

2 – Corrélation fonctionnelle

Christopher A. Brown

Professor of Mechanical Engineering

Worcester Polytechnic Institute

Détermination de corrélations entre l'analyse multi-échelle et la fonction ou les performances d'une pièce.

Objectifs

Définir des corrélations fonctionnelles par des moyens conventionnels et en fonction de l'échelle

- **Montrer les approches traditionnelles**
 - Sans réelle corrélations
 - Discuter de l'approche de Whitehouse (1997)
- **Discuter les conditions d'un réelle corrélation fonctionnelle**
 - Deux types de corrélations
 - Selon les relations étudiées
- **Montrer un exemple ancien**
 - Fuller et Tabor 1975
- **Décrire une procédure claire permettant d'obtenir des corrélations et une discrimination en fonction de l'échelle**

Recherche en métrologie des surfaces

- Tests de corrélation

- Régressions

- Tests de discrimination

- F-test, T-test

- Instrumentation

- Analyses

- Caractérisation

Traités
aujourd'hui

```
graph LR; A[Traités aujourd'hui] --> B[Tests de corrélation]; A --> C[Tests de discrimination];
```

Quelles problématiques centrales en métrologie des surfaces ?

- Ingénierie

- Conception de produits
- Procédés
- Contrôle/Assurance qualité

- Science

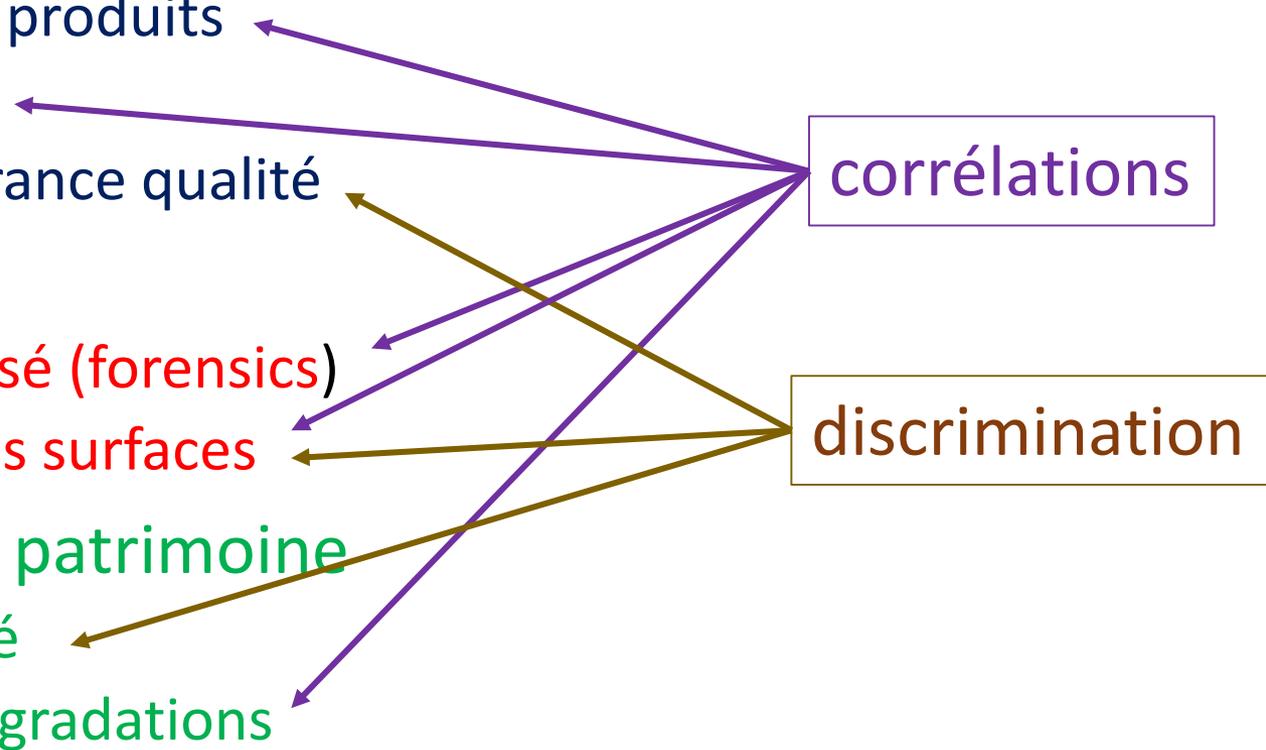
- Dévoiler le passé (forensics)
- Comprendre les surfaces

- Préservation du patrimoine

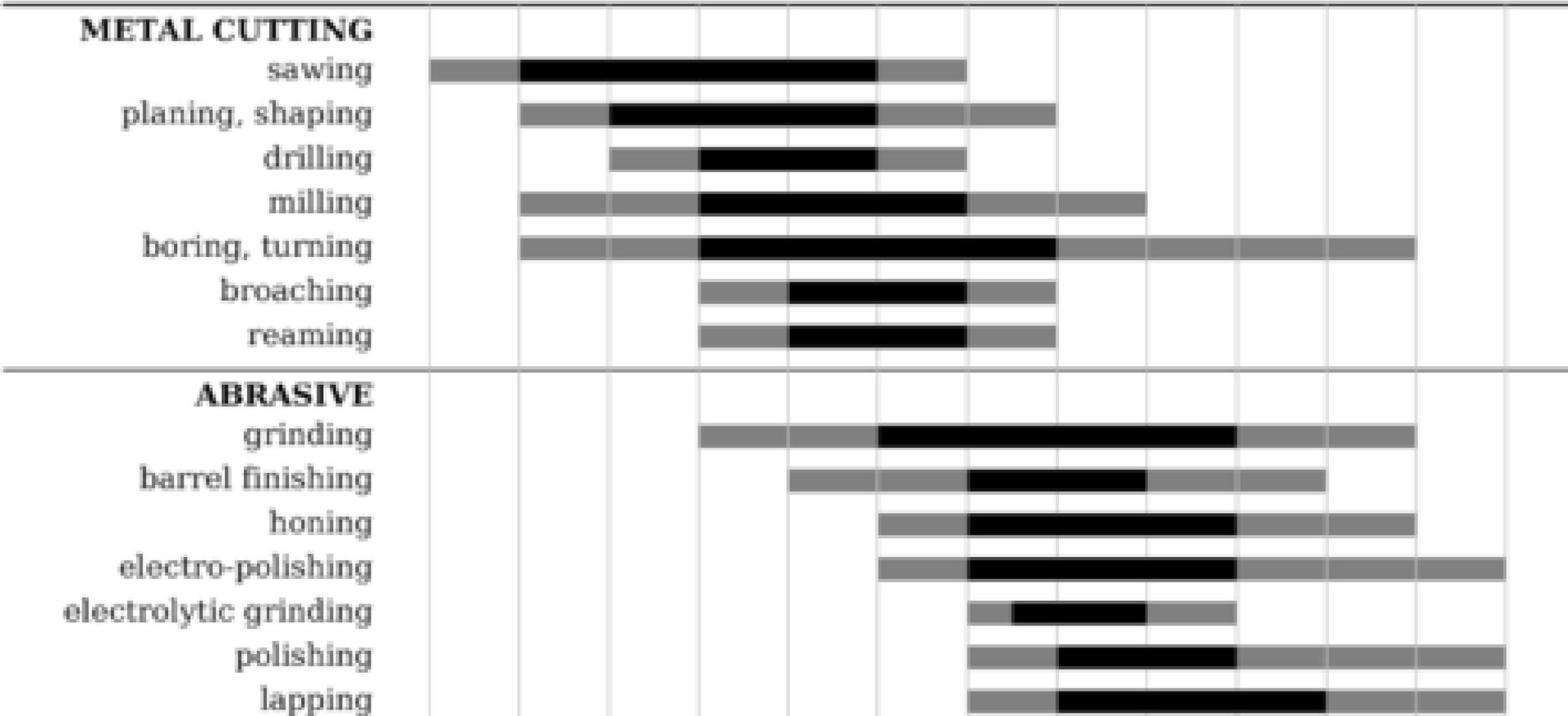
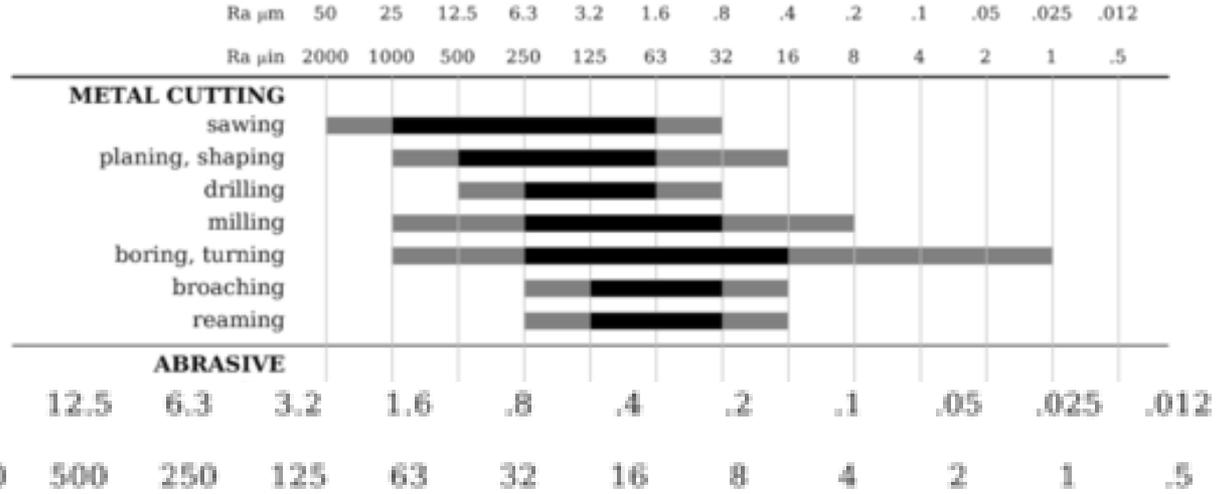
- Traces du passé
- Prévenir les dégradations

corrélations

discrimination



Rugosités typiques en fabrication



« Corrélation fonctionnelles » habituelles

2684

B. J. Griffiths et al.
1994 INT J PROD RES

| Typical parameters: | Heights R_a, R_q, R_t | Distribution and shape R_{sk}, R_{ka}, BAC | Slopes and curvatures Δ_a, Δ_q peak curvature | Lengths and peak spacing λ_a, λ_q, Pc correlation length | Lay and lead |
|------------------------|----------------------------|---|---|--|--------------|
| Function | | | | | |
| Bearings | ■ | ■ | □ | □ | ■ |
| Seals | ■ | ■ | ■ | □ | ■ |
| Friction | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Joint stiffness | ■ | ■ | □ | □ | □ |
| Sideways | ■ | ■ | □ | ■ | ■ |
| Elect/thermal contacts | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Wear | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Galling | ■ | □ | ■ | ○ | □ |
| Bonding and adhesion | ■ | ■ | □ | ○ | □ |
| Painting and plating | ■ | □ | □ | □ | □ |
| Forming and drawing | ■ | □ | □ | ■ | □ |
| Fatigue | ■ | □ | ○ | | ■ |
| Stress and fracture | ■ | ○ | □ | | ■ |
| Reflectivity | ■ | ○ | ■ | □ | |
| Hygiene | ■ | □ | □ | | |

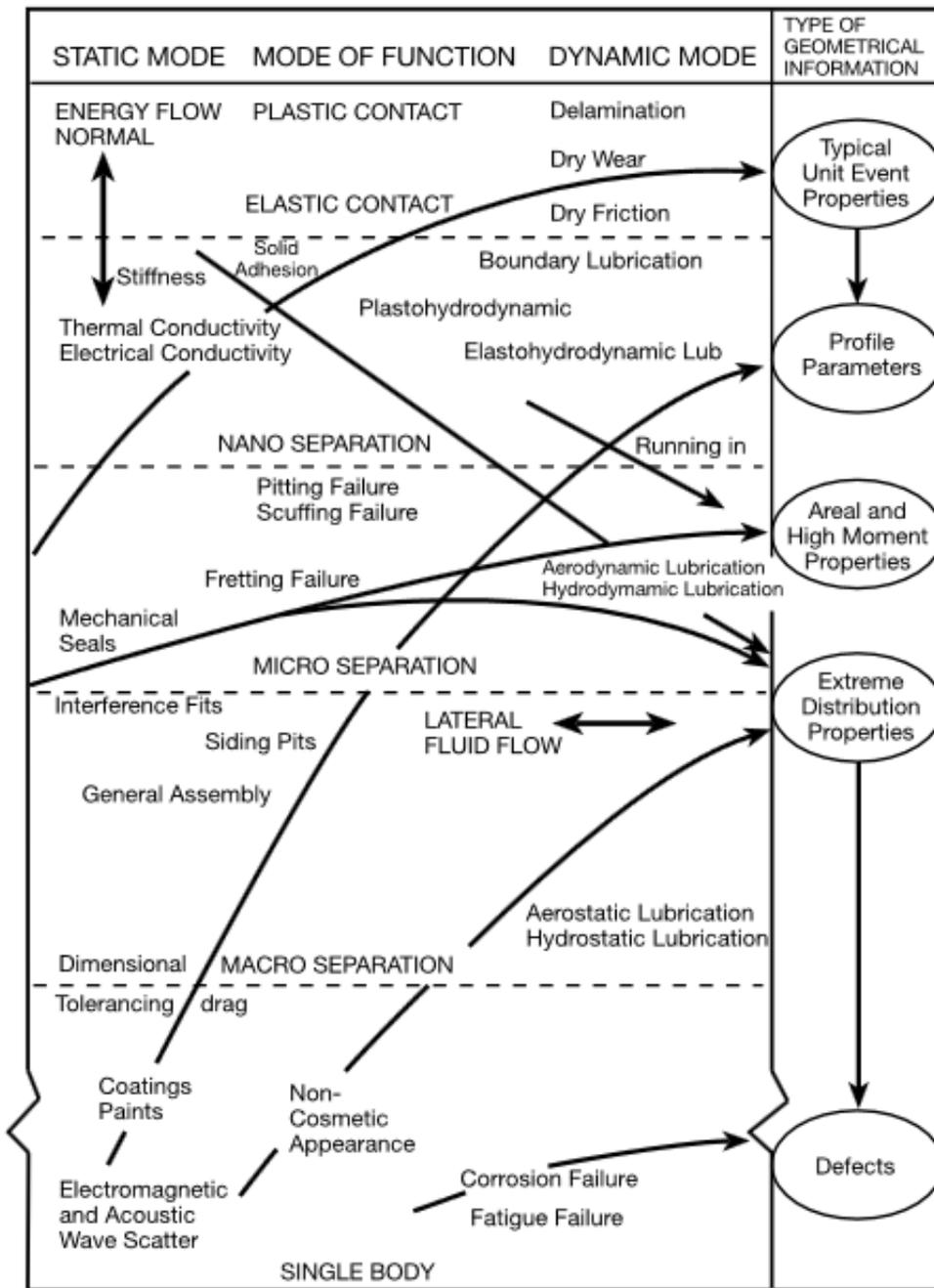
« La Table 1 montre que tous les groupes de paramètres influencent les performances des produits d'une manière ou d'une autre, et que l'évaluation de l'état de surface revêt une grande importance. »

Table 1. Relationship between surface parameters and surface function. ■, Much evidence; □, some evidence; and ○, little or circumstantial evidence.

- *Il y a peu de « preuves » statistiques dans la littérature*
- *Cela ne prouve pas qu'il y ait un corrélation statistique.*

| Typical parameters: | Heights R_a, R_q, R_t | Distribution and shape R_{sk}, R_{ka}, BAC | Slopes and curvatures Δ_a, Δ_q peak curvature | Lengths and peak spacing λ_a, λ_q, Pc correlation length | Lay and lead |
|------------------------|----------------------------|---|---|--|--------------|
| Function | | | | | |
| Bearings | ■ | ■ | □ | □ | ■ |
| Seals | ■ | ■ | ■ | □ | ■ |
| Friction | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Joint stiffness | ■ | ■ | □ | □ | □ |
| Sideways | ■ | ■ | □ | ■ | ■ |
| Elect/thermal contacts | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| Wear | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Galling | ■ | □ | ■ | ○ | |
| Bonding and adhesion | ■ | ■ | □ | ○ | □ |
| Painting and plating | ■ | □ | □ | □ | |
| Forming and drawing | ■ | □ | □ | ■ | □ |
| Fatigue | ■ | □ | ○ | | ■ |
| Stress and fracture | ■ | ○ | □ | | ■ |
| Reflectivity | ■ | ○ | ■ | □ | |
| Hygiene | ■ | □ | □ | | |

Table 1. Relationship between surface parameters and surface function. ■, Much evidence; □, some evidence; and ○, little or circumstantial evidence.



Vitesse croissante →

(dépend de l'échelle) →
Séparation croissante

Carte fonctionnelle de David Whitehouse
« séparation » en fonction du mode

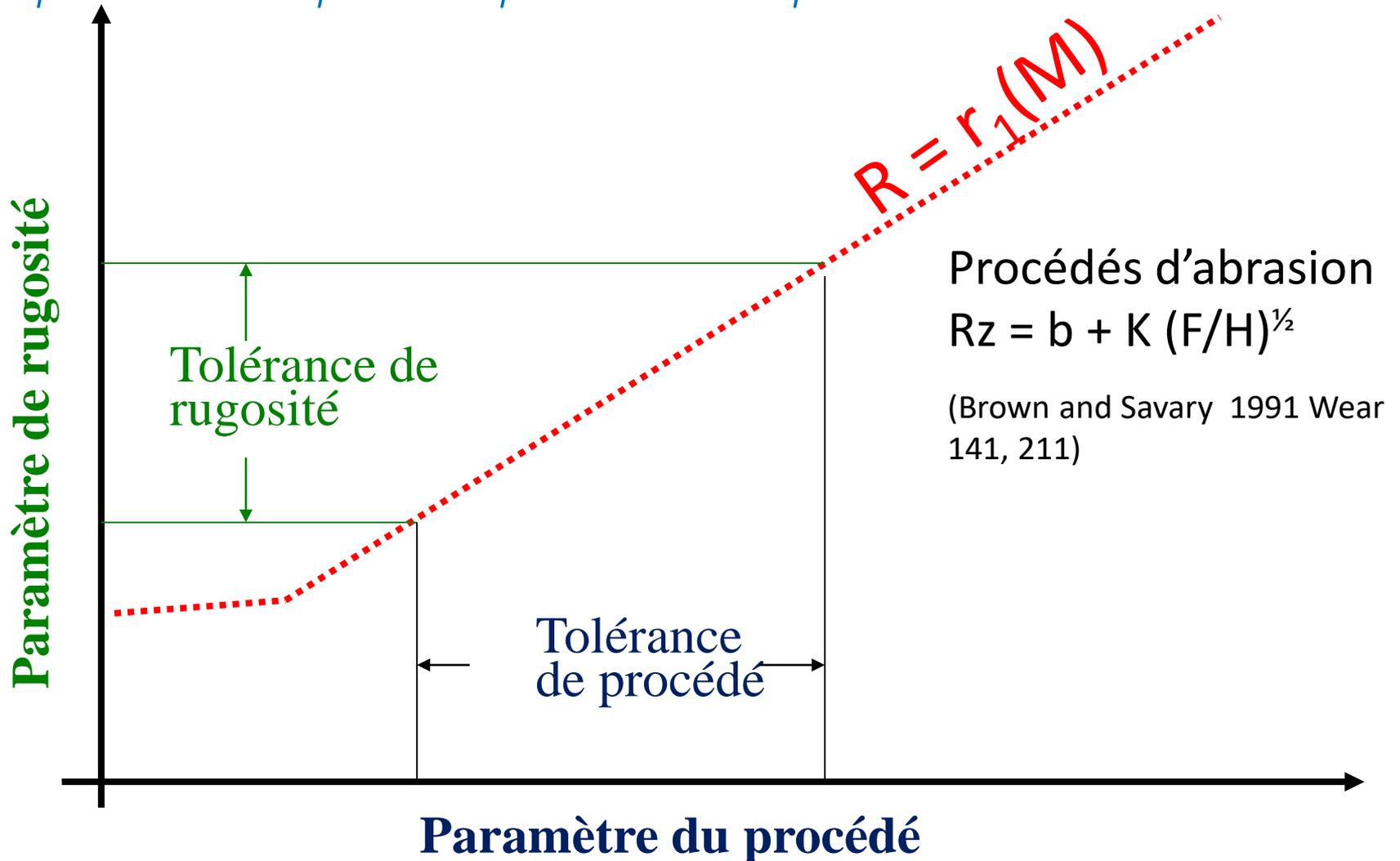
D J Whitehouse (1997) Surface metrology, Meas. Sci. Technol. 8, 955

Figure 6. Surface geometry and function.

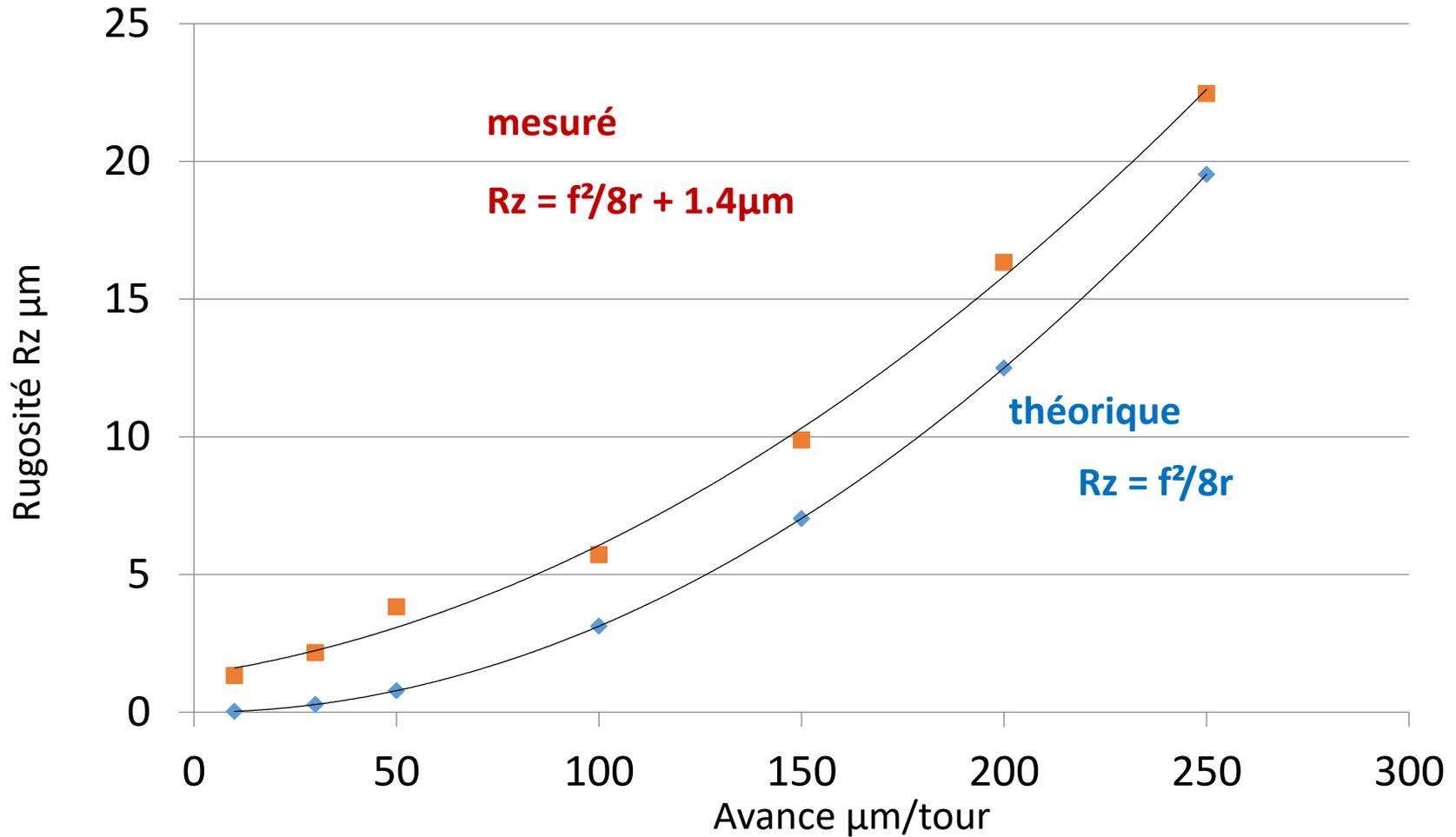
1^{er} type de corrélation fonctionnelle

Texture v Procédé

pour la conception de produit ou de procédé



Exemple de corrélation du 1er type (procédé-texture)



Relation « Texture-procédé » pour une fabrication par tournage, réalisée au WPI sur une machine Haas SL10, avec un outil de 0,4 mm avec insert Kennametal. Non publié 2013. Utilisé en ME1800 au WPI.

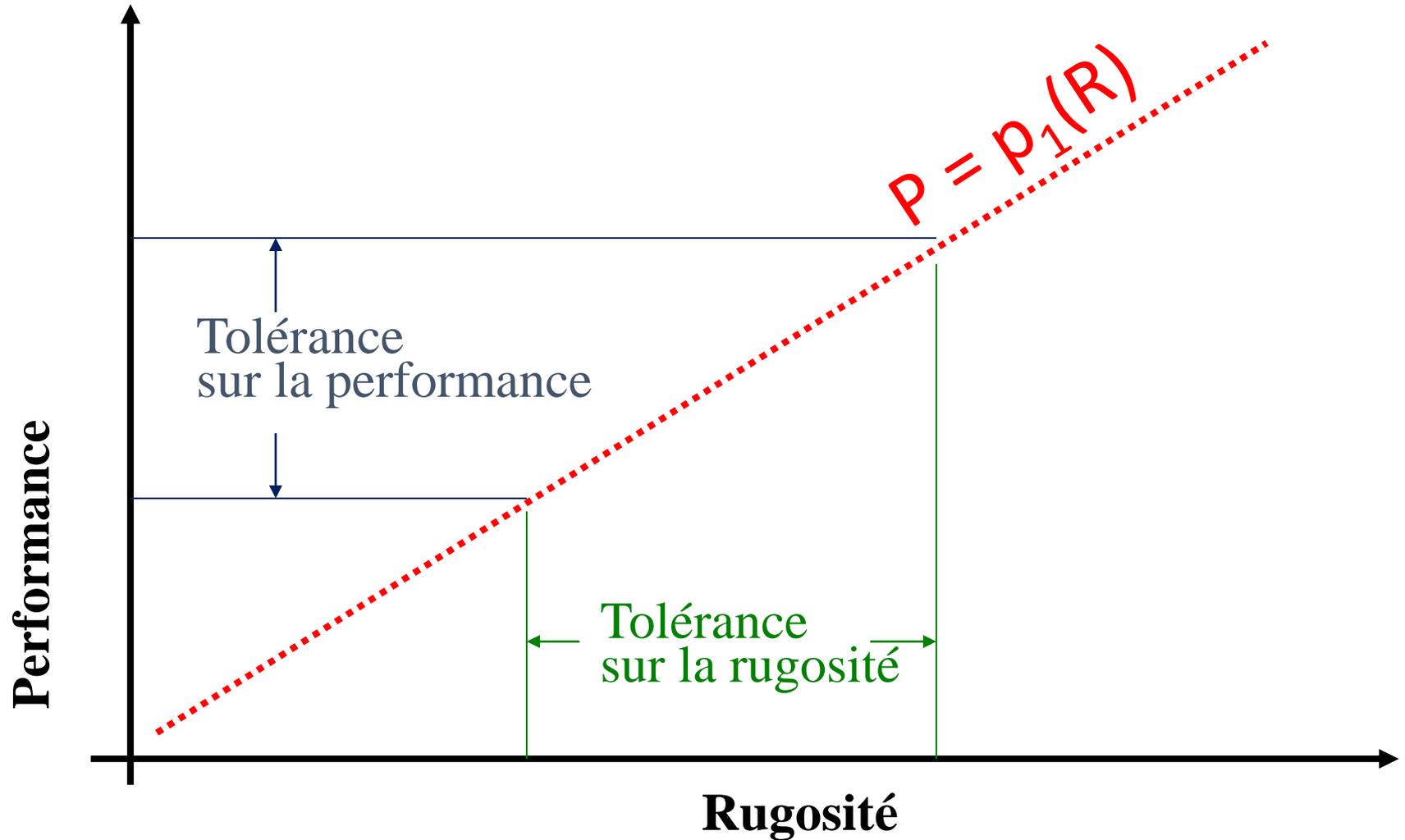
Procédés qui influencent la topographie de surface

- Usinage
- Fraisage
- Polissage
- Pierrage
- Laminage
- Forgeage
- Finition
- Cémentation
- Sablage
- Traitement thermique
- Grenailage
- Brunissage
- Gravure chimique
- Usure
- Extrusion
- Emboutissage
- Finition par brossage
- Traitement de surface

Corrélation fonctionnelle du 1^{er} type

Performance v Texture

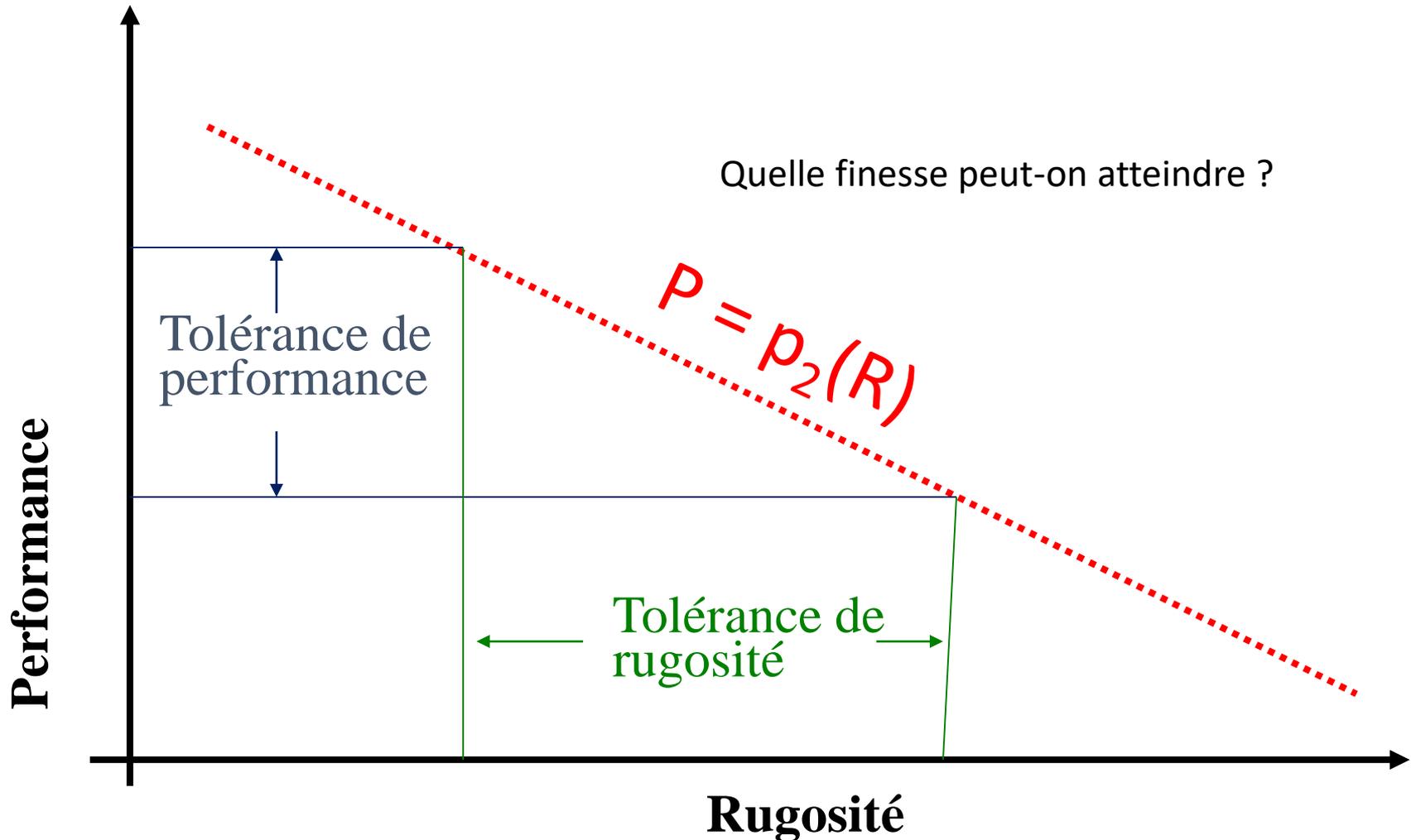
pour la conception de produit



Corrélation fonctionnelle du 2^{ème} type

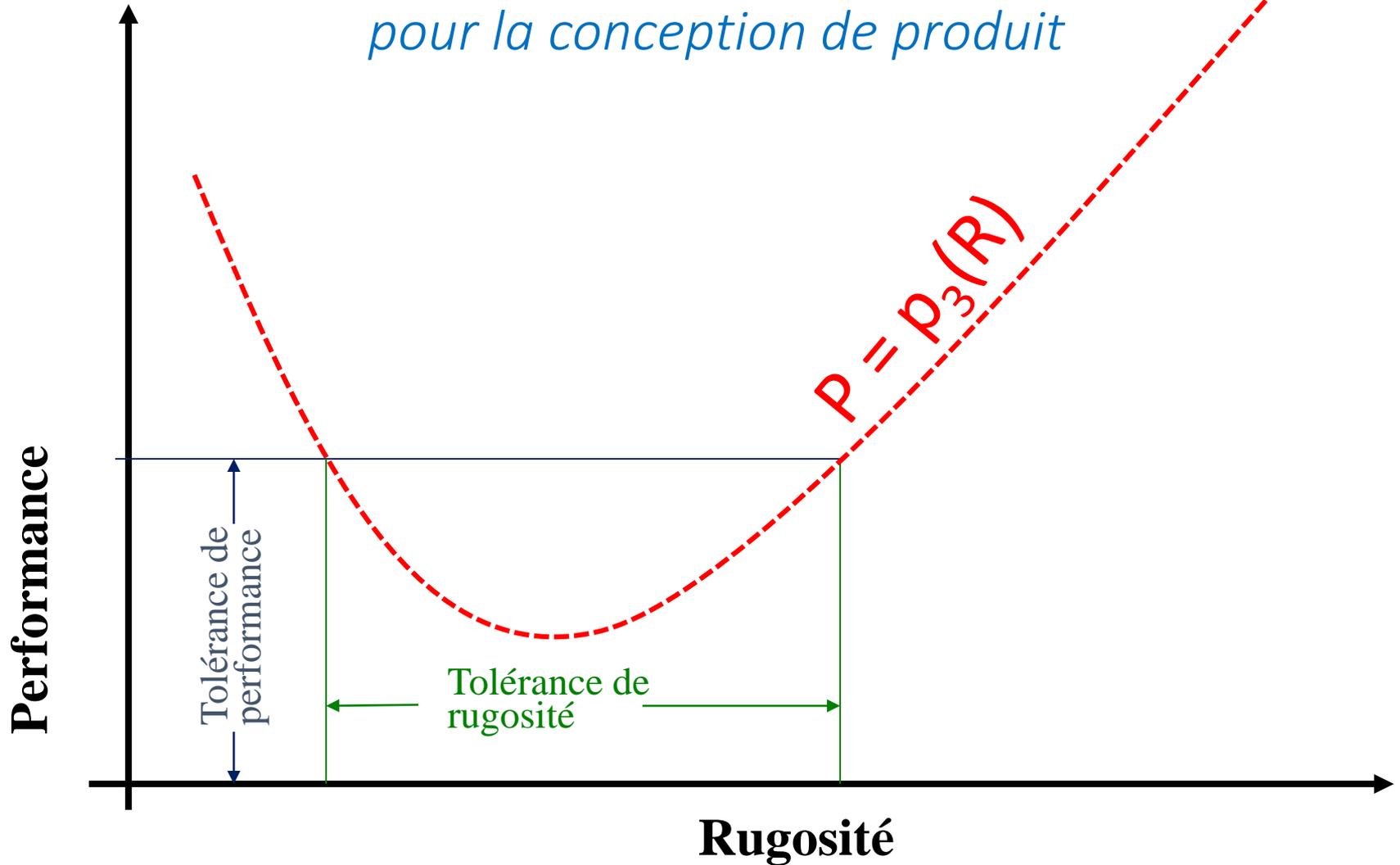
Performance - texture

pour la conception de produit



Corrélation fonctionnelle du 2^{ème} type

Performance - texture
pour la conception de produit



La texture Influence les performances

- Diffusion de la lumière
 - Apparence
 - Transfert d'énergie
- Échanges thermiques
- Transfert de masse
 - Diffusion
 - Dissolution, sublimation
 - Absorption, désorption
- Résistance à l'écoulement
- Nucléation
 - Évaporation
 - Condensation
 - Cristallisation
- Allumage (inflammabilité)
- Friction
- Usure
 - Traces d'outils
 - Analyse
- Transferts en usinage
 - Limaille, débris
 - Lubrification, refroidissement
- Stress concentration
 - Fracture
 - Fatigue
- Adhésion
 - Revêtements
 - Contaminations bactériennes
 - Assemblages
- Croissance biologique
 - Encrassement (Bio-fouling)
 - Ostéo-intégration
- Nettoyabilité
- Mouillabilité
- Conductivité
 - Soudage
 - Électronique
- Réactions chimiques
 - Corrosion
 - Catalyse
 - Électrolyse
 - Goût
- Joints
- Bio-compatibilité

Exemple de corrélation fonctionnelle du 2^{ème} type (Performance v Texture)

KNG Fuller and D Tabor 1975 The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids, Proc R. Soc. Lond. A.345, 327-342, <http://rspa.royalsocietypublishing.org/>

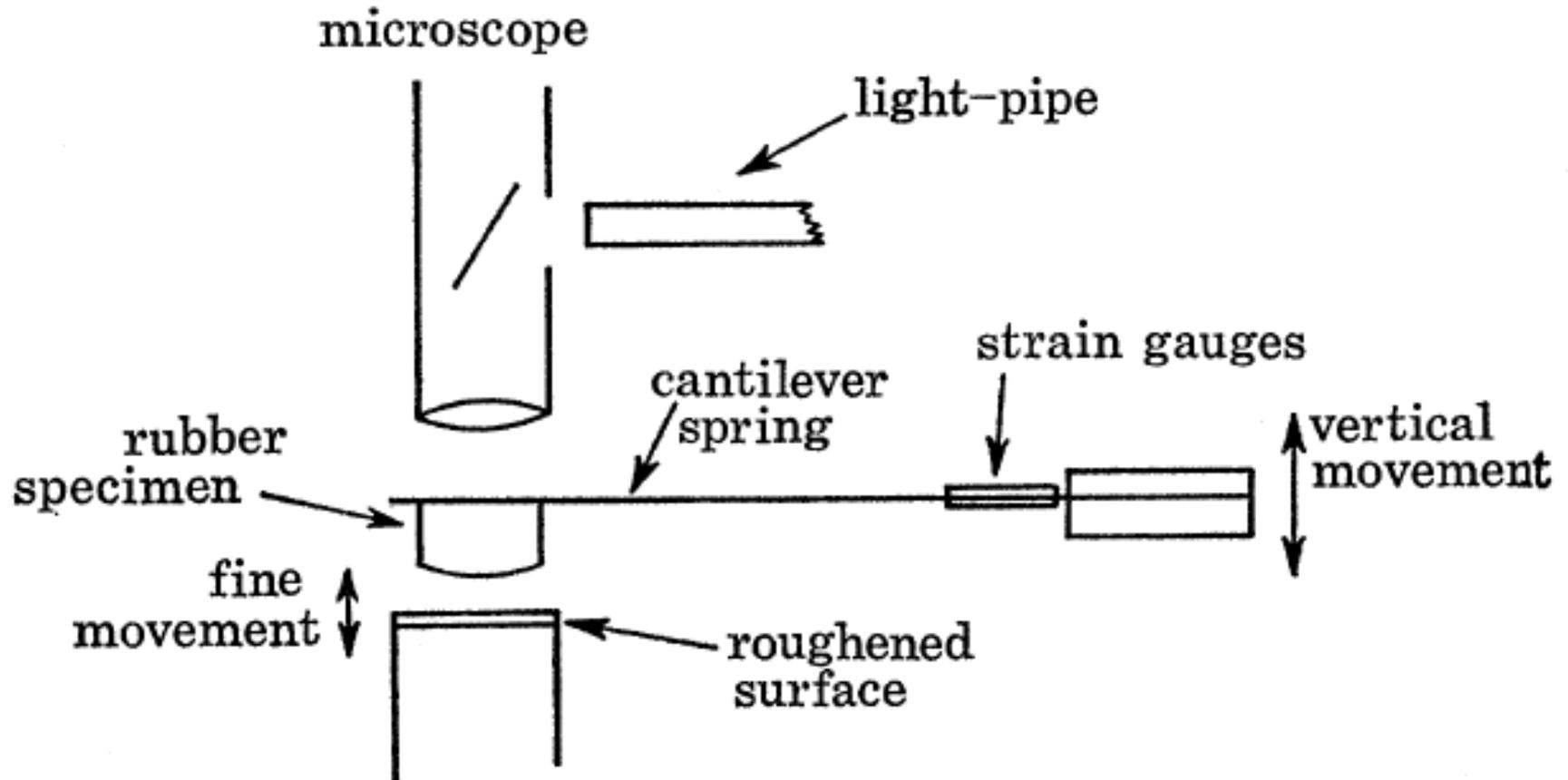


FIGURE 1. Schematic diagram of apparatus.

Exemple de corrélation fonctionnelle du 2^{ème} type (Performance v Texture)

KNG Fuller and D Tabor 1975

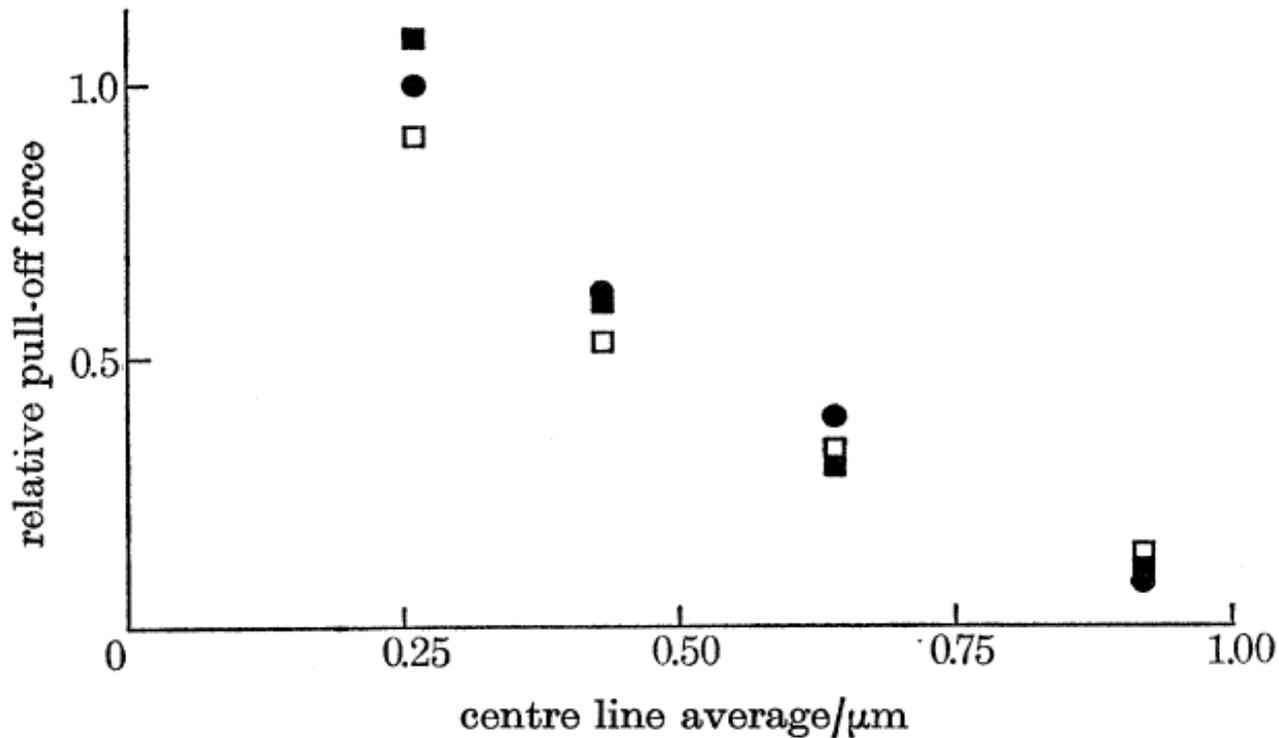


FIGURE 2. Relative pull-off force for smooth rubber spheres in contact with a flat Perspex surface as a function of the roughness (c.l.a.) of the Perspex. Effect of radius of curvature, R , of the rubber spheres. ■, $R = 53$ mm; □, $R = 19$ mm; ●, $R = 7.3$ mm.

Exemple de corrélation fonctionnelle du 2^{ème} type (Performance v Texture)

KNG Fuller and D Tabor 1975

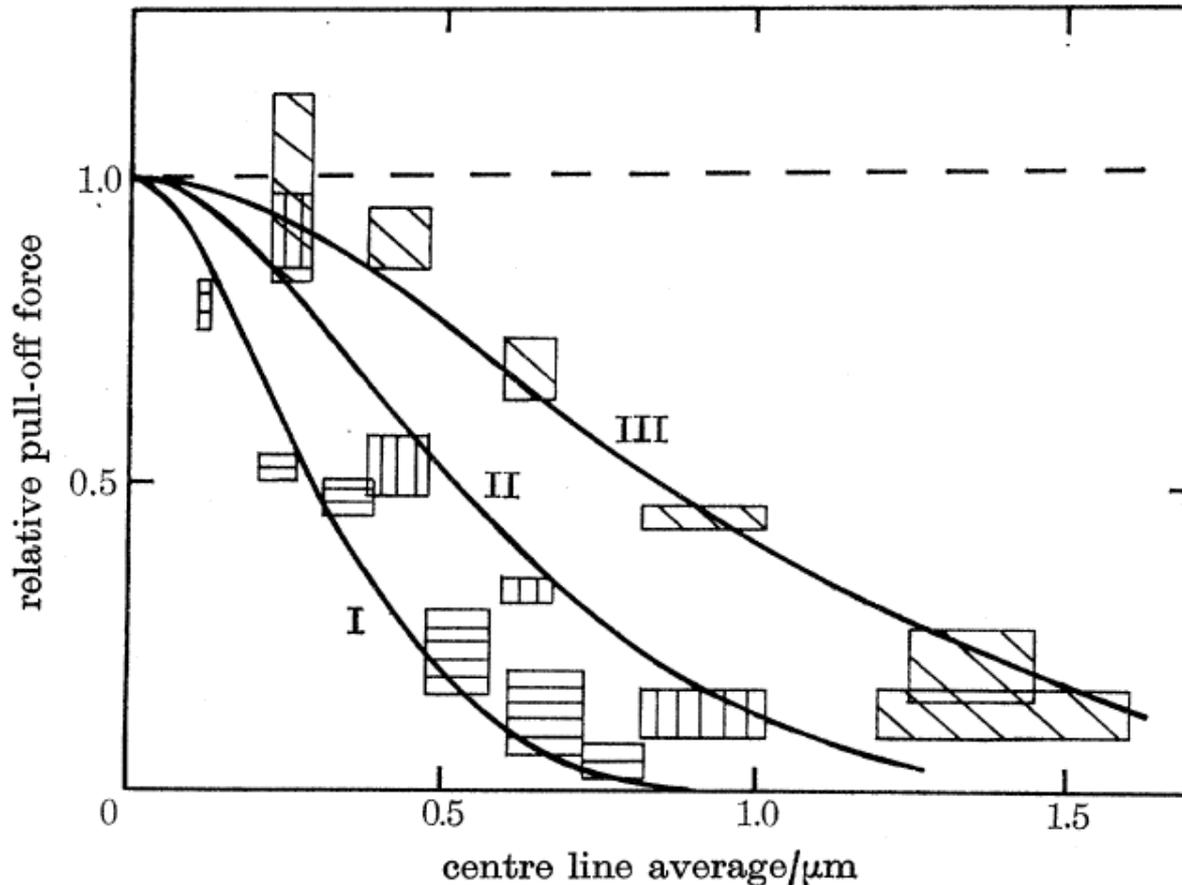
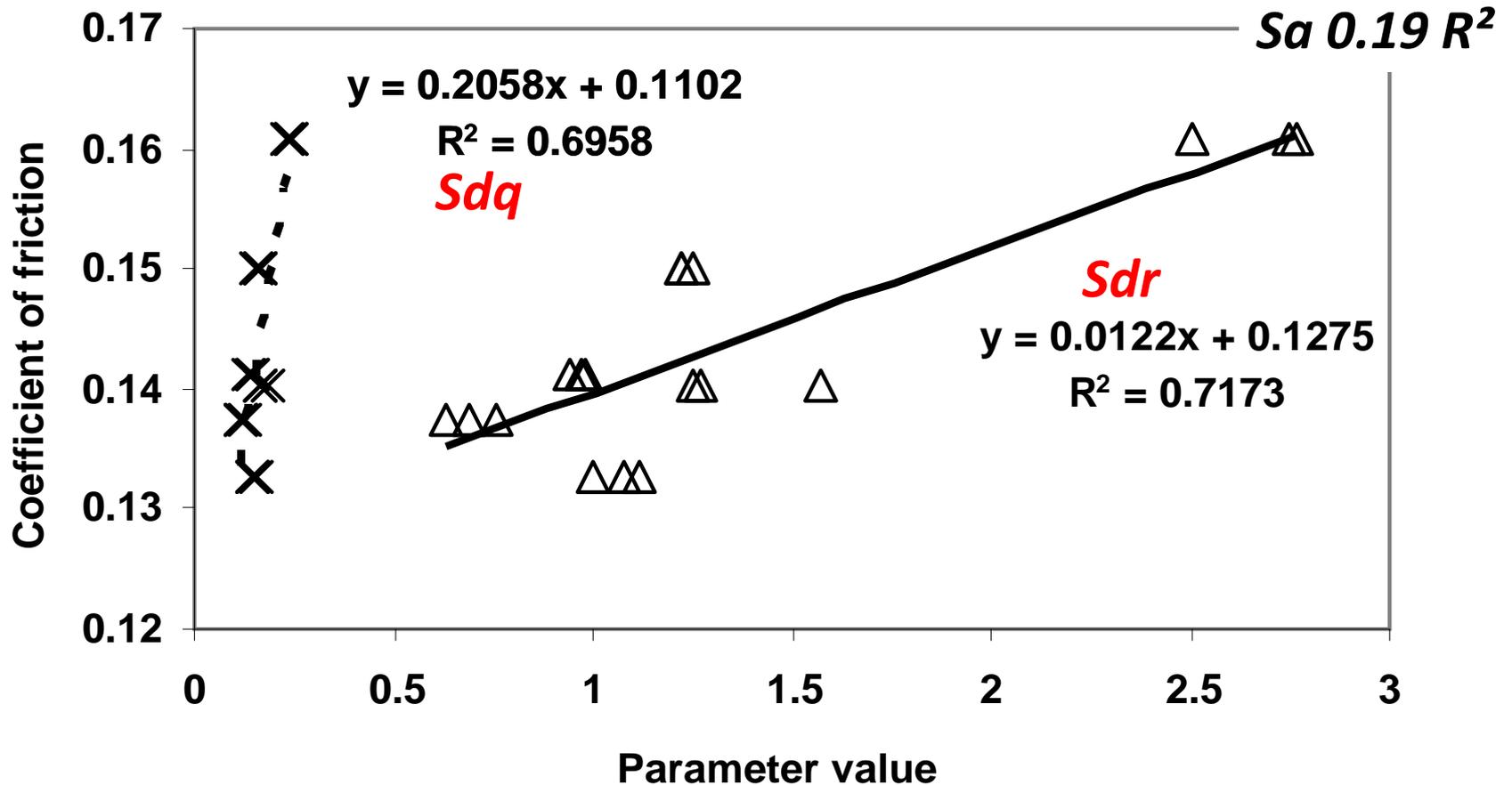


FIGURE 3. Relative pull-off force for smooth rubber spheres in contact with a flat Perspex surface as a function of the roughness (c.l.a.) of the Perspex. Effects of modulus, E , of the rubber: curve I, $2.4 \times 10^6 \text{ N m}^{-2}$; curve II, $6.8 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$; curve III, $2.2 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$.

Friction



Sa est plus sensible aux grandes échelles où les amplitudes sont plus élevées
Sdr et Sdq caractérisent les pentes et les aires locales aux échelles proches du pas d'échantillonnage

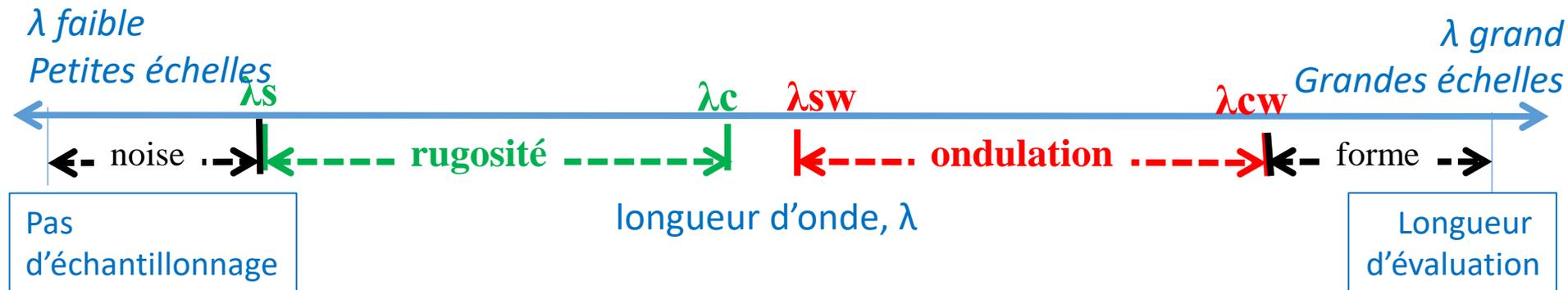
Remarques

- Le concept de corrélation fonctionnelle a été démontré et illustré.
- On ne trouve aujourd'hui que très peu de ces corrélations dans la littérature
 - Malgré le grand nombre de cas où la topographie est réputée influencer les performances
- Et souvent ces corrélations utilisent un filtrage conventionnel qui traite de larges bandes de fréquences ou de longueurs d'onde

Filtrage des échelles ASME B46.1 2002 (& ISO 16610)

- λ_c (cut-off du Filtre L) – Limite supérieure de la rugosité
 - Coupe les longueurs d'onde supérieures
- λ_s (cut-off du Filtre S) – Limite inférieure de la rugosité
 - Coupe le bruit et les longueurs d'onde inférieures
- λ_{cw} – (cut-off de l'Opérateur F) – Limite supérieure de l'ondulation
 - Limite inférieure de la forme – coupe les longueurs d'onde supérieures
- λ_{sw} – (cut-off du Filtre S) – Limite inférieure de l'ondulation
 - Coupe les longueurs d'onde inférieures

note : en général $\lambda_c = \lambda_{sw}$



*fréquence spatiale = $1/\lambda$,
l'inverse de la longueur d'onde*

Hypothèses

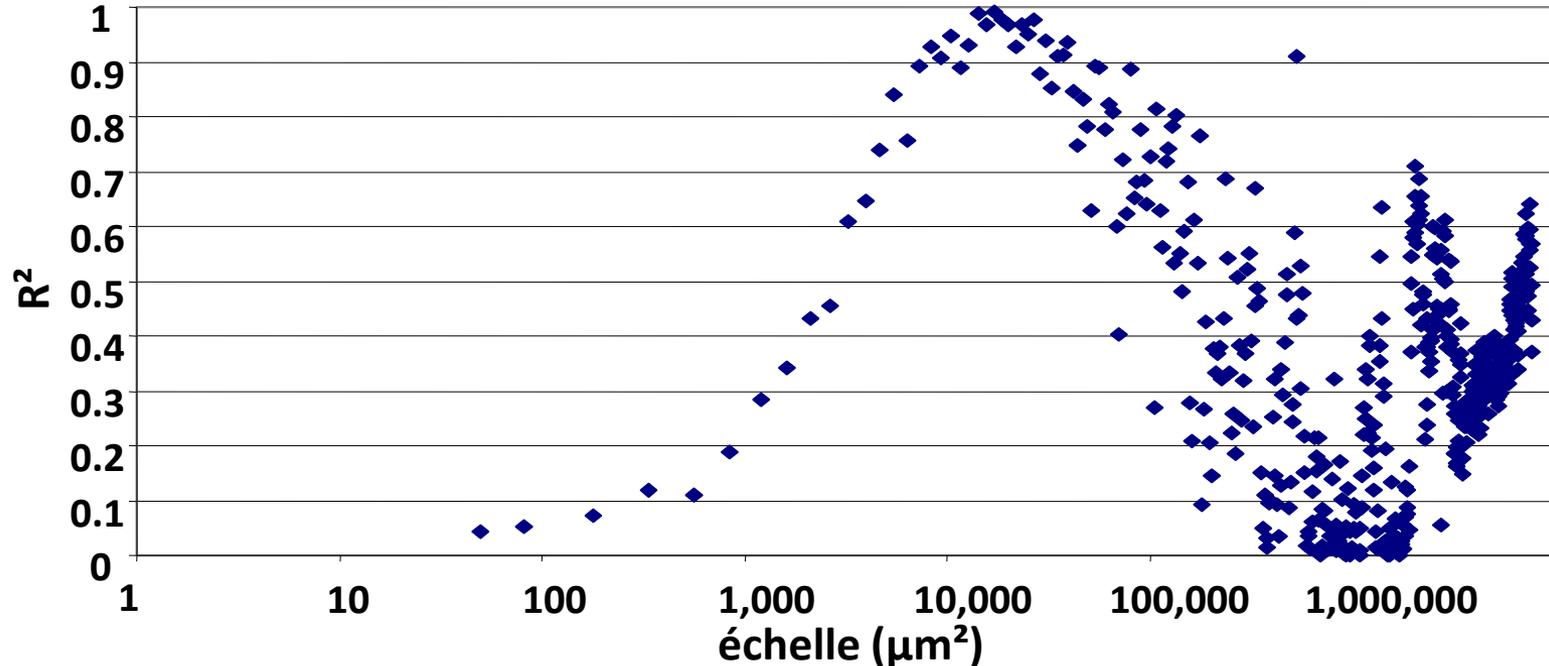
- Si il existe une échelle fondamentale d'interaction
 - Alors l'intensité de la corrélation entre les propriétés géométriques de la surface et cette interaction devrait montrer un maximum à l'échelle fondamentale d'interaction
 - Les échelles inférieures ou supérieures auront tendance à sous-estimer ou surestimer la force d'interaction et donc à donner une corrélation inférieure qu'à l'échelle fondamentale

Comment sélectionner la fréquence spatiale, c-à-d, la longueur d'onde ou l'échelle qui donnera la corrélation la plus élevée ?



Tester toutes les échelles et laisser les statistiques faire le tri

1. Caractérisation multi-échelle (ex: relative area)
2. Tests statistiques multi-échelle (ex: régression linéaire sur la performance ou le paramètre de fabrication)
3. Tracer le coefficient R^2 en fonction de l'échelle



Analyse de la régression multi-échelle pour déterminer l'échelle de corrélation

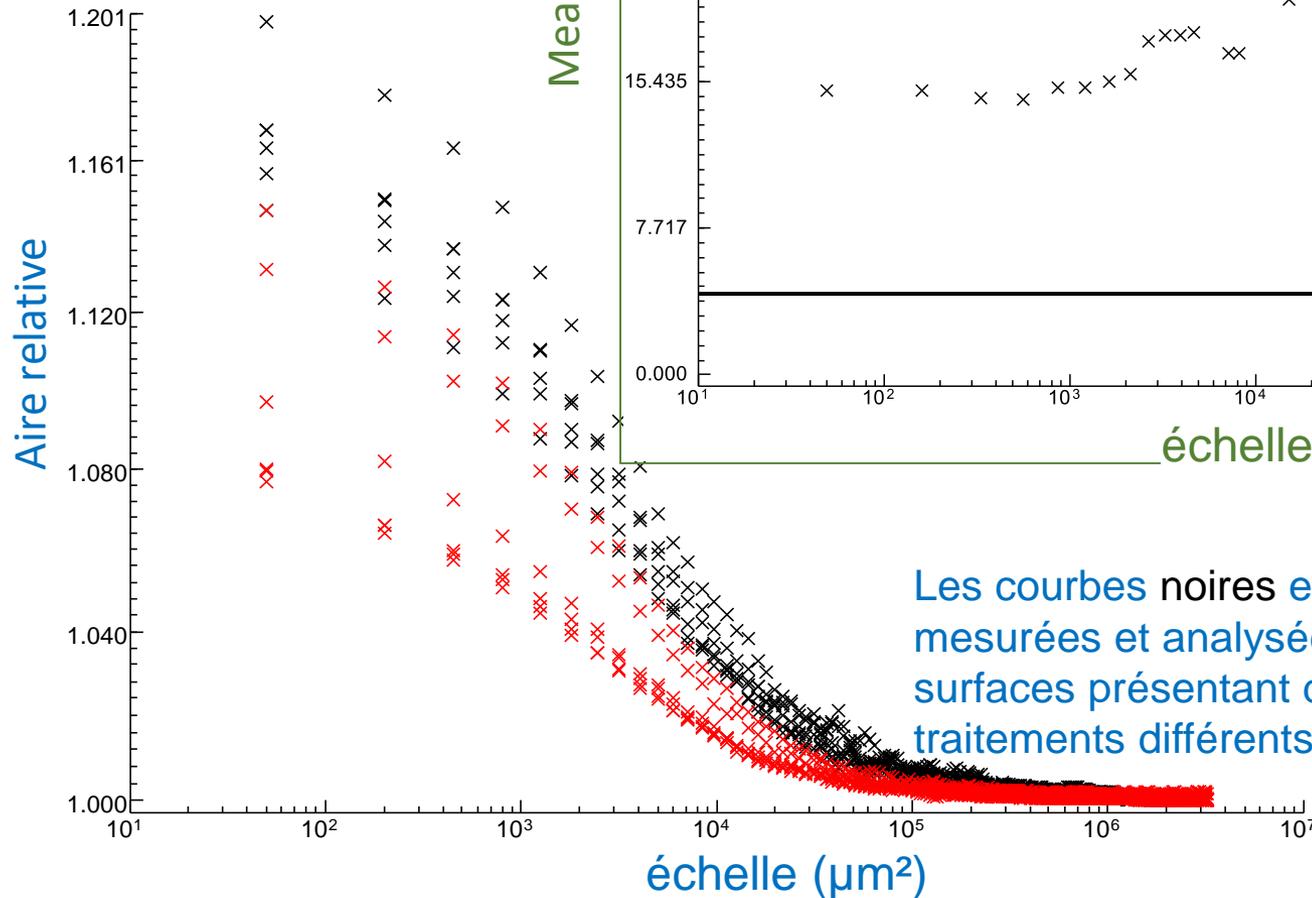
1. Analyse multi-échelle des mesures de surface
(ex : analyse « area-scale »)
 - Résultat : graphe multi-échelle
(ex : aire relative en fonction de l'échelle)
2. A chaque échelle, effectuer une régression entre le paramètre calculé (ex: aire relative) et le critère de performance ou le paramètre du procédé
(ex : force d'adhésion)
 - Résultat : coefficient de régression (R ou R^2) par échelle
3. Tracer les valeurs de R^2 en fonction de l'échelle
 - Résultat : évalue la force de corrélation permettant de déterminer ***les meilleures échelles pour spécifier et vérifier une caractéristique du produit ou du procédé***

Tests statistiques pour découvrir les échelles de *discrimination*

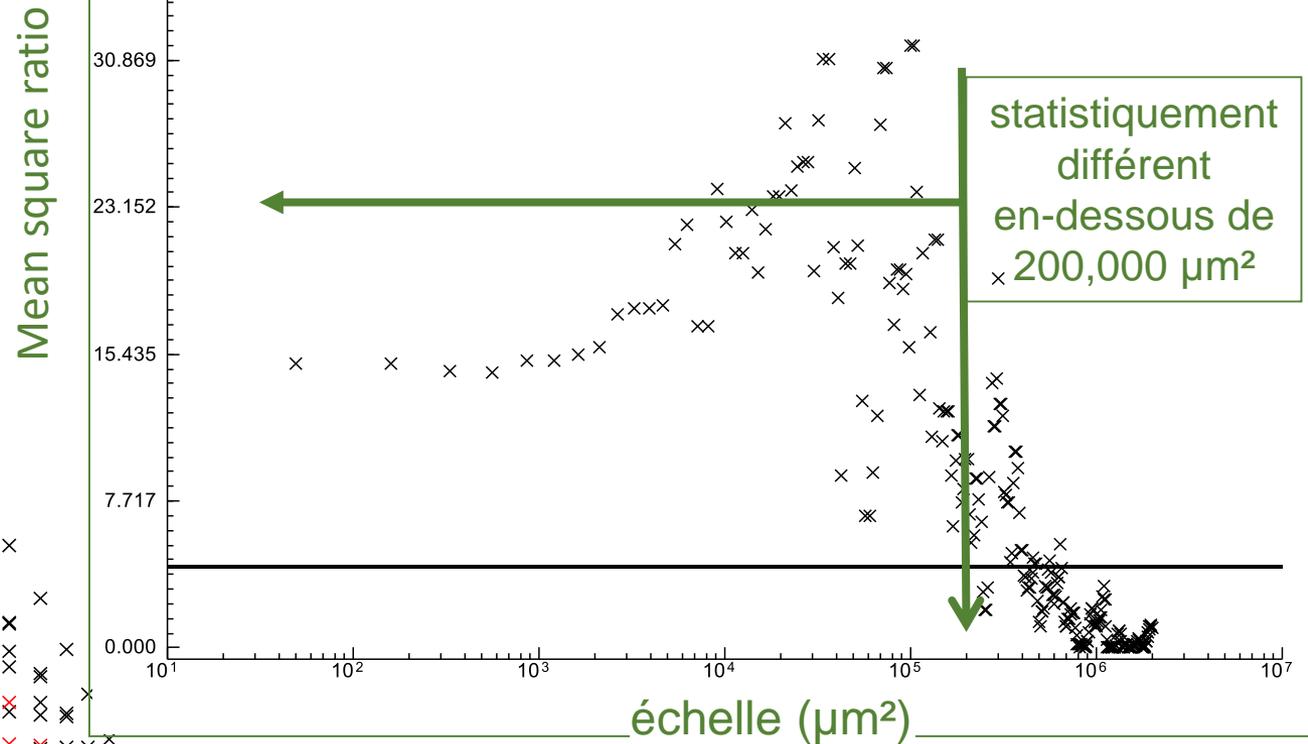
1. Analyser en multi-échelle plusieurs mesures de deux types de surfaces (ex : analyse « area-scale »)
 - Résultat : deux graphes multi-échelle (ex : aire relative en fonction de l'échelle)
2. *A chaque échelle, effectuer un test statistique de discrimination* (ex : F-test) du paramètre topographique (ex : aire relative) entre les deux surfaces
 - Résultat : un indice de discrimination (ex : MSR) par échelle
3. Tracer le graphe des valeurs de MSR en fonction de l'échelle
 - Résultat : courbe de l'indice de confiance de la discrimination permettant de déterminer *l'intervalle d'échelles pour discriminer des surfaces, pour l'assurance qualité et l'expertise de surfaces*

Test de discrimination

Caractérisation multi-échelle



F-test en fonction de l'échelle à 95% de confiance



Les courbes noires et rouge sont mesurées et analysées sur des surfaces présentant deux traitements différents

**Merci
de votre
attention**

