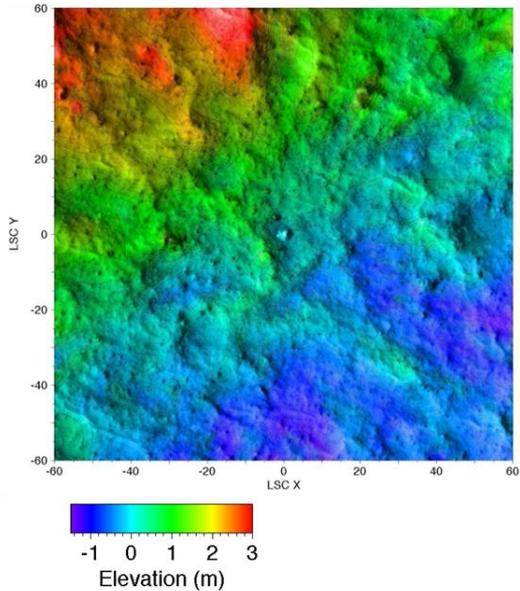
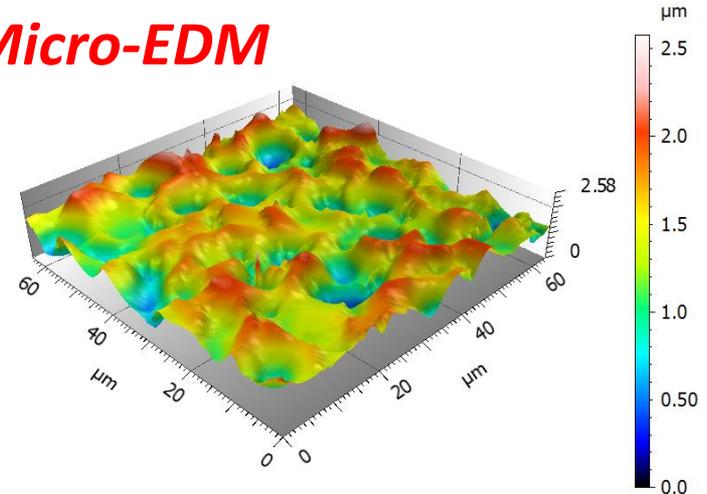


# 1 — Analyse géométrique en fonction de l'échelle



**Mars**

**Micro-EDM**



Christopher A. Brown

Professor of Mechanical Engineering

Worcester Polytechnic Institute

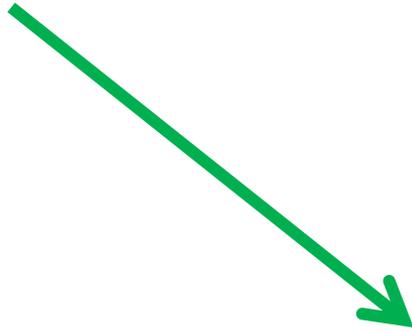
9h30-10h30

*Notions d'échelle d'observation et d'échelle d'interaction d'un phénomène avec la surface.  
Complexité d'une surface.*

*Caractérisation "length-scale", "area-scale", "volume-scale" avec le logiciel Sfrax.*

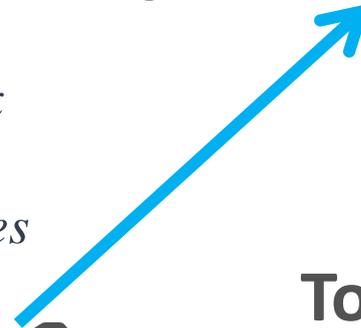
Qu'est-ce que la *Métrologie des surfaces* ?

**fabrication**

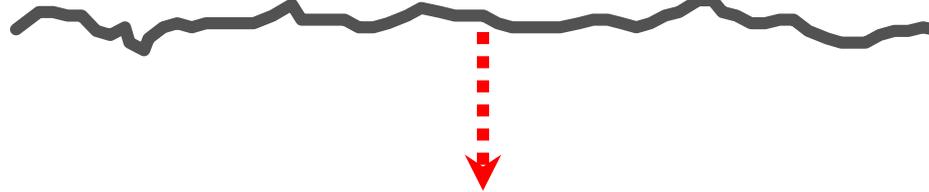


*Géométrie  
irrégulière  
et complexe aux  
échelles  
suffisamment fines*

**performance**



**Topographie  
(texture)**



*Mesure, analyse et caractérisation  
de la topographie de surface*

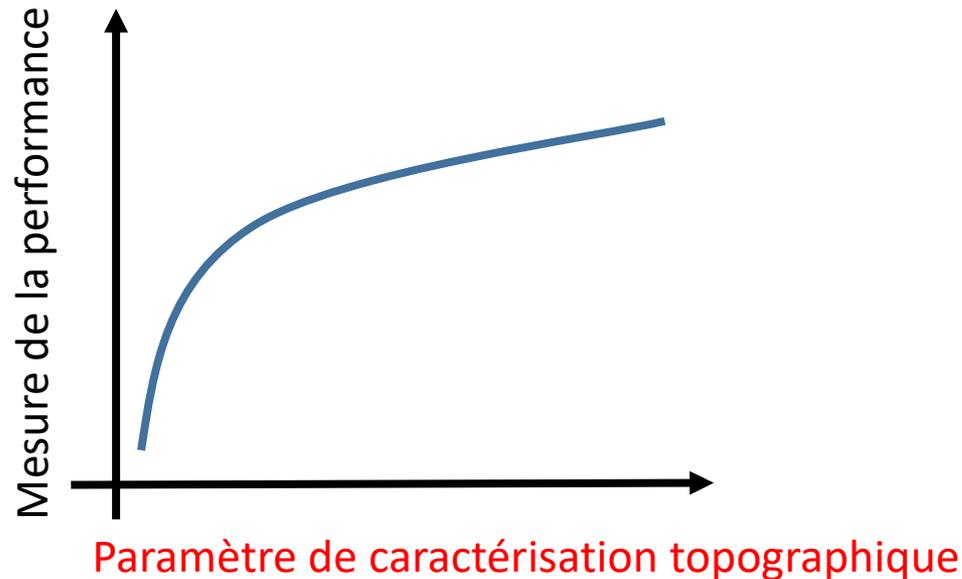
Pour comprendre les relations entre fabrication et performance

# Pourquoi la métrologie des surfaces est importante ?

## La topographie de la surface influence les performances

- Conception de produits
  - spécifier des surfaces avec les propriétés désirées
    - apparence, adhésion, échange thermique, friction, mouillabilité, fatigue, adsorption, absorption, séchage, réflectivité, diffusion

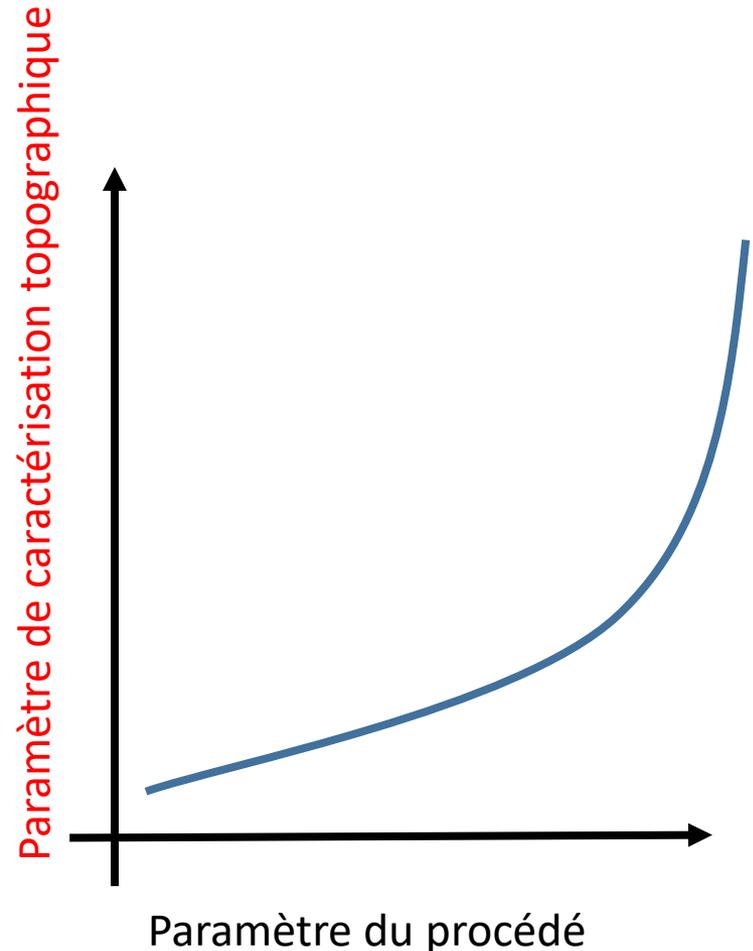
## Combien de corrélations fonctionnelles connaissons-nous ?



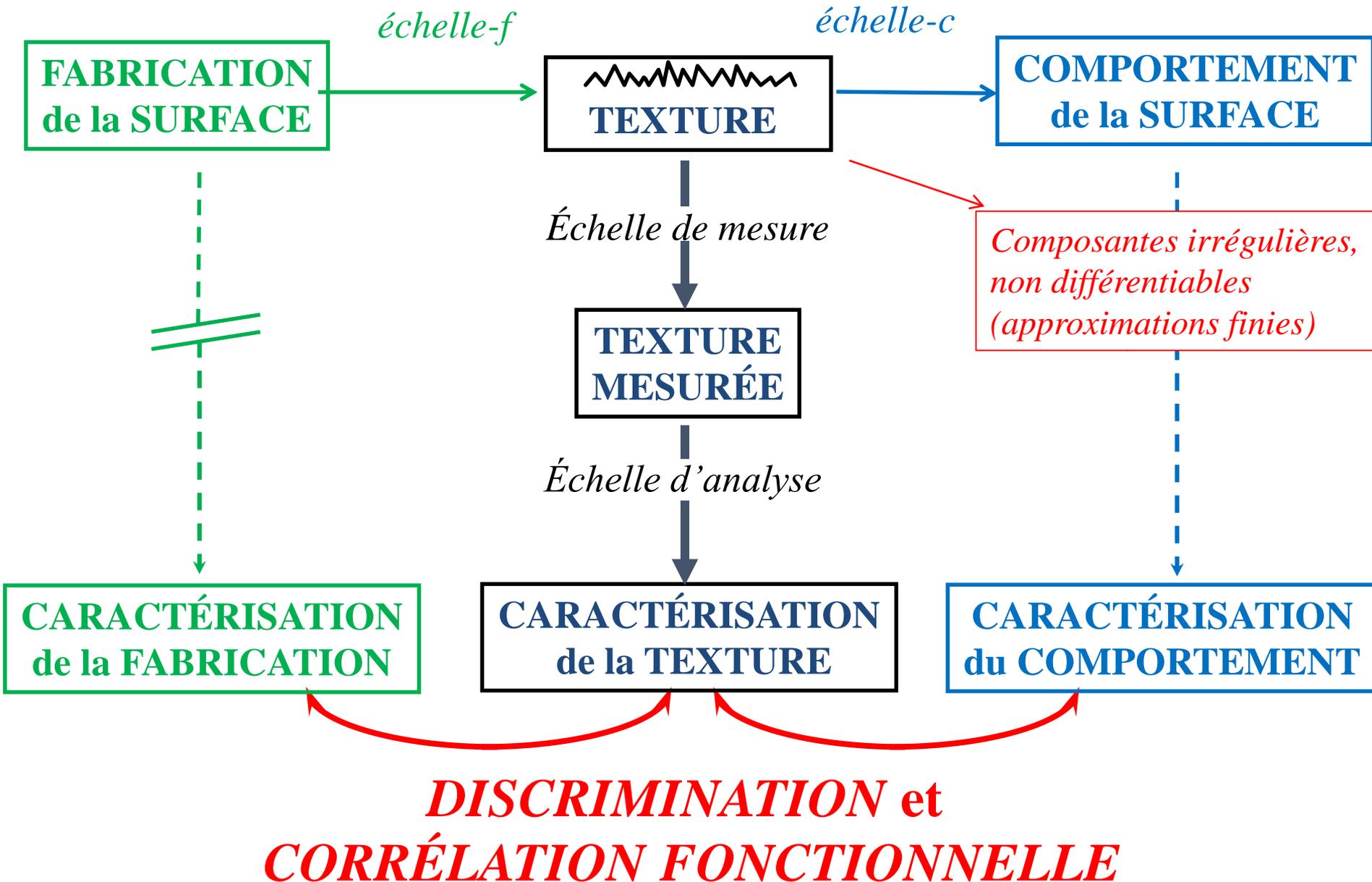
# La topographie des surfaces est influencée par leur fabrication

- Procédés de fabrication
  - obtenir des surfaces avec les propriétés désirées
- Anthropologie, archéologie, police scientifique
  - associer la topographie avec un phénomène
- Conservation culturelle
  - dégradation des surfaces
- Géographie et océanographie
  - érosion et sédimentation influencent la topographie
  - la topographie influence l'érosion, les éboulements et la sédimentation

Combien de corrélations fonctionnelles connaissons-nous ?

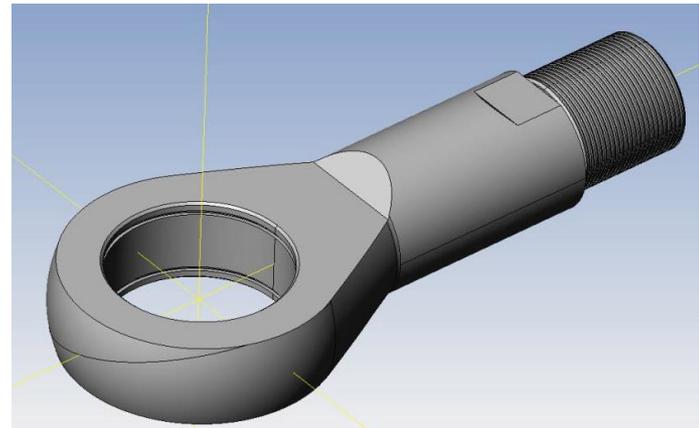


# Métrologie de surface et échelles



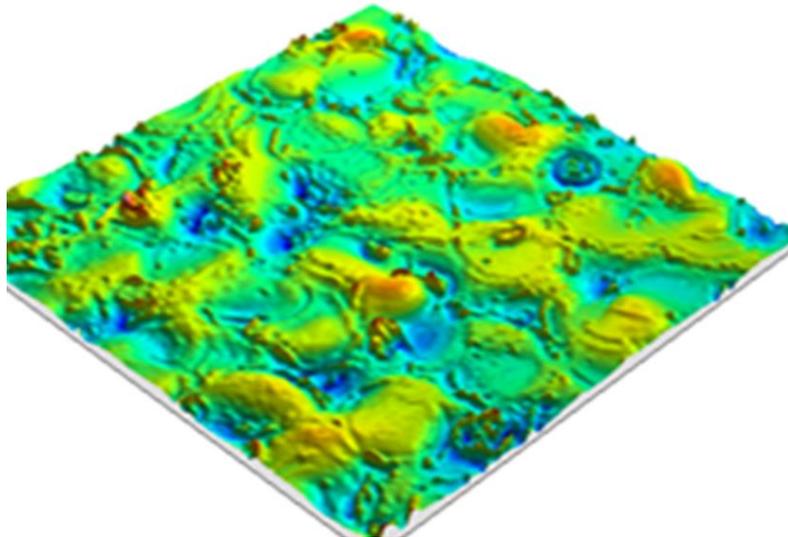
# Formes théoriques

- Les formes lisses peuvent être décrites facilement à l'aide d'équations algébriques.
- La mesure de quelques points sur la surface permet la prédiction de tous les autres points avec un degré de certitude élevé.



# La métrologie des surfaces traite de rugosité

- Les surfaces sont souvent irrégulières
  - spécialement aux échelles les plus fines
    - où se produisent les interactions qui contrôlent les phénomènes physiques qui influencent les performances de la surface
- La position des points d'une surface rugueuse
  - ne peut pas être décrite par des équations algébriques
    - car il y a une incertitude sur leur position
    - donc on utilise une description statistique



# Définitions – Rugosité

*Possibilités :*

1. fines échelles de la topographie
  2. déviations par rapport à une surface idéale
  3. topographie irrégulière
  4. ce qui reste après avoir retiré l'ondulation et la forme
  5. ce qu'on caractérise par une moyenne arithmétique
- une combinaison de ces propositions.

# La métrologie des surfaces est-elle une discipline expérimentale ou scientifique ?

- ***Les disciplines expérimentales***
  - acquièrent le savoir par l'expérience
  - définissent des normes et des bonnes pratiques
- ***Les disciplines scientifiques***
  - se basent sur des règles simples, des principes cohérents, des axiomes ou des lois
    - permettent la résolution d'un grand nombre de problèmes
      - ne peuvent pas être prouvées

*...les disciplines scientifiques sont beaucoup plus faciles à apprendre 😊*

# Quelles valeurs sont produites par la métrologie de surfaces ?

- Répétabilité, reproductibilité
  - Assurance qualité
  - Accord entre vendeur et acheteur
    - *Bases du commerce*

- Capacité à différentier de façon fiable
  - Assurance qualité
  - Anthropologie, archéologie, police scientifique
- Découverte de corrélations fonctionnelles
  - Conception de produits et de procédés

# Quatre principes de création de valeur

*La production de discriminations fiables et de fortes corrélations fonctionnelles est facilitée par les points suivants :*

1. Une caractérisation à une échelle appropriée
2. L'utilisation d'éléments géométriques appropriés
3. L'application de statistiques appropriées
4. L'emploi d'une résolution suffisante lors de la mesure

# *Application des quatre principes à l'analyse géométrique multi-échelle des surfaces*

Sur une topographie irrégulière, la caractérisation géométrique change en fonction de l'échelle (*caractérisation multi-échelle*) pour :

- la longueur curviligne du profil (*length-scale*)
- l'aire curviligne de la surface (*area-scale*)
- la capacité de remplissage (*filling-scale*)

(de même qu'avec les pentes et les courbures locales)

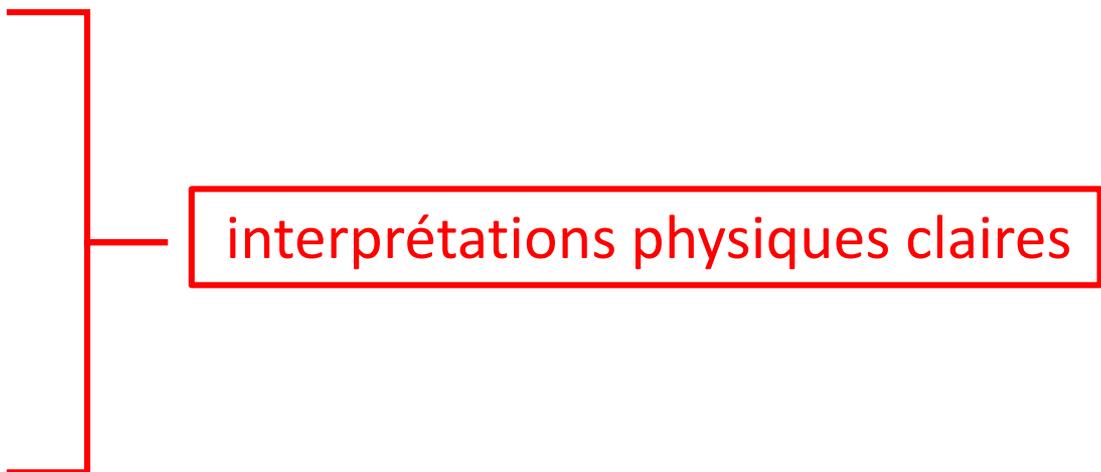
L'*analyse statistique multi-échelle* utilisée pour la discrimination et la corrélation peut mettre en valeur des *tendances sur l'étendue des échelles caractérisées*

Afin de trouver les corrélations entre performance et procédé, il faut analyser l'influence de l'échelle

1. Caractérisation *multi-échelle* de la topographie
2. Corrélation *multi-échelle* entre la performance et les paramètres du procédé
3. Discrimination statistique *multi-échelle* des surfaces selon les procédés et les performances

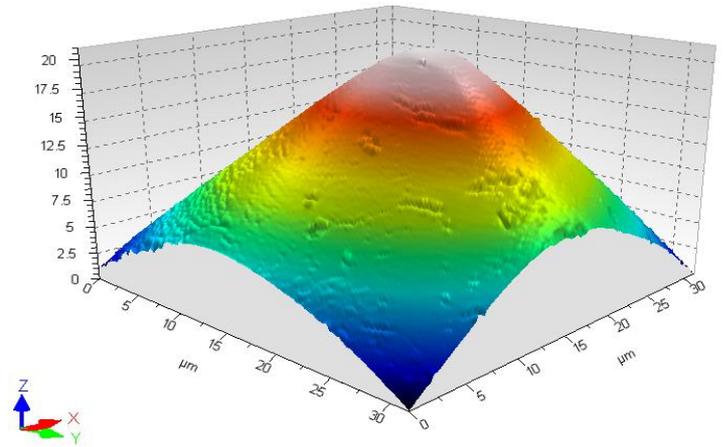
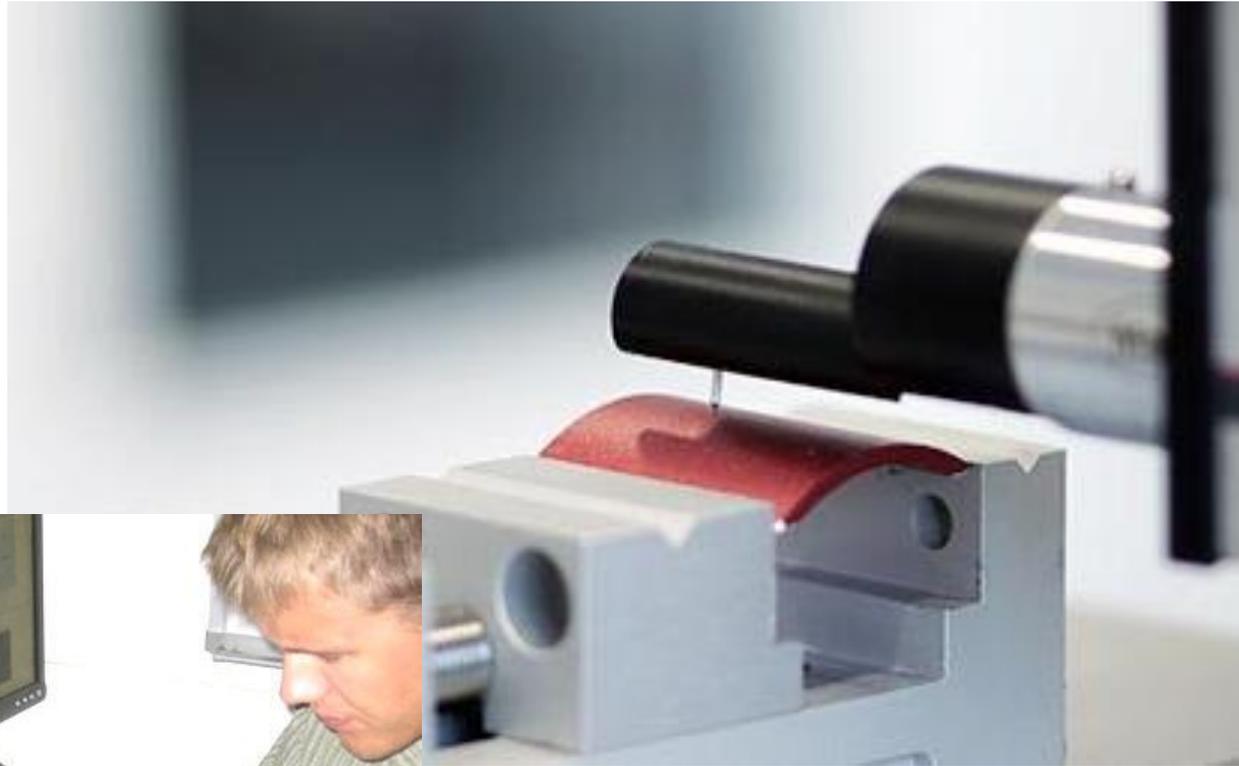
# Méthodes d'analyse liées à l'échelle en métrologie de surface

- Filtrage (conventionnel et passe-bande glissant)
- Fonction d'autocorrélation
- Fourier (PSD)
- Fonction de structure
- Ondelettes
- **Length-scale**
- **Area-scale**
- **Filling-scale**
- Slope-scale
- Curvature-scale

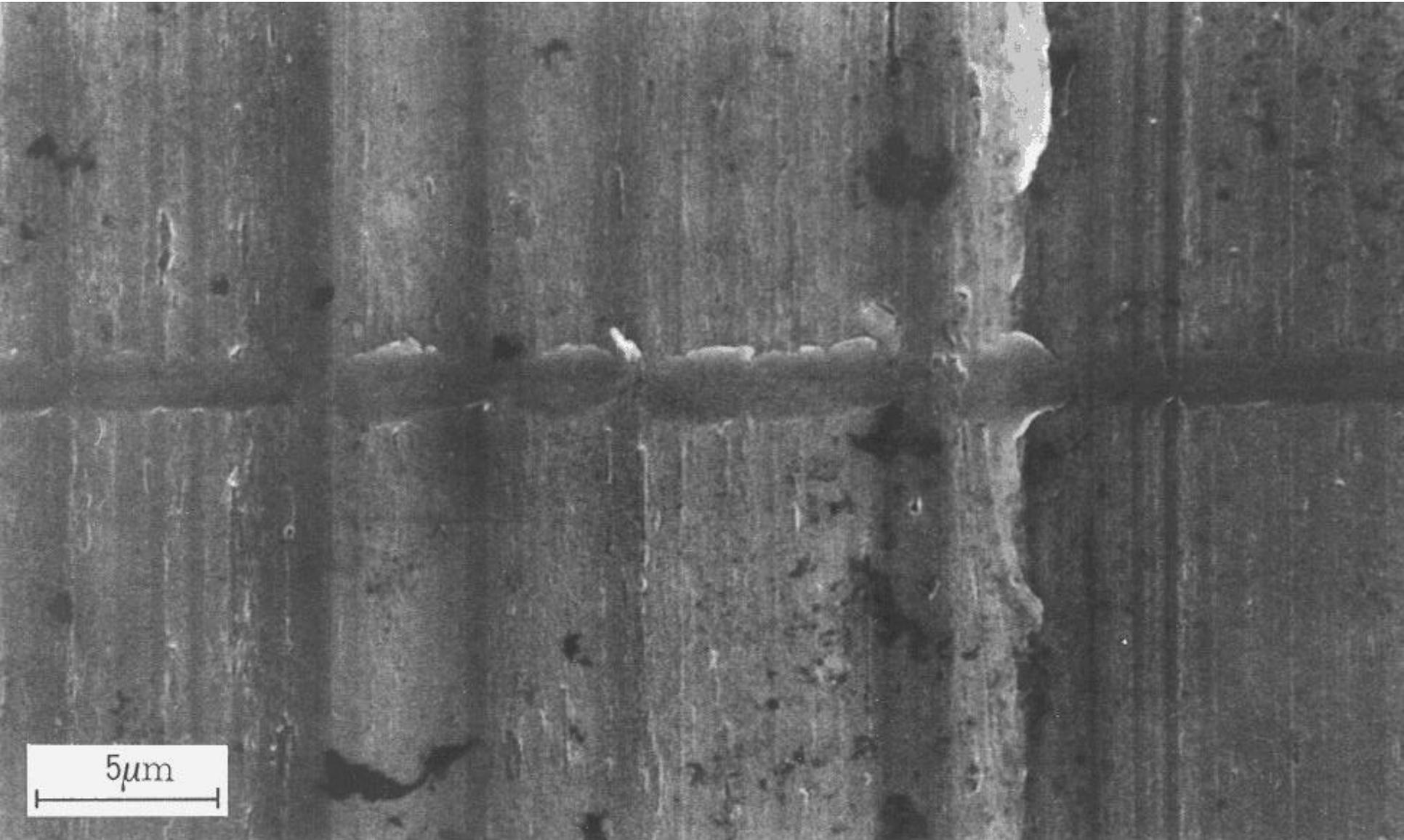


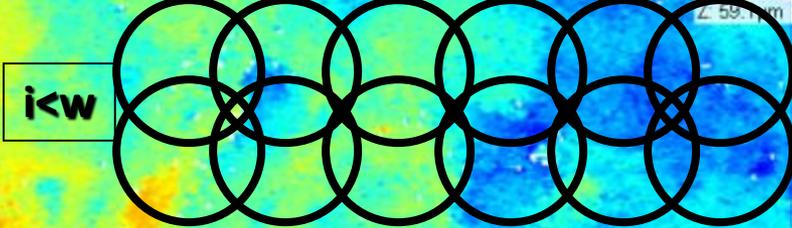
interprétations physiques claires

# Les échelles de mesure



La mesure à contact endommage la surface  
Image au MEB de la trace d'un stylet sur une surface tournée,  
en alliage d'aluminium pour l'aviation.

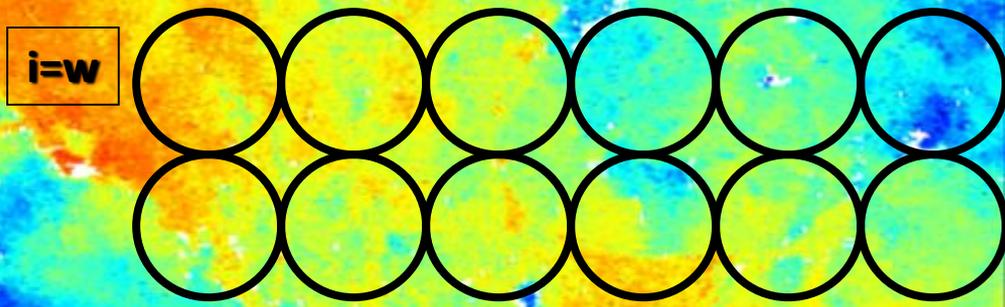




Limite inférieure des échelles latérales

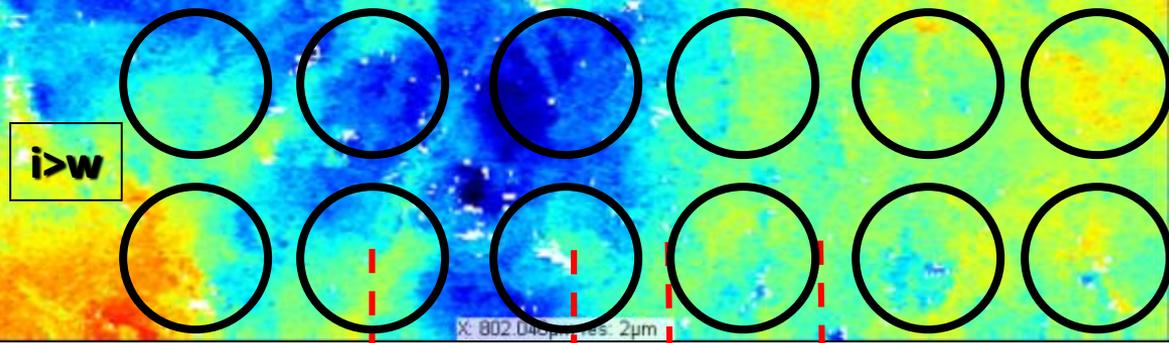
**Pas d'échantillonnage**

(*i*): distance entre les points mesurés  
(résolution spatiale)



**Zone d'échantillonnage**

(*w*): taille latérale de l'échantillon capté  
(résolution du capteur)



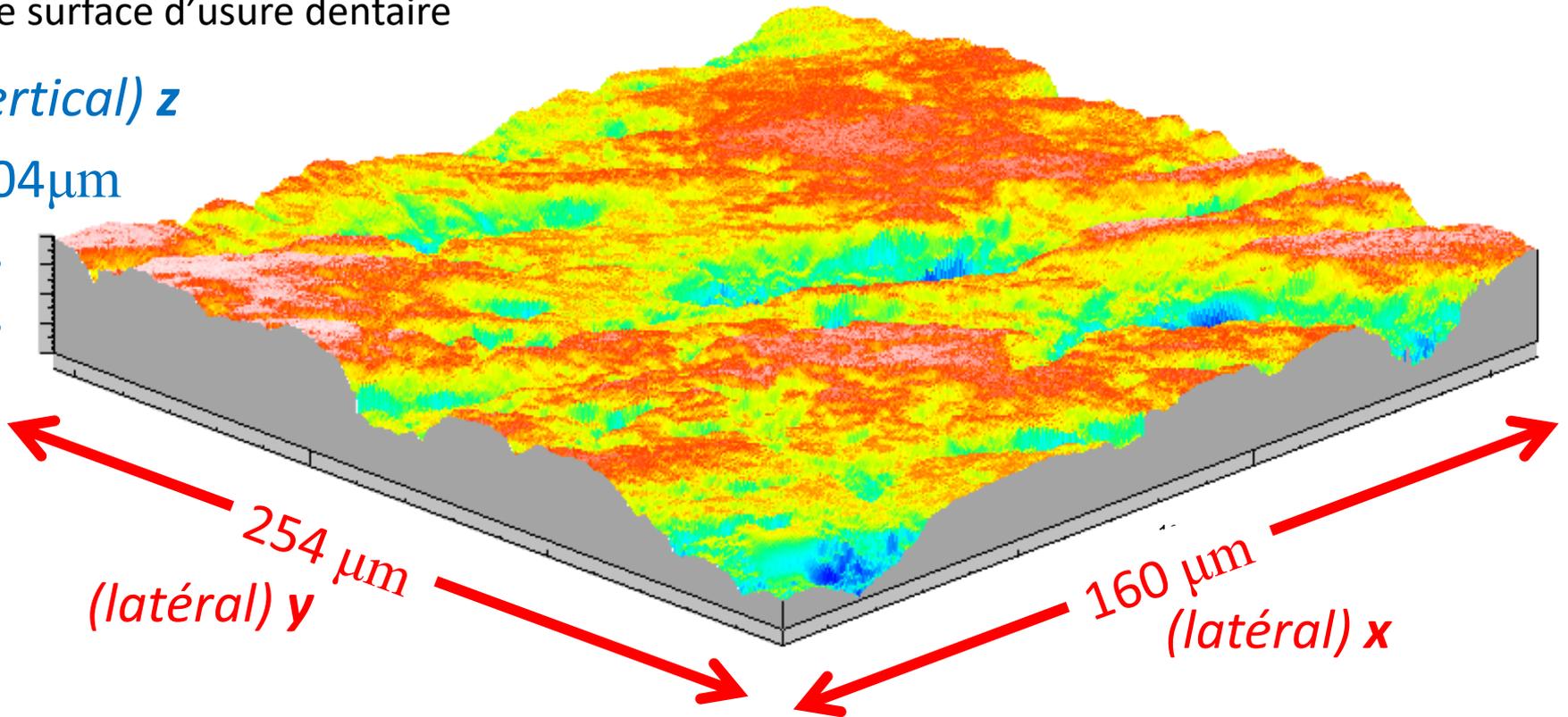
Pas d'échantillonnage *i*      Zone d'échantillonnage *w*

# Limites supérieures des échelles (volume de mesure)

Exemple mesuré au microscope confocal  
d'une surface d'usure dentaire

(Vertical)  $z$

4.04  $\mu\text{m}$

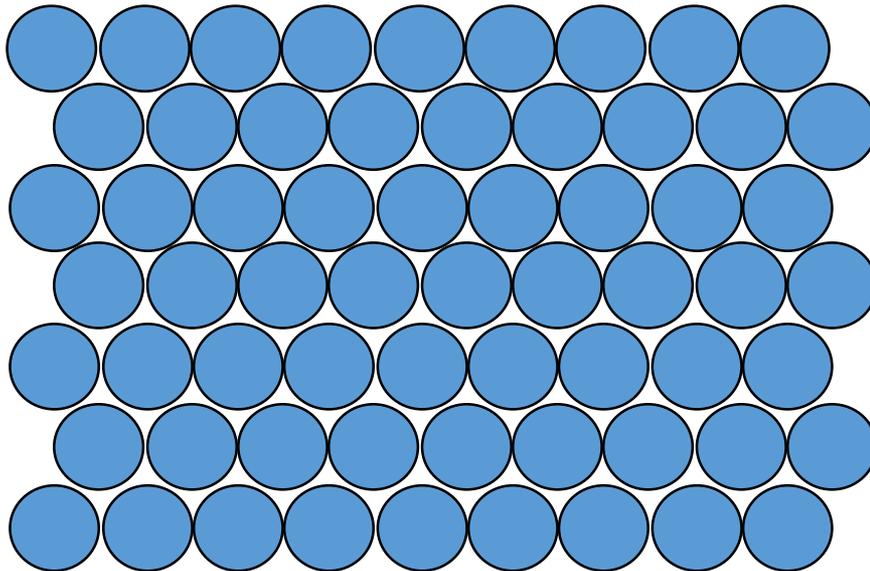


# Les échelles d'interaction

# Modèle d'interaction discrète

*Les interactions qui sont considérées comme continues à l'échelle macroscopique sont en fait*

- constituées d'un nombre fini *d'interactions discrètes*
- où chacune occupe un espace sur la surface, appelé *l'échelle fondamentale d'interaction*
- et chacune ayant une certaine force, *la force fondamentale d'interaction*

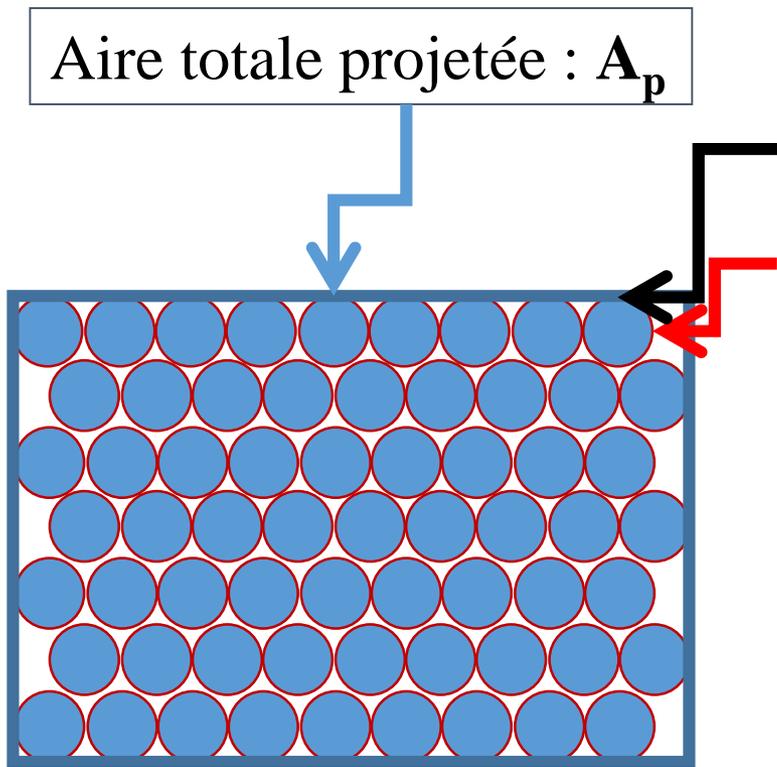


**Atomisme** du grec  
 $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\nu$ , *atomon*, i.e.  
« indivisible »

# Force théorique d'interaction

Force macroscopique :  $S_t = N \frac{S_s}{A_p}$

Nombre d'interactions (cercles bleus) :  $N = m \frac{A_{ts}}{A_s}$



$S_s$  Force d'une seule interaction

$A_s$  Aire d'une interaction discrète

$A_{ts}$  Aire totale à l'échelle d'une seule interaction

$m$  Fraction du nombre total possible des sites d'interaction qui sont actifs.

Doit être :  $0 \leq m \leq 1$

Macroscopique =  $\Sigma$  (discrètes micro & nanoscopiques)

# Force théorique d'interaction

Force totale :  $S_t = N \frac{S_s}{A_p}$

Nombre d'interactions :  $N = m \frac{A_{ts}}{A_s}$

En substituant :  $S_t = m \left( \frac{S_s}{A_s} \right) \left( \frac{A_{ts}}{A_p} \right)$

$\frac{S_s}{A_s}$  force par aire fondamentale  
d'interaction

$\frac{A_{ts}}{A_p}$  aire relative à l'échelle fondamentale  
d'interaction ( $\geq 1$ )

# Aspects géométriques

- Qu'est-ce qui fait sens d'un point de vue de la science ou de l'ingénierie ?

*contre*

- Quel paramètre créé dans les années 1930 devons-nous utiliser ?

# L'importance de l'aire d'interaction

- Loi de Newton (dissipation)  $\frac{dQ}{dt} = h \cdot A(T_0 - T_{\text{env}})$
- Transfert de masse Flux =  $-P \cdot A \cdot (c_2 - c_1)$
- Densité de courant – selon l'échelle ?
- Transfert de charge (fatigue à l'interface)  $F = \sigma A$
- Modèle d'interaction discrète  $I = \rho A$

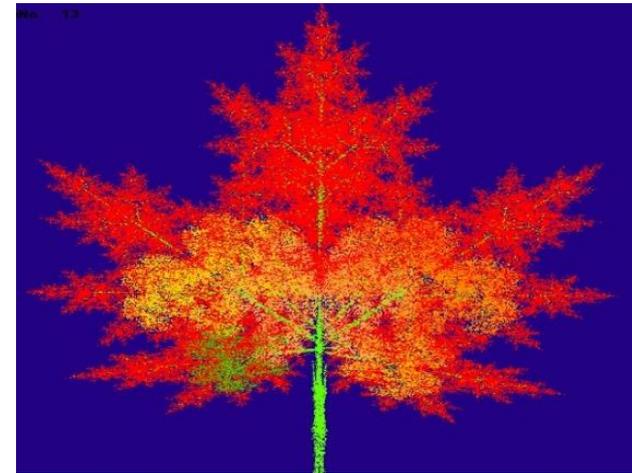
*L'aire d'une surface rugueuse n'est pas unique.*

**→ Elle dépend de l'échelle d'observation  
ou de calcul.**

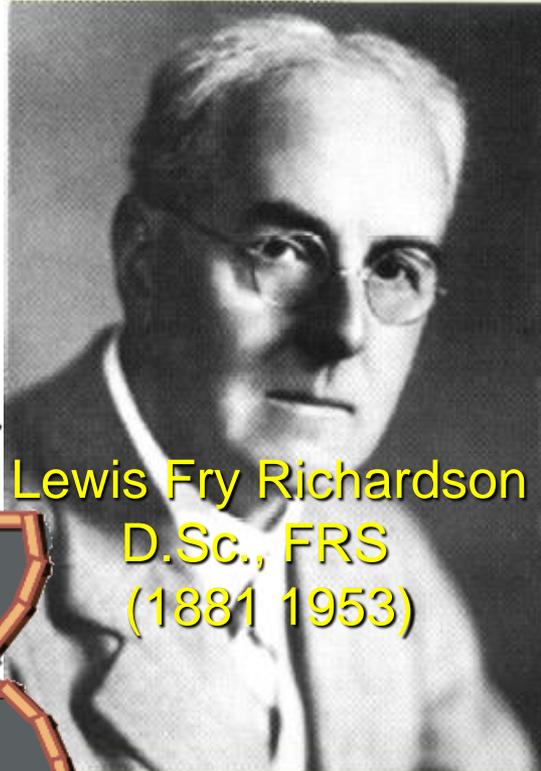
# Quelle est l'aire de l'état du Vermont?

## *Scale-sensitive fractal analysis (SSFA)*

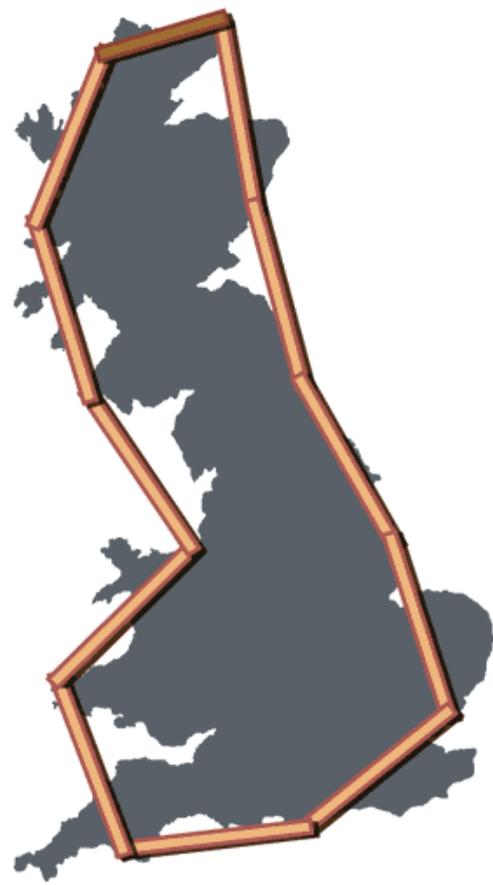
*L'analyse fractale en fonction de l'échelle*



Richardson – Quelle est la longueur de la côte de Grande-Bretagne ?

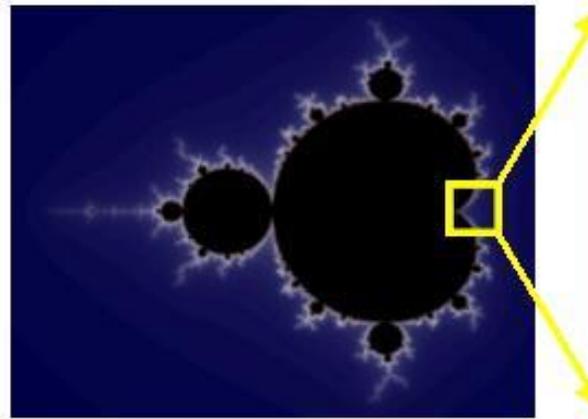


Lewis Fry Richardson  
D.Sc., FRS  
(1881 1953)



# L'ensemble de Mandelbrot

$$z_{n+1} = z_n^2 + c$$



## Fractales & self-similarité



Benoit Mandelbrot, École polytechnique  
né en 1924, Varsovie, Pologne  
mort en 2010, Cambridge, Massachusetts, USA