

FORMATION POUR DOCTORANTS & POST-DOCS

TRIBOLOGIE TACTILE

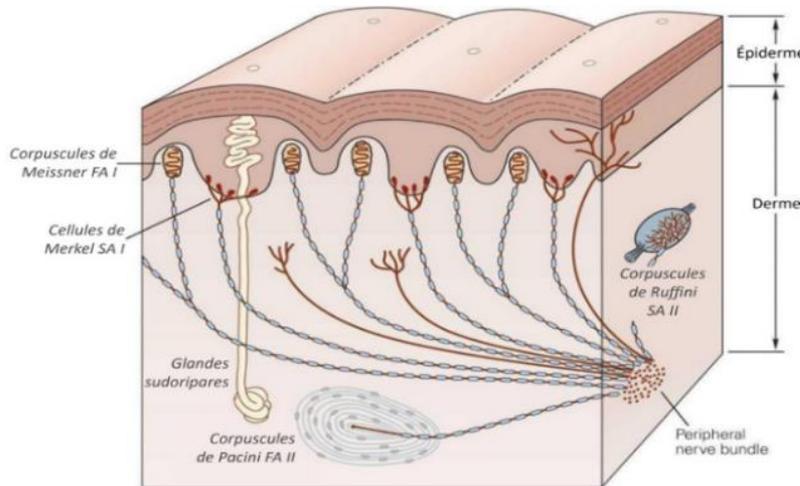
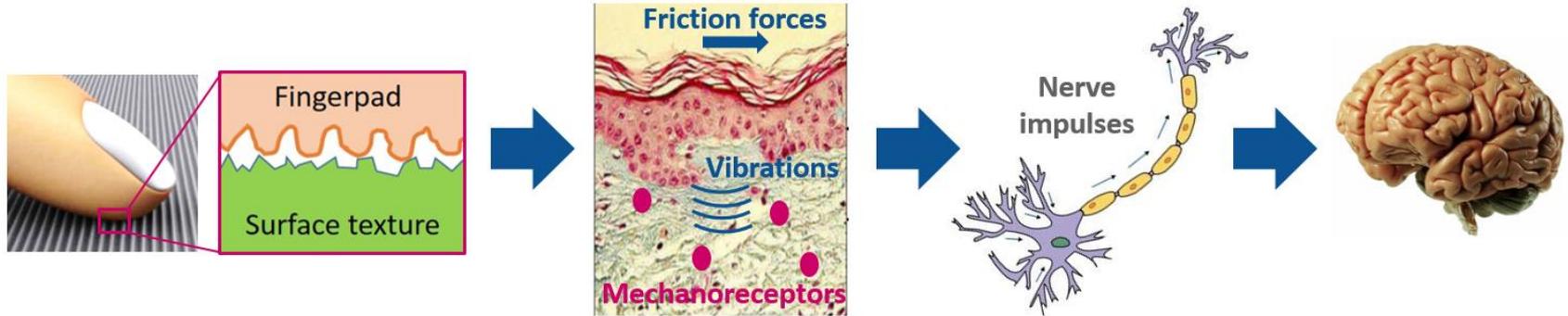
Workshop GDR TACT

LPMT – Mulhouse – 30 juin 2022

Pierre-Henri CORNUAULT



Pourquoi mesurer des signaux mécaniques ?



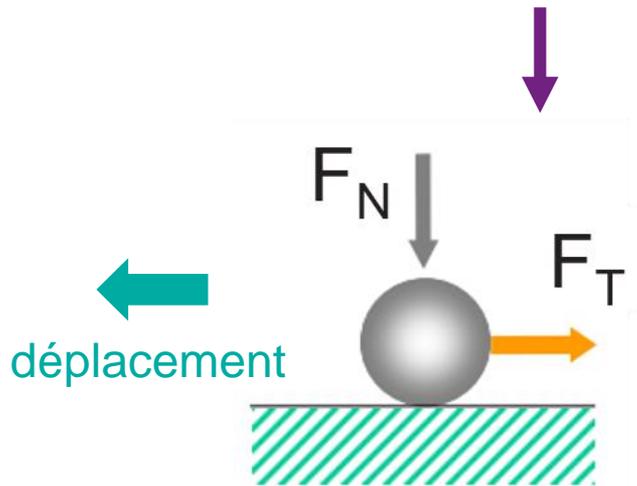
	Faible champ récepteur	Large champ récepteur
Adaptation lente	SA I $f = 0-30$ Hz Cellules de Merkel	SA II $f = 10-300$ Hz Corpuscules de Ruffini
Adaptation rapide	FA I $f = 5-64$ Hz Corpuscules de Meissner	FA II $f = 64-1000$ Hz Corpuscules de Pacini

+ Fibres C

➔ Intérêt de mesurer le frottement ET les vibrations induites

Tribométrie

= l'art de mesurer des signaux mécaniques selon des modalités de frottement ~ définies



- Coefficient de frottement

$$\mu = F_T / F_N$$

- Friction Induced Vibrations

(atout : rigidité du stratum corneum)

Particulièrement important pour l'étude du toucher...

- Direction / sens de déplacement
- Cinématique
- Vitesse relative
- Pression de contact
- Environnement

Les propriétés tribologiques sont des propriétés d'usage !

1 tribomètre : compromis entre capacités de mesure et modalités permises

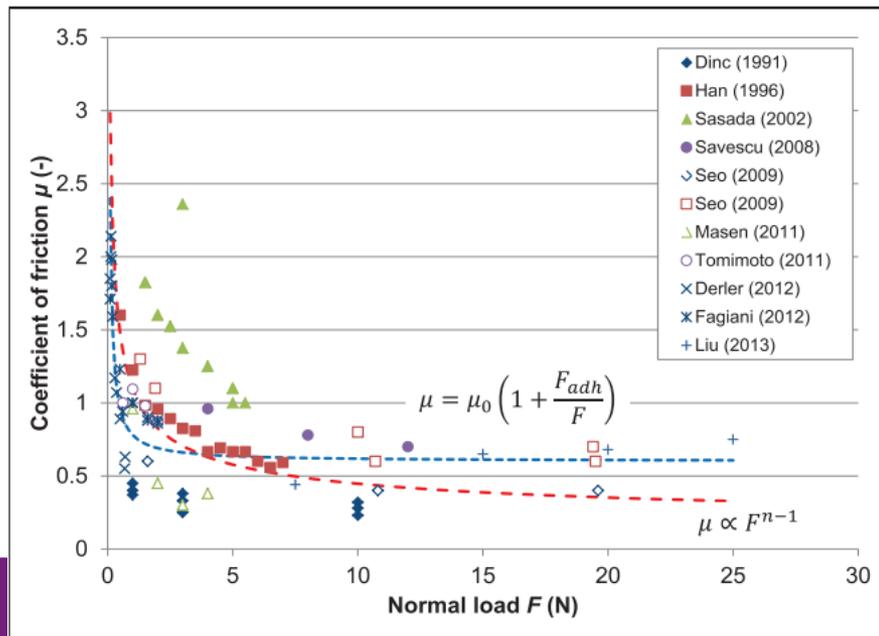
Modalités de frottement

Force normale et Pression de contact

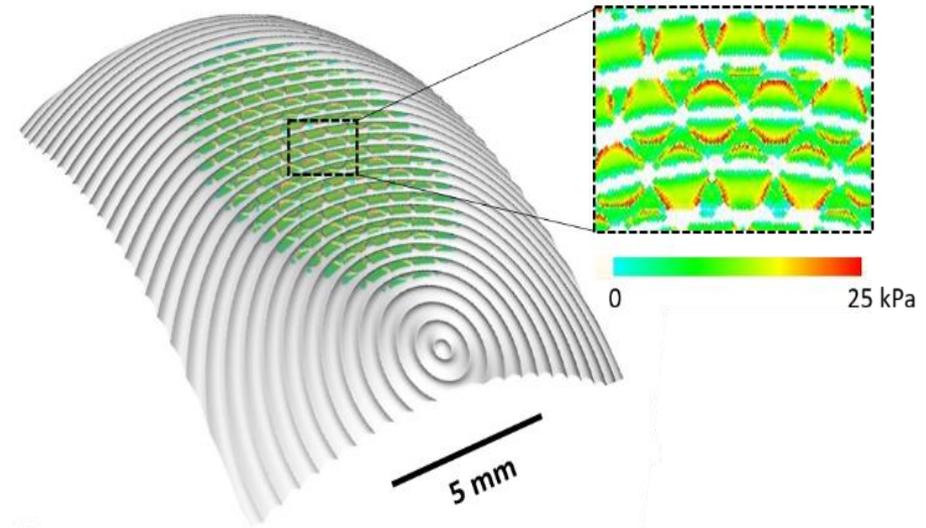
- ❑ La force normale est classiquement un paramètre « contrôlé » et facile à mesurer
- ❑ La pression et sa distribution dans le contact est très difficile à évaluer...



Emploi de modèles numériques

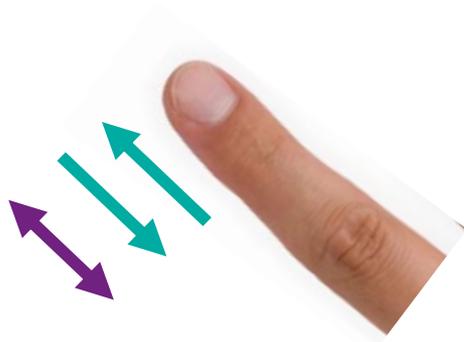


Modèle BEM : ContactPLOT

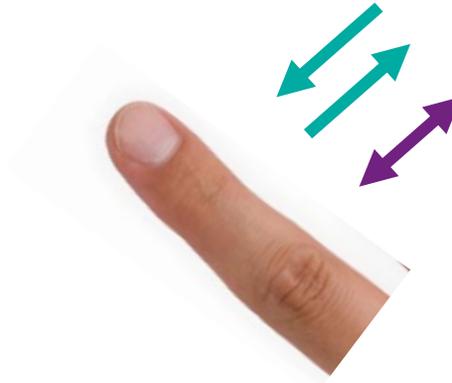


Modalités de frottement

Direction, Sens, et Cinématique



VS



Vitesse de glissement

Paramètre assez peu étudié... mais dont les effets sur les signaux sont fulgurants !

Un toucher + ou - actif...

Est-ce le volontaire ou la manip qui contrôle

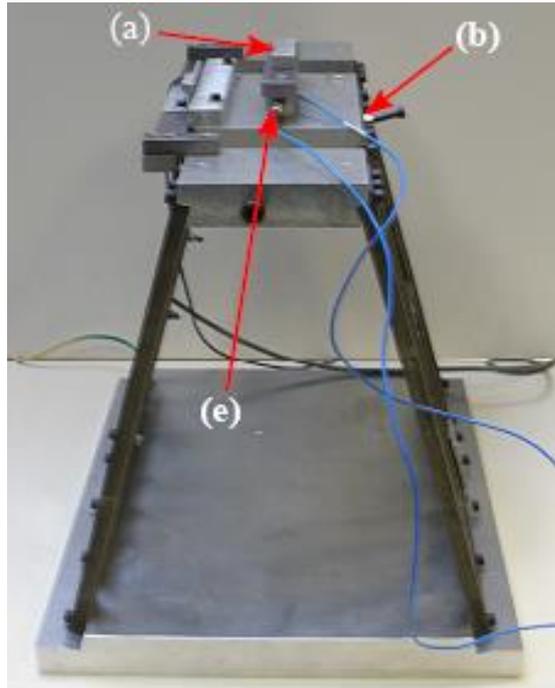
- la force normale ?
- la vitesse de déplacement ?
- la trajectoire du contact ?

Environnement

Prise en considération de l'existence d'un fluide hydrolipidique confiné dans le contact

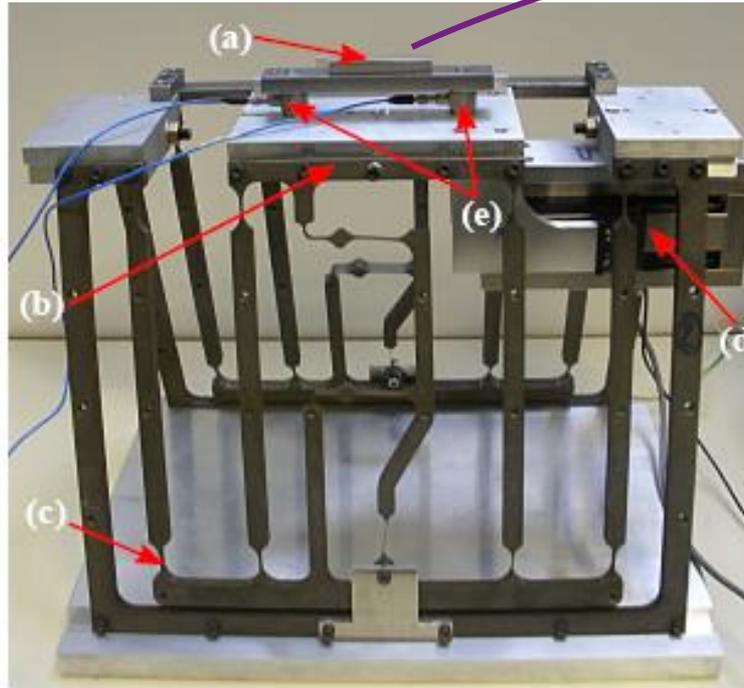
Tribomètres

TriboTouch @ LaMCoS



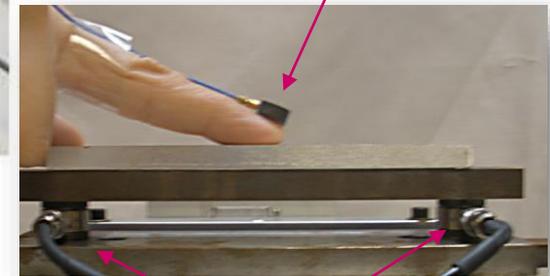
(A)

- (a) Surface sample;
- (b) Compliant mechanisms;
- (c) Flexible joint;



(B)

- (d) Linear voice coil actuator;
- (e) Force transducers;

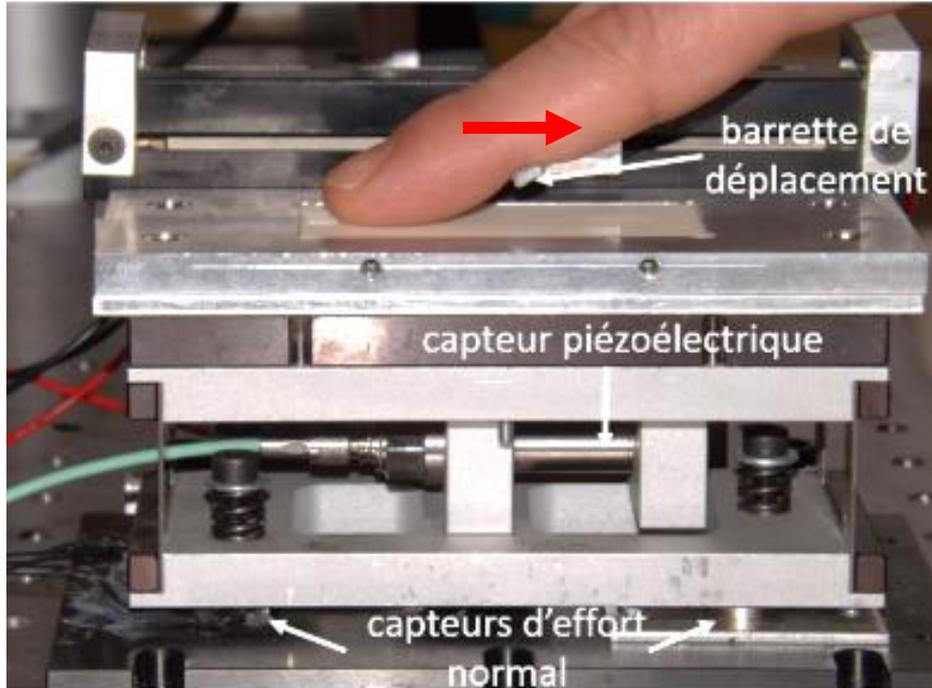


Light accelerometer

Biaxial force sensors

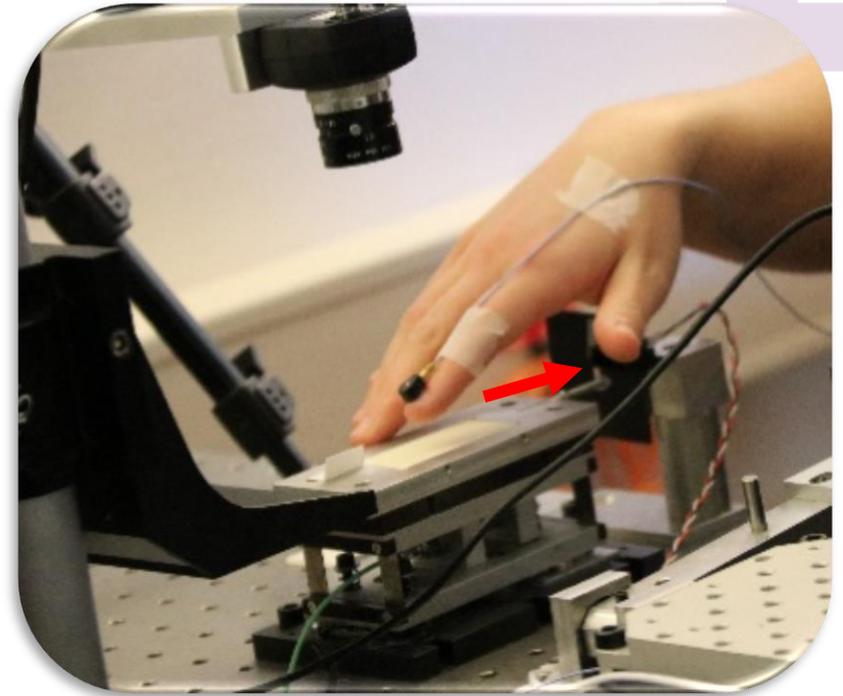
Tribomètres

ActivTACT @ Femto-ST



Mesure des signaux @ 10 kHz :

- Force normale
- Force de frottement
- Vibrations induites (accéléromètre)
- Déplacement du doigt



Caméra + marqueur sur accéléromètre

→ Tracking de la position du doigt au cours du temps

Tribomètres

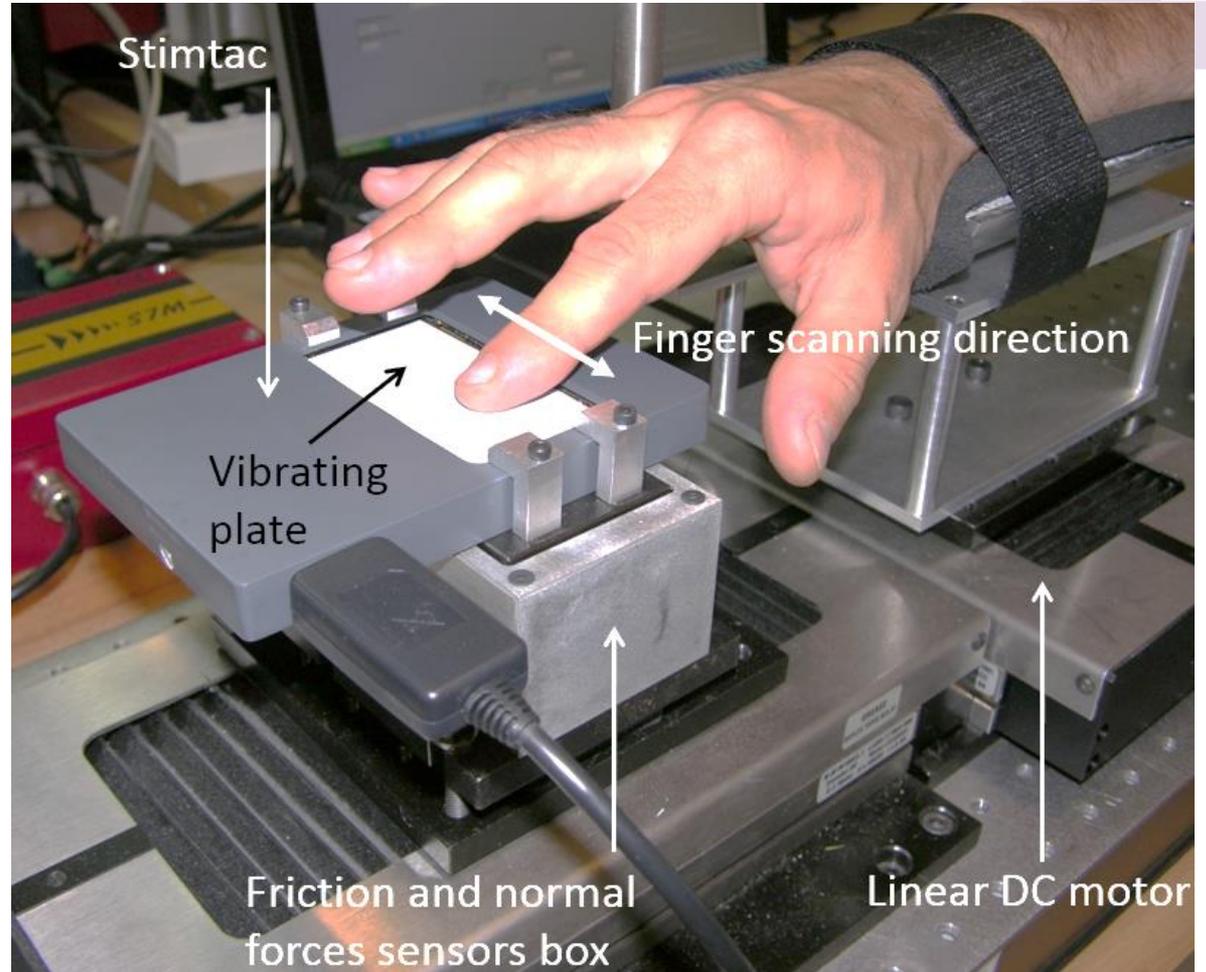
ActivTACT @ Femto-ST

❑ Motorisation possible

→ toucher semi-passif

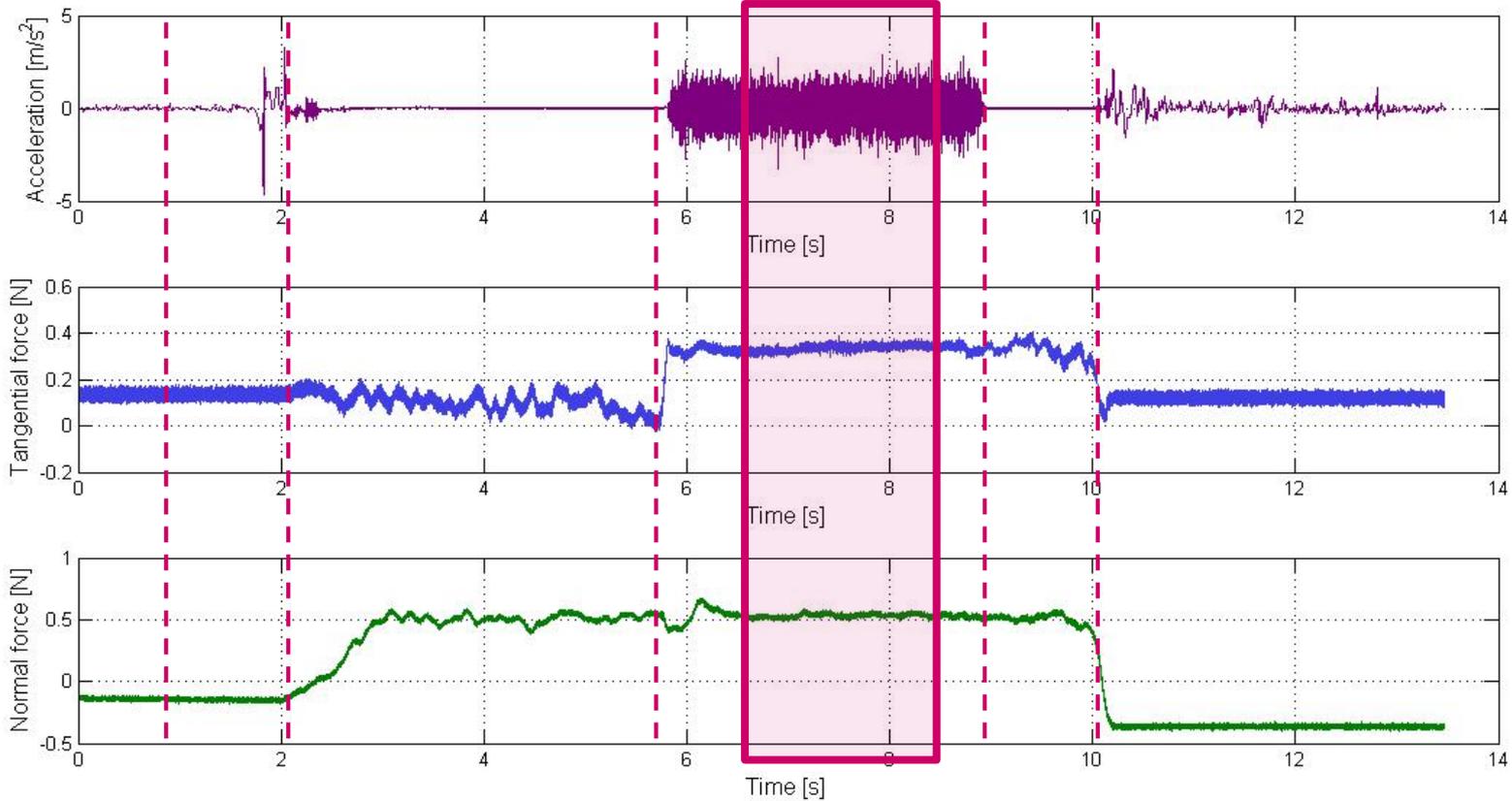
MAIS : FIV non mesurées

❑ Adaptation possible
d'un effecteur tactile



Signaux mécaniques mesurés

TriboTouch



In the
selected
time window



$$\mu(t) = \frac{F_t(t)}{F_n(t)}$$



Friction coefficient mean value μ



$$\ddot{x}(t)$$

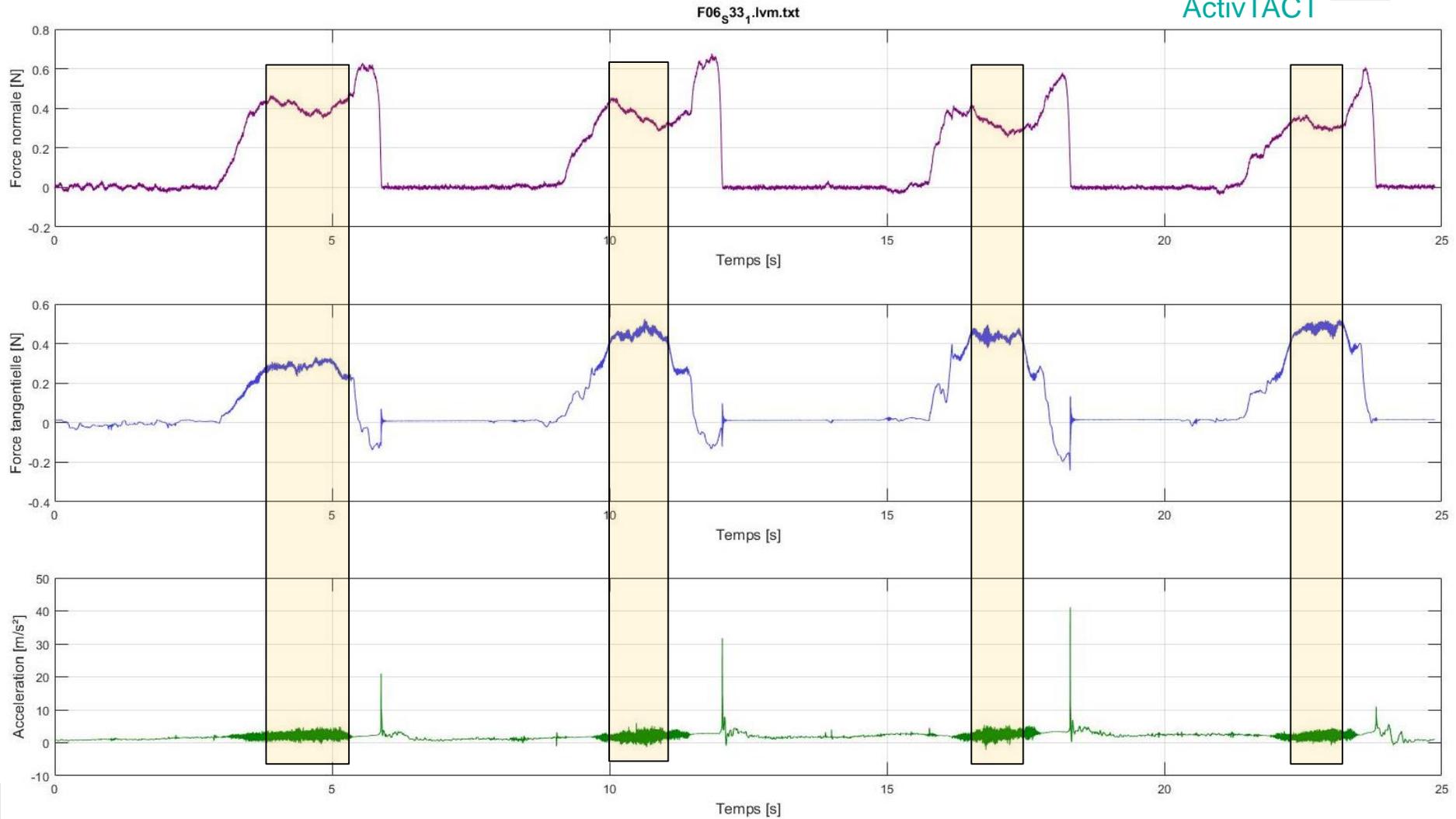


Acceleration rms value \ddot{x}_{rms}

Power Spectral Density of \ddot{x}

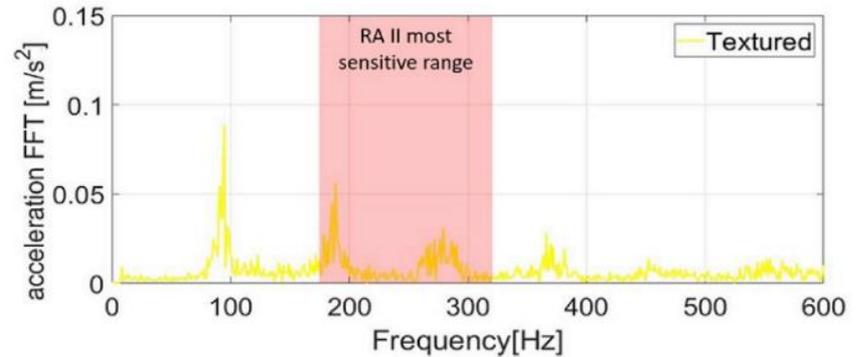
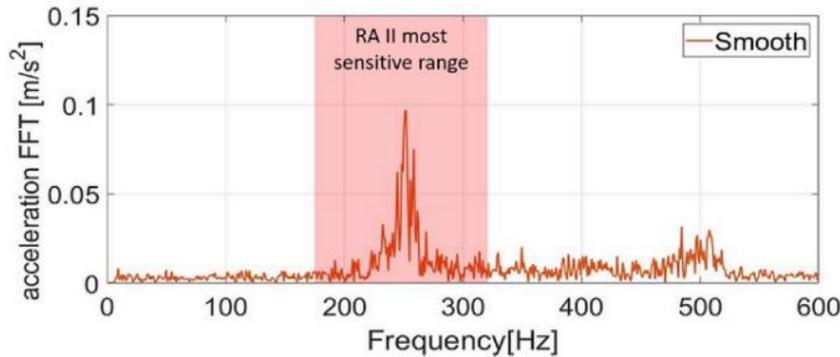
Signaux mécaniques mesurés

ActivTACT



Signaux mécaniques mesurés : spectre de fréquence

Surfaces parsemées de plots cylindriques ressenties « lisse » ou « texturées »

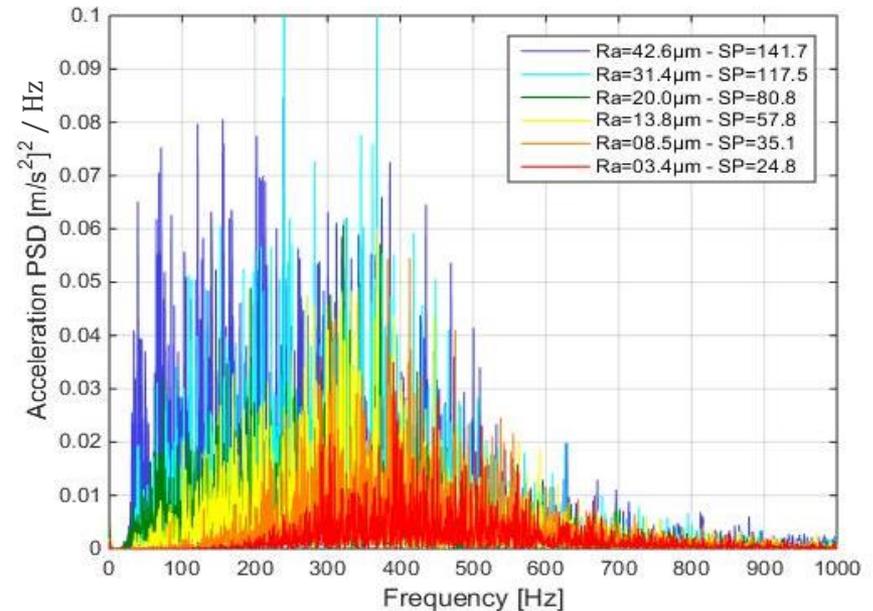


➔ Fréquences activées $\propto V / (D + Sp)$

Jeu de 6 textures isotropes
(non-déterministes) à
rugosité croissante



➔ Spectre large bande



Impact des propriétés du doigt

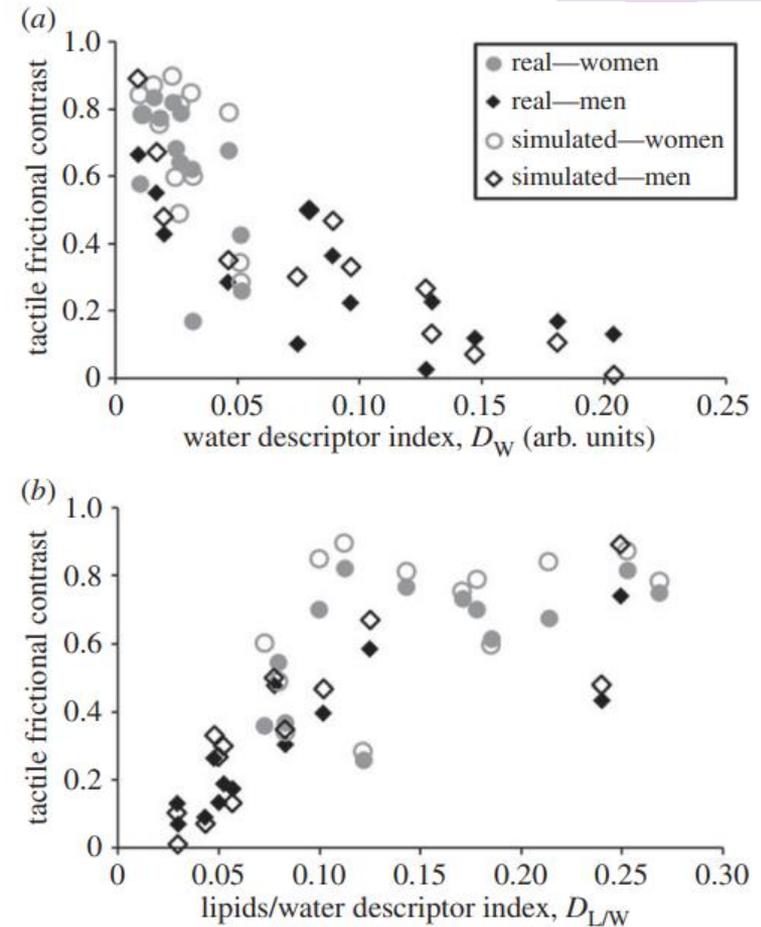
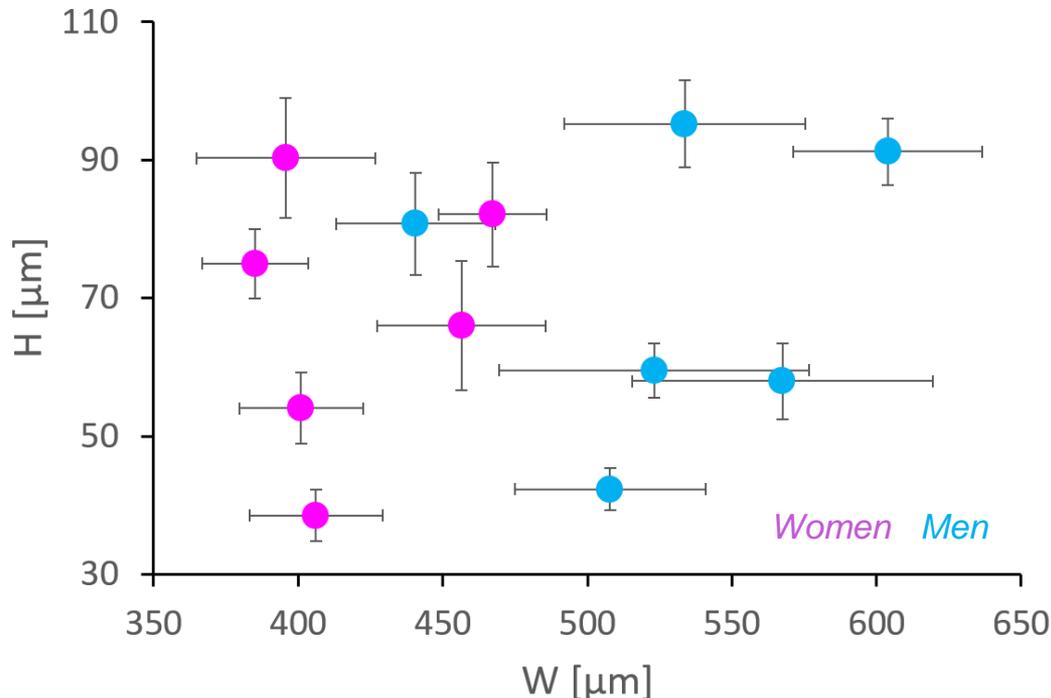
Variabilité biologique des individus...

... Quelle est la robustesse des signaux mécaniques mesurés ?



Les propriétés varient beaucoup d'un individu à un autre !

Leur impact peut être énorme !



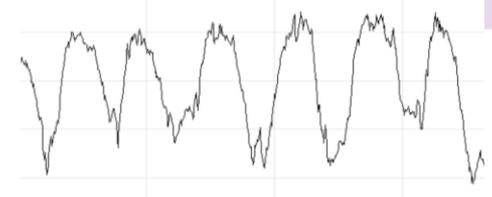
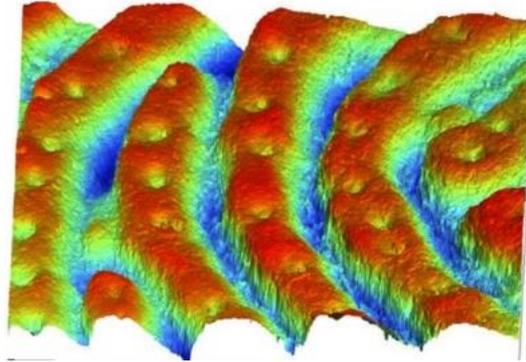
Impact des propriétés du doigt

Propriétés morphologiques et topographiques

(1) Réplique du doigt

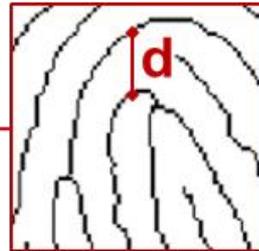


$$R_1 \text{ et } R_2 \\ \rightarrow R_{gm}$$

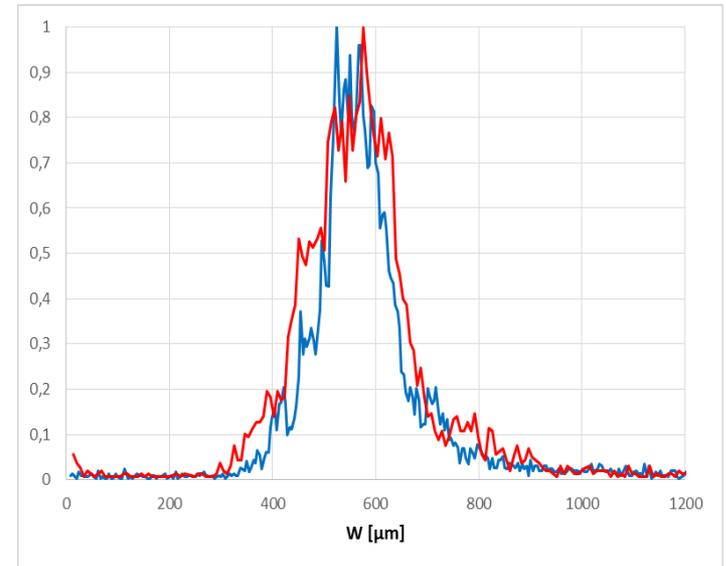


Hauteur moyenne des dermatoglyphes

(2) Traitement d'image d'une empreinte



Distribution des distances interdigitales

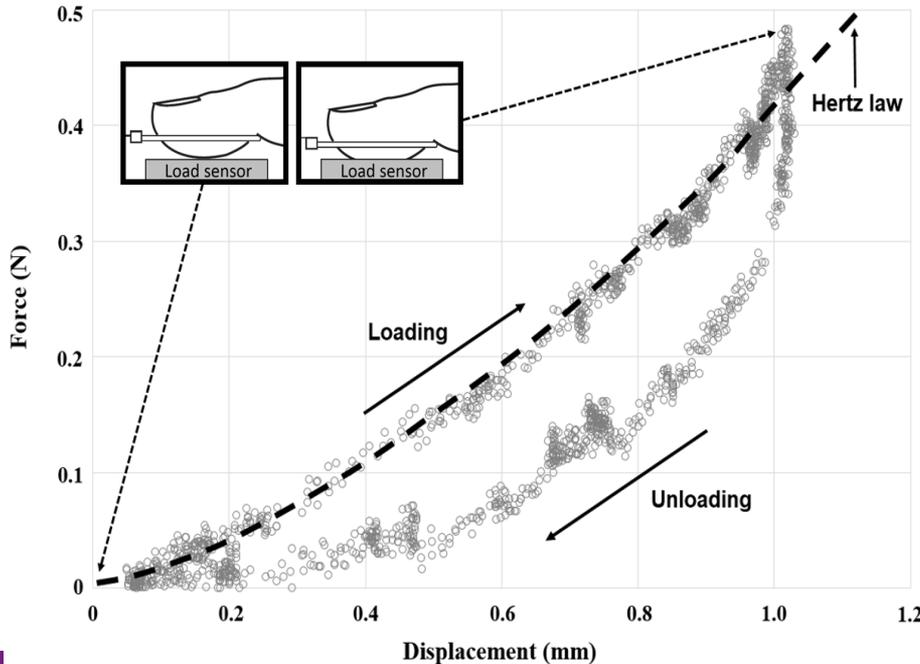
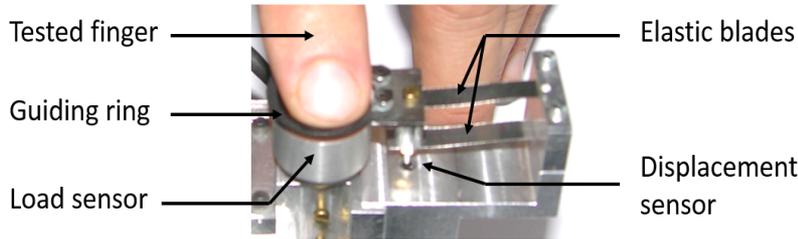


Impact des propriétés du doigt

Propriétés mécaniques

→ Contact assimilé à un sphère/plan

(1) Indentation instrumentée



$$P = \frac{4}{3} \cdot E^* \cdot R^{1/2} \cdot h^{3/2}$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_{\text{finger}}^2}{E_{\text{finger}}} + \frac{1 - \nu_{\text{steel}}^2}{E_{\text{steel}}}$$

(2) Prise d'empreintes avec mesure d'effort



$$a^3 = \frac{3R_{gm}}{4} \left(\frac{1 - \nu_{\text{doigt}}^2}{E_{\text{doigt}}} - \frac{1 - \nu_{\text{alu}}^2}{E_{\text{alu}}} \right) \times F_N$$

➔ **Module d'élasticité du doigt**

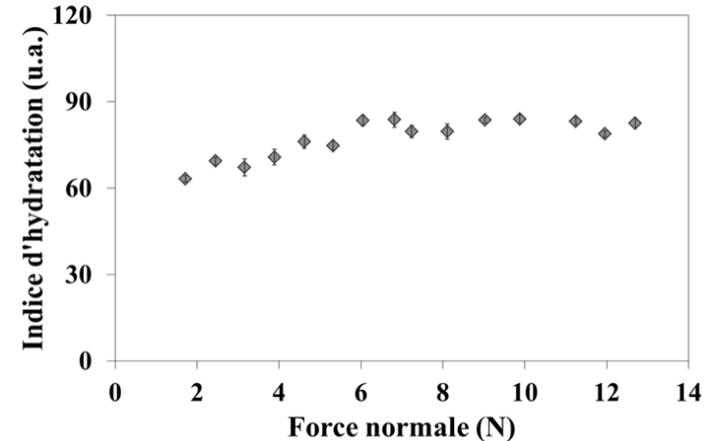
Pb : dermatoglyphes non considérés

Impact des propriétés du doigt

Propriétés physico-chimiques

Cornéomètre très classiquement utilisé : mesure capacitive de l'hydratation de la peau

Problèmes : peu de sens physique + sensibilité à la force normale



Beaucoup plus rarement :

- Tewamètre : mesure de la perte insensible en eau (PIE ou TEWL)
- Sébumètre : mesure du taux massique de sébum déposé sur un plan



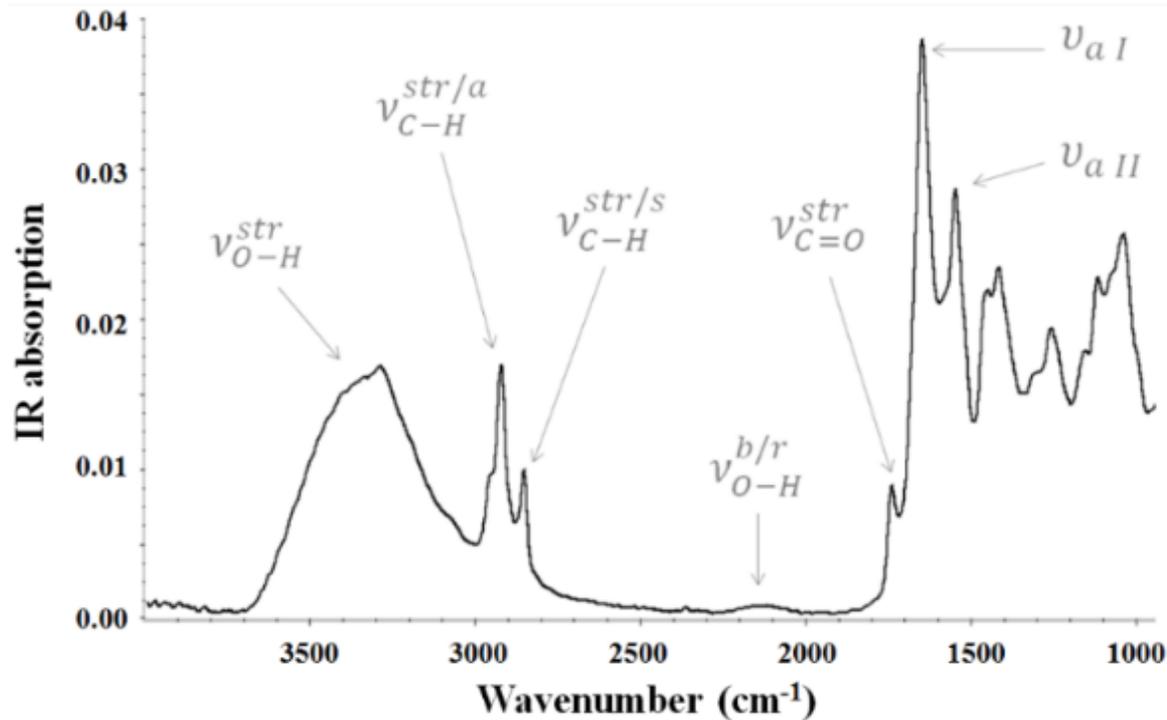
Méthodes relativement grossières...

Impact des propriétés du doigt

Propriétés physico-chimiques

Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

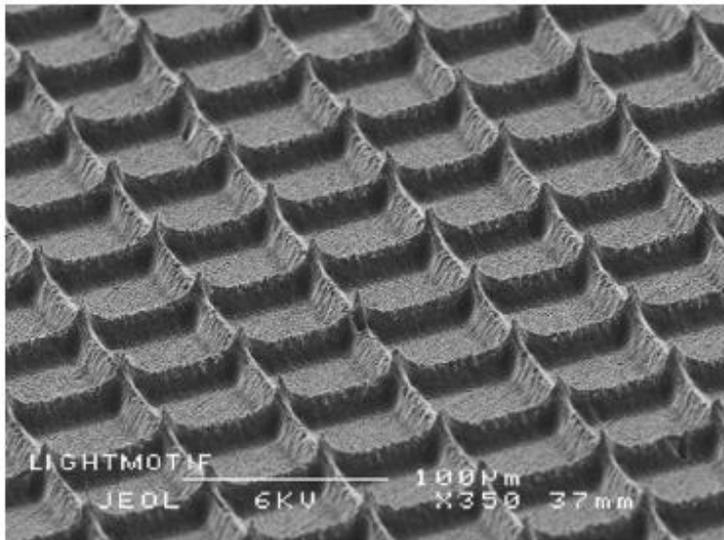
- Avantages :
- caractérisation de l'ensemble du film hydrolipidique
 - profondeur d'analyse très faible ($\sim 1 \mu\text{m}$)



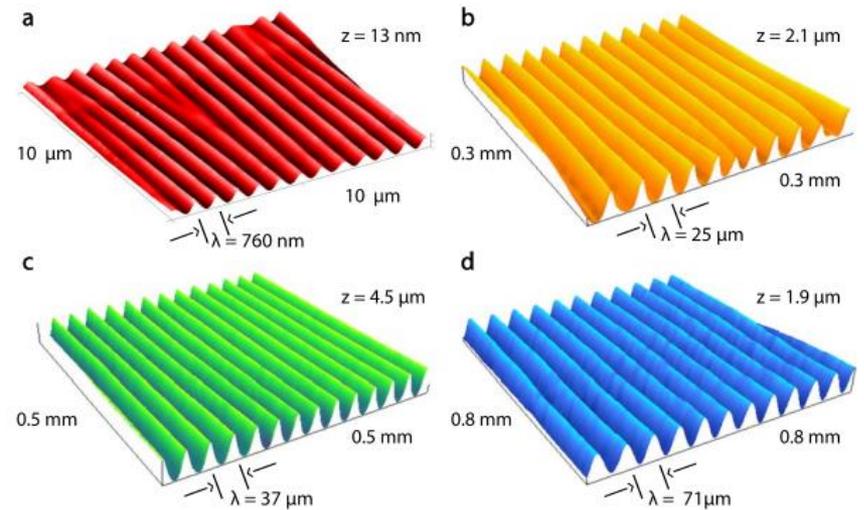
Descripteurs
variés de la
composition du
film hydrolipidique

Quelles textures investiguées ?

- ❑ Transmission des efforts → Nécessité d'une texture rigide ou bien d'un montage permettant de rigidifier un matériau s'il est souple
- ❑ Potentiellement : n'importe quelle texture !
- ❑ Problématique : contrôler les paramètres de texture (pour comprendre les variations de signaux mécaniques associées)



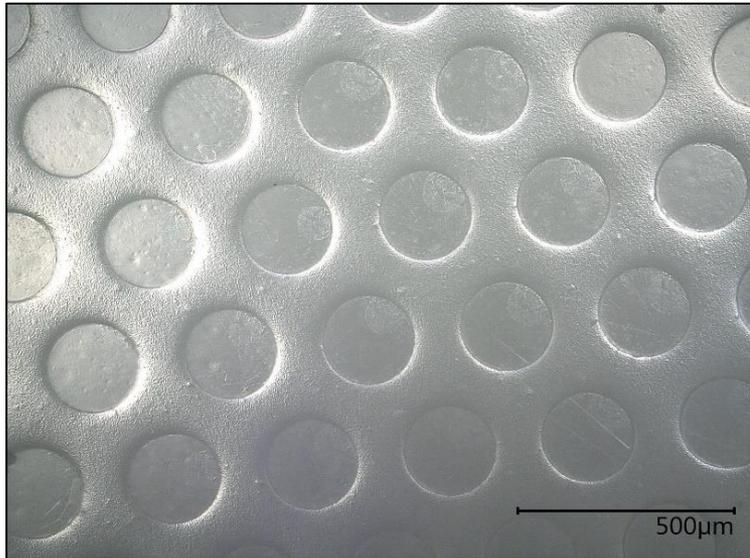
Van Kuilenburg *et al*, 2010



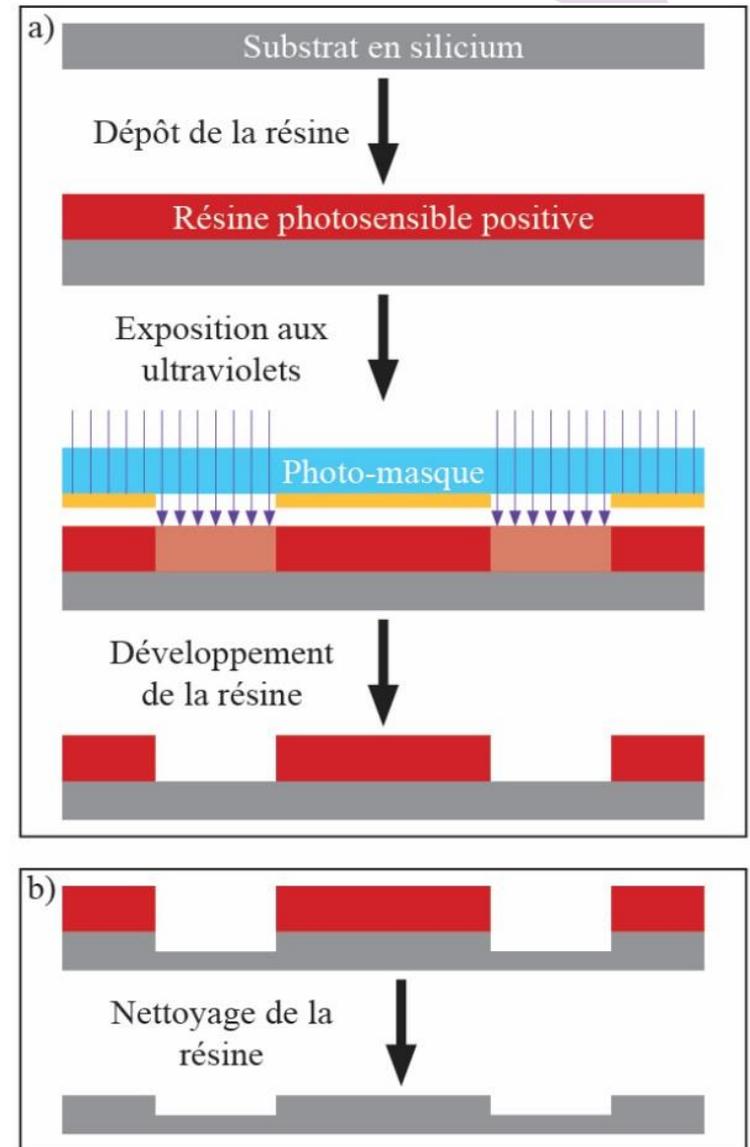
Skedung *et al*, 2013

Quelles textures investiguées ?

1. Réalisation en salle blanche (Mimento) : photolithographie + gravure plasma
2. Réplication de surfaces



Caractérisation topographique et physicochimique (énergie de surface)

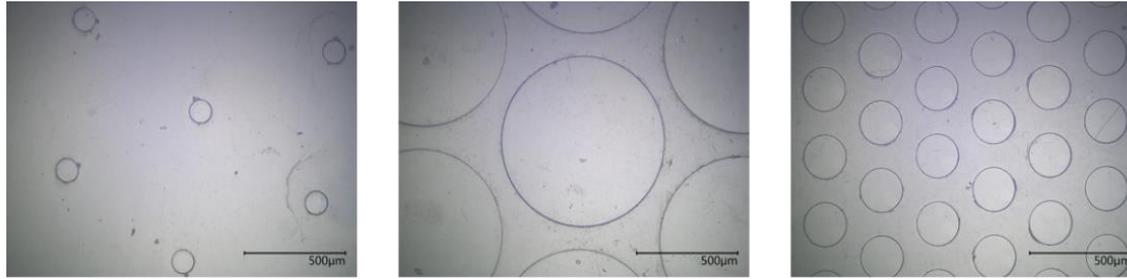


Cas d'étude

▪ Perception tactile de surfaces microtexturées (Thèse B. Weiland)

- 51 Surfaces planes parsemées de plots cylindriques selon un motif hexagonal

Procédé : réplcation résine PU de wafers réalisés par photolithographie



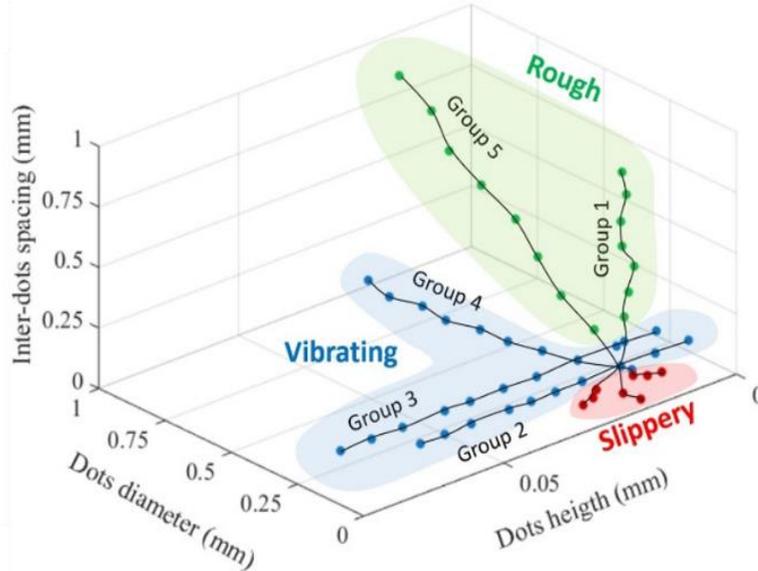
	D [μm]	H [μm]	SP [μm]	Nombre de surfaces
Groupe n°1	108 ± 2	20 ± 3	$120 \rightarrow 1023$	12
Groupe n°2	108 ± 1	$4 \rightarrow 62$	219 ± 1	10
Groupe n°3	207 ± 1	$5 \rightarrow 73$	318 ± 1	10
Groupe n°4	$12 \rightarrow 904$	24 ± 5	$(114 \pm 1) + D$	13
Groupe n°5	$22 \rightarrow 905$	20 ± 1	$= D$	11

- 2 tâches d'évaluation de la perception : catégorisation (20 indiv.) + jugement (25 indiv.)
- Mesures de μ et \ddot{x} (ActivTact - 1 indiv.) - $V = 30 \text{ mm/s}$; $F_N = 0.3 \text{ N}$

Cas d'étude

■ Perception tactile de surfaces microtexturées (Thèse B. Weiland)

⇒ Les surfaces procurent des sensations très variées ! → 3 catégories de perception

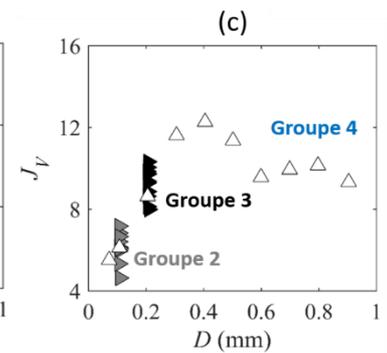
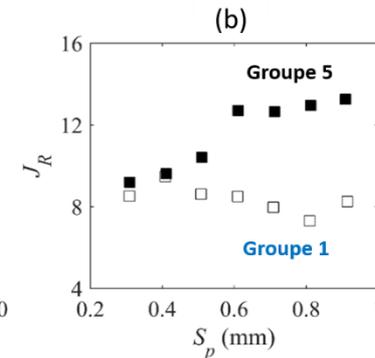
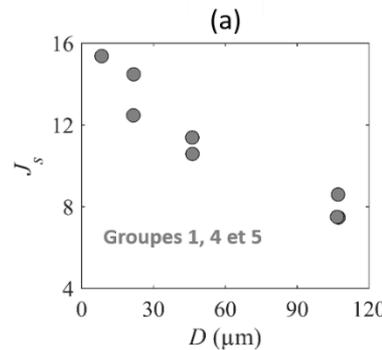


Tâche de jugement



Intensités de perception J_S J_V J_R dans chaque catégorie

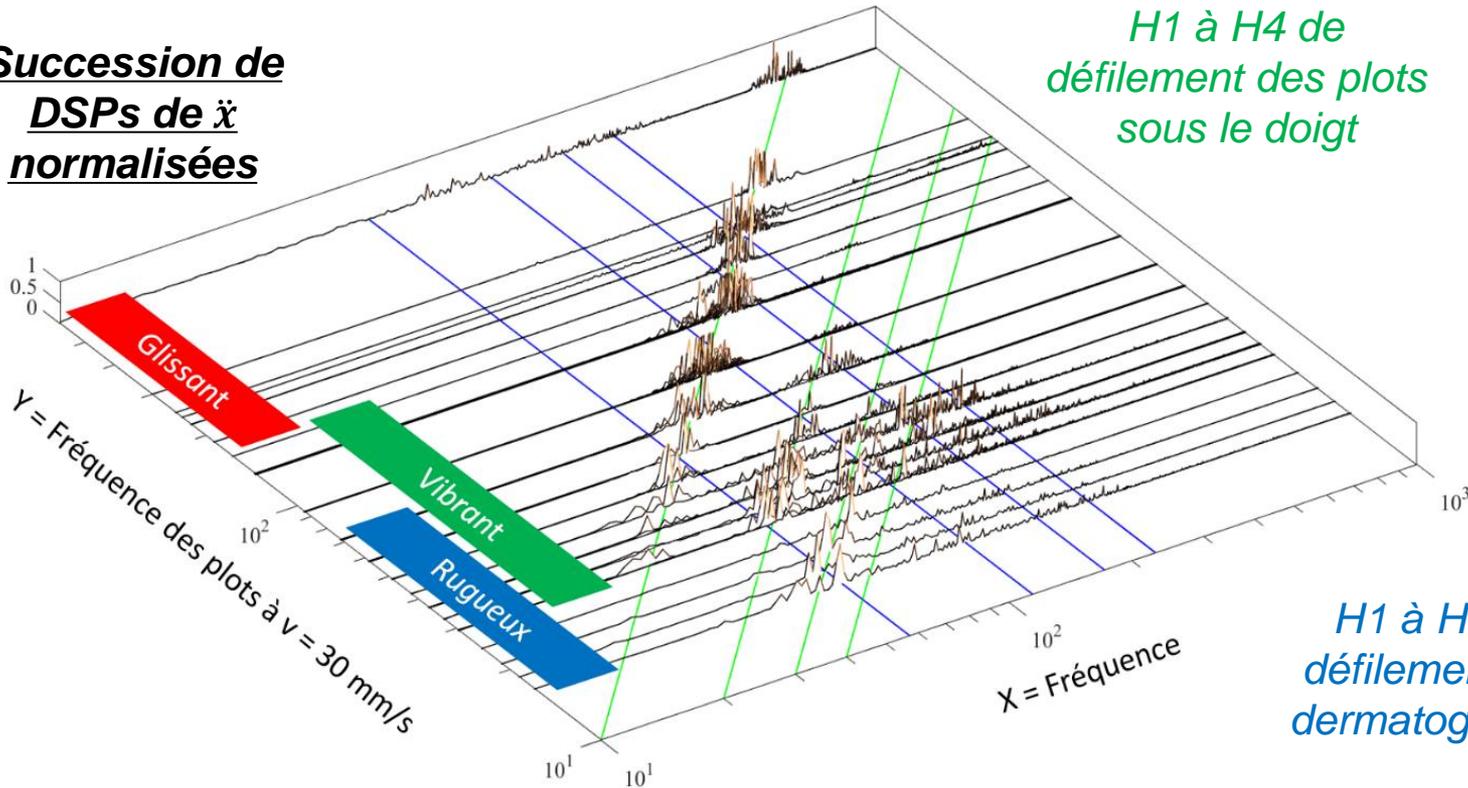
Les intensités de perception sont implicitement liées aux paramètres géométriques des surfaces (D et S_p)



Cas d'étude

- Perception tactile de surfaces microtexturées (Thèse B. Weiland)

Succession de DSPs de \ddot{x} normalisées



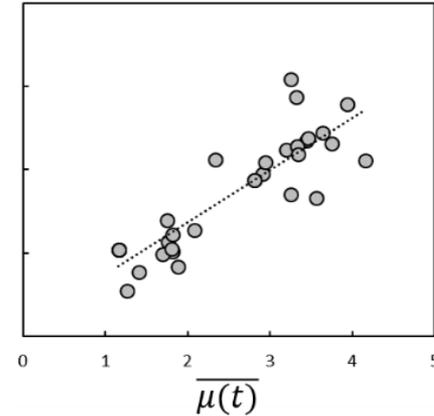
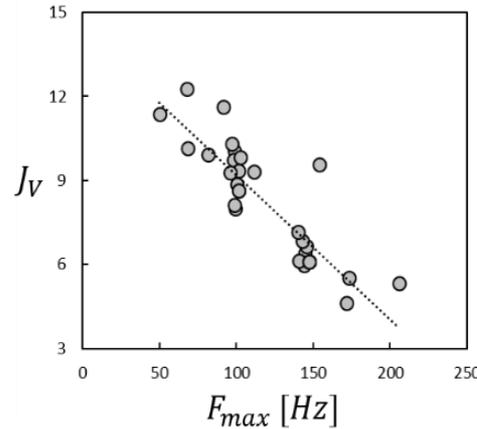
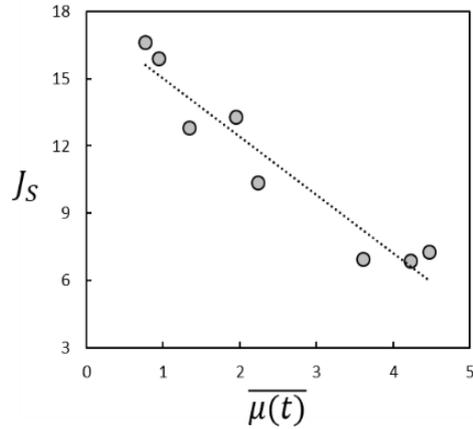
H1 à H4 de défilement des plots sous le doigt

H1 à H4 de défilement des dermatoglyphes

- La signature fréquentielle est fonction de la catégorie de perception
- Les fréquences liées au dermatoglyphes n'interviennent pas !

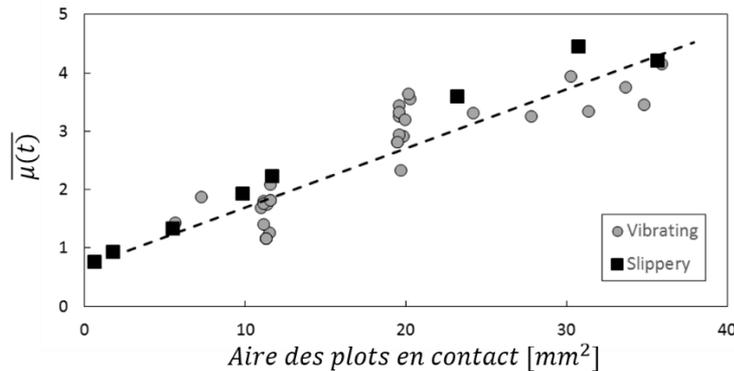
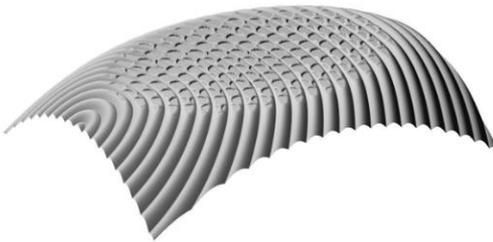
Cas d'étude

Perception tactile de surfaces microtexturées (Thèse B. Weiland)



J_S : corrélation avec μ - J_V : corrélation duale avec μ et F_{max} - J_R : pas de lien !

**Modèle
ContactPLOT**



**Surfaces vibrantes
et glissantes :
Le frottement est
purement adhésif**