

Biomimetisme de la perception tactile : des souris et des Hommes

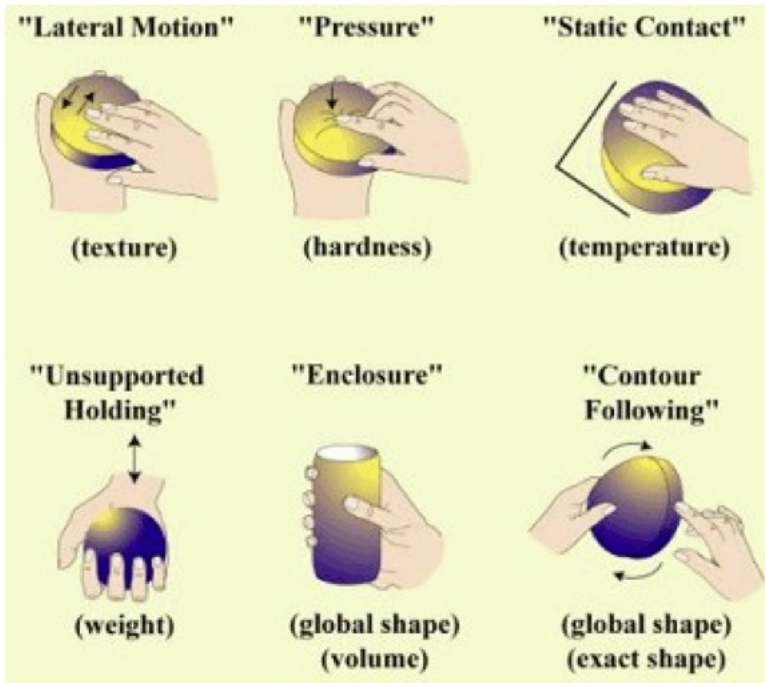


E. Wandersman

Laboratoire Jean Perrin, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Perception tactile digitale :

- Nécessite un **contact**
- Exploration **statique** ou **dynamique**



Lederman 2002

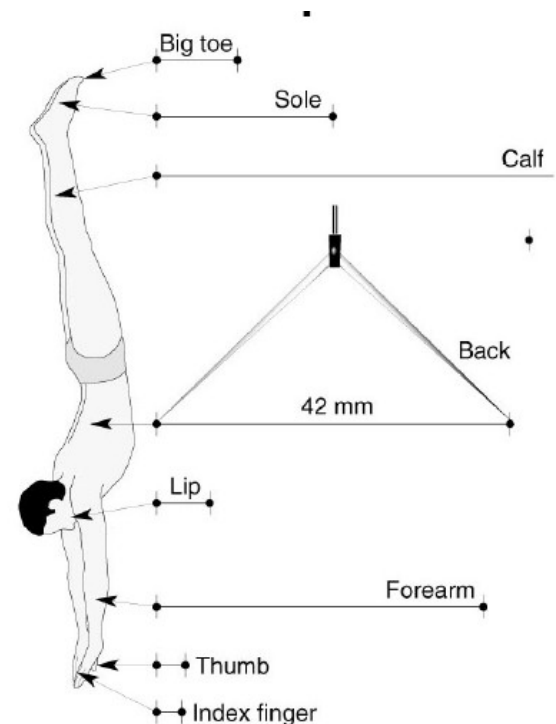
Un sens très fin ...

Intensité : ~ 50 mg (extrémité du doigt)

Spatiale : ~1 mm

Temporelle : ~5 ms

Texture : ~ 1 μ m



Perception tactile vibrissale :

- Nécessite un **contact**

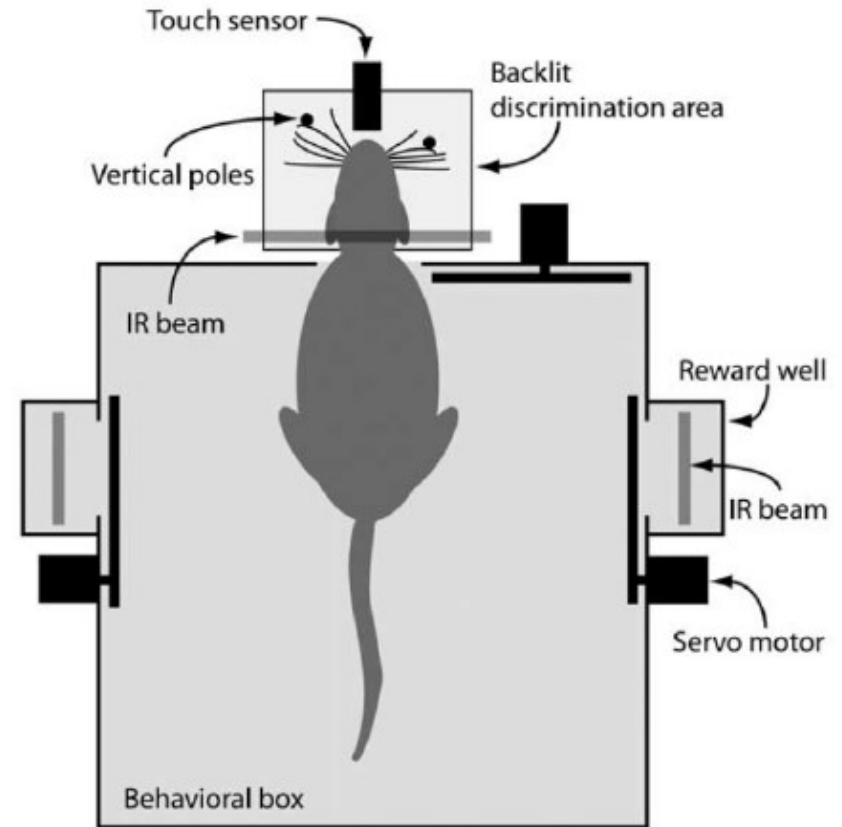
- Exploration dynamique

Passive ou **active (whisking)**

Resolution :

Spatiale : ~ 1° angulaire
~ 1 mm radial

Texture : ~ 10 μm



Ahissar, J. Neuroscience 2006

Organe Tactile

Mécanorecepteurs

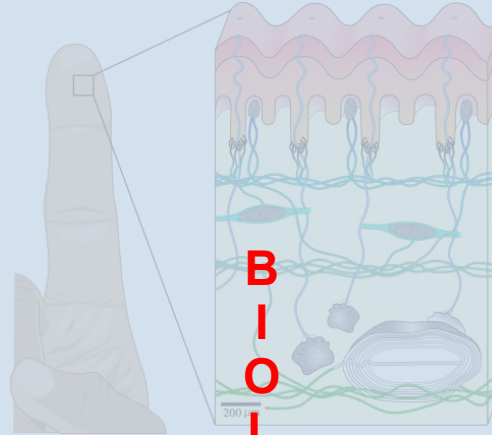
Signal Nerveux

Humains

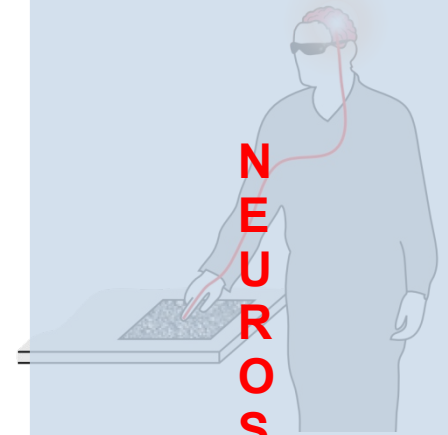


Doigt

P
H
Y
S
I
Q
U
E



B
I
O
L
O
G
I
E

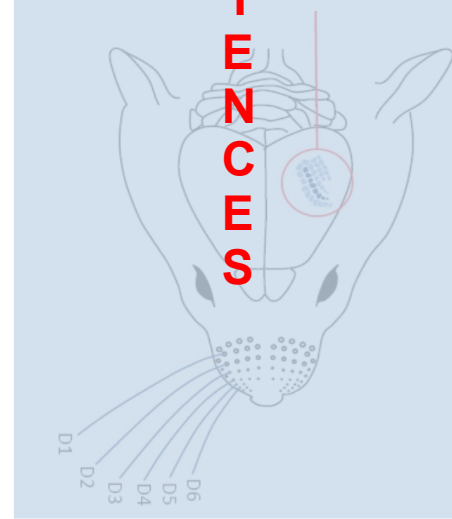
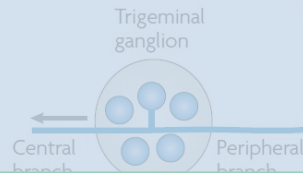
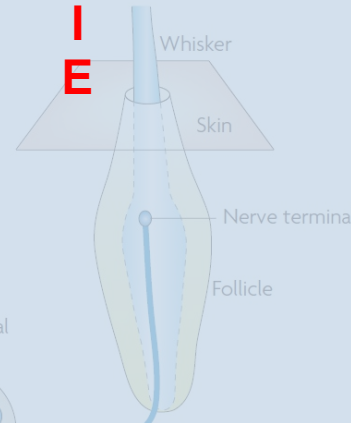


N
E
U
R
O
S
C
I
E
N
C
E
S

Rongeurs



Moustache



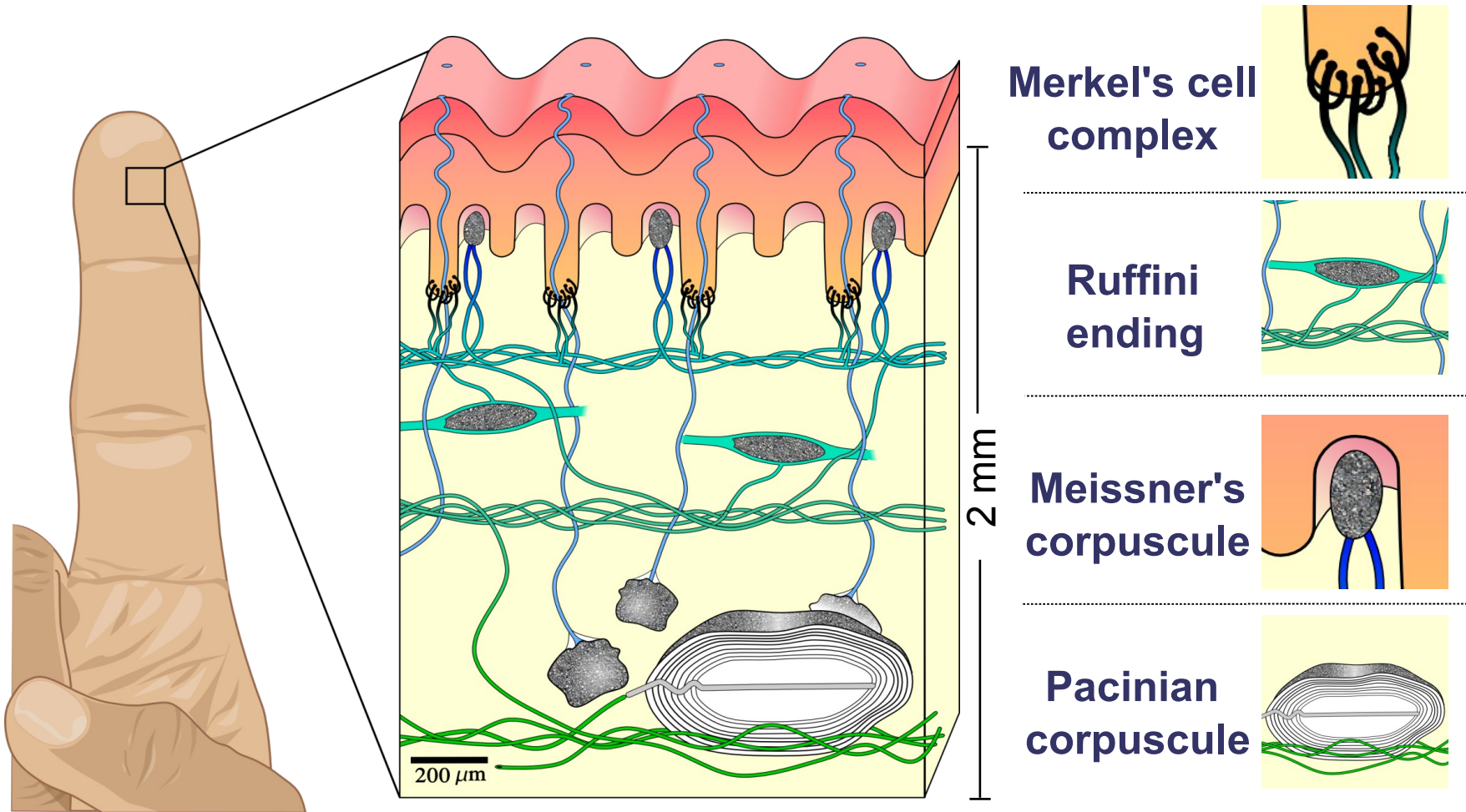
1) Les mécanorécepteurs

- Physiologie et réponses des mécanorecepteurs
- Mécano-transduction à l'échelle cellulaire
- Vers des mécanorecepteurs artificiels ?

2) L'organe tactile

- Biomécanique de la perception tactile humaine
- Biomécanique de la perception vibrissale des rongeurs

Chez l'humain



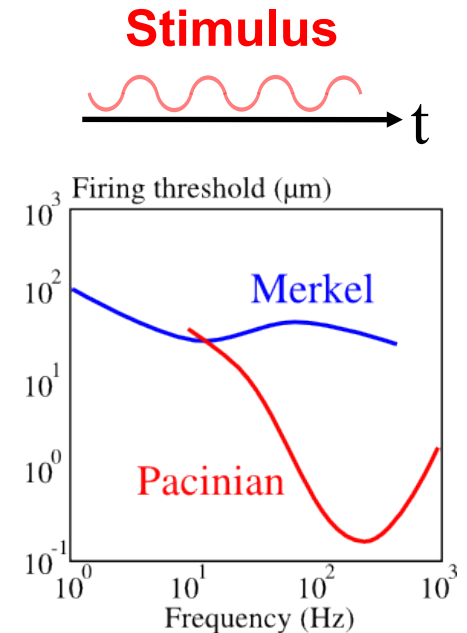
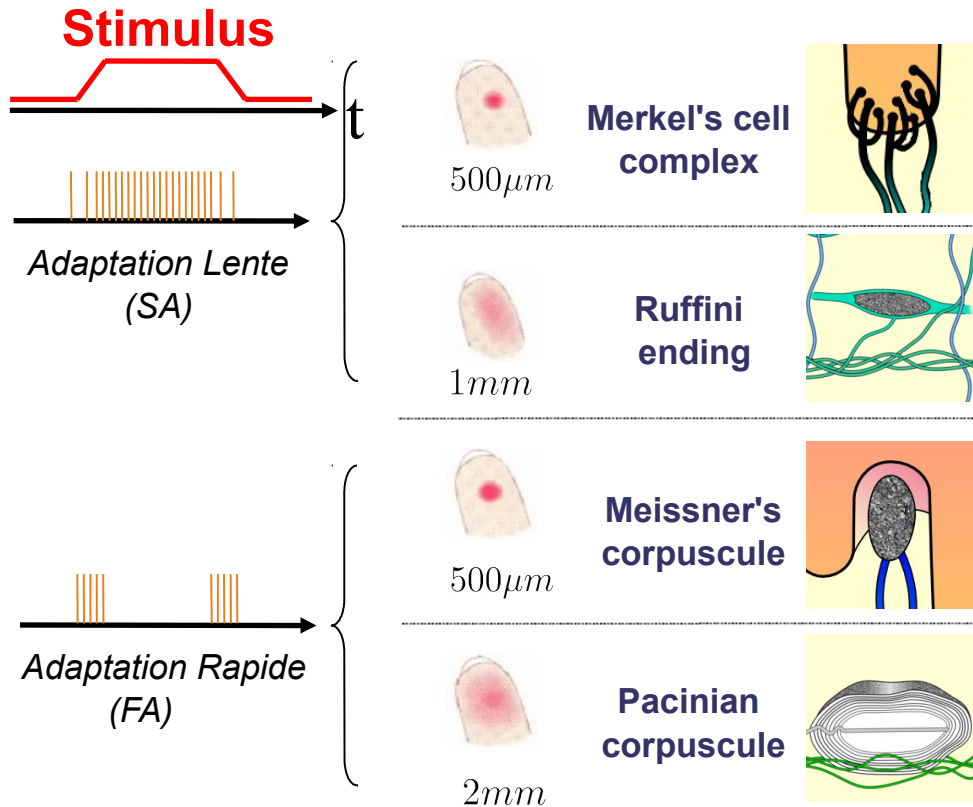
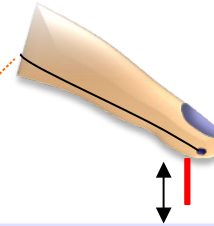
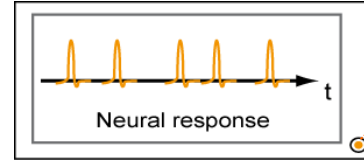
Environ 17 000 mécanorécepteurs dans la main:
différence en taille, localisation, champ récepteur, réponse

Chez l'humain

Microneurographie

Bolanowski et al., 1988

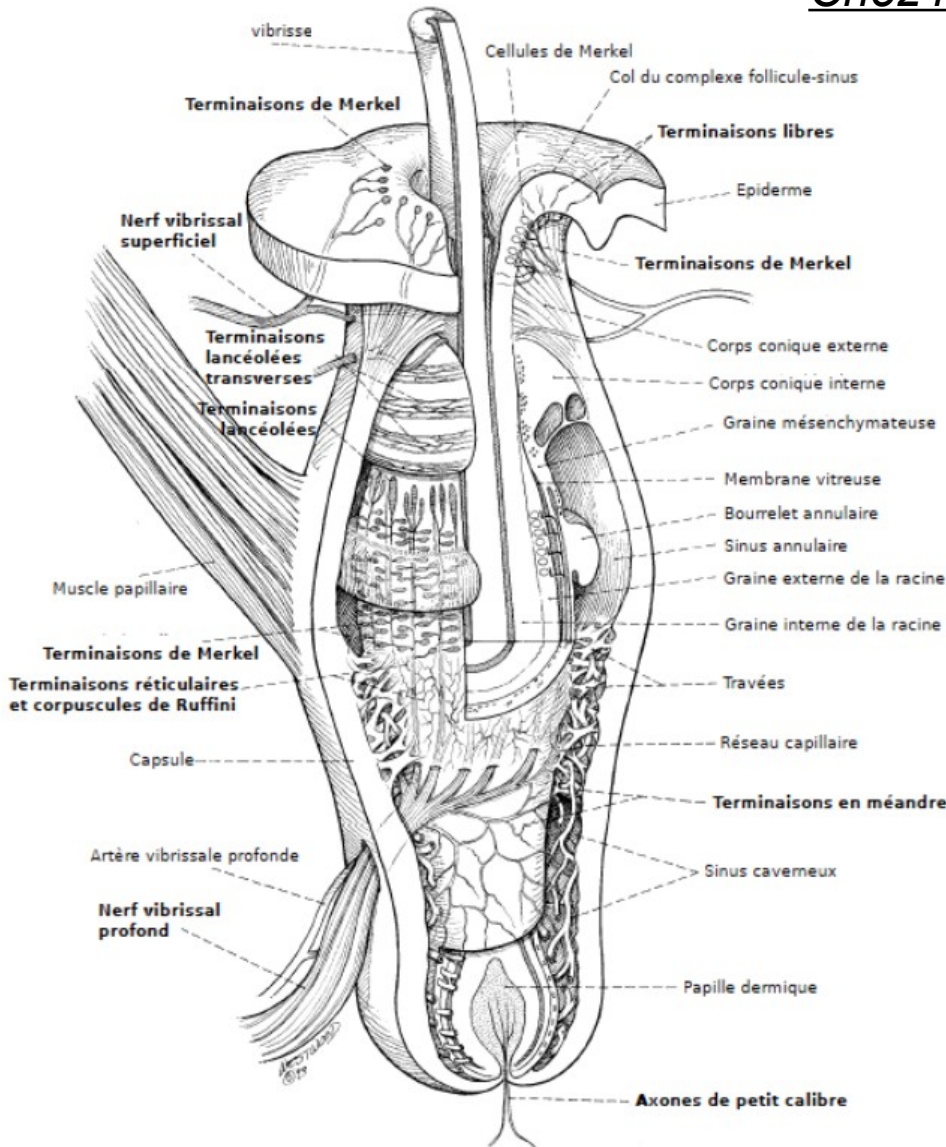
Johansson, Nature 2009



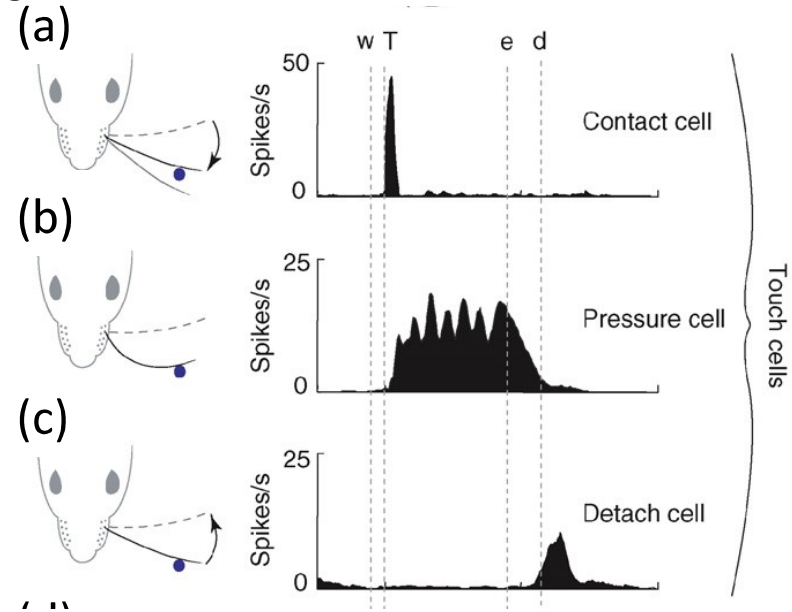
Fréquence optimale de réponse pour les Paciniens

$f \sim 200 \text{ Hz}$

Chez le rongeur



Rice et al., 1993

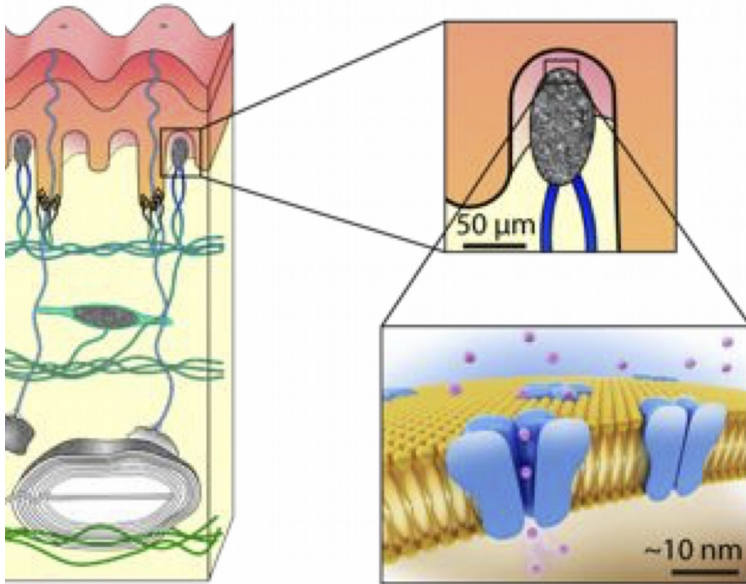


Knutsen et Ahissar, 2009

Mecanorécepteurs base de moustache
Complexe Follicule Sinus

- Mecanorecepteurs à **adaptation lente** (Merkel, Ruffini) **et rapide** (lancéolées)

Knutsen et Ahissar, *J Neurosc.* 2009
Leiser et al., *Neuron* 2007



La membrane plasmique contient des **protéines mécanosensibles**

Canaux ioniques nanométriques
Perméabilité ionique varie selon les **contraintes mécaniques appliquées**

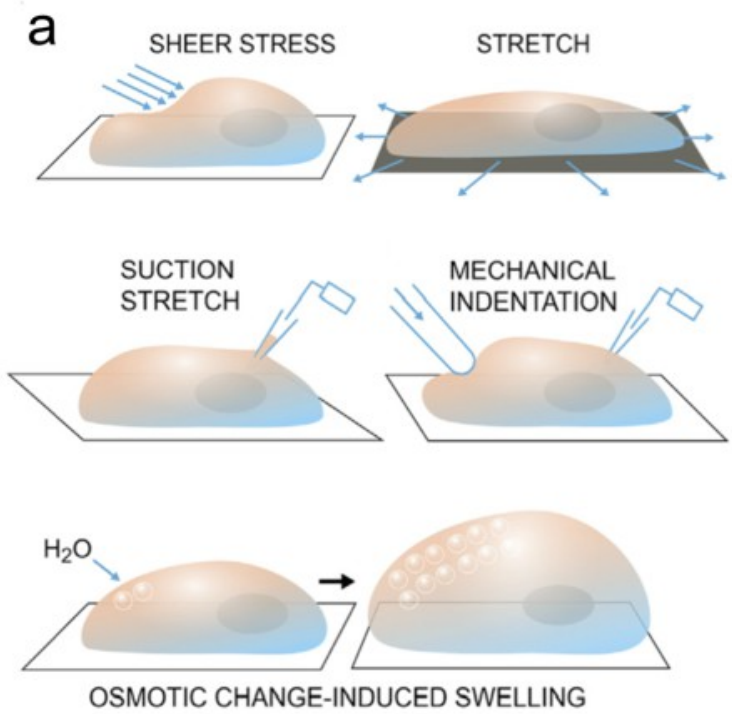
Flux d'ions → **dépolarisation** de la membrane → naissance du **potentiel d'action**

Mecanosensibilité :

Universalité, importance en biologie

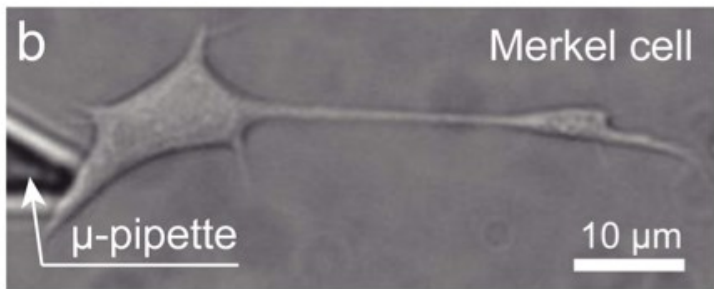
Réponse mécanique ?

Adaptation Rapide / Lente ?



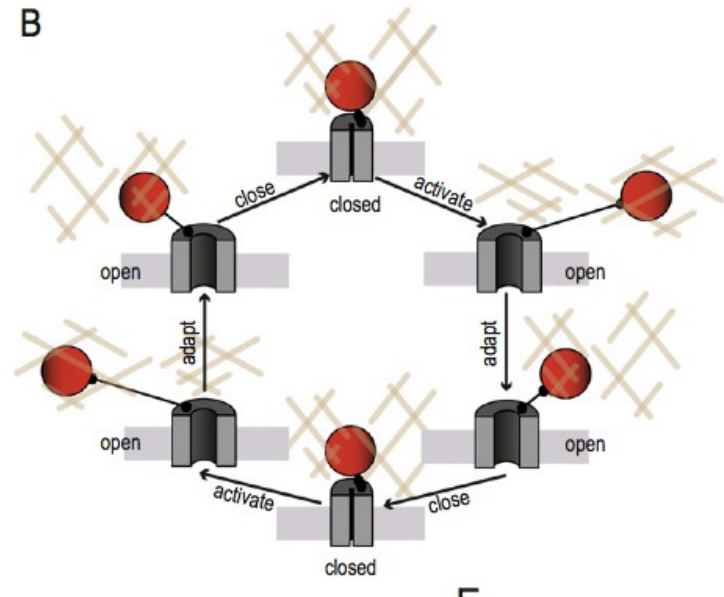
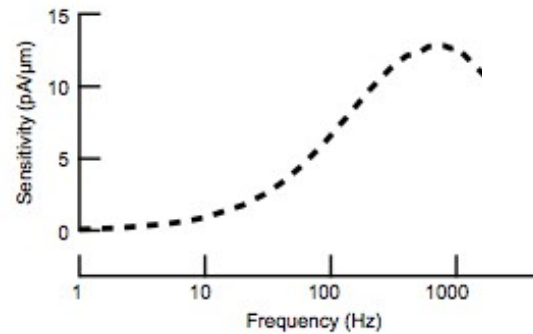
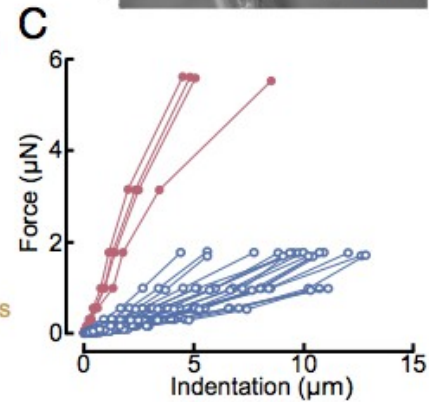
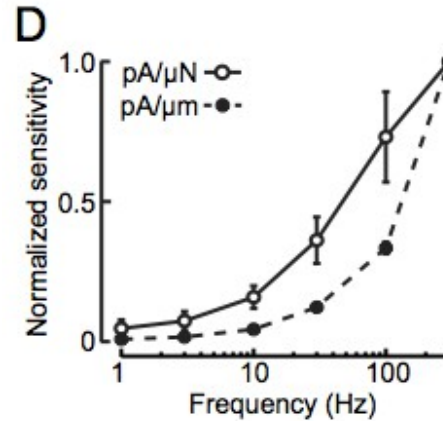
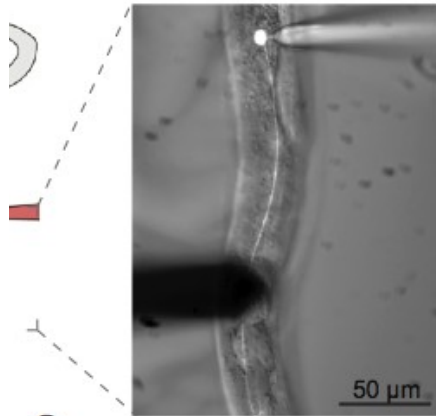
Mesure électrophysiologie
courant ioniques sous
contraintes mécaniques appliquées.

Imagerie calcique
Rapporteurs fluorescents ioniques



Complexités :
Un ou **plusieurs canaux ?**
Réponse rhéologique de la cellule

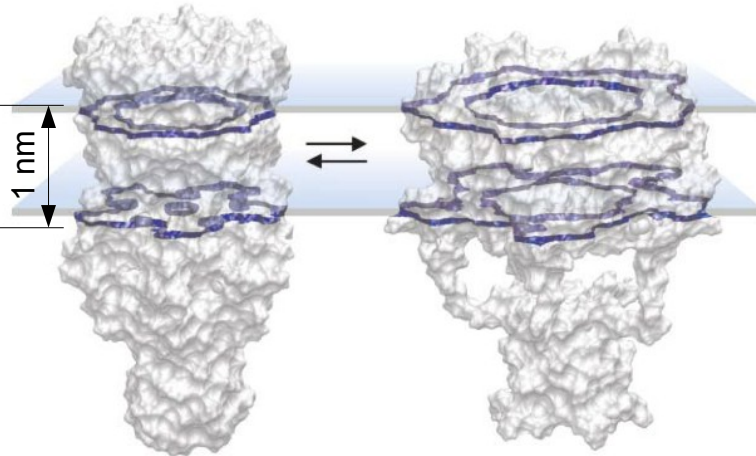
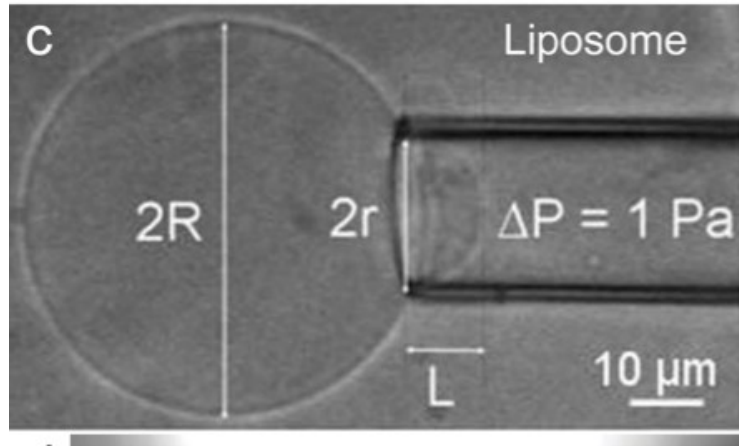
Exemple : Mesure activité d'un MR à adaptation rapide de *C-elegans*



Vergassola, PNAS 2015

La réponses des mécanorecepteurs dépend de **l'indentation pas de la force**

Réponse **accentuée à haute fréquence** et **modélisation passe-bande**



Vésicules décorées de pores MS

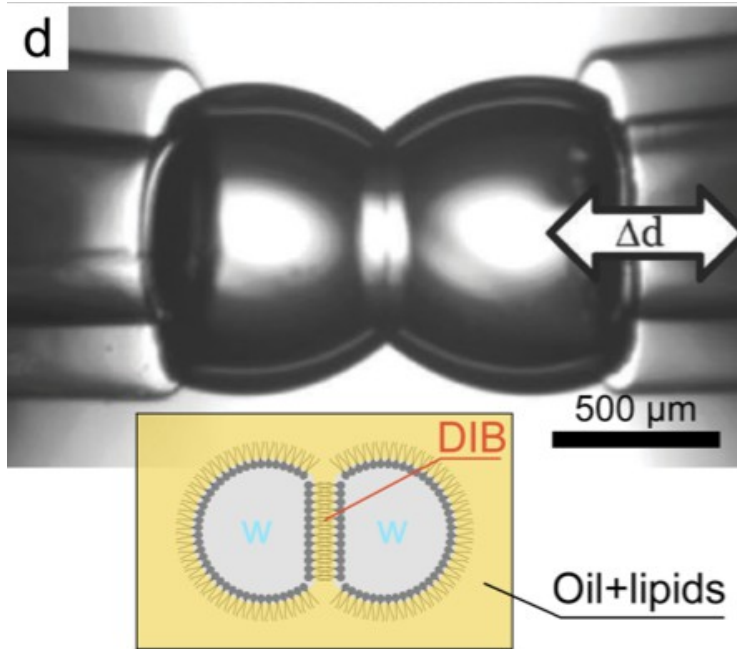
Mesure de courant sous depression
« Force on Lipid Principle »

**Estimation des forces seuils
d'ouverture (~ mN/m)**

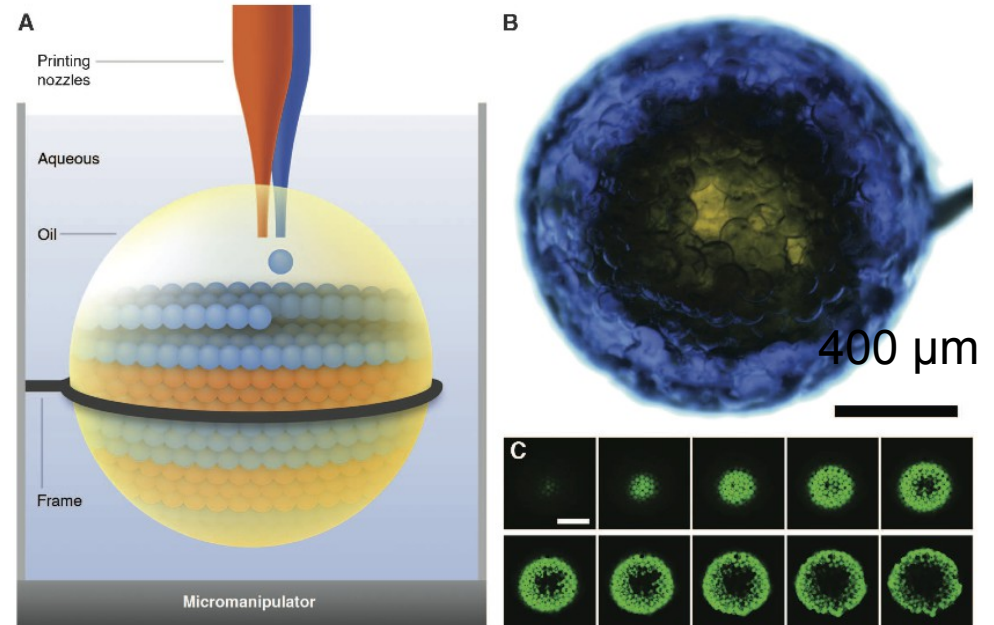
Microfluidique ? Drug delivery ?

H.Stone PNAS 2015

Leo and Sarles Sc. Report 2015



Bayley Science 2013



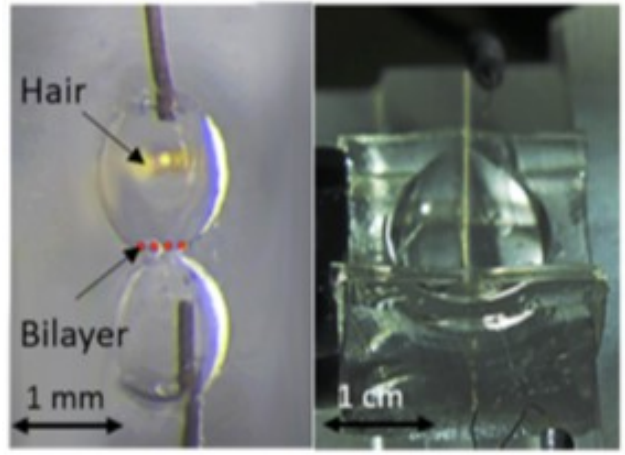
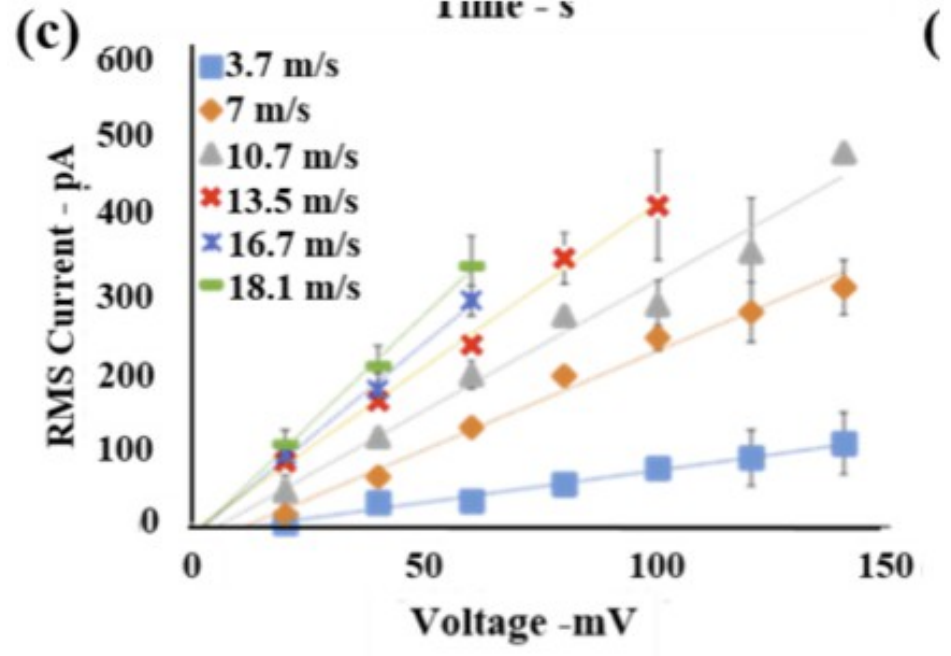
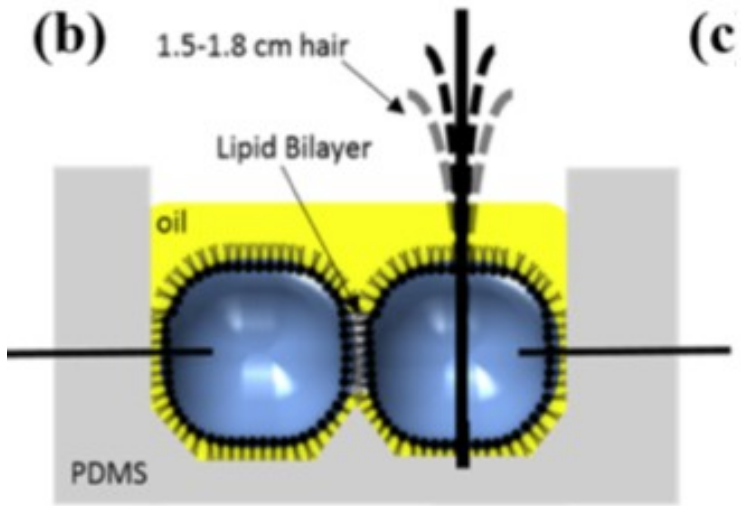
Droplet Interface bilayers

Insertion de protéine MsCL et mécanosensibilité

Impression 3D. Réseaux Mécanosensible ?

Vers des tissus artificiels ? La morphogénèse ?

Leo and Sarles Soft Matter (2011)



Capteur « poil », avec DIB

Mesure du flux d'air

Variation de la capacité électrique
De la membrane

1) Les mécanorécepteurs

- Physiologie et réponses des mécanorecepteurs
- Mécano-transduction à l'échelle cellulaire
- Vers des mécanorecepteurs artificiels ?

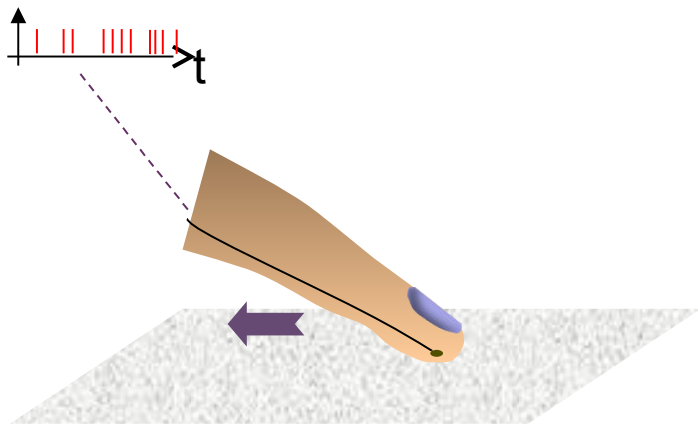
2) L'organe tactile

- Biomécanique de la perception tactile humaine
- Biomécanique de la perception vibrissale des rongeurs

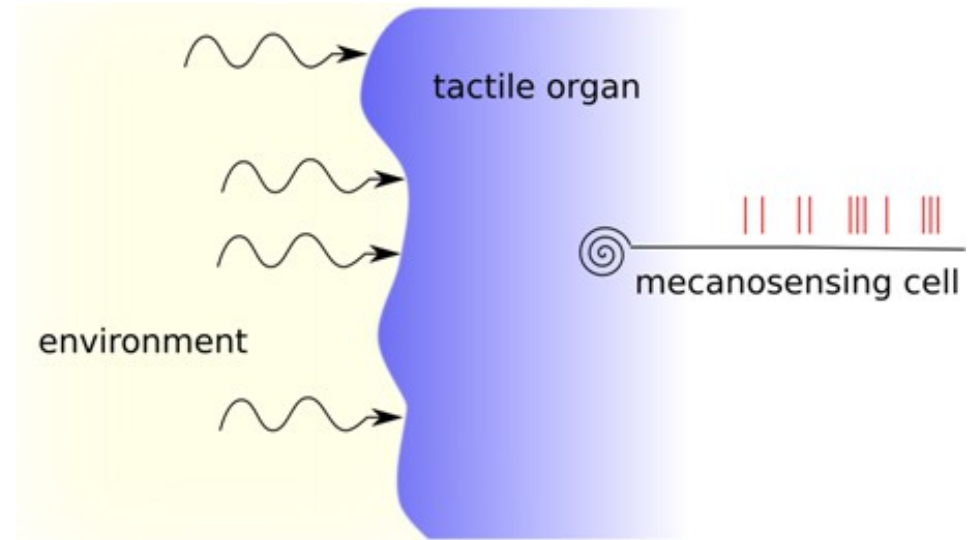
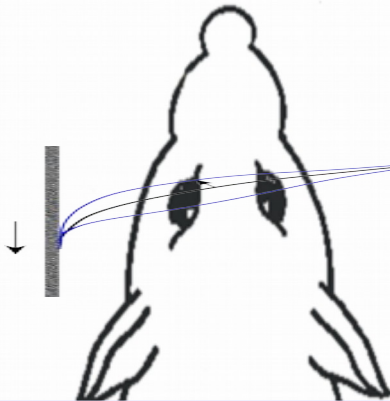
Le toucher : mécanique du contact et frottement

Perception de textures fines par le glissement du doigt

Toucher humain digital



Toucher des rongeurs



Effet des **propriétés mécaniques et géométriques de l'organe tactile** ?
Filtrage/Codage de l'information tactile ?

Fonction de transfert ?

Bensmaia Plos One (2012)

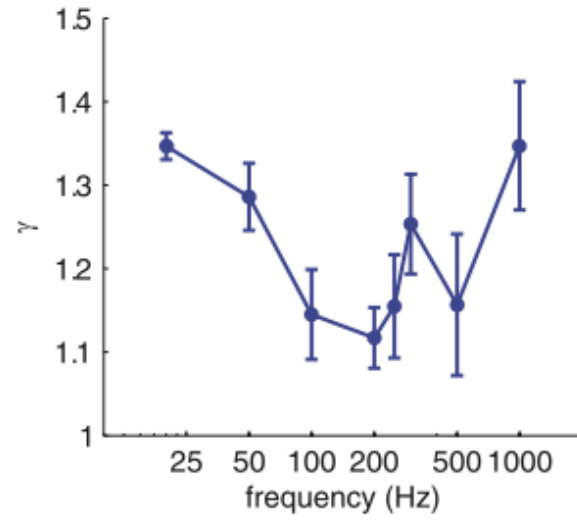
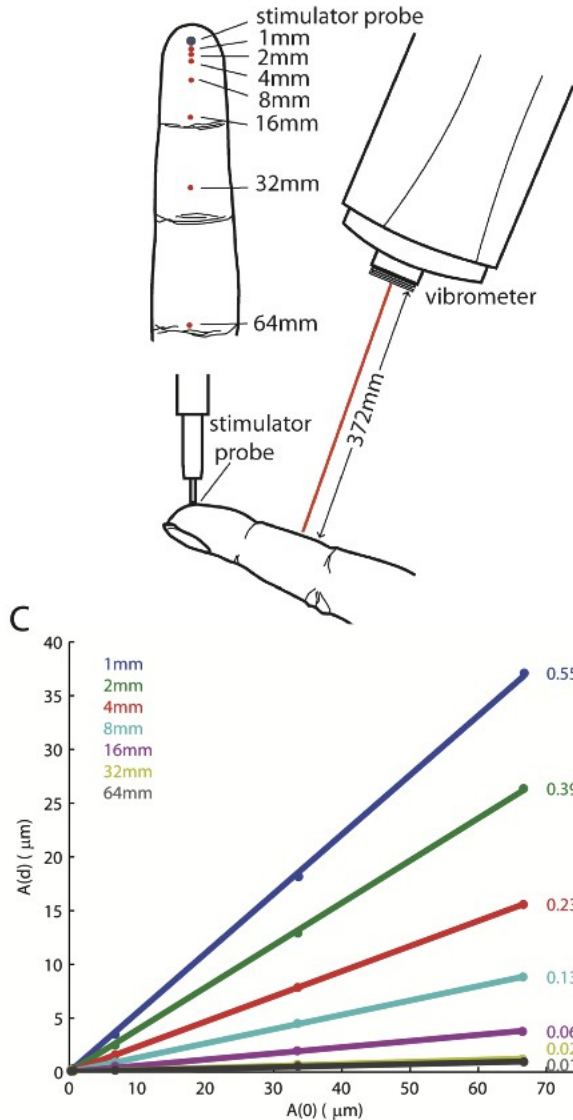


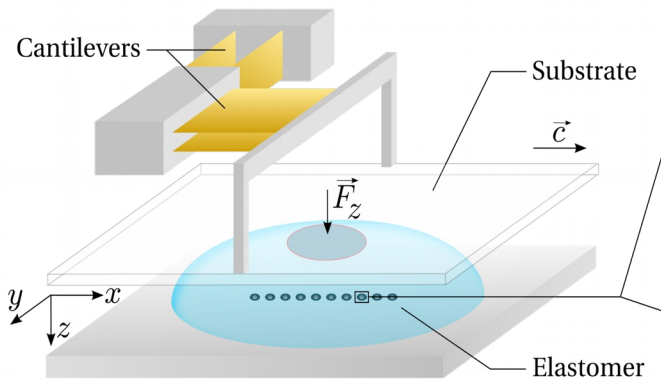
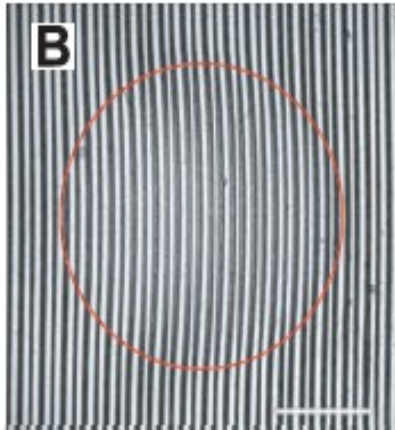
Figure 2. Decay exponent as a function of frequency across participants (error bars denote SEM). The decay exponent is lowest (and so decay is slowest) at around 200–250 Hz, at which Pacinian afferents are most sensitive.

Résonance de la peau ~ 200 Hz
Optimum des Paciniens

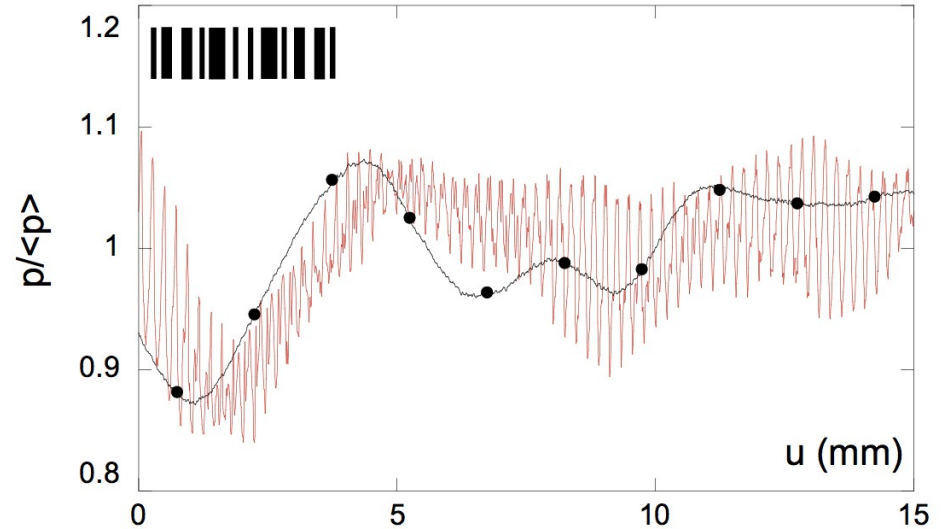
Propagation de l'information tactile

Amplification de certaines échelles spatiales

Prevost Degréas Science 2009



$P=1.71\text{N} - V=0.2\text{ mm/s}$ Smooth skin —● Fingerprinted skin —

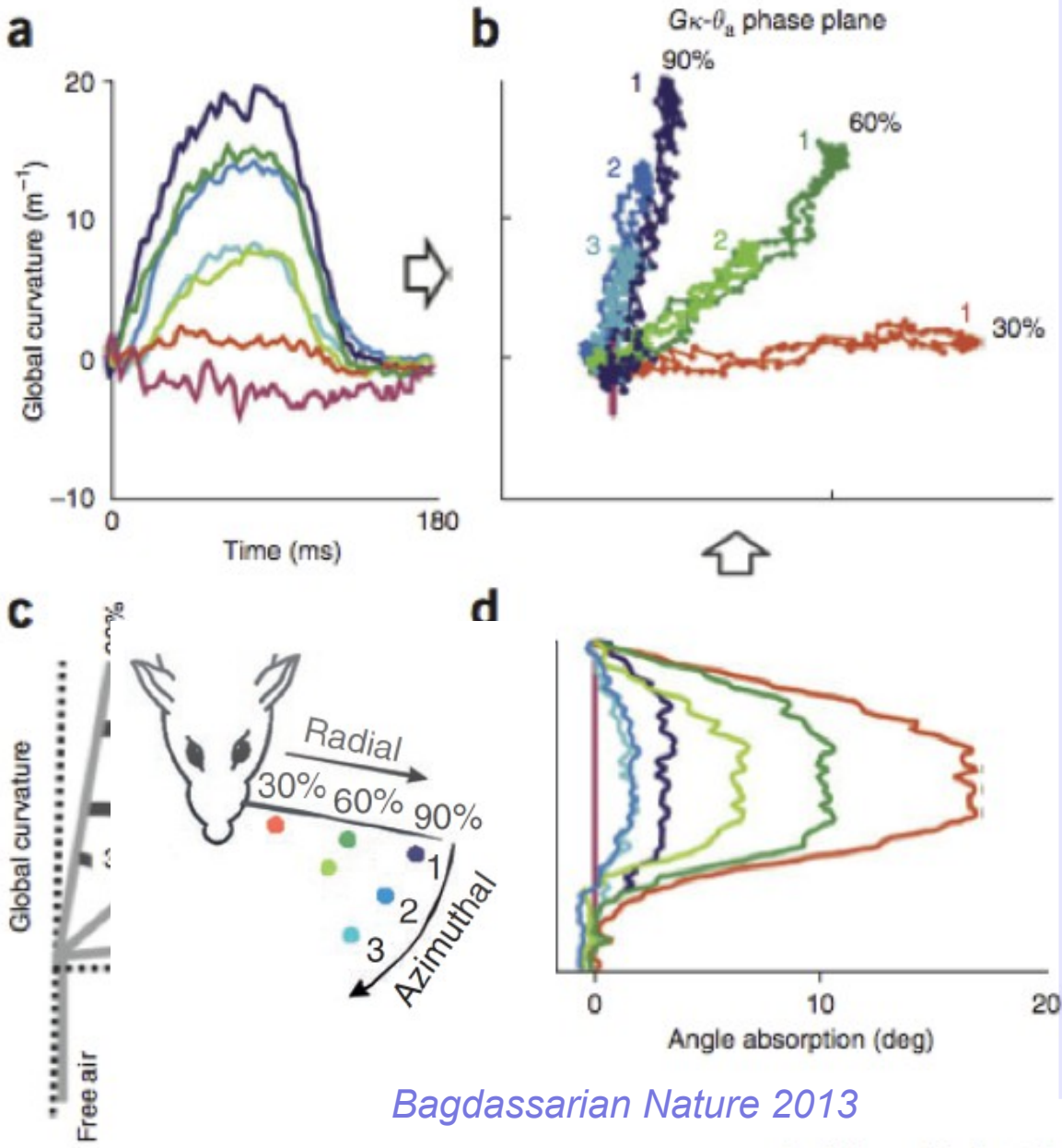


Empreintes digitales → fluctuations spatiales des contraintes au niveau du Mécanorecepteur.

Fréquence temporelle
 $V / \lambda \sim 200\text{ Hz} !$

Discrimination de texture frottement

Wandersman et al. Phys Rev Lett 2011



Bagdassarian Nature 2013

Whisking artificiel

augmentation de la courbure au cours du cycle

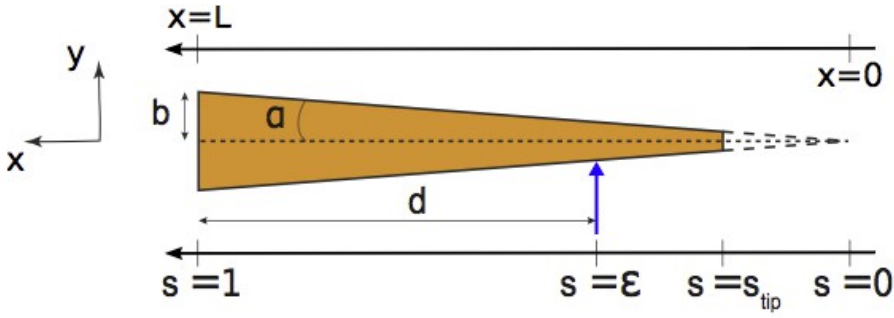
Espace des phase
 Courbure / angle de contact
 Permet de localiser radialement

Modélisation mécanique de la moustache

→ le robot rat...
 Ne fait pas peur aux enfants



Prescott



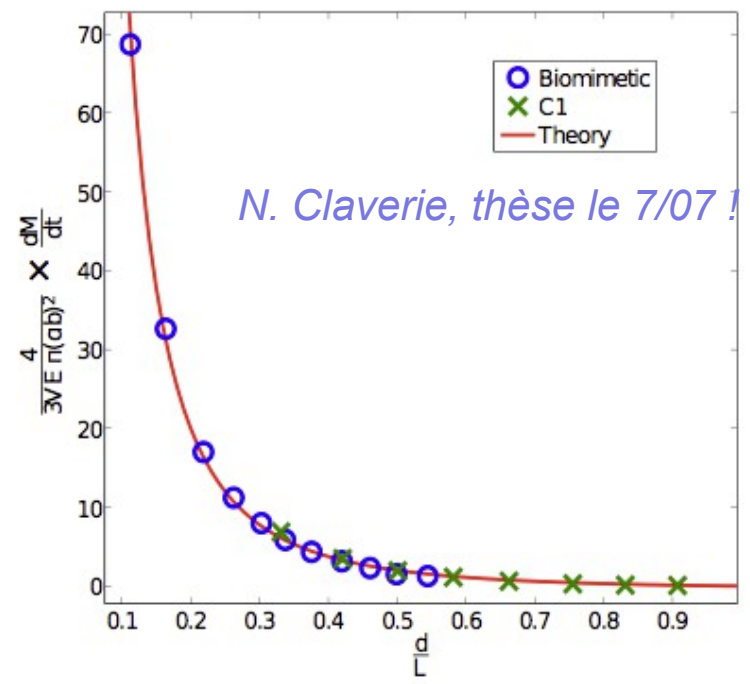
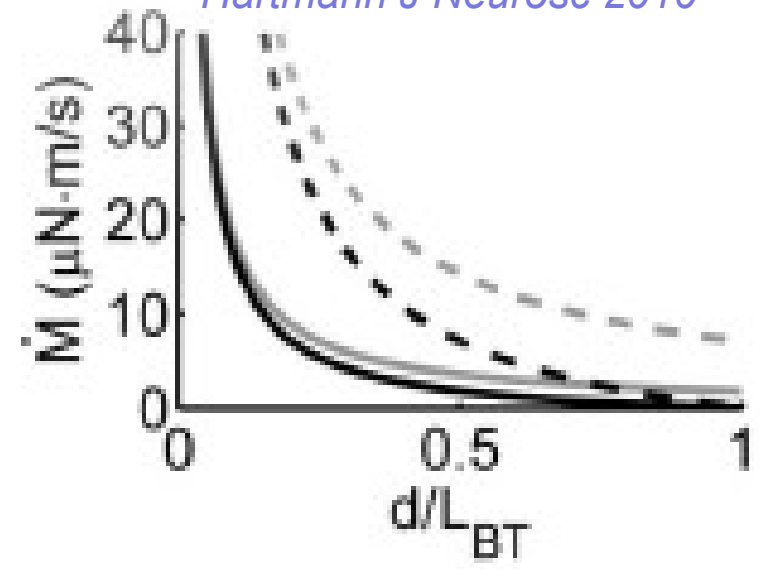
$$M(\phi) = \frac{3E\pi L^3 \alpha^4}{4} \frac{1 - \frac{d}{L}}{\frac{d}{L}} \phi$$

Vibrisse = Cone tronqué élastique

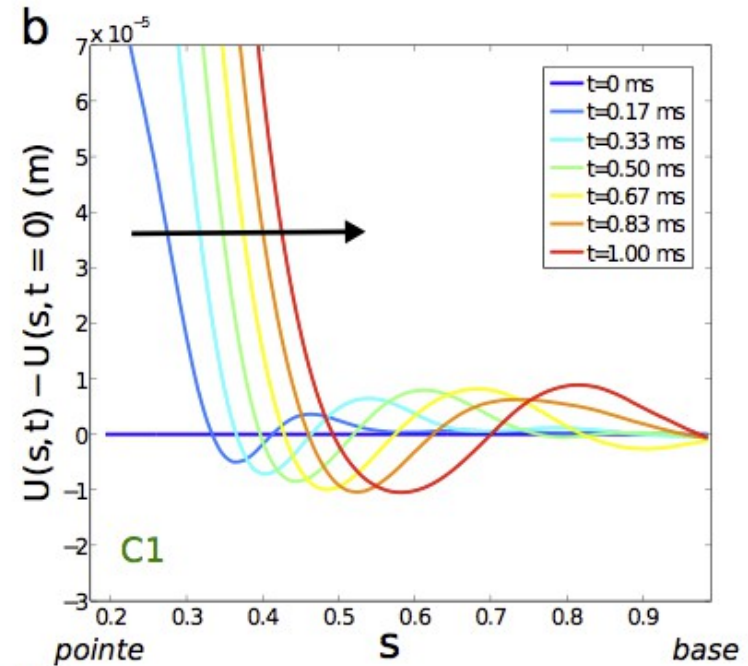
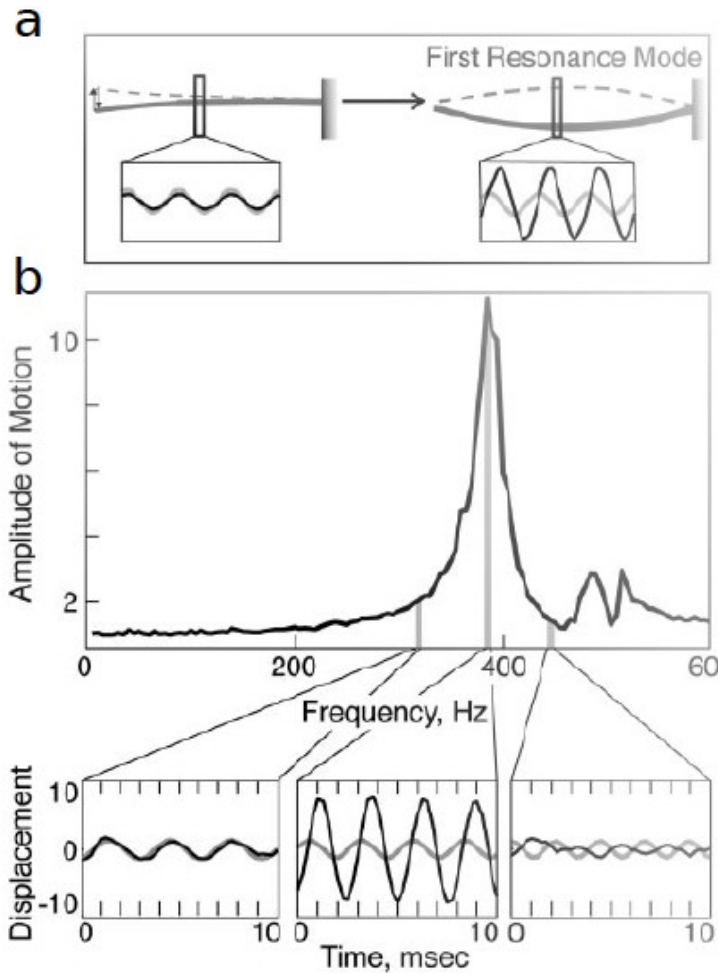
**Théorie de l'élasticité →
Moment mécanique en base
lors d'une indentation**

- effet de levier !
- localisation radiale

Hartmann J Neurosc 2010



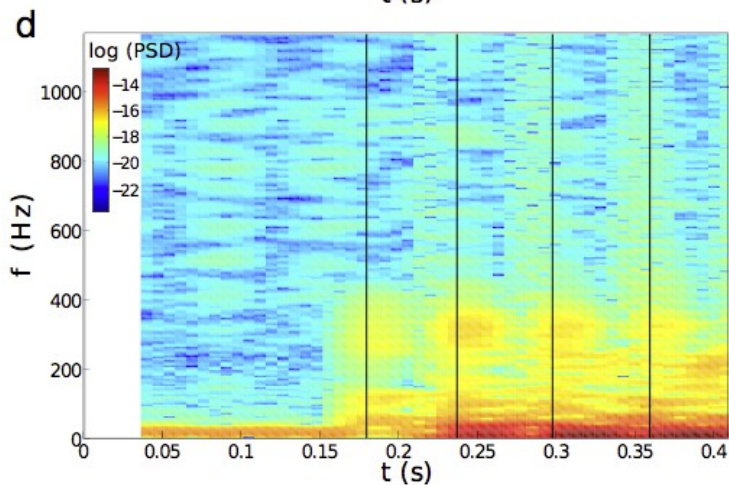
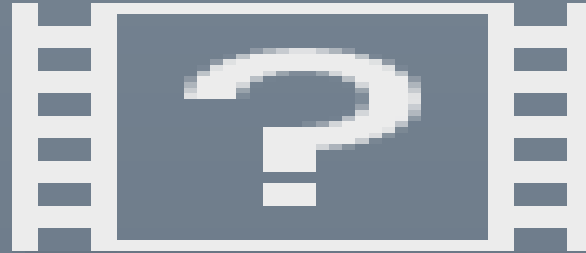
N. Claverie, thèse le 7/07 !



Moustache corps allongé
 → **Vibration ~ 200 – 500 Hz**

→ **Détection des contacts**
 Boubennec Debregeas 2012

→ **perception des textures**
 Neimark J. Neuroscience 2003



Biomimétisme du whisking

Inertie → effet cane à peche
Oscillation de moment en base
 Bruit ? Seuil ?

Contact → effet **vibratoire** et **quasi-statique**.
Meilleure détection ?

Extreme acuité tactile humain / rongeur
Repose sur des **mécanorécepteurs**
Adaptation de Type **Lente / Rapide**

Mecanosensibilité due des **canaux ioniques**
Biomimétisme pour étudier leur propriétés mécaniques
Capteurs biocompatibles / tissus mécanosensibles

Les propriétés **mécaniques de l'organe tactile**
mettent en forme l'information tactile

- Effet **quasi-statiques** (empreintes / levier conique)
- Effets **dynamiques** (résonance de la peau/moustache)