







# LA BIBLE HAPTIQUE

*La science du toucher*

Cyril BOUNAKOFF  
Université de Sherbrooke  
*Canada*

William FRIER  
University of Sussex  
*Royaume uni*

Basil DUVERNOY  
Université Pierre et Marie Curie  
*France*

Supervisé par  
Personne MON-GARS

SENSES COLLECTIONS®

3 avril 2017



Aux dauphins



# RÉSUMÉ

Ce document présente un recueil d'information lié au toucher dans son sens large. Du cerveau à la peau, de la sensation à la perception, ce document décrit tout les éléments jouant un rôle dans notre perception du monde via le sens du toucher. Il s'agit d'un document de référence nous permettant de (re)trouver rapidement des éléments importants liés à nos doctorats respectifs. Il sert aussi de rapide introduction au milieu et aux notions que l'on maîtrise pas forcément. Enfin il permet de voir rapidement où les connaissances nous viennent à manquer et où devront porter nos prochaines recherches dans la littérature.

**Mots-clés :** Haptique, Neurosciences, Système somatosensoriel





# REMERCIEMENTS

Consultez le *Protocole deails sur les remerciements*.



# TABLE DES MATIÈRES



# LISTE DES FIGURES



# LISTE DES TABLEAUX





# LEXIQUE

Ceci est un exemple de lexique (glossaire).

Terme technique	Dfinition
Actionneur	Dfinition du terme actionneur
Capteur	Dfinition du terme capteur
Rentiel	Dentiel



# LISTE DES SYMBOLES

Ceci est un exemple de liste des symboles.

Symbole	Dfinition
$[\ ]$	Dntiel inertiel
$[\ ]$	D seconde selon lentiel inertie
$a$	Acration
$m$	Masse
$t$	Variable temporelle
...	...



# LISTE DES ACRONYMES

Ceci est un exemple de liste des acronymes.

Acronyme	Dinition
OIQ	Ordre des ingeurs du Qc
UdeS	Universit de Sherbrooke
...	...



# PREMIÈRE PARTIE

Bible Haptique

Résumé des connaissances





# CHAPITRE 1

## LE SYSTÈME NERVEUX

On distingue le système nerveux central (SNC) et le système nerveux périphérique (SNP).



## CHAPITRE 2

### LA PEAU



# CHAPITRE 3

## SENS, SENSATION, PERCEPTION

### 3.1 Les sens connus de l'être humain

...9 sens chez l'homme, Aristote avait posé que l'Homme possédait 5 sens. Définition d'une sens : ...

(On devrait essayer de les présenter dans l'ordre chronologique du dev du fœtus)

#### 3.1.1 La vue

...

#### 3.1.2 L'ouïe

...

#### 3.1.3 Le toucher

Le toucher ou somatoception est le sens transmis par la peau. Il est composé de la sensation des déformations de la peau mais aussi de la température et de la douleur. Le toucher existe aussi pour les organes internes.

#### 3.1.4 L'odorat

...

#### 3.1.5 Le goût

...

#### 3.1.6 Proprioception

...

### 3.1.7 Equilibrioception

...

### 3.1.8 Nociception

...

### 3.1.9 thermoception

...

(Le sens haptique englobe-t-il thermo, nocio, proprio,...? Pt à éclaircir question de vocabulaire...)

## 3.2 Distinction entre sensation et perception

La sensation est la stimulation des récepteurs sensoriels qui produisent des potentiels d'actions que le cerveau interprètera. Une sensation se produit lorsqu'un organe sensoriel absorbe l'énergie provenant d'un stimulus physique venant de l'environnement extérieur. Les récepteurs sensoriels convertissent cette énergie physique en potentiel d'action et les transmettent au cerveau via les nerfs.

La perception c'est quand le cerveau organise les informations sensorielle et les traduit/interprète en quelque chose significatif, qui a du sens ou qui peut être rationalisé. De plus, la perception est comment quelqu'un reçoit ce sentiment ou cette pensée, et y donne sens à travers la mémoire et l'émotion. La perception est principalement « comment » le cerveau interprète une sensation. L'information est obtenue à travers la collection, réception, transmission et mécanisme de codage.

Sensation et perception se complètent l'un et l'autre pour donner du sens à notre expérience, mais restent deux complètement différents moyens de comment on interprète notre monde.

La perception est propre à chaque individu - différences intersujets, mais peut aussi varier au sein d'une même personne (i.e. des sensations identiques peuvent entraîner des perceptions différentes) - différences intrasujets. Ces différences viennent du fait que ce que nous percevons de notre environnement dépend de nos connaissances, de nos humeurs, de nos motivations, etc. Il arrive aussi qu'à certains moments, nos perceptions puissent dé-

passer les données sensorielles reçues, la perception va plus loin que la sensation. Exemple perception : un objet qu'on regarde peut nous apparaître chaud, rugueux, lourd.

### 3.3 Cross-modalité et congruence

Quand deux sensations venant d'un système sensoriel différent, arrivent au SNC, l'information est traitée comme un tout afin de donner lieu à une unique perception. On définit alors l'information provenant d'un système sensoriel comme une modalité et on dit que la perception résultante de plusieurs modalités est cross-modale.

Les informations provenant de deux modalités différentes peuvent être congruente (cohérente) et ainsi renforcer la perception. Dans le cas inverse les informations sont contradictoires et alors la perception sera biaisée vers l'une ou l'autre des modalités. Cette contradiction peut aussi donner lieu à des illusions (voir section correspondante).

### 3.4 Illusion

Illusion Haptique — <https://lejournal.cnrs.fr/articles/lillusion-tactile-une-revolution-e>

#### 3.4.1 *Fishbone illusion*

Soit une surface découpée en trois parties : côté droit, milieu, côté gauche. Si les côtés droit et gauche de la surface ont une texture plus rugueuse que le milieu, lorsque quelqu'un déplace son doigt le long de la surface, il percevra le milieu de la surface à un renforcement/creux.

#### 3.4.2 *Bump/hole illusion*

Lorsque le doigt parcourt une surface, une information kinesthésique de creux ou de bosse, sera perçue de la même manière par une même personne.

#### 3.4.3 *Cutaneous Rabbit illusion (saltation)*

Original : Une série de courts pulses délivrés successivement à trois différentes positions sur la peau sont perçus comme un seul et unique stimulus bougeant progressivement le long de la peau. Comme si un petit lapin sautillait progressivement du premier au troisième stimulateur.

Réduit : 3 stimulation à 2 location, une des stimulations sera perçu au milieu des deux locations.

Exemple d'expérience :

- Original : marche mieux avec 3-6 « tapements » et un intervalle inter-stimuli entre 20-250ms ;
- Zone : 2.28cm<sup>2</sup> sur l'index et 145.7cm<sup>2</sup> sur l'avant bras.

### 3.4.4 Illusion du peigne — *comb illusion*

Lors d'une succession de stimuli de cisaillement, un stimulus de cisaillement plus « fort » peut induire l'illusion de la présence d'un pic.

### 3.4.5 *Apparent motion (effet phi)*

L'illusion d'un déplacement continu peut être donné au travers de tapements successifs le long d'un trajet discontinu. La durée des tapements et l'intervalle inter-stimuli sont les paramètres principaux permettant la réalisation de cette expérience. Exemple d'expérience :

- Tapement durée : 25-400ms ;
- Meilleur avec tapement de 100ms et intervalle inter-stimulus de 70m ;
- Intervalle 320ms avec 3 tapements et intervalle 20ms avec 12 tapements.

### 3.4.6 Phantom-Funneling illusion

Quand de bref stimuli sont présenté simultanément à différents points proche sur la peau, ils sont souvent perçus comme un unique stimulus central plutôt qu'une sensation phasique aux différentes positions. C'est comme si le stimulus tactile était « cheminée » vers une position centrale à laquelle le stimulus était perçu plus fort qu'à la position individuelle de stimulation.

Exemple d'expérience :

- 3 stimulateurs sur l'avant bras (espacé de 30mm) à localisé dans une bande de 20mm autour du stimulateur du milieu. (robustesse : 80%) ;
- 2 stimulateurs à point “phantom” au milieu, la position peut être variée vers un stimulateur ou l'autre en faisant varié le ratio d'amplitude des stimulateurs ;



- Intensité au point « phantom » :  $A_{phantom}^2 = A_{point1}^2 + A_{point2}^2$ .

### 3.4.7 Tau effect

Le tau effect représente la dépendance temporelle de la perception des distances. Par exemple soit 3 stimuli successif sont présenté aux locations A,B et C. Si ces locations sont espacé tel que la distance AB soit 2 fois plus grande que la distance BC et que le temps entre le stimulus en A et celui en B soit deux fois plus lent qu'entre le stimulus B et C. Alors la distance AB sera perçu 4 fois plus grande que BC.

Cette illusion fonctionne aussi pour des stimuli mobile : Un stimulus rapide sera perçu comme parcourant une distance plus courte qu'un stimulus lent faisant le même parcourt.

Dans d'autre modalité, la dépendance spatial de la perception des durations (effet kappa) a été observé, mais ne semble pas existé pour le sens tactile.

Exemple d'expérience :

- 3 points illusion : Meilleur si le ratio temps est inférieur à 4 :1, marche pour des distances allant de 30 à 85mm sur l'avant bras et des intervalle de temps inter-stimuli variant de 200 à 500ms ;
- Stimulus mobile : Un stimulus rapide (2500mm/s) et un stimulus lent (10mm/s), la distance sera réduit de 50%. Ne marche pas pour des stimuli de 50-200mm/s.



# CHAPITRE 4

## SENSATION TACTILE

Ici nous présentons le chemin de l'information et détaillons les points clé dans des sections séparé.

### 4.1 Cheminement de l'information

La zone 3b est seulement à 3 synapses de la fibre sensorielle. (via le cuneate nucleus and the thalamus).

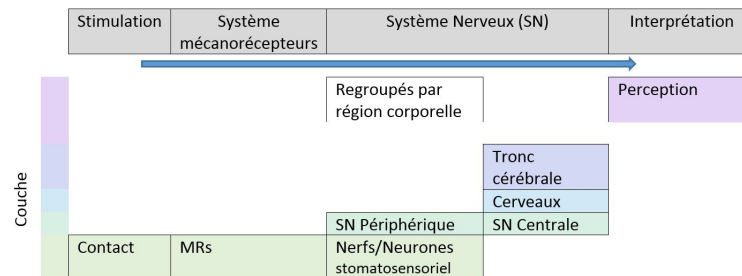


Figure 4.1 Cheminement de l'information

### 4.2 Mécanique du contact

#### 4.2.1 Définition des termes

**Force :** Dans la mécanique du point, une force est représenté par une direction (vecteur) et une amplitude (scalaire). Dans la mécanique du solide, le concept est étendu à une matrice 3x3 où chaque ligne représente les forces soumises sur les faces du cube élémentaire. On parle alors de tenseur de force. Les éléments sur la diagonale du tenseur sont appelés les efforts normaux, et les autres les efforts tangentiels. Dans certain cas, une matrice du moment peut être définie pour décrire les forces de rotations.

**Déformation :** La différence de géométrie entre l'état l'initiale et l'état qui suit l'exercions du tenseur de force peut être définie avec un tenseur de déformation.

**Élasticité :** Décrit la capacité d'un matériau de résister une force qui lui est appliqué. Exprimé avec le coefficient de Young.

Viscosité : Décrit la composante temporelle qui lie application d'une force et déformation.

Compressibilité : Décrit la capacité d'un matériau à se comprimer. Exprimé avec le coefficient de poisson.

...Distinction entre force normale, pression ; glissement, effort tangentiel ; contraint, effort ; tenseur de déformation...

...Distinction entre force et pression

### **4.2.2 Contact statique**

Loi de hooke : Relie les deux grandeurs force et déformation

Contact Hertzien : Décrit les déformations

### **4.2.3 Contact dynamique**

...

### **4.2.4 Déformation local**

...

### **4.2.5 Déformation distante – Propagation des ondes**

Lors d'un stimulus tactile, des ondes se propagent à la surface de la peau, dans les couches inférieures de la peau et dans les organes. De ce fait les MRs distant du point de contact sont aussi stimulés par le contact. En plus de MRs cutanées, les MRs au niveau des muscles, tendons et articulation sont aussi stimulés. Il a été mis en évidence, que selon l'interaction tactile, le motif de propagation d'ondes sera différent. Ce qui alimentent l'hypothèse que ces ondes sont pris en compte lors de l'interprétation d'un stimulus. Par exemple, lors d'un toucher d'exploration, la texture de la surface va créer un motif d'ondes particulier qui se fera sentir jusqu'au poignet, où des PC récepteurs pourront encoder la texture et ainsi permettre l'identification de la texture parcourue.

Qu'est ce qui est pondérant, la propagation de la vibration : dans la peau, dans les os, dans les tendons ?

## 4.3 Mécano-transduction

Sous la stimulation, les mécanorécepteurs émettent des potentiels d'action le long des nerfs afférents et en direction du CNS. Le procédé par lequel une excitation sensorielle (ici mécanique) donne lieu à un potentiel d'action est nommé mécano-transduction. Ce procédé a fait l'objet de différentes études et a été modélisé.

Chaque mécanorécepteur encode la déformation mécanique en un potentiel d'action d'une manière différente. Il est à noter aussi que chaque mécanorécepteur semble sensible à différents types de stimuli (voir correspondant sous-partie).

### 4.3.1 PC

...

### 4.3.2 RA

...

### 4.3.3 SAI

...

### 4.3.4 SAII

...

### 4.3.5 Fibre de type C

...

### 4.3.6 Exemple de modélisation

...

## 4.4 Séquence de potentiel d'action (spike train)

Les mécanorécepteurs produisent une séquence de potentiel d'action dont l'amplitude et la fréquence est propre à la caractéristique de la sensation. La séquence de potentiel d'action peut alors être interprétée comme l'encodage de la sensation.

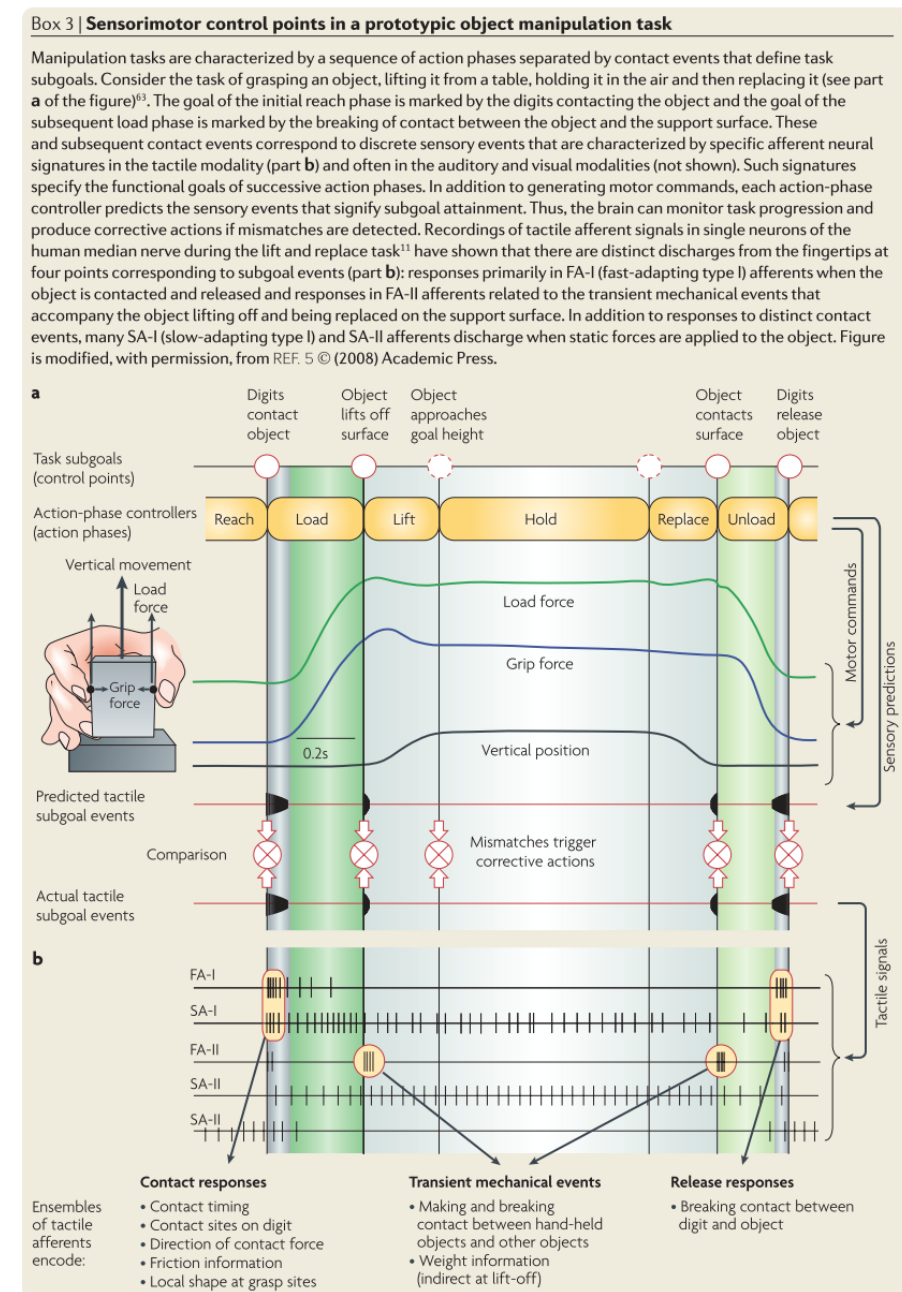


Figure 4.2 Exemple de séquence de potentiels d'action lors d'une tâche de manipulation



**TABLE 1**  
Sensory Resolution and Weber Fractions  
for a Range of Tactile and Haptic Stimuli

STIMULUS DIMENSION	RESOLUTION	WEBER FRACTION (%)
Surface texture (roughness)	0.06 $\mu\text{m}$ <sup>[21]</sup>	5-12% <sup>[22] [23]</sup>
Curvature	9 $\mu\text{m}$ <sup>[24]</sup>	10% <sup>[25]</sup>
Temperature	0.02-0.09°C <sup>[26]</sup>	0.5-2% <sup>[27]</sup>
Skin indentation	11.2 $\mu\text{m}$ <sup>[28]</sup>	14% <sup>[29]</sup>
Velocity of tactile stimuli		20-25% <sup>[30]</sup>
Vibrotactile frequency (5-200 Hz)	0.3 Hz <sup>[31]</sup>	3-30% <sup>[31] [32] [33]</sup>
Vibrotactile amplitude (20-300 Hz)	0.03 $\mu\text{m}$ <sup>[34]</sup>	13-16% <sup>[35] [36]</sup>
Pressure	5 gm/mm <sup>2</sup> <sup>[4]</sup>	4-16% <sup>[37]</sup>
Force	19 mN <sup>[38]</sup>	7% <sup>[39] [40]</sup>
Tangential force		16% <sup>[41]</sup>
Stiffness/compliance		15-22% <sup>[14] [42] [43]</sup>
Viscosity		19-29% <sup>[44] [45]</sup>
Friction		10-27% <sup>[46] [47]</sup>
Electric current	0.75 mA <sup>[48]</sup>	3% <sup>[49]</sup>
Moment of inertia		10-113% <sup>[50] [51]</sup>

#### 4.5.1 Seuil de perception – *Threshold*

...

#### 4.5.2 Seuil de discrimination – *JND*

...

##### Seuil de discrimination spatiale

La méthode du seuil de discrimination spatiale consiste à déterminer la distance minimale qu'un sujet (les yeux fermés) n'arrive plus à distinguer les deux pointes qui lui appliqué sur la peau. En fonction des différentes partie du corps, le seuil – entre ressentir les deux pointes et le passage ou le sujet ne pense qu'il n'y en a plus qu'une. Zones plus sensible de que d'autre. Les MRs ne sont pas réparti de la façon sur le corps, la densité est différente.

Les parties les plus sensibles sont les mains, le visage et les doigts de pieds.



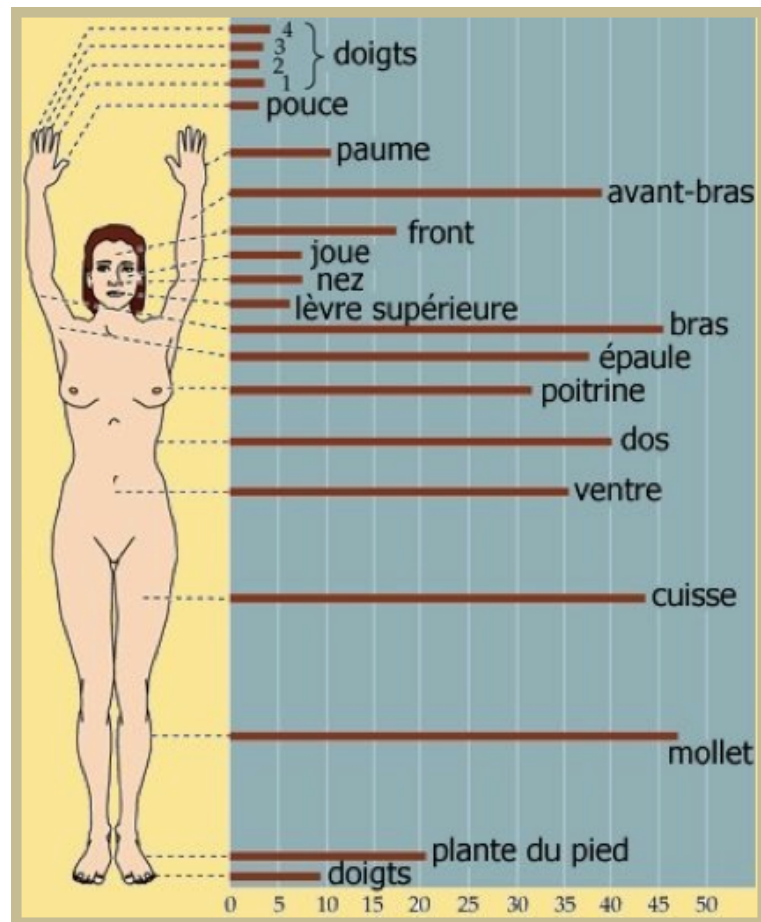


Figure 4.3 Tests des deux points

### 4.5.3 Méthode de mesures psychophysique

...

Méthode classique

...

Théorie de la détection du signal

...



# CHAPITRE 5

## PERCEPTION TACTILE

Sens du toucher : (déf) système qui peut mesurer une propriété donnée d'un objet ou d'un phénomène, au travers d'un contact physique entre le système et l'objet. [Lederman SJ. Tactual Perception]

Le sens du toucher pour certains animaux est primordial. Les araignées sont très sensibles au toucher mais ne voient pas la lumière, l'obscurité et les formes basiques [Barth'2016. ...]. Les araignées apprennent plus sur leur environnement en ressentant les vibrations qu'en utilisant leurs yeux. Elles arrivent à faire la distinction en les différentes vibrations (insert dans la toile, vent qui souffle, autre araignées sur la toile, ...).

Diap presentation

Le sens du toucher chez les mammifères et humains :

...Les Mammifères [...]

...Le premier sens développé chez le fœtu – au bout de 7 semaines, haptonomie -

Sens de nature complexe et non intuitive. Ce n'est pas une simple transduction d'une propriété physique en un signal électrique. Elle peut prendre plusieurs formes de la détection d'une texture, d'une forme, d'une blessure, d'un échange et autre. Les dernières avancées dans le domaine de l'haptique, des neurosciences cognitives et psychologiques.

Par rapport au sens de l'ouïe ou de la vue, le toucher reste encore une quantité définie. Dans les prochains paragraphes, un état de l'art sur la mécanique de la peau, les systèmes mécanorécepteurs de la peau jusqu'au système somatosensoriel va être établi à partir des dernières études faites en haptique.

### 5.1 Procédure d'exploration

Pour satisfaire ces besoins la peau doit être capable distinguer et faire émerger différentes propriétés. Pour ce faire. La main interagit avec un objet/surface selon plusieurs méthodes. Ces méthodes recensés dans une étude de Lederman et Klatzky sont nommés « exploratory procedure » or EP for short (Lederman & Klatzky 1987) :

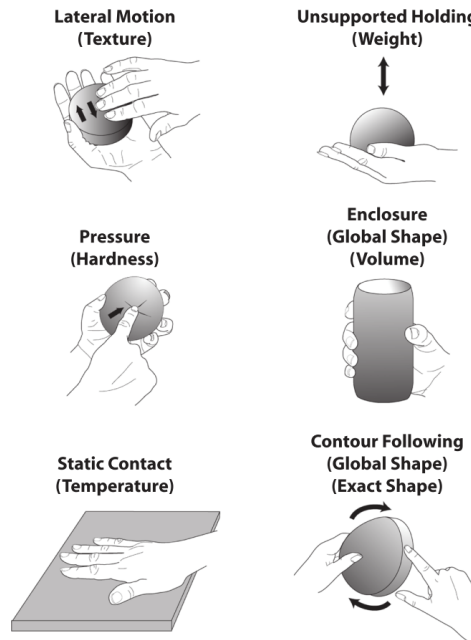


Figure 6. Depictions of six manual “exploratory procedures” and their associated object properties (in parentheses). From “Hand Movements: A Window Into Haptic Object Recognition,” by S. J. Lederman and R. L. Klatzky, 1987, *Cognitive Psychology*, 19, p. 346. Copyright 1987 by Elsevier. Reprinted with permission.

Figure 5.1 Procédure d’exploration []

## 5.2 Dimension du toucher

Les EP, vu précédemment, servent notamment à renseigner sur la nature de l’objet/surface manipuler, qui sont caractérisé par les grandeurs physique et psychophysique suivante (Okamoto et al. 2013) :

- Texture ;
  - Rugueux/lisse ;
    - Macro-échelle (coarse) ;
    - Micro -échelle (fine) ;
- Dur/mou ;
- Friction ;
  - Humide/sec ;
  - Glissant/collant ;
- Température : Chaud/Froid ;

- Forme : global/exact ;
- Poids.

La texture regroupe plusieurs dimension et non seulement des information de rugosité. (voir liste au dessus).

Dualité de la perception de la rugosité : La rugosité d'une surface est perçu à deux échelles : Une macro-échelle, de l'ordre du millimetre et une micro-echelle de l'ordre du micrometre (voire nanometre). Cette difference d'échelle s'explique par les mecanisme du toucher qui encode la rugosité. La macro echelle vient du fait que les MR SA1 encode les informations de rugosité localement, là où peau et surface font contact. De ce fait, les limite de perceptions dépendent de l'acuité spatiale du sens du toucher. (threshold autour de 1mm). La micro-echelle dépend des MR PC qui encode les vibration créent par le doigt parcourant la surface. Ces vibrations se propagent dans tout le doigt, la paume des mains et vont même jusqu'au poignet. Des détails aussi fin que de qq centaine de nanomètre peuvent induire de telle vibration.

... Les parties les plus sensibles de notre corps humain sont les parties telles que : la figure, l'arrière de la nuque, les mains, le haut du bras, le torse, entre les jambes et la plante des pieds.

Et les changements d'état de celui-ci, glissement d'un objet, caresse,...

Le système somatosensoriel traite les données spatiotemporelles provenant des mécanorécepteurs [glissement, vibration], thermorécepteur [température] et nocicepteur [blessure] compris dans la peau.

## 5.3 Taux de transfert d'information tactile

...

## 5.4 Types de toucher

Outre tous les caractéristiques biologiques de la peau et les informations qu'il est possible d'en retirer quant à son importance dans la sensation d'une surface/d'un objet (i.e. : la souplesse/dureté de la surface de contact, sa température, sa texture, sa forme, etc.), il est intéressant de noter que notre perception se découpent en différents types de toucher,

aux caractéristique différentes (exemple : récepteur stimulé). En tout on peut distinguer jusque quatre type de toucher : de manipulation, d'exploration, communicatif et protectif.

### **5.4.1 Toucher de manipulation**

Type de peau : glabre

Le toucher de manipulation est spécifique à la peau glabre est aussi celui qui a été le plus étudié.

### **5.4.2 Toucher d'exploration**

Type de peau : Glabre ; et Poilu pour la navigation

Le toucher d'exploration est...

### **5.4.3 Toucher communicatif**

Type de peau : Poilu

Le toucher communicatif est ...

### **5.4.4 Toucher protectif**

Type de peau : Poilu

Le toucher est ...

# CHAPITRE 6

## LES TECHNOLOGIES HAPTIQUES

Retrouver les photos en HD !

### 6.1 Systèmes récepteurs

#### 6.1.1 Ecran tactile

#### 6.1.2 Peau tactile

### 6.2 Systèmes acteurs

#### 6.2.1 Interfaces à retour de force



Figure 6.1 Interfaces à retour de force : a) ...

#### 6.2.2 Interfaces à retour tactile

Par contact direct – "*tangible*"

Par contact indirect – "*mid-air*"



Figure 6.2 Interfaces à retour de force : a) ...



Figure 6.3 Interfaces à retour de force : a) ...



Figure 6.4 Interfaces à retour tactile par contact direct : a) ...



Figure 6.5 Interfaces à retour tactile par contact direct : a) ...



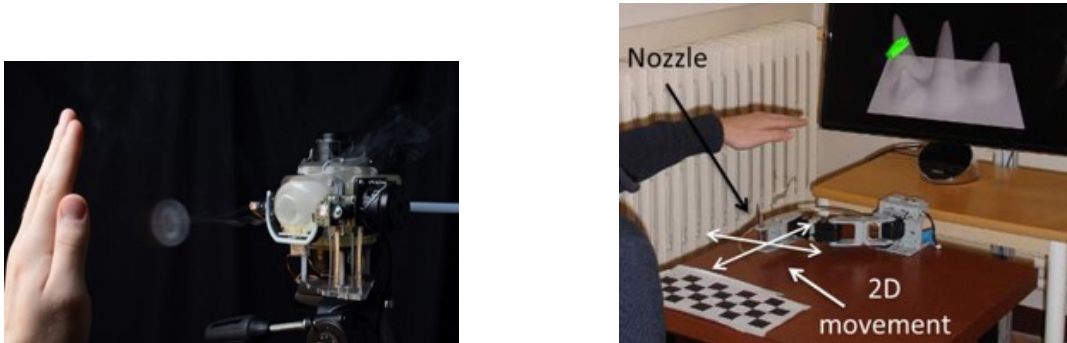


Figure 6.6 Interfaces à retour tactile par contact indirect : a) ...



Figure 6.7 Interfaces à retour tactile par contact indirect : a) ...



# DEUXIÈME PARTIE

## Fiches des articles



# CHAPITRE 7

## Biomécanique

## 7.1 Finger pad friction and its role in grip and touch (2012) *Adams et al.*

Le papier fait un état de l'art de la littérature sur la friction ayant lieu au point de contact entre doigt et surface. Le papier est divisé en 4 parties : Surface de contact, occlusion, l'évolution du slip dans la région de contact et l'influence de la vitesse de glissement.

### 7.1.1 Aire de contact

#### Tribologie, science des frottements

La rugosité des faces en contact crée de l'adhérence. Au niveau microscopique, comme illustré à la figure ??, les atomes des deux solides sont en interaction — liaison chimique, force de Van Der Waals — appliquant une force supplémentaire perpendiculaire à la surface moyenne de contact. Frottement statique, Force de décrochage, adhésion.

Frottement dynamique, énergie libérée lors de la rupture des liaisons.

Origine de la tribologie, Travaux de Leonard De Vinci (1452-1519). Vers 1480, il énonce la loi suivante traduite en français “La friction double l'effort quand le poids double” (“*La confregazione si fa di duplicata fatica in duplicato peso*”), image de l'archive à la figure ?? (a). Ainsi, appuyer par d'autres dessins, présent à la figure ?? (b), il est supposé que Leonard De Vinci savait que “la force de frottement agissant entre deux surfaces qui glissent est proportionnelle à la charge qui pousse les surfaces l'une contre l'autre et que la friction est indépendante de la surface apparente de contact entre les deux surfaces”. Ce qui devancerait les travaux du physicien français Guillaume Amontons (1663-1705) qui était à l'origine de cette théorie en 1699.

Charles August Coulomb (1736-1806)

- La force de frottement statique est proportionnelle à la charge (lois d'Amontons) ;
- La force de frottement statique est indépendante de la surface de contact apparente (lois d'Amontons) ;
- La force de frottement cinétique (en mouvement) est indépendante de la vitesse (La loi de Coulomb).

F. Philip Bowden and David Tabor (1950) - Contact entre deux solides n'a lieu que sur des zones ponctuelles, la pression élevée sur ces points de contact qui induit une déformation



Figure 7.1 Illustration du contact réel entre deux solides — défauts microscopiques sur la surface des solides.

plastique. Plus la pression augmente plus il y a d'aspérité en contact. Les forces de friction sont donc dépendantes de la vraie surface de contact.

<http://www.tribology-abc.com/> [https://www.canal-u.tv/video/universite\\_de\\_tous\\_les\\_savoirs/la\\_tribologie.1457/](https://www.canal-u.tv/video/universite_de_tous_les_savoirs/la_tribologie.1457/)

...énoncer les formules générales...

**Cas de la peau**

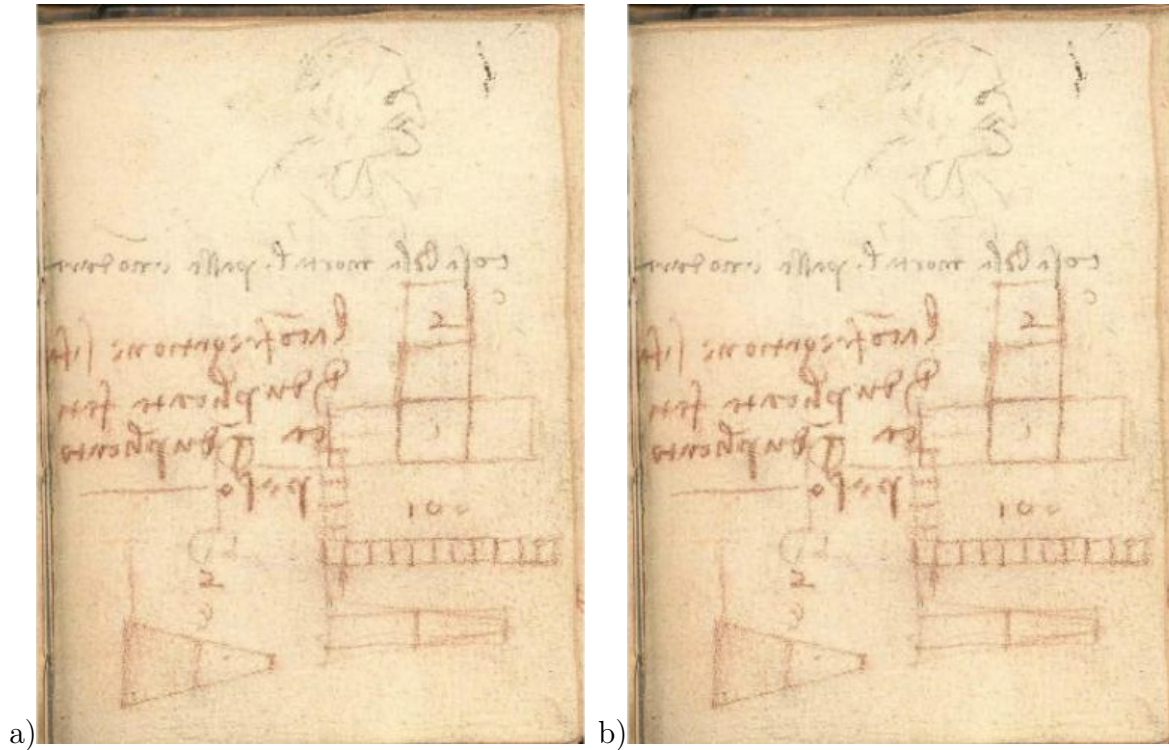


Figure 7.2 Archives des travaux de Leonard De Vinci : a) ; b) .

**Modèle général** Mécanisme d'adhésion pour un polymère organique : (équation 2.1)

$F$  : force de friction ;  $Tau$  : force de cisaillement ;  $A$  : Aire de contact.

Transition thermique d'un polymère typique : (gauche : froid ; droite : chaud) État vitreux – *Glassy state* => État visco-élastique – *Viscoelastic state* (=> État mélangé – *Melt state*)

Pour un polymère organique dans son état vitreux, la force de cisaillement augmente linéairement avec le pression moyenne en contact,  $p$  : (équation 2.2) avec  $tau0$  la valeur intrinsèque de  $tau$  avec pression nul ;  $alpha$  le coefficient de pression. Or,  $P=W/A$  avec  $W$  la force normale (habituellement on utilise  $F_n$ ).

Pour un contact entre deux corps parfaitement lisses, ici une sphère de rayon  $R$  et un plan, l'équation de hertz nous permet de déduire l'équation suivante : (équation 2.4)

Équation de hertz permet de calculer l'intégrale du profile de pression.  $E$  : module de young, propriété du matériaux, représente l'élasticité de celui-ci. Permet de déterminer la déformation pour une contrainte donnée — lois de Hooke.  $Mu$  : coefficient de poisson intrinsèque au matériaux. rapport de la contraction transversale unitaire sur allongement axiale unitaire.



Modèle utilisable dans les deux sens : doigt/surface et point/peau. Le doigt peut aussi être assimilé à une ellipse avec  $R=(R'R'')$ ...

**Caractérisation de l'aire de contact de bout du doigt** Il est habituel de mesurer deux paramètres :

- $A_{gross}$  Aire de contact totale (aire de contact réelle + aire des surfaces pas en contact entre les stries)
- $A_{ridge}$  Aire de contact due aux des stries (
- $A$  aire de contact réelle

$$A_{gross} - A_{ridge} = A$$

Grosse déformation de la peau dépend principalement du tissu le plus mous de la peau.

Peau sèche : Aire calculé sera bien plus grande que le contact réel.

**État nominal sec** Stratum coreum se comporte comme un polymère organique hydrophobe vitreux, e.g. Nylon, Keratin. Pas d'occlusion. Caractéristique de ces polymères :  $F$  augmente avec l'absorption de l'humidité bien que  $Tau$  diminue. Plastification due à l'humidité réduit le module de Young, donc d'après 2.4  $A$  augmente (si on reste dans un modèle de sphère et surface parfaite).

Nylon plastification augment la friction d'un facteur 2 (*from dry to the saturated wet states*). Au poignet augmentation d'un ordre. Cette diff vient de de la sensibilité à l'humidité du stratum coreum, qui modifie le module de Young. Conduisant à une augmentation de  $A$  (due à l'aplatissement des aspérités sous la force normale appliqué).

**cas pour le bout du doigt** État mouiller : une augmentation de  $F$  a aussi été observé. Il est supposé que  $A$  augmente vers  $A_{ridge}$ . De sec à mouiller :  $E$  de stratum coreum diminue de 3 ordre – correspondant à une transition d'un état vitreux à un état visco-élastique.

Remarque : Hydrophobie de la peau – angle de contact de 100 degré.

Observé communément que  $F$  pour le bout du doigt augmente lorsque  $F_n$  diminue, dans le cas de charge faible, inférieur à 3,5 N. D'après (2.1)(2.2) et (2.4), on a :  $F = \dots$  (équation 2.5)

Approximé par :  $F = \dots$  (équation 2.6) avec  $n$  index de charge de friction ;  $K_2$  coef de friction dépend de la charge

donc coef de friction,  $\mu$ , vaut : (équation 2.7)

...

Déformation du bout du doigt est bien plus complexe que le poignet (dont on a calculé le coef de friction)

2N déformation limite du bout du doigt due au fait que le tissu underlying est compressé contre les phalanges.

## Discussion

Les équation de hertz ne sont pas applicable à chaque fois. Adams, Warman sont d'accord que la suggestion de Wolfman est incorrect (et bam dans les dents). Suggestion de wolfman : la friction de la peau pourrait être décrite par un coef de friction indépendant de la pression. Suggestion incorrect car le modèle prédit un indice de charge de  $2/3$ . Il est difficile de distinguer les eq (2.8) et (2.6) car erreur dans les données, les données sont rare en particulier lorsque la charge est faible.

### 7.1.2 Occlusion

[29] **Smith and Scott** - coefficient de friction de l'extrémité du doigt, sur un certain nombre de surface, qui augmente de .36 à .79 après 7 essais. - Réponse physiologique de la sécrétion de la transpiration.

### 7.1.3 Evolution of slip in the contact region

Cette partie de l'article discute de comment la force de pression (normal et lateral), et donc le contact, évolue avant et pendant un glissement. Ces informations étant importante pour ajuster les forces avec lesquels un objet est tenu ou manipulé. En effet ces forces augmentent lorsque un glissement est sur le point de se produire. Les auteurs citent principalement l'article "Effect of skin hydration on the dynamics of fingertip gripping contact", où des images de glissement ont pu être enregistré. La principale observation est que lorsque la force tangentiel augmente, l'aire de contact réduit petit à petit jusqu'à ce que le doigt entre en glissement.

Cattaneo [98] et Mindlin [99], utilisent les équation du contact de Hertz pour décrire la formation du "slip annulus" en fonction de la force de contact. Les équations de hertz

permettent aussi de déterminer que la force de contact est distribué selon une parabole inversé avec un maximum au centre de la surface de contact (1.5p) et une limite de 0 au bords. Cette application des équations de Hertz est justifié pour des relativeent faibles forces (inférieur à 1N). (équations 4.1-4.3)

Tada et al. [96] et André et al. [95] ont essayé de mettre en relation ces résultat théorique avec des mesures expérimental. Ils ont trouvé que la théories sousestiment les forces tangentiellles mesuré expérimentalement. Ces résultat expérimentaux suggerent un seuil de valeur pour les forces tangentiell qui viendrais reduire le coefficient d'adhésion.

Tüzün et Walton [100] détermine une valeur maximale pour les forces tangentielle. (équations 4.4 et 4.5)

Wang et Hayward [102] pointent les propriété anisotropique du doigt et donc les limitent de l'application des équations de Hertz. Par la suite l'article discutent de nouveaux model théorique pour des forces supérieur à 1N. (équations 4.6-4.8) La conclusion etant que le coefficient d'adhesion diminue linéairement avec les forces tangentiellles.

La conclusion de cette partie suggere qu'une diminution du "gross area" précédent toujours un glissement. Ceci pointe vers un mechanism de pelage\de décollement. Néanmoins, l'ensemble des études (et les équations établis) considèrent seulement une valeur constant de la "gross area".



# ANNEXE A

## APP TEST





