

Le Toucher de la Peau



Projet de Troisième année Conception et Développement Produit

Présenté par Sophie PAYRARD le 26 Février 2014

Tuteur : Jean-Marc Sieffermann

Partenaire industriel : LVMH – Eléonore Loescher

Table des matières

Introduction.....	3
Rappel Physiologie de la Peau.....	4
Thématique 1 : Physiologie du Toucher	6
I. RECEPTEURS SENSORIELS	6
I. 1. <i>LTMRs : Mécanorecepteurs à bas seuil</i>	6
I. 1. 1. <i>La peau glabre</i>	7
I. 1. 2. <i>La peau velue</i>	10
I. 2. <i>HTMRs</i>	10
II. MECANOTRANSDUCTION	11
II. 1. <i>Introduction à la mécanotransduction</i>	11
II. 2. <i>Molécules impliquées dans la mécano-transduction</i>	12
II. 2.1. <i>Degenerin/epithelial amiloride sensitive Na⁺ channel (DEG/ENaC)</i>	12
II. 2.2. <i>Transient Receptor Potential (TRP)</i>	12
II. 2.3. <i>Autres molécules candidates</i>	13
II. 3. <i>Théories de mécanotransduction</i>	13
III. VOIES DES RECEPTEURS AU CORTEX	14
III. 1. <i>La voie lemniscale</i>	15
III. 2. <i>La voie extra-lemniscale</i>	15
CONCLUSION	17
Thématique 2 : Influence de l'âge sur le toucher.....	18
I. EFFET DE L'ÂGE SUR LA PEAU	18
I. 1. <i>Changements structuraux de la peau</i>	18
I. 2. <i>Mécanorécepteurs</i>	18
I. 3. <i>Canaux ioniques</i>	18
II. EFFET DE L'ÂGE SUR LE SYSTEME NERVEUX	19
II. 2. <i>Structure et vitesse de conduction des nerfs</i>	20
II. 3. <i>Densité des fibres nerveuses</i>	20
CONCLUSION	21
Thématique 3 : Le toucher et la robotique	22
I. VERS UNE PEAU ARTIFICIELLE	22
I. 1. <i>Harvard et ses capteurs bon marché</i>	22
I. 2. <i>Le projet Roboskin</i>	23
I. 3. <i>Georgia Institute of Technology</i>	24
II. VERS UNE PROTHESE REPRODUISANT LE SENS DU TOUCHER	25
II. 1. <i>Chicago et les prothèses de main</i>	25
II. 2. <i>Projet LifeHand2</i>	26
III. VERS UN SENS DU TOUCHER PAR LES VIBRISSES	28
Autres	31
Conclusion	32
BIBLIOGRAPHIE	33

Le toucher est le sens qui nous permet de percevoir les frottements, pressions et autres déformations s'exerçant sur l'enveloppe corporelle. Il est probablement le sens le plus indispensable à la survie de l'être humain et le plus stimulé. Le fait de toucher nous renseigne sur la texture, la température ou encore la consistance d'un objet.

A tous les autres sens correspond un organe clé que l'on peut étudier. Dans le cas du toucher, cet organe est la peau qui s'étend sur tout le corps. C'est la raison pour laquelle le toucher est un système sensoriel dont il est délicat d'isoler ou d'éliminer l'influence.

La connaissance et la compréhension du fonctionnement de la peau et de son toucher sont indispensables au développement de l'industrie cosmétique.

Lors de ma première visite chez Dior, ce projet a été décrit comme un projet bibliographique concernant le toucher de la peau, l'objectif étant d'acquérir le maximum de connaissances sur le sujet. Dior souhaite, à travers cette synthèse de revues scientifiques, identifier les laboratoires actifs sur le sujet et ainsi obtenir une liste de contacts potentiels (en vue d'un possible partenariat). Mon objectif est de comprendre ce que l'on sait actuellement sur le sens du toucher.

Ce dossier se concentrera uniquement sur la physiologie du toucher de la peau et ne traitera pas des méthodes de caractérisation de celui-ci.

Il s'axera sur plusieurs thématiques : d'une part la neurophysiologie à travers les différents types de mécanorécepteurs, la mécanotransduction ainsi que les voies permettant de transmettre l'information jusqu'au cerveau. Cela permettra de réaliser un véritable état de l'art sur le sujet.

D'autre part sera étudiée l'influence de l'âge sur le toucher. L'anti âge est une préoccupation majeure de l'industrie cosmétique représentant une véritable cible de consommatrices. Il est donc judicieux de connaître les changements liés au toucher apparaissant avec l'âge.

Enfin, la dernière partie se concentrera sur l'application de la compréhension des mécanismes du toucher à travers un domaine, la robotique. Nous étudierons, entre autres, des modèles de peau artificielle et de prothèse de main reproduisant le sens du toucher.

La peau est l'organe du corps humain à la fois le plus étendu et le plus lourd : de 4 à 10 kilos chez l'adulte et près de 2 m² de surface (dermato-info).

La peau remplit différentes fonctions essentielles (Franceschini, 1994) :

- Protection (rayons UV, déshydratation, agressions extérieures)
- Sensorielle, qui est la fonction que nous allons détailler dans ce dossier.
- Métabolique (thermorégulation)
- Immunitaire

La peau détient également un rôle social de par sa couleur, sa texture et sa qualité.

Elle est composée du point de vue chimique de 70% d'eau, 27,5% de protéines, 2% de matières grasses et 0,5% de sels minéraux et oligo-éléments (Le Figaro santé).

De plus, elle est constituée de trois couches de tissus : l'épiderme, la couche superficielle, le derme, la couche intermédiaire et l'hypoderme la couche profonde (Le Figaro santé).

- **L'épiderme**

L'épiderme est un tissu épithélial qui nous protège contre les agressions extérieures. Son épaisseur varie selon les régions du corps : un demi-millimètre (sur les paupières) jusqu'à 2 ou 3 millimètres (plante des pieds ou paume des mains). Il n'est pas directement irrigué par des vaisseaux sanguins mais par diffusion du derme. Néanmoins, il contient de nombreuses terminaisons nerveuses impliquées dans notre sensibilité au sens du toucher (Franceschini, 1994).

L'épiderme contient plusieurs centaines de pores par cm², responsables de l'écoulement de la sueur et du sébum. Ces deux substances se joignent pour former un film hydrolipidique hydratant qui protège la peau continuellement (Franceschini, 1994).

L'épiderme est composé à 85 % de kératinocytes remplis de kératine (protéine entrant dans la composition des cheveux et des ongles) et de lipides. Ces cellules s'éliminent par desquamation, s'en suit une nouvelle génération de kératinocytes (cours de C. Lafforgue).

Ainsi, l'épiderme se régénère en permanence : il est entièrement renouvelé toutes les 4 à 6 semaines. Les 15% restants se répartissent entre les mélanocytes qui synthétisent la mélanine, pigment naturel à l'origine de la couleur de notre peau, les cellules de Langerhans participant au système immunitaire et les cellules de Merkel impliquées dans le sens du toucher (cours de C. Lafforgue).

L'épiderme se divise en cinq couches (Le Figaro santé) :

- Couche basale, la plus profonde de l'épiderme. Elle est le lieu de naissance par division cellulaire des kératinocytes. Elle assure donc la régénération continue de la peau : les cellules produites migrent progressivement vers les couches supérieures en subissant diverses mutations.

Entre ces cellules basales s'intercalent les mélanocytes.

- Couche épineuse ou corps muqueux de malpighi, comportant 3 à 10 assises de kératinocytes qui s'aplatissent peu à peu vers la surface.

- Couche granuleuse où démarre la kératinisation des kératinocytes (évoluant en cornéocytes).

- Couche claire correspondant à une phase de transition entre la couche granuleuse et la couche cornée.

- Couche cornée composée de kératinocytes dégradés (les cornéocytes) liés par des lipides et par des complexes protéinés (les cornéodesmosomes).

- Le derme

Le derme est un tissu conjonctif 10 à 40 fois plus épais que l'épiderme. Il est irrigué par de nombreux vaisseaux sanguins lui permettant de transmettre à l'épiderme les éléments nutritifs requis (Franceschini, 1994).

Le derme se divise en deux couches (Le Figaro santé) :

- le derme papillaire (derme superficiel), couche intermédiaire riche en terminaisons nerveuses, séparé de l'épiderme par la jonction dermo-épidermique.
- le derme réticulaire (derme profond), un tissu conjonctif dense composé d'un réseau de fibres élastiques.

Les principales cellules du derme sont les fibroblastes synthétisant des types de fibres protéiques telles que le collagène et l'élastine. L'élastine a un rôle dans la souplesse et l'extensibilité du derme et le collagène dans la cicatrisation et contribue à la résistance de ce dernier (cours de C. Lafforgue).

L'espace entre les cellules est appelé « matrice extracellulaire » dans laquelle se trouvent, entre autres, le collagène et l'élastine noyés dans les glycoaminoglycanes.

Avec le vieillissement, les fibres de collagène et d'élastine se dégradent ce qui est à l'origine de la diminution de la fermeté de la peau et de l'apparition de rides (cours de C. Lafforgue).

- L'hypoderme

L'hypoderme est la couche la plus profonde et la plus épaisse de la peau. Composé essentiellement d'adipocytes (cellules graisseuses), l'hypoderme est très épais dans les zones à impacts fréquents (les fesses ou les talons) et beaucoup plus fin dans les autres régions du corps (cours de C. Lafforgue).

Il est traversé par les vaisseaux et les nerfs arrivants dans le derme.

Il joue plusieurs rôles : protecteur, isolant thermique (grâce à ses cellules graisseuses), morphologique et énergétique (stockage des graisses) (Le Figaro santé).

Au niveau du derme et de l'hypoderme se situent les annexes de la peau (Le Figaro santé) :

- les glandes sudorales eccrines, qui fabriquent la sueur aqueuse.
- les glandes sudorales apocrines, responsables de l'odeur corporelle.
- les glandes sébacées qui secrètent le sébum, ce film hydrolipidique qui protège l'épiderme.
- les follicules pileux des poils et des cheveux, associés à une glande sébacée.

La peau réagit au toucher par l'intermédiaire de récepteurs spécialisés qui contiennent une ou plusieurs cellules neurosensorielles. Il existe plusieurs types de récepteurs répondant à une grande variété de stimuli : les mécanorécepteurs qui répondent à un stimulus de vibration, d'étirement ou encore de pression, les nocicepteurs qui répondent à la douleur et les thermorécepteurs qui répondent à la température. Ils sont localisés dans les différentes couches de la peau et représentent la partie terminale différenciée d'un même type de neurone sensoriel, le neurone ganglionnaire de la corne dorsale.

En effet, la partie terminale de la branche périphérique reçoit les stimuli et la branche centrale et le reste de la branche périphérique constituent la fibre afférente primaire. Il existe également des neurones aux terminaisons libres.

Les fibres nerveuses associées aux récepteurs sont de trois types : A β , A δ et C selon la taille de leurs cellules, le diamètre de leurs axones, leurs degrés de myélinisation et la vitesse de conduction de leurs potentiels d'action (Abraira et al, 2013). Les caractéristiques des fibres afférentes sensorielles sont récapitulées dans le schéma suivant.

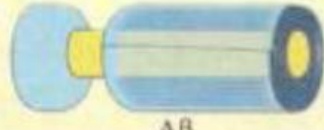
Receptor type	Axon type	Diameter (μ m)	Conduction speed (m/s)
Mechanoreceptors of skin	 A β	6–12	35–75
Pain, temperature	 A δ	1–5	5–30
Temperature, pain, itch	 C	0.02–1.5	0.5–2

Figure 1 Types de fibres afférentes sensorielles (Rosensweig et al, 2002)

Un récepteur sensoriel doit convertir le stimulus en potentiel d'action (influx nerveux) afin de communiquer l'information : c'est la transduction.

I. RECEPTEURS SENSORIELS

Les neurones somato-sensoriels de la peau se divisent en deux groupes (Roudaut et al, 2012) :

- LTMRs (low-threshold mechanoreceptors) qui réagissent à une pression bénigne
- HTMRs (high-threshold mechanoreceptors) répondant à une stimulation mécanique douloureuse

I. 1. LTMRs : Mécanorécepteurs à bas seuil

Les LTMRs peuvent être classés selon leur vitesse d'adaptation au stimulus mécanique : adaptation lente (SA-LTMRs) ou rapide (RA-LTMRs). Ils sont également distingués par le récepteur terminal qu'ils innervent et par leurs stimuli préférentiels.

Une distinction entre les mécanorécepteurs peut également être faite sur leur champ récepteur c'est-à-dire la zone sensorielle modifiant l'activité d'un neurone lorsqu'elle est stimulée. Plus les récepteurs sont profonds, plus le champ récepteur est grand (figure 2).

La peau peut être divisée en deux types : la peau glabre (pas de poils) et la peau velue.

	A - Glabrous skin			B- Both		C - Hairy skin (Mice)			
Receptor	Meissner corpuscle A1	Ruffini corpuscle A2	Pacinian corpuscle A3	Merkel cell- neurite complex B1	Free nerve ending B2	Guard hair C1	Awl/auchene hair C1	Zigzag hair C1	C-touch C2
Perceptual sensory functions	Skin movement, handling objects	Skin stretch, movement direction, hand shape and finger position	Vibration when grasping an object	Fine tactile discrimination, form and texture perception	Pain, nociception	Hair movement, Pleasant touch			Pleasant touch, Social interaction, Caress
Skin stimulus	Dynamic deformation 	Skin stretch 	Vibration 	Indentation depth 	Injurious forces 		Light brush 		Caress, touch 
Localization	Dermal papillae	Dermis	Deeper dermis	Basal layer of the epidermis / around guard hair	Epidermis > Dermis	Epidermis/dermis			Epidermis > dermis
Associated fibre	Aβ	Aβ	Aβ	Aβ	Aδ C-HTMR	Aβ	Aβ Aδ C-LTMR	Aδ C-LTMR	C-LTMR
Conduction velocity	35-70 m/s	35-70 m/s	35-70 m/s	35-70 m/s	5-30 m/s 0.5-2 m/s	11-18 m/s	11-18 m/s 5-7 m/s ~ 0.5 m/s	5-7 m/s ~ 0.5 m/s	0.6-1.3 m/s
Receptive field	22 mm ²	60 mm ²	finger, hand	9 mm ²	1-3 mm ²	Around hair follicle			1-3 mm ²
Receptor / Hair density	150 / cm ²	10 / cm ²	20 / cm ²	100 / cm ²	4-25 / mm	1 or 2	clusters arrangement: ~ 20	~ 80	1-9 / 35 mm ² 50-60% area of hairy skin
Putative MS ion channels	β-ENaC/γ-ENaC/ ASIC2/ASIC3/TRPV4/ KCNQ4/Piezo 2	β-ENaC/ASIC3/ Aquaporine 1/ Piezo 2	β-ENaC/γ-ENaC/ ASIC1/ASIC2/ Piezo 2	ASIC2/ASIC3/ TRPV4/Piezo 2	TRPA1/TRPV1/ TRPV2/TRPV4/ Piezo 2	β-ENaC/γ-ENaC/ASIC2/TRPV4/KCNQ4/Piezo 2			?

Figure 2 Récepteurs tactiles de la peau (Roudaut et al., 2012)

I. 1.1. La peau glabre

Les LTMRs innervant la peau glabre sont de quatre types.

D'une part, les récepteurs à adaptation lente (réponse maintenue tout au long du stimulus) pouvant être divisés en deux types (SAI et SAII) différenciés par la régularité de leur réponse durant la phase statique d'excitation des terminaisons nerveuses (Abraira et al, 2013).

- Complexe neurite-Cellules de Merkel :

En 1875, Merkel a décrit un groupe de cellules épidermiques avec de larges noyaux (en forme de disque) en contact avec des fibres nerveuses afférentes. Il leur donna le nom de Tastzellen «(tactile cells). Chez les humains, ces cellules se situent dans la couche basale de l'épiderme et sont très nombreuses à l'extrémité des doigts et sur les lèvres. Elles sont également présentes dans la partie velue de la peau mais à une moindre densité (Abraira et al, 2013).

Le complexe est composé d'une ou plusieurs cellules de Merkel connectées à un axone Aβ (figure 4). Ils ont une réponse de type SAI (adaptation lente de type I) et un champ récepteur de 2-3 mm. Ils réagissent à une pénétration profonde dans la peau (type pressions localisées) et possèdent la plus grande résolution spatiale de tous les mécanorécepteurs (0,5 mm) (Roudaut et al, 2012).

Ils fournissent une image neurale précise de la structure spatiale des objets et des surfaces et sont à l'origine de la perception des formes et des textures (Johnson, 2001).

Actuellement, beaucoup de recherches sont consacrées aux cellules de Merkel (voir section bibliographie cellules de Merkel). Bien que leur structure soit très bien identifiée, leurs différentes fonctions restent encore méconnues.

Leur implication dans la mécanotransduction (sites de transduction : cellule de Merkel ou neurone), leur répartition irrégulière, leur origine (épidermique ou neurale) sont de vastes champs de recherches. Plusieurs articles ont également démontré que les cellules de Merkel étaient requises au codage des réponses des récepteurs de Merkel (Roudaut et al, 2012 après Maricich et al, 2012). On parle également de dôme tactile pouvant contenir jusqu'à 150 cellules de Merkel innervées par une seule fibre A β . De plus, Les kératinocytes semblent jouer un rôle important dans le complexe de Merkel (Roudaut et al, 2012).

- Terminaisons de Ruffini

Les terminaisons de Ruffini ont été décrites par Angelo Ruffini en 1894 comme de longues et fines terminaisons sensorielles encapsulées connectées à une fibre nerveuse (figure 4). Ce sont de petits tissus cylindriques disposés dans le derme supportés par une à 3 fibres nerveuses myélinisées A β (de 4 à 6 mm de diamètre). Jusqu'à trois cylindres de différentes orientations dans le derme peuvent fusionner pour former un récepteur. Structurellement, les terminaisons de Ruffini sont similaires à l'organe tendineux de Golgi (Abraira et al, 2013). Ils ont une réponse de type SAII (adaptation lente de type II).

La densité de terminaisons de Ruffini est plus faible que celle des cellules de Merkel, cependant leur champ récepteur est environ 5 fois plus grand. Les terminaisons de Ruffini sont sensibles à l'étirement de la peau et permettent la perception de la conformation des doigts et de la forme de la main (figure 3). Ils seraient également impliqués dans la détection de mouvement des objets.

Par ailleurs, les terminaisons de Ruffini sont le sujet de nombreuses recherches car elles constituent le récepteur le plus méconnu des mécanorécepteurs du toucher (beaucoup de controverses concernant leurs afférences sensorielles). Il n'y a pas encore de preuve de leur existence chez la main du singe (Abraira et al, 2013 après Blake et al 1997, Connor et al, 1990, Goodwin et al, 1997 et Johnson et al, 2010). Seulement récemment des neurones avec les propriétés des SAII ont été repéré chez la souris (Abraira et al, 2013 après Wellnitz et al, 2010 Woodbury et al, 2003). La morphologie de ces mécanorécepteurs est également mal connue. Il est supposé que les réponses de type SA II viennent des terminaisons de Ruffini mais il n'existe pas de preuve directe (Abraira et al, 2013 après Chambers et al, 1972).

Chez les humains, chaque axone possède une région « à bas seuil » suggérant qu'une seule fibre A β soutient chaque organe récepteur (Abraira et al, 2013 après Johansson et al, 1980).

Les autres mécanorécepteurs sont dits à adaptation rapide, c'est-à-dire qui répondent le mieux aux mouvements d'objets le long de la peau mais le moins bien à la pression statique. Tout comme les mécanorécepteurs à adaptation lente, on peut les diviser en deux catégories : RAI et RAII (figure 2). Les réponses RAI sont généralement associées à de petits champs récepteurs et à de basses fréquences de vibrations (1 à 10 Hz) alors que les RAII sont associées à de grands champs récepteurs et à de fortes fréquences de vibrations (80-300 Hz) (Vallbo et al, 1984). Anatomiquement, ces récepteurs sont associés à des corpuscules, ce qui peut être significatif quant à leur propriété de rapidité d'adaptation.

- Copuscules de Meissner

Ils sont localisés dans la papille dermique de la peau glabre, essentiellement dans les paumes de mains et les plantes de pieds. Anatomiquement, il s'agit d'une terminaison nerveuse encapsulée (en forme d'olive voir figure 4). La capsule est composée de cellules aplaties en lamelle de façon horizontale (Roudaut et al, 2012). Jusque-là, on pensait qu'il y avait une fibre afférente A β par corpuscule. Cependant, récemment il a été découvert chez les primates 30 à 80 corpuscules qui peuvent être innervés par une seule et même fibre afférente A β (Paré et al, 2001).

Les fibres de collagène qui relient la couche épidermique basale aux cellules lamellaires du corpuscule fournissent la force mécanique déformant le corpuscule et engendrant un volet de potentiels d'actions qui cessent rapidement (récepteurs à adaptation rapides). Lorsque le stimulus disparaît, le corpuscule retrouve sa forme initiale et produit un autre volet de potentiels d'actions. Due à leur localisation superficielle dans le derme, ces corpuscules répondent sélectivement au mouvement de la peau, et à la détection tactile de glissement et vibration. Ils sont sensibles au contact dynamique c'est-à-dire par exemple entre la peau et un objet qui est tenu (Roudaut et al, 2012) Ils sont plus sensibles que les SA mais répondent avec une acuité spatiale plus réduite. (Johnson et al, 2001).

Par ailleurs, certains corpuscule de Meissner peuvent être innervés par des axones afférents C amyélinisés (jusqu'à deux fibres). La fonction de ces neurones est peut-être liée à la nociception (Abraira et al, 2013 après Johansson et al, 1999, Paré et al, 2001).

- Corpuscules de Pacini (PC)

Les corpuscules de Pacini sont les récepteurs situés le plus profondément dans la peau dans le derme profond et sont les plus sensibles au mouvement de la peau. Ce sont des corpuscules de forme ovoïde (large de 1 mm) composés de tissus fibreux et de fibroblastes disposés de façon concentrique et aplatie. Au centre du corpuscule dans une cavité remplie de fluide se situe la terminaison de la fibre nerveuse démyélinisée (figure 4). Ils possèdent un grand champ récepteur à la surface de la peau avec un centre particulièrement sensible (Roudaut et al, 2012).

Il y a approximativement 2500 PC dans la main avec la plus grande densité dans les doigts (Abraira et al, 2013). Les PC ont une vitesse d'adaptation très rapide (RA II) leur permettant d'être sensible aux vibrations (perception d'objet en contact avec la peau, par exemple objets saisis par la main (Johnson, 2001).

Ils sont également appelés détecteur d'accélération car ils peuvent détecter les changements de force d'un stimulus. Si la vitesse de changement du stimulus est altérée (ex : vibrations), leur réponse devient proportionnelle à ce changement. Les corpuscules sentent les gros changements de pressions et quasiment toutes les vibrations (150-300 Hz) qu'ils peuvent d'ailleurs détecter même éloignés de quelques centimètres (Roudaut et al, 2012).

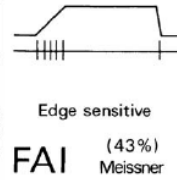
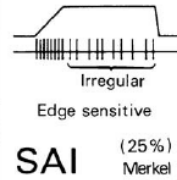
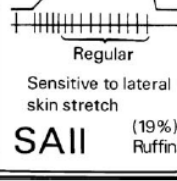
		ADAPTATION		
		Fast, no static response	Slow, static response present	
RECEPTIVE FIELDS	Small, sharp borders 	 Edge sensitive FAI (43%) Meissner	 Irregular Edge sensitive SAI (25%) Merkel	 INNERVATION DENSITY
	Large, obscure borders 	 FAII (13%) Pacini Golgi-Mazzoni	 Regular Sensitive to lateral skin stretch SAII (19%) Ruffini	

Figure 3 Caractéristiques des mécanorécepteurs de la peau glabre (McGlone et al, 2010)

I. 1.2. La peau velue

L'une des caractéristiques de la peau des mammifères est le poil, il joue un rôle essentiel dans la régulation de la température du corps et la protection contre les agressions extérieures. Et l'on sait maintenant que le follicule pileux est un organe mécano sensoriel spécialisé qui détecte l'effleurement (Abraira et al, 2013). Le follicule pileux associé à une fibre nerveuse est un récepteur à adaptation rapide.

Chez la souris, les follicules pileux peuvent être divisés en trois types : zigzag (72%), awl/auchene (23%) et guard (5%) qui se distinguent par leur longueur, leur épaisseur et le nombre de glandes sébacées associées (Roudaut et al, 2012). Récemment, Ginty et ses collaborateurs ont travaillé sur l'innervation des follicules : Zigzag est innervé par des axones C (80%) et A δ , awl/auchene par les trois types de fibres et enfin le guard est innervé par un axone de type A β . Par ailleurs, le follicule guard peut être associé à une ou plusieurs cellules de Merkel (touch dome) et connecté à une fibre A β (figure 4). Pour Ginty et al, la peau velue est une répétition d'unités périphériques de follicules contenant un ou deux guard, 20 auchene et 80 zigzag (Roudaut et al, 2012).

Ces trois follicules sont également innervés par des terminaisons appelées « circumferential lanceolate endings » dont la physiologie et la fonction ne sont pas encore connues (figure 4).

- Terminaisons libres LTMRs

La plupart des fibres C aux terminaisons libres dans la peau sont des HTMRs, mais une sous population de ces fibres ne répond pas au toucher douloureux (nocicepteur). Cette partie des fibres tactiles C afférentes (CT) représente un type distinct d'unité mécano réceptrice à bas seuil non myélinisée existant dans la peau velue et non dans la peau glabre. Ces fibres sont généralement associées avec la perception d'une stimulation tactile plaisante (Olausson et al, 2010).

Les fibres CT sont le sujet de nombreuses recherches actuelles (Olausson). Ces fibres nerveuses particulières acheminent les sensations de caresse jusqu'au cerveau. Ce sont des nerfs « subtils » sans myéline qui seraient dédiés au plaisir du toucher. Olausson a également travaillé sur son implication dans l'activation du cortex insulaire (chez des patients déficient en fibres CT). L'activation des fibres CT auraient aussi un rôle dans l'inhibition de la douleur : récemment, il a été proposé qu'une inflammation ou un traumatisme pouvait changer la sensation transmise par les C-LTMRs de plaisant à douloureux. Les fibres C sont 3 à 4 fois plus nombreuses que les fibres A. Li et ses collaborateurs (2011) ont beaucoup travaillé sur l'anatomie des fibres (périphérique et centrale) chez la souris. Cependant, la voie par laquelle les afférents CT rejoignent le cortex n'est pas encore connue (Roudaut et al, 2012).

I. 2. HTMRs

Les mécanorécepteurs à seuil élevé (HTMRs) sont des terminaisons nerveuses libres épidermiques C et A δ . Ces dernières ne sont pas associées à des structures spécialisées et sont observées à la fois dans la peau glabre et la peau velue. Par ailleurs, le terme terminaison « libre » doit être considéré prudemment puisque les terminaisons nerveuses sont toujours en proche apposition à des kératinocytes ou à des cellules de Langerhans ou des mélanocytes (Roudaut et al, 2012).

Les HTMRs sont une catégorie de neurones sensoriels appelés nocicepteurs qui sont optimalement activés par un stimulus mécanique « nocif » (douloureux).

A δ –HTMRs sont vraisemblablement à l'origine du contrôle rapide de la douleur et peuvent être divisés en deux catégories fibres qui répondent aux stimuli de chaleur (nocive) et de froid. D'autre part, les C-HTMR ne répondent qu'aux stimuli mécaniques et non thermiques (Abraira et al, 2013 après Cain et al, 2001).

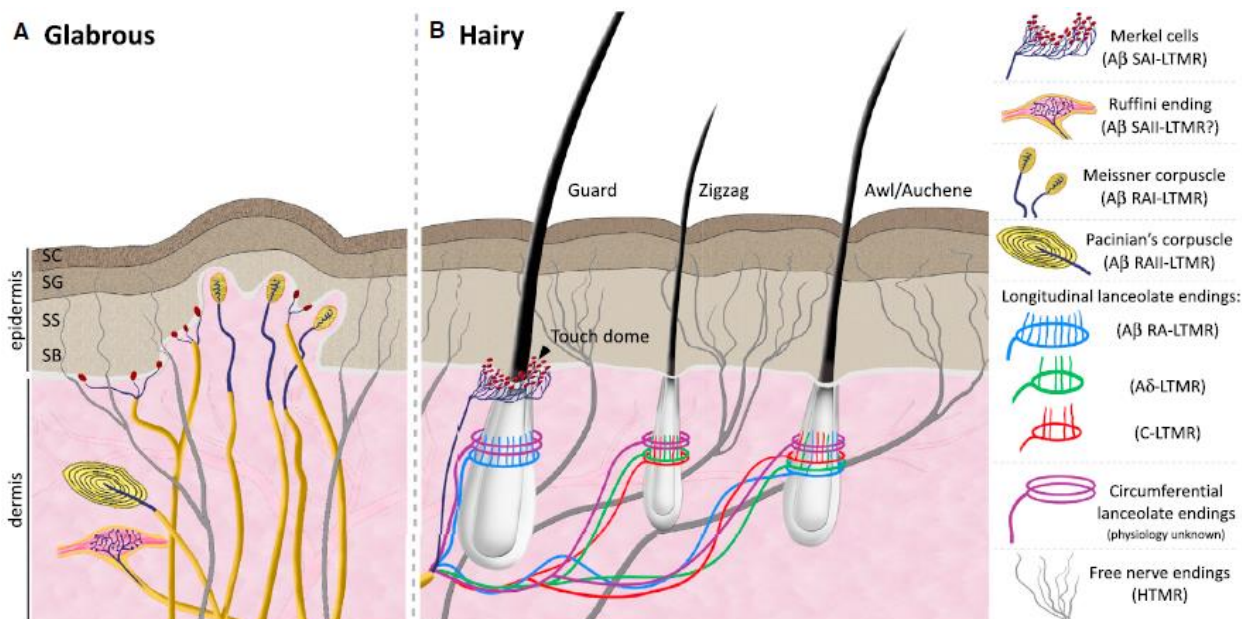


Figure 4 L'organisation des mécanorécepteurs cutanés dans la peau (Abraira et al., 2013)

II. MECANOTRANSDUCTION

II. 1. Introduction à la mécanotransduction

La mécanotransduction peut être définie comme la conversion d'un stimulus mécanique en un signal électrique (Del Valle et al, 2012). L'habileté des mécanorécepteurs à détecter une déformation mécanique repose sur la présence de canaux mécano-transducteurs placés sur les terminaisons nerveuses qui transforment rapidement les forces mécaniques en signal électrique et dépolarisent le champ récepteur. Cette dépolarisation locale, appelée potentiel du récepteur (figure 5), peut générer des potentiels d'action qui vont se propager jusqu'au système nerveux central (Delmas et al, 2011). De nombreuses recherches sont actuellement axées sur la cause de cette dépolarisation locale (environnement des terminaisons sensorielles, propriétés des canaux mécano transducteurs...).

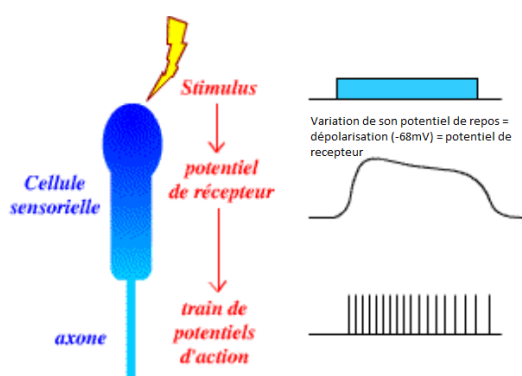


Figure 5 Principe de la mécanotransduction (cours Univ. Montpellier)

Stimulus long: phénomène d'adaptation

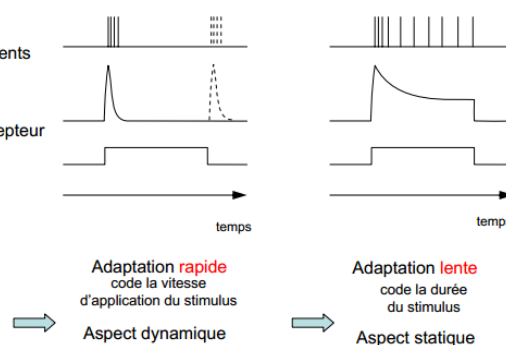


Figure 6 Phénomène d'adaptation (Cours de C. Deransart)

L'intensité du stimulus est liée au potentiel de récepteur. Par ailleurs, concernant le phénomène d'adaptation de réponse du récepteur cité dans la première partie, cela peut s'expliquer par le fait que plus la durée du potentiel récepteur est grande, plus le train de potentiels d'actions qui part dans la fibre afférente est long et inversement (figure 6).

II. 2. Molécules impliquées dans la mécano-transduction

La relation entre le stimulus et la voie de transduction est tout sauf simple et il est clair que la perception d'un simple stimulus requiert souvent plusieurs mécanismes de transduction. Le toucher et la sensibilité tactile requiert une signalisation rapide et directe fournie par des canaux ioniques via des protéines de la matrice extracellulaire et du cytosquelette (McGlone et al, 2010).

Tous les récepteurs comportent des canaux ioniques qui s'ouvrent en réponse à une déformation mécanique. Ces canaux sont insérés dans leur membrane et sont dit « mécano-sensibles ». Leur ouverture permet à certains ions d'entrer et de sortir.

Les canaux ioniques sont des composés clés des cascades de transduction qui convertissent le stimulus énergétique en changement de potentiel membranaire (Lumpkin et al, 2010). Plusieurs familles d'ions ont été suggérées comme candidates à la mécanotransduction mais peu ont démontré des propriétés mécanotransductrices chez les vertébrés (Del Valle et al, 2012).

II. 2.1. *Degenerin/epithelial amiloride sensitive Na⁺ channel (DEG/ENaC)*

Les familles de protéines les plus étudiées chez les mammifères sont les canaux sodium épithélial et les canaux ioniques ASIC (Acid-sensing ion channels) appartenant tous deux à la famille DEG/ENaC (McGlone et al, 2010).

Ces canaux ont initialement été étudiés dans la mécanotransduction à cause de leur homologue phylogénétique chez *C. elegans*, les sous unités MEC, qui sont indispensables à la perception du toucher.

Trois membres de la famille ASIC sont exprimés dans les mécanorécepteurs et les nocicepteurs (ASIC1, ASIC2, ASIC3). Le rôle de ce canal a été étudié chez les souris. La délétion d'ASIC1 n'altère pas la fonction des mécanorécepteurs mais augmente la sensibilité mécanique des afférents innervant l'intestin. Le knock-out d'ASIC2 montre une baisse de la sensibilité des LTMRs à adaptation rapide. La perturbation d'ASIC3 diminue la mécano-sensibilité des afférents viscéraux et réduit les réponses des HTMRs aux stimuli douloureux (Roudaut et al, 2012).

Ces données ainsi que d'autres effectuées sur cette même famille suggèrent un rôle intermédiaire dans les fonctions mécano-réceptrices mais ne semblent pas indiquer un rôle direct de la famille ASICs dans la mécano transduction (Delmas et al, 2011).

II. 2.2. *Transient Receptor Potential (TRP)*

La famille des TRP se divise en six sous-familles chez les mammifères. Deux TRP, TRPV4 et TRPA1 sont impliquées dans la réponse au toucher. Perturber l'expression de TRPV4 chez les souris réduit considérablement la sensibilité aux stimuli douloureux. TRPV4 est un déterminant crucial dans la mise en place de la réponse des neurones nociceptifs au stress osmotique et à l'hyperalgésie durant l'inflammation. TRPA1 semble avoir un rôle dans l'hyperalgésie mécanique. Les souris déficientes en TRPA1 montrent une hypersensibilité à la douleur. TRPA1 contribue à la transduction des stimuli mécanique, froid et chimique mais il ne semble pas être essentiel pour la transduction des cellules de follicules pileux (Roudaut et al, 2012).

Il reste à déterminer si les canaux TRPA1 servent de canaux mécano-transducteurs ou si ils jouent un rôle indirect dans la mécano-sensation en amplifiant ou en modulant le signal du canal de transduction. (Roudaut et al, 2012).

De nombreuses études portant sur les canaux TRP et DEG/ENAC chez les mammifères n'ont pas réussi à démontrer un rôle fondamental de ces molécules dans la mécanotransduction bien qu'elles semblent moduler la réactivité du toucher. Cependant, ne sachant pas si les canaux de mécanotransduction peuvent fonctionner en dehors de leur contexte cellulaire, les chercheurs ne peuvent pas totalement les exclure (Lumpkin et al, 2010).

II. 2.3. Autres molécules candidates

- Protéines Piezo

Les protéines Piezo ont récemment été identifiées comme des candidats prometteurs impliqués dans la mécano détection (Coste et al, 2010). Les vertébrés ont deux membres Piezo, Piezo 1 et Piezo 2. Piezo 2 est abondant dans les ganglions de la racine rosale alors que Piezo 1 y est à peine détectable. Elles partagent de nombreuses propriétés avec les molécules responsables des phénomènes d'adaptation rapide dans les neurones sensorielles (Roudaut et al, 2012).

- TMC : Transmembrane channel-like

Une étude récente indique que les deux protéines TMC1 et TMC2 sont nécessaires pour la mécanotransduction des cellules du follicule pileux (Kawashina et al, 2011 après Roudaut et al, 2012).

- Stomatin-like protein 3

SLP3 est exprimé dans les neurones des ganglions de la racine dorsale. Les souris déficientes en SLP3 ont révélé une sensibilité réduite des récepteurs des follicules pileux à la stimulation mécanique. Les prochaines recherches se tournent vers la possible implication de cette protéine dans régulation de l'activité des canaux mécano transducteurs (Roudaut et al, 2012).

- Famille KCNK

La sous famille K⁺ serait impliquée dans les définitions du seuil mécanique et du temps d'adaptation des mécanorécepteurs (Roudaut et al, 2012).

II. 3. Théories de mécanotransduction

Il y a plus de 20 ans, les chercheurs pensaient que l'engendrement de potentiel d'action dans les mécanorécepteurs s'expliquait par les propriétés mécaniques des capsules et autres cellules periaxoniques. Puis la découverte de canaux ioniques contrôlés par les forces mécaniques remise en cause cette théorie. Mais aujourd'hui, même en connaissant l'implication des canaux ioniques, le mécanisme lui, reste inconnu (Del Valle et al, 2012). L'importance de la membrane plasmique ainsi que celle des structures intra et extracellulaires ont été démontrées dans la mécanotransduction.

Pour résumer, les canaux ioniques peuvent être contrôlés par trois mécanismes (Del Valle et al, 2012) :

- 1) ils peuvent être ouverts par modification de la membrane cellulaire (déformation ou stress locale) à proximité des canaux ioniques (figure 7.a)
- 2) l'intra et extra domaine cytoplasmique des canaux d'ions sont liés aux protéines du cytosquelette et à la matrice extracellulaire (respectivement) et la tension d'une de ces protéines peut également produire l'ouverture d'un canal ionique (figure 7.b et c)
- 3) les canaux communiquent avec des protéines mécanosensorielles à travers des intermédiaires de signalisation (figure 7.d)

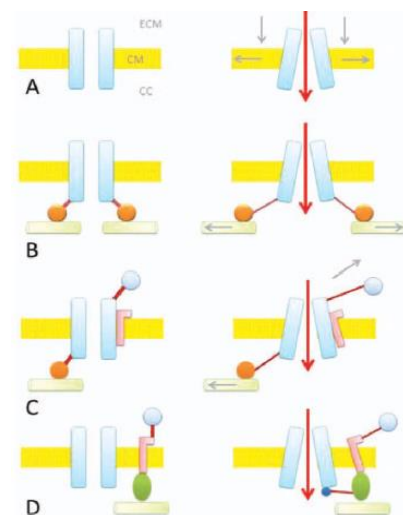


Figure 7 Modèles d'ouverture de canaux ioniques (Del Valle et al, 2012 après Christensen et al, 2007)

III. VOIES DES RECEPTEURS AU CORTEX

Pour résumer, nous avons vu dans les deux premières parties que les informations sensorielles étaient détectées par des récepteurs appelés mécanorécepteurs. Elles sont ensuite transmises au système nerveux central par des fibres afférentes (ou afférences sensoriels).

La morphologie des neurones somatosensoriels est telle que le corps cellulaire est situé dans les ganglions de la racine dorsale et leurs axones projetés d'une part au niveau central et d'autre part au niveau périphérique (pour se terminer dans les mécanorécepteurs). Elles reçoivent donc les informations par les récepteurs (l'influx nerveux) et les renvoient vers le système nerveux central. Les axones situés au niveau central rejoignent la corne dorsale de la moelle épinière par la racine dorsale et viennent contacter d'autres neurones.

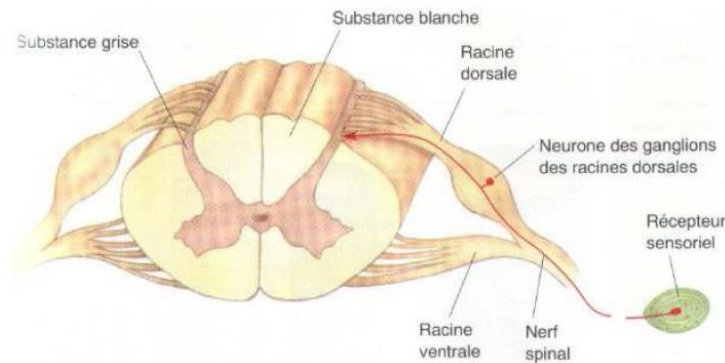


Figure 8 Représentation d'un neurone sensoriel dans la moelle épinière (Cours Univ. Montpellier)

Nous détaillerons dans cette partie deux voies sensorielles ascendantes qui sont la voie dite des colonnes dorsales et du lemnie médian (voie lemniscale) qui transmet les informations tactiles et la voie spinothalamique (voie extra-lemniscate) qui transmet les informations tactiles, nociceptives et thermiques.

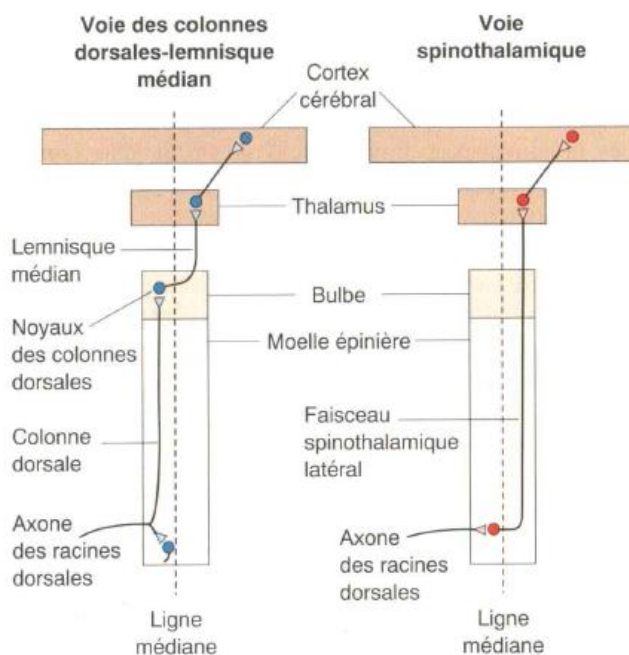


Figure 10 Schéma des deux voies

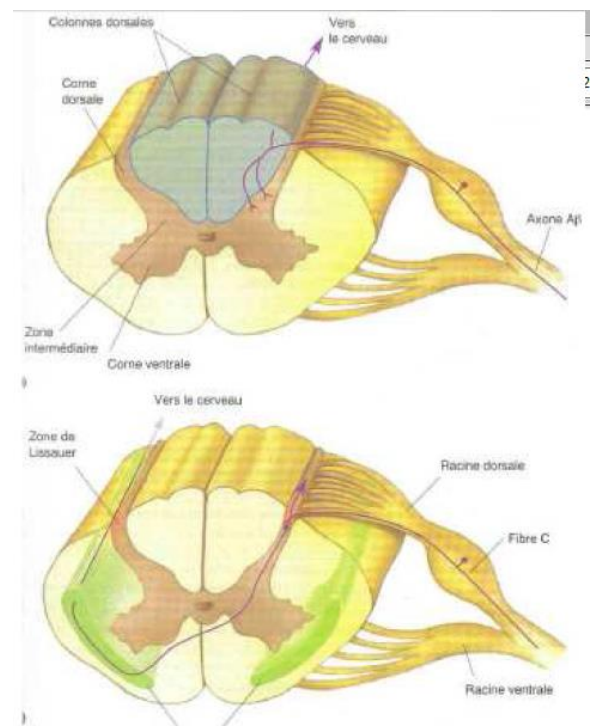


Figure 9 Représentation des voies dans la moelle épinière

III. 1. La voie lemniscale

Cette voie est spécifique aux fibres afférentes A β . Les fibres remontent la moelle épinière jusqu'aux noyaux de la colonne dorsale (DCN dorsal column nuclei) qui sont divisés en deux parties : gracile nucleus et cuneate nucleus (en fonction des neurones présents dans la moitié haute ou basse du corps). C'est à cet endroit que les fibres se terminent et font synapse. L'information sensorielle y est encore ipsilatérale (figure 9) : les neurones des noyaux des colonnes dorsales droites reçoivent les informations des récepteurs du côté droit du corps (et pareil pour le côté gauche). Les axones des neurones des noyaux des colonnes dorsales (neurones de 2ème ordre) décussent et forment le lemnisque médian. Le fait que ce neurone du second ordre décusse de l'autre cote du système nerveux signifie que l'information somatosensorielle provenant du cote gauche du corps sera analysée par notre cerveau droit et vice versa. Les axones des neurones de 2ème ordre traversent, dans le lemnisque médian, le bulbe, le pont et le mésencéphale et se terminent dans le noyau ventral postérieur (VP) latéral du thalamus. Un neurone du 3 ème ordre prend le relai : c'est le neurone thalamique dont l'axone se termine au niveau du cortex somesthésique primaire. C'est à cet endroit que sont analysées les informations (Docteur Dominique Rose, CHU d'Amiens). Dans cette voie, se joignent également les afférences du trijumeau, responsable des perceptions sensorielles provenant de la face et de la tête.

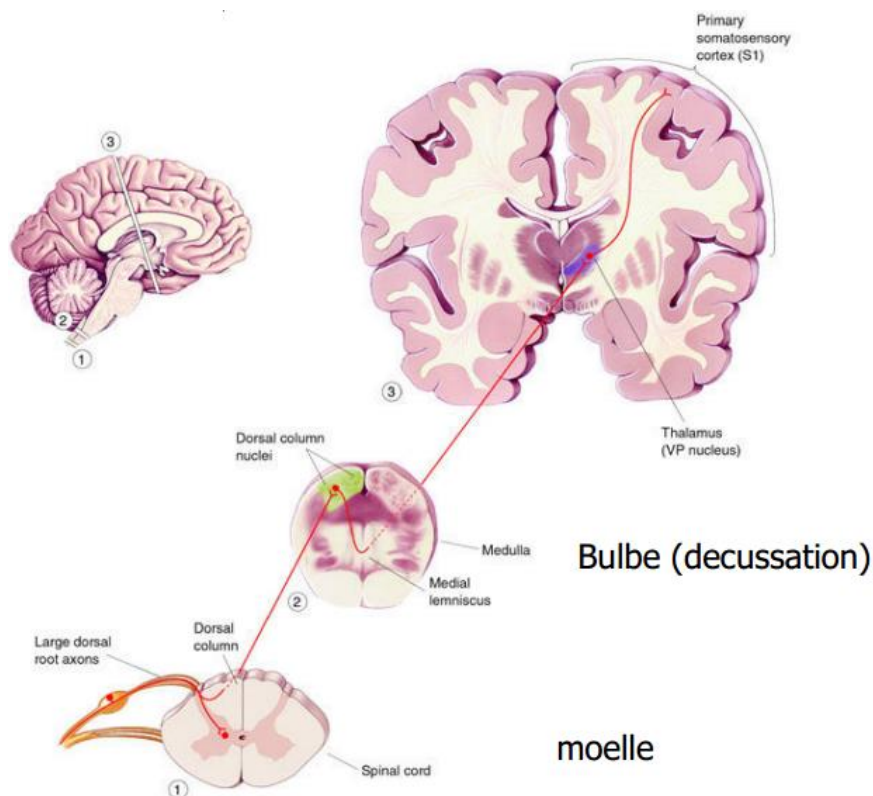


Figure 11 Schéma de la voie lemniscale

III. 2. La voie extra-lemniscale

Cette voie est spécifique aux axones des neurones liés aux informations douloureuses et thermiques (fibres C et A δ) bien que récemment, des chercheurs ont montré que des axones A β empruntaient également cette voie (figure 13) (Roudaut et al, 2012).

A l'intérieur de la corne dorsale, les axones des neurones des ganglions rachidiens font synapse sur des neurones sensoriels spinaux de 2ème ordre (voir figures 9 et 12). Les axones de ces neurones spinaux de 2ème ordre décussent immédiatement au niveau spinal et empruntent le faisceau spinothalamique latéral. Les fibres de ce faisceau parcourent la moelle jusqu'au bulbe, traversent le pont et le mésencéphale près des fibres du lemnisque médian sans faire synapse et atteignent le thalamus. Le faisceau spinothalamique latéral se projette sur le noyau ventral postérieur (VP) latéral et noyaux intra-laminaires non spécifiques du thalamus. Par la suite, l'axone du neurone thalamique de 3ème ordre atteint le cortex et touche des régions corticales beaucoup plus larges que celles liées aux informations proprioceptives et tactiles véhiculées par le lemnisque médian (Docteur Dominique Rose, CHU d'Amiens).

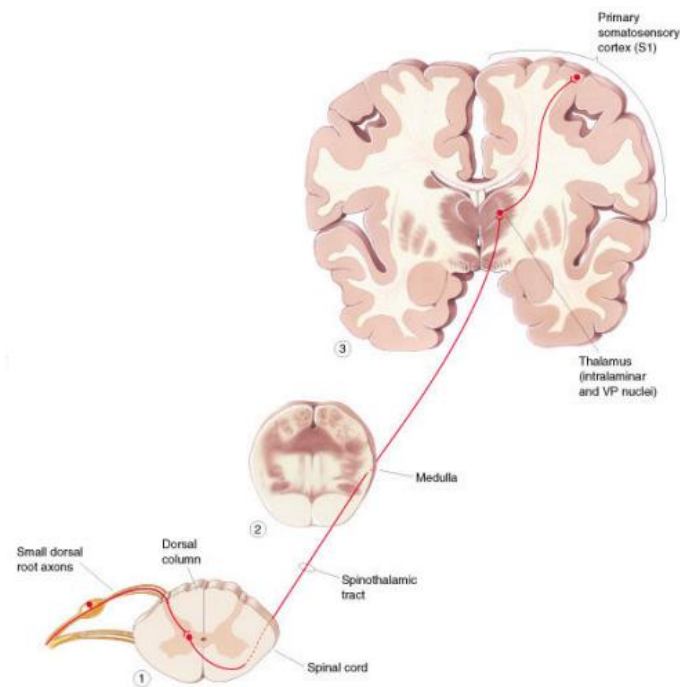


Figure 12 Schéma de la voie extra-lemniscale

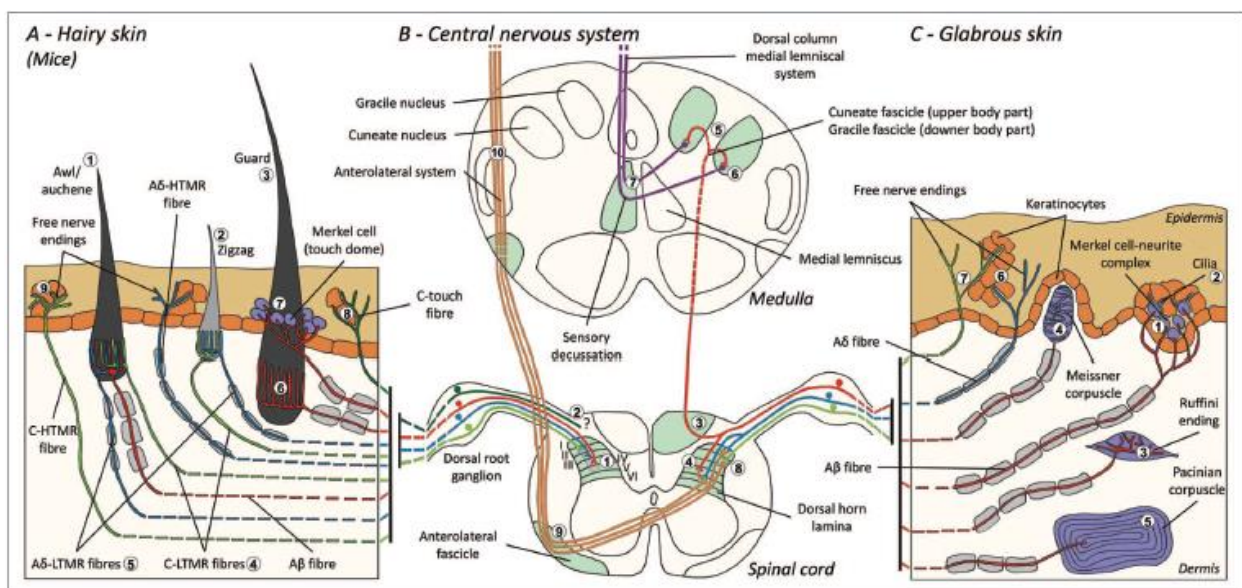


Figure 13 Projections des fibres dans la moelle épinière (Roudaut et al, 2012)

CONCLUSION

Le challenge majeur pour les années à venir va être de réussir à établir une carte et à comprendre les voies centrales permettant de traiter les informations recueillies par chaque système primaire d'afférents. Le prochain objectif pour les neurophysiologistes est de comprendre comment stimuler sélectivement chacun des systèmes avec des stimuli significatifs pour que les voies centrales de chaque système puissent être identifiées et étudiées. Le développement de nouvelles techniques va permettre aux chercheurs de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la mécanotransduction et de mieux définir les circuits du toucher jusqu'au cerveau (Delmas et al, 2011).

L'âge est associé à la réduction de 50 à 60% des principales fonctions de la peau telles que la protection, l'excrétion, la sécrétion, l'absorption ou encore la thermorégulation (Decorps et al, 2013).

Le vieillissement entraîne également la dégradation progressive des perceptions sensorielles cutanées incluant la mécano-sensibilité (Wu et al, 2001). Le déclin des fonctions cutanées est considéré comme une signature typique des changements physiologiques, structuraux et métaboliques qui apparaissent avec le vieillissement (Decorps et al, 2013 après Farage et al, 2008). De plus, la vitesse intrinsèque de vieillissement de la peau peut être dramatiquement influencée par des facteurs personnels ou environnementaux comme le régime, l'exercice, les facteurs psychosociaux ou l'exposition aux UV (Decorps et al, 2013).

I. EFFET DE L'ÂGE SUR LA PEAU

I. 1. Changements structuraux de la peau

Toutes les couches de tissus que constituent la peau subissent des changements dramatiques avec l'âge, incluant une réduction de l'épaisseur de l'épiderme due à un renouvellement plus lent des kératinocytes et une réduction de l'épaisseur du derme accompagnée par une diminution du nombre de mastocytes, fibroblastes et glandes sébacées ainsi qu'un aplatissement de la jonction dermo-épidermique. La génération de collagène, d'élastine et de glycosaminoglycanes est également réduite dans le derme âgé menant à une perte d'élasticité et de rigidité associée avec une diminution des composants viscoélastiques et une déshydratation majeure (figure 14).

Cependant, on ne sait pas à quel point ces modifications structurales liées à l'âge contribuent à une perception tactile déficiente (Decorps et al, 2013).

I. 2. Mécanorécepteurs

Le vieillissement a un effet sur chacun des mécanorécepteurs de la peau (figure 14). Tout d'abord, le nombre de corpuscules de Pacini et de Meissner diminue fortement et leurs structures se détériorent avec l'âge (Decorps et al, 2013 après Stevens et al, 1995). Ces changements structuraux périphériques sont corrélés avec le déclin de la sensibilité tactile (réduction de la sensibilité à la vibration (Decorps et al, 2013 après Verrillo et al, 2002) et au toucher (Decorps et al, 2013 après Stevens et al, 1995).

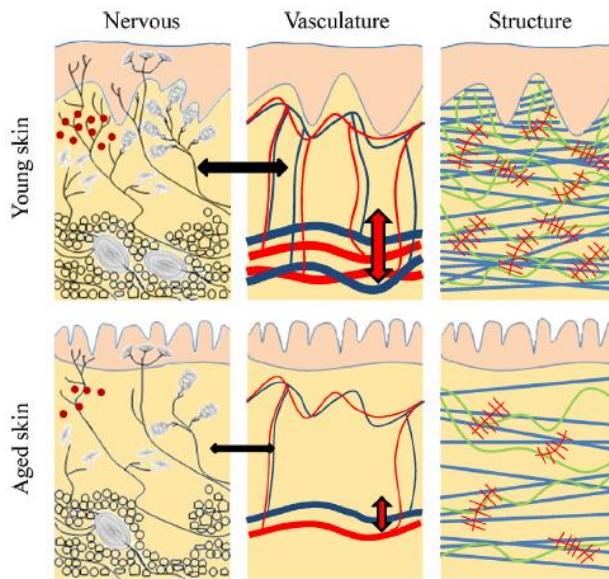
Ensuite, une détérioration des disques de Merkel a été observée avec l'âge chez les rats (Fundin et al, 1997) alors que les complexes neurite-Merkel semblent moins affectés (Paré et al, 2011).

Et enfin, un déclin dans le nombre de corpuscules de Ruffini a été reporté dans les ligaments des sujets âgés (Morisawa, 1998) et des lapins (Decorps et al, 2013 après Aydog et al, 2006) ainsi que des contours irréguliers et aplatis.

En outre, la proportion entre mécanorécepteurs à adaptation lente (cellules de Merkel et corpuscules de Ruffini) et ceux à adaptation rapide (corpuscules de Meissner et Pacini) varie avec l'âge en faveur des mécanorécepteurs à adaptation rapide (Reinke et al, 1996).

I. 3. Canaux ioniques

Bien que les effets de l'âge sur la structure et/ou la fonction des canaux ioniques mécano-sensibles ne soient pas décrits, les chercheurs spéculent qu'ils seraient susceptibles de contribuer aux déficiences tactiles causées par le vieillissement (Decorps et al, 2013).



Avec l'âge :

- Nervous : Diminution des densités des mécanorécepteurs
- Vasculature : Diminution de la Densité et du diamètre des capillaires et augmentation de la tortuosité
- Structure : Diminution du collagène (bleu), de l'élastine (vert), des GAG (rouge)

Réduction de l'épaisseur de l'épiderme et développement de rides.

Figure 14 Changements liés à l'âge (Decorps et al, 2013)

II. EFFET DE L'ÂGE SUR LE SYSTEME NERVEUX

En plus des changements morphologiques des récepteurs périphériques, d'autres anomalies du système sensoriel (seuil de détection, vitesse de conduction nerveuse, changements structuraux des fibres sensoriels, densité des fibres nerveuses) se développent à cause du vieillissement. Ces influences sont considérées comme impliquées dans l'augmentation des seuils de sensations tactiles chez les personnes âgées. En effet, comme nous l'avons vu dans la première thématique, une fois que l'information est détectée par les mécanorécepteurs, cette information est transférée de la périphérie au système nerveux central via des fibres afférentes nerveuses (Decorps et al, 2013 après Cole et al, 2006).

D'autre part, le cerveau diminue en moyenne de 200 grammes durant la troisième jusqu'à la dixième décennie de la vie, en accélérant la perte entre la sixième et la septième décennie. Cette diminution ainsi que d'autres changements se produisant au niveau du système nerveux central sont impliqués dans le ralentissement du processus des stimuli sensoriels (Wickremaratch et al, 2006).

Ces changements fonctionnels et morphologiques du système nerveux sont apparemment reliés à la diminution de la perception tactile liée à l'âge (Decorps et al, 2013 après Periquet et al, 1999).

1. Seuil de détections sensorielles

Les seuils de détections sensorielles ont été comparés en testant un groupe de sujets âgés (55-84 ans) et un groupe de sujets jeunes (19-31 ans) en bonne santé. Kenshalo et ses collaborateurs (d'après la revue de Wickremaratch et al, 2006) ont comparé les seuils pour une détection cutanée sur deux sites du corps (l'éminence thénar (sous le pouce) et la plante du pied). Les six modalités étaient le tactile, la vibration à 40 et 250 Hz, la température (augmentation puis diminution) et la chaleur.

Les sujets âgés étaient significativement moins sensibles aux stimuli mécaniques (vibration et tactile) sur les deux sites. De plus, les pieds des sujets âgés étaient significativement moins sensibles aux stimuli de chaleur que les jeunes pieds. Tous les sujets âgés montrèrent un déficit pour une ou plusieurs modalités sensorielles sur au moins un site. Une autre étude a confirmé qu'avec l'âge, les seuils de détection mécaniques étaient augmentés pour le toucher, la vibration et la pression chez les sujets âgés (Decorps et al, 2013 après Fromy et al, 2010).

- L'augmentation du seuil de détection tactile chez les personnes âgées peut s'expliquer par la diminution de la densité et de la distribution des corpuscules de Meissner et de Pacini et des disques de Merkel dans la peau causant une acuité spatiale réduite (voir dernier point) (Wickremaratchi et al, 2006).
- L'augmentation du seuil de détection de la douleur (thermique) peut être due au changement de fonction des fibres A δ , c'est la raison pour laquelle la perception de la douleur et de la température est généralement dépendante des fibres C chez les personnes âgées (Wickremaratchi et al, 2006). De plus, nous remarquons que les seuils de détection sont généralement indépendants du genre alors que les seuils de douleur sont significativement plus bas chez les femmes que chez les hommes (Rolke et al, 2006).
- L'augmentation du seuil de détection pour plusieurs intensités de vibrations est démontrée par une étude basée sur des tests musculaires de force, d'équilibre, de discrimination somatosensorielle et de temps de réaction. Toutes ces performances déclinent avec l'âge et sur une échelle de pourcentage, le seuil de vibration est le plus rapidement affecté par le vieillissement et est maximal après 65 ans (Wickremaratchi et al, 2006).
- Des recherches ont également démontré une dégradation de l'acuité spatiale avec le vieillissement (diminution de 1% chaque année entre 20 et 80 ans). Par exemple, le seuil d'acuité tactile dans le pied et dans le doigt est en moyenne 80% plus élevé chez les sujets âgés (sup. à 65 ans) comparé aux jeunes (18-28 ans) (Wickremaratchi et al, 2006).

II. 2. Structure et vitesse de conduction des nerfs

Les études électrophysiologiques ont démontré une vitesse de conduction des nerfs plus basse chez les sujets âgés (Di Iorio et al, 2006) et les animaux (Decorps et al, 2013 après Verdu et al, 1996) particulièrement dans les fibres myélinisées à cause de leur gaine de myéline vulnérable. La réduction de l'épaisseur de la myéline observée dans les nerfs périphériques ainsi que ses changements de structure peuvent être attribués à la diminution de l'expression des protéines de myéline et à une myélinogenèse altérée.

En outre, la réduction de la vitesse de conduction nerveuse liée à l'âge peut également être expliquée par la diminution du diamètre de l'axone (Decorps et al, 2013).

Par ailleurs, des études neurophysiologiques ont démontré une diminution de l'amplitude des potentiels d'action sensoriels (expérimentations sur 4000 sujets entre 20 et 95 ans, Rivner et al).

II. 3. Densité des fibres nerveuses

La densité des fibres myélinisées dans les racines dorsales est réduite avec le vieillissement (Wickremaratchi et al, 2006). D'autre part, des expérimentations utilisant des techniques immunohistochimiques ont permis de démontrer que l'âge induisait une diminution de l'innervation épidermique de la face (Decorps et al, 2013 après Besne et al, 2002), du tronc (Lauria et al, 1999), de la jambe distale de l'avant-bras (Chang et al, 2004).

L'expérimentation de Chang et ses collaborateurs consiste à comparer deux groupes de population; le premier étant de jeunes adultes (18-39 ans) et la seconde une population plus âgée (supérieur à 60 ans) pour deux sites : l'avant-bras et la jambe distale (par biopsie). Les résultats qu'ils ont obtenus sont présentés figure 15.

L'effet de l'âge sur les terminaisons sensorielles de la peau y est clairement observé : chez les sujets âgés il y a une réduction de 40 à 42% des nerfs épidermiques dans la jambe et dans l'avant-bras comparé aux jeunes adultes.

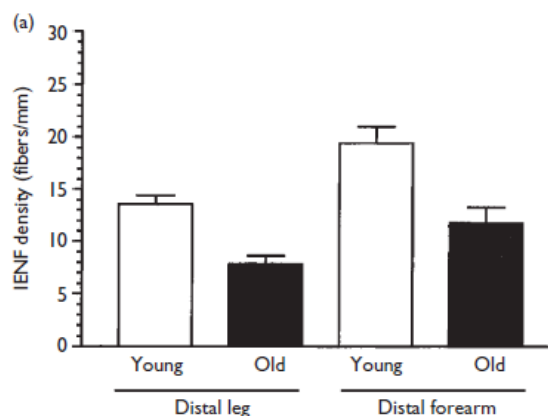


Figure 15 Comparaisons de l'innervation épidermique de l'avant-bras et de la jambe distale avec l'âge (Chang et al, 2004)

Par ailleurs, une technique permettant de séparer l'épiderme et le derme à la jonction entre les deux et l'analyse d'images numériques après immunocoloration du disque de l'épiderme a montré que la densité des fibres nerveuses épidermiques était plus faible chez les sujets âgés au niveau du pied et du mollet (Decorps et al, 2013 après Panoutsopoulou et al, 2009).

Ces études appuient le fait que la densité des fibres nerveuses intra épidermique décline graduellement avec l'âge (Goransson et al, 2004 et Lauria et al, 2010).

CONCLUSION

L'âge affecte des éléments morphologiques et fonctionnels impliqués dans la détection tactile. Une combinaison de plusieurs de ces changements pourrait contribuer à la déficience tactile liée à l'âge. Afin de décrire les procédés du vieillissement et investiguer les pathologies liées à l'âge, les chercheurs peuvent suivre les individus tout au long de leur vie (études longitudinales) ou comparer les individus jeunes et âgés (études croisées). Dans les études croisées, les différences entre adultes et individus âgés ont souvent été basées sur la comparaison de seulement deux groupes expérimentaux. Coleman et ses collaborateurs ont démontré que les changements liés à l'âge n'étaient pas linéaires mais qu'il existe des « ages points » c'est-à-dire des âges spécifiques auxquels des changements apparaissent brusquement (Decorps et al, 2013).

Les effets de l'âge sur la perception tactile sont essentiellement étudiés chez les mammifères, incluant les humains. Cependant étudier l'âge chez les humains est difficile puisque souvent associé à des maladies ou des traitements et il est compliqué de discriminer les effets dus à l'âge et les effets dus aux autres paramètres. Les investigations chez les humains sont réduites comparés aux approches exploratoires chez les modèles animaux (comme le rongeur). De plus, les scientifiques peuvent plus facilement isoler la variable qu'ils souhaitent étudier car les études sur animaux se déroulent dans un environnement très contrôlé : régime, exposition limitée aux polluants, stress... ou tout autre élément qui pourrait affecter la santé ou la durée de vie de l'animal (Decorps et al, 2013).

Les études sont observationnelles et non mécanistiques, ce qui incite à l'utilisation de modèles expérimentaux. Les prochaines études auront pour objectif de mieux comprendre les mécanismes qui amènent à une déficience tactile liée à l'âge et d'améliorer les interventions thérapeutiques (Decorps et al, 2013).

La robotique actuelle possède de nombreuses applications dans des domaines aussi nombreux que variés. En plein essor, la robotique est en constante évolution. Bien que de grands progrès aient été réalisés dans ce domaine, restaurer le sens du toucher chez un robot ou sur une prothèse reste encore à l'état d'expérimentation. Nous présenterons dans cette partie les travaux de recherche de plusieurs grandes universités et détaillerons les véritables avancées scientifiques qu'ils permettent.

I. VERS UNE PEAU ARTIFICIELLE

I. 1. Harvard et ses capteurs bon marché

Les chercheurs de la Harvard School of Engineering and Applied Sciences (SEAS) travaillent sur l'amélioration continue de l'autonomie des humanoïdes. Dans l'optique de rendre les robots capables de discerner ce qu'ils touchent, ils ont mis au point un capteur bon marché permettant de détecter le poids d'un objet grâce à la pression atmosphérique (Loubens, 2013).

Ce capteur, appelé TakkTile, permet à n'importe quel bras mécanique de se transformer en véritable main robotisée intelligente. Si jusque-là, la plupart des capteurs étaient piézoélectriques, TakkTile est un capteur MEMS (Microsystème électromagnétique) barométrique qui mesure la pression de l'air, supportant jusqu'à 11 kg de pression. C'est justement grâce à la pression atmosphérique que le capteur peut déterminer le poids d'un objet. Le capteur est ensuite recouvert d'un élastomère afin de le protéger tout en conservant sa sensibilité. Les chercheurs le disent à la fois « très résistant et très sensible » (Tenzer et al, 2012).

Ce capteur, que l'on peut surmouler à un doigt de robot tend à créer une peau artificielle qui pourrait déboucher sur la fabrication de robots dotés du sens du toucher. Une fois le capteur disposé sur une main mécanique, l'humanoïde pourrait par exemple tenir un ballon de baudruche dans les mains sans l'éclater ou tenir une clé pour ouvrir une porte (Asimov, 2013).

La sensibilité de ce capteur est bonne, cependant la résolution reste encore faible de l'ordre de 3 à 5 mm là où d'autres atteignent les centaines de microns. Cependant, TakkTile est plus facile à mettre en œuvre et possède un prix plus abordable (Loubens, 2013).

C'est sur ce dernier point que les créateurs de TakkTile souhaitent mettre l'accent. En effet, la reconnaissance tactile est présente sur le marché depuis plusieurs années mais TakkTile est le premier à être accessible au plus grand nombre.

Le coût abordable de ce capteur permet à tous les roboticiens, professionnels ou amateurs, d'avoir accès à un objet technologiquement à la pointe. Ce coût peut s'expliquer par le fait que les baromètres sont des pièces bon marché que l'on retrouve chez certains téléphones portables ou dans les GPS. Le procédé de fabrication de la puce a été breveté (Tenzer et al, 2012).

Véritable premier pas vers une peau artificielle, l'équipe cherche à commercialiser ce capteur avec l'aide de l'Office of Technology Development de l'université de Harvard soit en le vendant directement préfabriqué, soit sous forme de licence aux entreprises (Asimov, 2013).

1. 2. Le projet Roboskin

Le projet ROBOSKIN « Skin-based technologies and capabilities for safe, autonomous and interactive robots » rassemble des chercheurs italiens, suisses et anglais. Financé par l'UE, il a pour but de développer de nouvelles technologies de capteurs permettant aux robots d'acquérir un sens artificiel du toucher (Cordis). Pour ce faire, une nouvelle peau artificielle couvrant la totalité du corps d'un robot humanoïde a été présentée. Elle fournit des mesures de pression et des informations sur la forme ou la structure de la surface de contact entre le robot et l'environnement (Cannata et al, 2008).

Le système est basé sur une maille de capteurs interconnectés formant une structure en réseau. Chaque capteur a une forme triangulaire et est recouvert d'un substrat flexible, permettant à la peau de s'adapter aux surfaces courbes ou lisses. Trois ports de communications placés au bord de chaque capteur permettent de communiquer avec les autres capteurs. Les mesures tactiles sont envoyées à un tableau microcontrôleur (Cannata et al, 2008) capable de lire les mesures de pression.

Le système peut s'adapter et réduire sa résolution spatiale, ce qui lui permet d'améliorer son temps de réponse. Cette particularité lui permet de détecter un premier contact très rapidement à une résolution spéciale faible puis d'augmenter sa résolution dans la région de contact afin de reconstruire précisément la répartition de la pression de contact (Cannata et al, 2008).

La cognition en robotique étant complexe, l'équipe de chercheurs a commencé en réalisant des tests en laboratoire afin de classifier les types de toucher. En effet, les matériaux ne lui permettant pas de distinguer le toucher utile de celui indésirable, chaque sensation du robot a été répertoriée afin d'enrichir une base de données tactile (Cordis).

« Avec nos capteurs, le robot pouvait ressentir ou détecter tout contact et les données compilées ont formé une part importante de la classification de contacts que nous avons établie, notamment dans le cas de la distinction entre le contact consenti et non consenti » a expliqué le professeur Cannata (Cordis).

En parallèle, des patchs sensitifs ont été testés sur différents points de contact du robot (pied, joue, bras) de l'Université de Hertfordshire (Kaspar). Cela ayant pour objectif d'améliorer son autonomie et la précision de ses mouvements (Mécatronique, 2013).

Il est important de préciser que ce concept n'est pas nouveau. En effet, en 2011, des chercheurs de l'université de Munich avaient présenté une peau artificielle permettant aux robots de détecter des sensations liées aux éléments extérieurs. Néanmoins, le projet Roboskin se distingue par les matériaux employés que sont les matériaux piézoélectriques et les semi-conducteurs organiques flexibles (Comte, 2013).

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps à faire apparaître à leur surface des charges d'électricité quand ils sont soumis à une pression. Ces matériaux ont permis à la peau artificielle modelée à partir de vraie peau, possédant un minuscule réseau de fibres nerveuses, de ressentir les changements comme le chaud et le froid, le rugueux ou le lisse (Comte, 2013). L'avantage des matériaux piézoélectriques est qu'ils peuvent réagir aux changements par le contact avec une force externe. Quant aux capteurs utilisant les semi-conducteurs organiques flexibles, il est possible d'y intégrer des puces sur les différents matériaux organiques comme une peau artificielle (Cordis).

Le projet Roboskin s'est clôturé à l'été 2012 mais les recherches ne s'arrêtent pas là. Tous les prototypes sont à disposition de toute autre recherche scientifique. Le professeur Cannata a expliqué que même si les capteurs tactiles ne relevaient pas de l'inédit, le projet ROBOSKIN a réussi à développer un système de production pour l'établissement de la perception tactile pour différents robots (Cordis).

1. 3. Georgia Institute of Technology

Des chercheurs du Georgia Institute of Technology ont mis au point une peau artificielle composée de nano-fils d'oxyde de zinc disposés verticalement sur un support (substrat flexible) qu'ils ont ensuite disposé entre deux électrodes transparentes (transistors) (Wu et al, 2013). Cette peau « artificielle » est capable de traduire l'énergie mécanique en signal électrique.

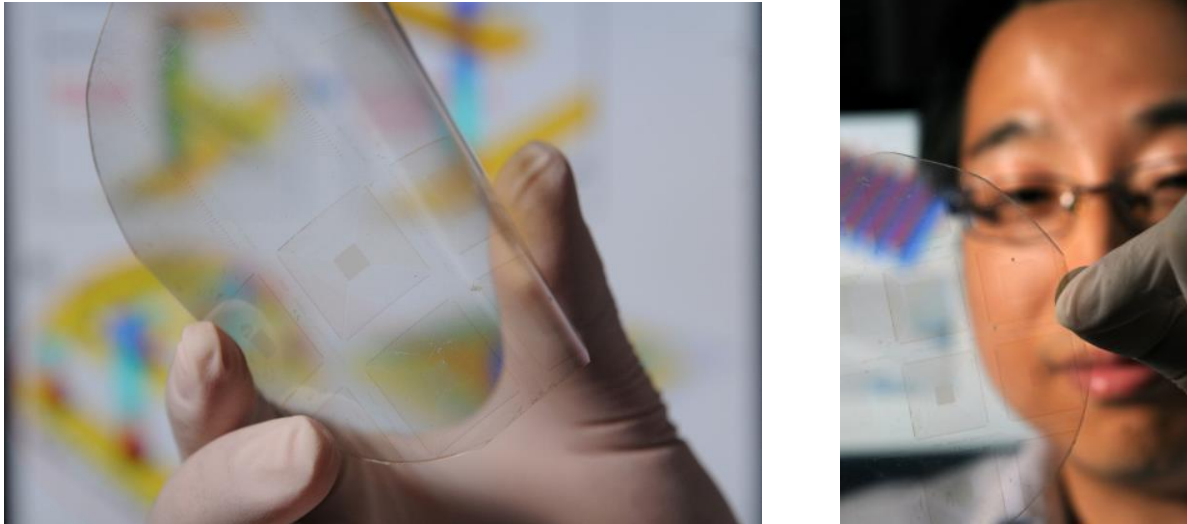


Figure 16 La peau artificielle et Wenzhuo Wu, l'un de ses créateurs (Georgia Tech)

La matrice contient plus de 8000 transistors piézoélectriques, chacun pouvant indépendamment produire un signal électrique lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique (Wu et al, 2013).

Le principe de leur peau artificielle repose donc sur la piézoélectricité. L'oxyde de zinc fait partie des matériaux qui se polarisent eux-mêmes lorsqu'ils sont soumis à une déformation mécanique.

En réponse à une contrainte mécanique, les nanofils de 500 à 600 nm de diamètre génèrent un courant électrique capté par l'un des transistors du circuit imprimé flexible (Chaput, 2013).

En retour, les nanofils convertissent l'information en signaux électriques, simulant ainsi les réponses engendrées par le toucher. Les chercheurs affirment que le degré de précision de ce dispositif est 15 fois plus élevé que les précédentes (Chaput, 2013).

Le point fort de cette peau artificielle est sa résolution : les chercheurs indiquent qu'elle serait inférieure à 100 μm et attestent qu'elle détecte des changements de pression de l'ordre de 10 kPa, égalant ainsi la sensibilité de notre propre peau.

En outre, sa capacité de détection ne diminue pas avec l'usage (expérimentations : 24h dans l'eau distillée et pas de différence de performance) (Wu et al, 2013).

Différentes applications de cette peau artificielle sont possibles : que ce soit dans le but d'équiper une prothèse humaine ou un robot pour lui conférer le sens du toucher mais également donner une signature « multidimensionnelle » enregistrant le graphisme, la pression en chaque point et la vitesse d'écriture (Wu et al, 2013).

Les prochaines recherches seront consacrées à produire une matrice composée de nanofils individuels plutôt que d'un réseau et d'intégrer la matrice sur un dispositif silicium CMOS (Complementary metal oxide semi-conductor). L'utilisation de nanofils individuels permettrait d'améliorer la sensibilité des matrices d'au moins 3 en ordre de magnitude (Wu et al, 2013).

II. VERS UNE PROTHESE REPRODUISANT LE SENS DU TOUCHER

II. 1. *Chicago et les prothèses de main*

Les scientifiques de l'université de Chicago sont en mesure de simuler les sensations inhérentes au toucher via de simples électrodes chez les singes.

Ce programme a été initié en 2006 par la DARPA (Agence chargée des projets de recherche avancée de la Défense des Etats Unis) afin d'aider les vétérans victimes d'une perte de membre ou d'une lésion de la moelle épinière. En plus des recherches ayant pour but d'augmenter la mobilité et l'adresse des prothèses, les chercheurs se sont intéressés au rétablissement du lien moteur et des sensations du membre. En effet, il est difficile de connaître la pression exercée sur un objet ou sa position exacte dans une main prothétique sans un retour somatosensoriel provenant des doigts (Fenner, 2013).

Parmi les chercheurs se trouve le professeur Bensmaia qui travaille depuis plusieurs années sur la base neurale correspondant au sens du toucher. Avec son équipe, il a travaillé sur un prototype de main prothétique équipée de capteurs envoyant des signaux électriques vers un réseau d'électrodes reliées au cerveau permettant de recréer une réponse équivalente à celle du toucher avec une main naturelle (Tabot et al, 2013).

Les chercheurs ont mené leurs expérimentations sur un groupe de macaque rhésus. Tout d'abord, ils ont entraîné les singes en les touchant à l'aide d'une sonde à différents niveaux de pression. Ensuite, des électrodes ont été implantées chez les singes dans la zone du cerveau correspondant au sens du toucher. Les singes ont reçu des impulsions électriques ayant pour but de stimuler la sensation du toucher. A noter que les chercheurs avaient dissimulé les mains des signes pour ne pas qu'ils puissent voir qu'on les touchait et ainsi compenser avec la vision (Rahman, 2013).

Les chercheurs ont analysé les données correspondantes aux différents types de stimuli et ont créé une fonction reliant l'impulsion électrique à différents niveaux et intensités du toucher de la main. Cela signifie que pendant que les signes touchaient un objet ou le prenaient en main, les chercheurs analysaient les schémas neuronaux et ont pu ainsi établir une carte reliant chaque zone de la peau à une zone de cerveau (Tabot et al, 2013).

Enfin, lorsque les chercheurs ont renouvelé l'expérience avec une main prothétique connectée aux électrodes implantées dans le cerveau du signe, les macaques ont réagi de la même façon que la stimulation vienne de leur propre main ou de la prothèse. Ils n'ont pas fait de différence entre le signal réel et le signal créé artificiellement (Rahman, 2013).

Après accord de la FDA, les essais auront bientôt lieu sur les humains. Ces progrès vont permettre d'accroître la dextérité des prothèses des membres supérieurs et constituent une avancée majeure dans la restauration du sens du toucher (Site de l'Université de Médecine de Chicago).

II. 2. Projet LifeHand2

L'édition du 5 Février 2014 de la revue *Science Translational Medicine* fait part d'une avancée extraordinaire : Dennis Aabo Sorensen, danois de 36 ans et amputé de sa main gauche depuis dix ans a retrouvé le sens du toucher grâce à une prothèse artificielle expérimentale reliée aux nerfs de son bras (Carter, 2014).

Un groupe de chercheurs de plusieurs universités et hôpitaux suisses italiens et allemands dans le cadre du Projet Européen LifeHand2 est à l'origine de cette main « bionique ».

Il était possible jusque-là d'ouvrir ou de fermer une prothèse de main à l'aide d'électrodes implantées qui captent les signaux musculaires.

Cependant, cela n'offrait pas aux patients la possibilité de retrouver une sensibilité. Cette nouvelle prothèse de main, quant à elle, permet au patient d'ajuster sa force pour saisir un objet et d'identifier sa forme ou sa texture (Sanctuary, 2014).



Figure 17 Prothèse de main du projet LifeHand2 (Prensilia)

Le dispositif est composé d'une toute nouvelle prothèse de main équipée de capteurs qui réagissent aux variations de tension de tendons artificiels. Les informations fournies par ces capteurs sont ensuite transmises à un système électronique qui les convertit en signaux électriques. En soi, les signaux électriques ne constituent pas une information que le système nerveux peut interpréter. C'est la raison pour laquelle afin de les convertir, les chercheurs ont mis au point une série d'algorithmes. Une fois traduits en un langage analogue aux impulsions nerveuses, les signaux peuvent être transmis aux quatre électrodes greffées sur les nerfs périphériques du bras du patient (situés au niveau du moignon). Le sens du toucher est alors rétabli (Sanctuary, 2014).

Les électrodes (ultra-minces) ont été développées par Thomas Stieglitz et son équipe de l'Université de Freiburg, en Allemagne. Elles permettent de transmettre les signaux électriques au système nerveux. Elles ont été conçues afin d'être implantées de manière transversale dans les nerfs périphériques, ce qui représente une première mondiale (Sanctuary, 2014).

Dennis Aabo Sorensen en a fait l'expérience en janvier 2013, à l'Hôpital Gemelli de Rome, où il a été équipé du dispositif. Les électrodes ont été implantées dans bras gauche de l'amputé, à l'intérieur des nerfs cubital et médian (Sanctuary, 2014).



Figure 18 Dennis Aabo Sorensen et la prothèse de main issue des recherches du Projet LifeHand2 (Science Translational Medicine)

Près de trois semaines de tests et de calibrage ont été nécessaires avant que la prothèse n'ait pu être branchée aux électrodes. Denis Aabo Sorensen a alors réalisé plusieurs exercices, le tout équipé d'un masque pour les yeux et d'un casque sur les oreilles pour ne dépendre que de son sens du toucher (Sanctuary, 2014).

Tout d'abord, différents objets ont été placés entre ses doigts (une boule de coton, une mandarine, une bouteille, un morceau de bois...), Denis a pu déterminer grâce à son sens du toucher la forme et la consistance de l'objet (plus ou moins dur).

Par la suite, le danois a également été capable d'adapter la force qu'il souhaitait appliquer à sa prothèse en fonction de l'objet qu'il voulait saisir. «C'est la première fois qu'une personne amputée retrouve une perception sensorielle en temps réel avec un membre artificiel» a déclaré Silvestro Micera (chercheur suisse de l'EPFL, coauteur de l'étude) (Sanctuary, 2014).

La durée légale de l'essai clinique n'a permis à Denis que de garder les électrodes pendant seulement un mois. Il reste donc à déterminer si ces résultats peuvent être obtenus sur d'autres personnes et surtout sur le long terme (Sanctuary, 2014).

Il est difficile à ce stade d'estimer le prix d'une telle prothèse. Dans les années à venir, les chercheurs souhaitent réussir à miniaturiser les composants électroniques afin de les intégrer complètement à la prothèse. En outre, ils comptent affiner leur dispositif sensoriel afin de parvenir à une meilleure résolution du toucher pour que le patient puisse ressentir les mouvements des doigts de façon plus précise (Sanctuary, 2014).

Par ailleurs, une équipe américaine de l'Université Case Western Reserve à Cleveland travaille sur un concept voisin (publication à venir). La seule différence réside dans le fait que les électrodes sont implantées autour des nerfs périphériques du bras et non directement reliées à l'intérieur. L'équipe américaine considère que son approche est moins invasive et comporte moins de risques de dégradation des signaux nerveux (Le Monde Sciences et Techno, 2014).

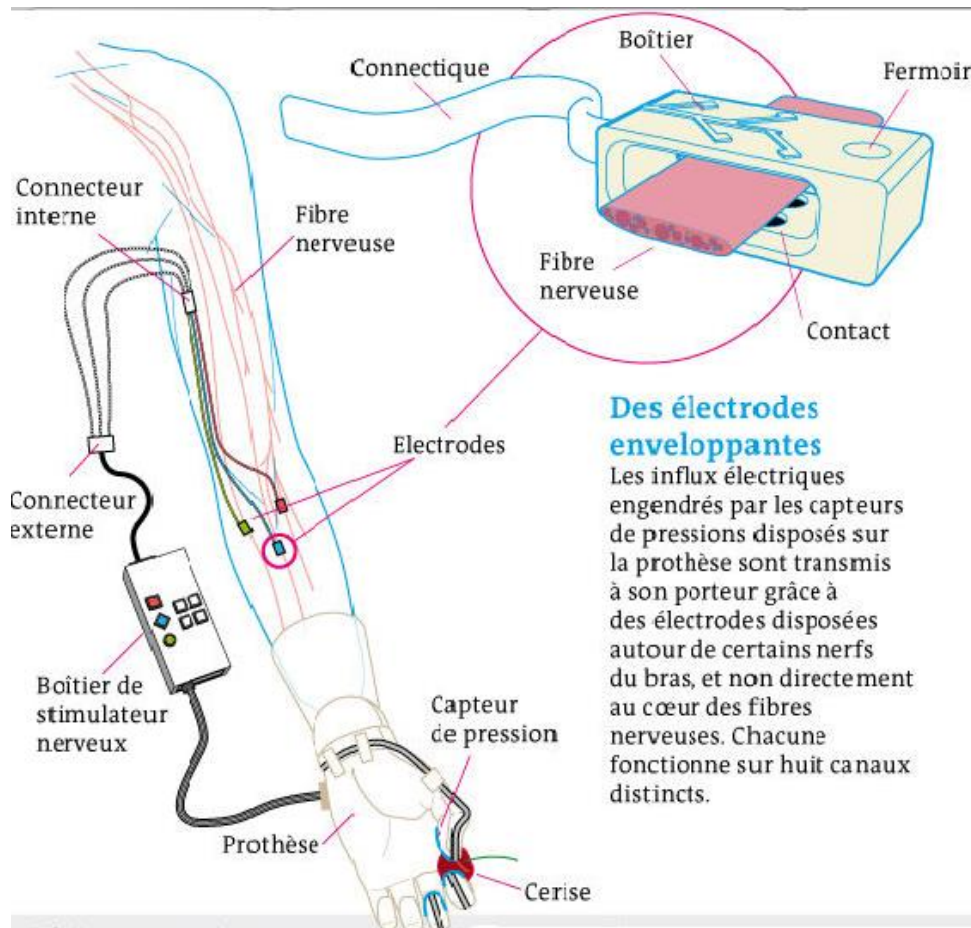


Figure 19 Schéma du dispositif de l'équipe américaine (Henri Olivier, Le Monde)

Les premières prothèses de main dites sensibles pourraient arriver le marché d'ici une dizaine d'années. A plus longue échéance, d'autres méthodes pourraient permettre de donner une sensibilité à des membres artificiels, via l'implantation d'électrodes dans le cerveau (voir Université de Chicago) afin d'y stimuler les aires sensorielles ou le recâblage des neurones sensitifs lésés vers des muscles actifs (Minet, 2014).

III. VERS UN SENS DU TOUCHER PAR LES VIBRISSES

Le projet Biotact (Biomimetic Technology for vibrissal Active Touch) démarré en 2008 pour une durée de 4 ans, a rassemblé 8 centres de recherches (1 américain, 6 européens et 1 israélien) et une entreprise française BVS (Brain Vision Systems spécialisée dans la vision artificielle). Financé par l'UE, il est à l'origine de nouveaux robots semblables à des rongeurs équipés de senseurs tactiles directement inspirés des vibrisses, ces longs poils plantés sur le museau de nombreux mammifères (Goudet, 2012).

Tony Prescott, professeur de neurosciences à l'Université de Sheffield au Royaume-Uni et coordinateur du projet, assure que les capteurs tactiles développés dernièrement pour les robots connaissent un gros problème d'usure puisqu'ils se situent sur le bout des doigts et sont en interaction constante avec des objets ou des surfaces. C'est pourquoi le groupe de chercheurs s'est tourné vers un dispositif tactile plus robuste et plus sensible : les vibrisses (Cordis).

Le but étant de reproduire dans un système artificiel le fonctionnement des vibrisses naturelles.

«Les moustaches sont un moyen naturel de détecter les objets par le toucher», a déclaré le professeur Prescott (Cordis).

Les chercheurs ont étudié de nombreux mammifères tels que la souris, le rat ou la musaraigne et ont cherché à comprendre la façon dont ils usent de leurs moustaches (les vibrisses) afin de percevoir leur environnement et détecter des objets (études comportementales).

Ils ont remarqué que l'animal pouvait positionner la pointe de ses vibrisses de façon précise et qu'il pouvait contrôler leurs déplacements afin d'obtenir de nombreuses d'informations sur un objet ou une surface. Il peut explorer son environnement uniquement grâce à son sens du toucher (Goudet, 2012).

Ils ont alors mis en place un réseau de capteurs tactiles semblable à des vibrisses qu'ils ont implanté sur des robots similaires à des rats ne pouvant se déplacer qu'en utilisant le toucher (Cordis).

Leur technologie mesure à la base de la vibrisse la vibration qu'engendre un contact avec un objet ou une surface. Grâce à de petits moteurs, chaque poil ou réseau de poils est déplacé et frotté contre un objet, imitant la manière dont les rongeurs agitent à grande vitesse leurs vibrisses d'avant en arrière. Des logiciels analysent les informations provenant des vibrisses pour déterminer à quelle distance se situe un objet, s'il est en mouvement ou encore la nature de sa surface (Goudet, 2012).

Comme expliqué plus haut, les chercheurs se sont tournés vers les moustaches en citant un problème d'usure des capteurs tactiles classiques situés au bout des doigts. Grâce à ce nouveau dispositif, les composants électroniques précieux se situent à la base de la vibrisse et n'entrent jamais en contact avec les objets ou les surfaces (Cordis).

Plusieurs robots et différents capteurs ont été créés :

- La souris e-Puck qui détecte les objets autour d'elle grâce aux mouvements de ses 6 senseurs tactiles (Goudet, 2012).



Figure 20 Souris e-Puck (BVS)

- La musaraigne Shrewbot n'est équipée d'aucun capteur visuel et peut se déplacer uniquement grâce au toucher. Elle peut également suivre un objet en déplacement en utilisant ses longues vibrisses (Goudet, 2012).

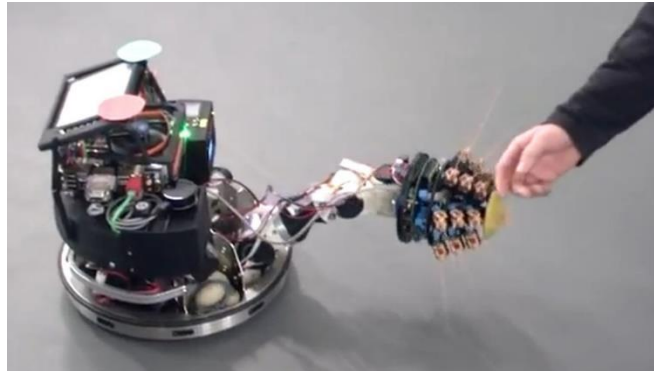


Figure 21 Musaraigne Shrewbot (Bristol Robotics Lab)

- Quant au MechaLobster, il ne dispose que d'une seule longue vibrisse. Avec ses quatre pattes articulées et son corps étanche, il a été conçu pour explorer un environnement aquatique même lorsque la visibilité est nulle (Goudet, 2012).

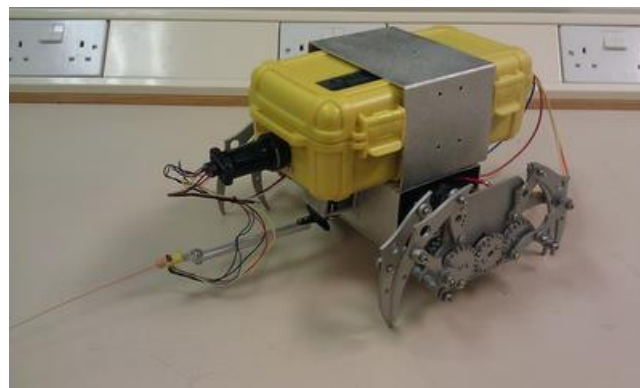


Figure 22 MechaLobster (BVS)

Les applications de cette technologie sont multiples : des robots comme Shrewbot seraient en mesure d'aider les pompiers à trouver des personnes piégées par le feu ou à des endroits où la fumée, la poussière ou l'obscurité font obstacle à la vision (Cordis).

Des robots comme MechaLobster pourraient être impliqués dans le déclassé nucléaire afin d'inspecter des bassins contenant des déchets nucléaires, dans le secteur pétrolier ou dans l'archéologie sous-marine (Cordis).

Les capteurs à vibrisses pourraient être utilisés dans le domaine médical afin de donner un retour tactile extrêmement sensible lors des interventions chirurgicales non invasives permettant de détecter un os ou un certain type de tissu par exemple. Dans la fabrication, ce dispositif pourrait servir à renseigner sur la qualité des produits ou bien les trier en fonction de leur texture. Une autre application pourrait concerner la vie courante : ce dispositif placé dans un aspirateur permettrait de détecter les différentes surfaces et ainsi modifier ses réglages en fonction du sol aspiré (Cordis).

L'université de Sheffield a travaillé avec le South Yorkshire Fire and Rescue afin de réaliser à l'aide de cette nouvelle technologie un casque pour pompier (associant des capteurs à ultrasons pour la navigation et des actionneurs pour le retour tactile) (Cordis).

Le rapport de Cédric Fleury datant de 2007 intitulé « Simulation sensorielle pour la réalité virtuelle : cas du toucher et de la proprioception » souligne les différentes stimulations existantes pour le toucher. D'une part, la stimulation vibrotactile qui a pour but de stimuler les mécanorécepteurs par des microvibrations. Actuellement, il n'est pas encore possible de stimuler indépendamment un type de récepteur en particulier. D'autre part, la stimulation électrotactile qui consiste à émettre un courant dans la peau à l'aide d'électrodes cutanées directement dans les fibres nerveuses. Le courant peut être émis en fonction de la profondeur dans la peau ou de l'orientation (anode qui stimule les axones perpendiculaires (RA) et cathode qui stimule les axones parallèles a la peau(SA)).

Par ailleurs, dans la partie application de son dossier, il fait part d'un dispositif à retour tactile appliqué à la réalité virtuelle, l'Electric Mouse. Cette application a été réalisée par Kajimoto et al en 2001.



Figure 23 Electric Mouse (Kajimoto et al, 2001)

La souris électrique est composée d'une matrice de 4x4 électrodes situées au centre de la souris et d'un capteur de force localisé sous l'électrode afin de mesurer la pression du doigt et de réguler l'intensité du courant émis par les électrodes.

En fonction du mouvement de la souris, le mode de stimulation est changé de façon à ce que le sujet ressente l'existence d'objets stationnaires sous sa peau. La fréquence de stimulation est réglée en fonction de la vitesse de déplacement de la souris, ce qui permet de percevoir la vitesse de déplacement du doigt par rapport à la surface virtuelle et donc de ressentir les différentes textures.

Conclusion

Ce dossier est le fruit d'un travail de recherche à travers livres, publications et articles de presse qui m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances physiologiques sur le toucher de la peau. Bien que peu d'études aient été parues, j'ai été surprise du grand nombre d'informations connues sur le sujet.

Néanmoins, les mécanismes mis en œuvre lors de la mécanotransduction restent encore assez méconnus et feront sans doute l'objet de nombreuses publications futures.

Par ailleurs, il est regrettable de ne pas obtenir plus d'informations sur les types de peau sur lesquels sont effectuées les différentes expérimentations recensées dans les publications.

Ce projet constitue, hors stage, notre premier lien direct avec une entreprise qui, pour ma part, est en adéquation totale avec mon projet professionnel. Comprendre et respecter les attentes de l'entreprise vis-à-vis du projet est primordial et nous permet de contribuer à une véritable problématique d'actualité donnée.

La partie la plus difficile pour ma part a été de faire la synthèse de ce projet car je ne dispose pas d'assez de recul pour distinguer les informations indispensables de celles qui le sont un peu moins.

Cette étude n'est que la première étape d'une grande thématique démarrée chez Dior, l'objectif étant à terme, de mettre en place des méthodes de caractérisation du toucher de la peau appliquées à la cosmétique.

BIBLIOGRAPHIE

PARTIES INTRODUCTION ET RAPPELS PHYSIOLOGIQUES DE LA PEAU

Livres

Ackerman D. Le livre des sens. Grasset, 1991.

***Bouillon C.** La Peau: Une enveloppe de vie. Gallimard, 2002.

Franceschini P. La peau et son vieillissement : Un exposé pour comprendre, un essai pour réfléchir. Flammarion, 1994.

***Hill-Sylvestre MP, Ottavy F.** La Peau: La dermatologie au service de la beauté. Ellipses, 2013.

Sources Internet

[Le Figaro Santé, Structure et rôle de la peau.](#)

[Site d'information de la société française de Dermatologie. La peau c'est quoi ?](#)

Cours

Christine Lafforgue, UV Cosmétiques CDP 2014.

BIBLIOGRAPHIE DE LA PARTIE PHYSIOLOGIE

*Publications non citées

☐ Publications importantes

Abraira VE, Ginty DD. 2013. The sensory neurons of touch. *Neuron* 79(4):618-39.
Département de Neuroscience, Institut Médical Howard Hughes, Baltimore, Etats-Unis.

***Boulais N, Misery L.** 2008. The epidermis: a sensory tissue. *European Journal of Dermatology* 18(2):119-27.
Laboratoire de Neurobiologie cutanée, Université de Brest, France.

***Chalfie M.** 2009. Neurosensory mechanotransduction. *Nature* 10:44-52.
Département des Sciences Biologiques, Université de Columbia, New York, Etats Unis.

Delmas P, Hao J, Rodat-Despoix L. 2011. Molecular mechanisms of mechanotransduction in mammalian sensory neurons. *Nature Reviews* 12:139-53.
Centre de Recherche en Neurobiologie et Neurophysiologie, Université de la Méditerranée, Marseille, France.

Del Valle ME, Cobo T, Cobo JL, Vega JA. 2012. Mechanosensory neurons, cutaneous mechanoreceptors, and putative mechanoproteins. *Microscopy Research and Technique* 75(8):1033-43.
Département de biologie cellulaire et de morphologie, Université d'Oviedo, Espagne.

***Hamann W.** 1995. Mammalian cutaneous mechanoreceptors. *Progress in Biophysics & Molecular Biology* 64(1):81-104.
Département d'Anesthésie, Hopital Guy, Londres, Angleterre.

Johansson RS, Vallbo AB. 1979. Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *The Journal of Physiology* 286:282-300.
Département de Physiologie, Université d'Umeå, Suède.

Johnson KO. 2001. The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Current Opinion in Neurobiology* 11(4):455-61.
Institut Krieger, Université Johns Hopkins, Baltimore, Etats-Unis.

Li L, Rutlin M, Abraira VE, Cassidy C, Kus L, Gong S, Jankowski MP, Luo W, Heintz N, Koerber HR, Woodbury CJ, Ginty DD. 2011. The functional organization of cutaneous low-threshold mechanosensory neurons. *Cell* 147(7):1615-27.
Département de Neuroscience Solomon H Snyder et Institut Médical Howard Hughes, Université Johns Hopkins, Baltimore, Etats-Unis.

Lumpkin EA, Marshall KL, Nelson AM. 2010. The cell biology of touch. *The Journal of cell biology* 191(2):237-48.
Département de Dermatologie, Université de Columbia, New York, Etats-Unis.

***Makoto T, Bautista DM.** 2009. Mammalian somatosensory mechanotransduction. *Current Opinion in Neurobiology* 19:362-69.

Département de biologie moléculaire et cellulaire, Université de Californie, Berkeley, Etats Unis.

McGlone F, Reilly D. 2010. The cutaneous sensory system. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 34:148-59.

Département de Sciences Neurologiques, Liverpool, Angleterre et Unilever.

***Montagna W.** 1977. Morphology of cutaneous sensory receptors. *The Journal of Investigative dermatology* 69:4-7.

Centre de Recherche de l'Oregon, Beaverton, Etats Unis.

***Munger BL, Ide C.** 1988. The structure and function of cutaneous sensory receptors. *Archives of histology and cytology* 51(1):1-34.

Département d'Anatomie, Centre Médical Milton S. Hershey, Université d'état de Pennsylvanie, Etats Unis.

***Oaklander AL, Siegel SM.** 2005. Cutaneous innervation: form and function. *Journal of the American Academy of Dermatology* 53(6):1027-37.

Département d'Anesthésiologie, Hôpital général des Massachusetts, Ecole médicale d'Harvard, Boston, Massachusetts, USA.

Olausson H, Lamarre Y, Backlund H, Morin C, Wallin BG, Starck G, Ekholm S, Strigo I, Worsley K, Vallbo AB, Bushnell MC. 2002. Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex. *Nature Neuroscience* 5(9):900-4.

Département de Neurophysiologie Clinique, Hôpital universitaire Sahlgrenska, Göteborg, Suède.

Olausson H, Wessberg J, Morrison I, McGlone F, Vallbo A. 2010. The neurophysiology of unmyelinated tactile afferents. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 34(2):185-91.

Institut de Neuroscience et de Physiologie, Université de Gothenburg, Göteborg, Suède.

Paré M, Smith AM, Rice FL. 2002. Distribution and terminal arborizations of cutaneous mechanoreceptors in the glabrous finger pads of the monkey. *Journal of comparative neurology* 445:347-359.

Département de Physiologie, Université de Montréal, Montréal, Canada.

Roudaut Y, Lonigro A, Coste B, Hao J, Delmas P, Crest M. 2012. Touch sense: Functional organization and molecular determinants of mechanosensitive receptors. *Channels (Austin)* 6(4).

Université d'Aix-Marseille, CNRS, Marseille, France.

Vallbo AB, Johansson RS. 1984. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiology* 3:3-14.

Département de Physiologie, Université d'Umeå, Suède.

Articles portant sur les cellules de Merkel

***Boulais N, Misery L.** 2007. Merkel cells. *The American Academy of Dermatology*.

Unité de Physiologie Comparée et Intégrative, Université de Bretagne Occidentale, Brest et BIOPREDIC International, Rennes, France.

***Halata Z, Grim M, Bauman KI.** 2003. Friedrich Sigmund Merkel and his "Merkel cell", morphology, development, and physiology: review and new results. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology* 271(1):225-39.

Département d'anatomie fonctionnelle, université de Hambourg, Hambourg, Allemagne.

***Lucarz A, Brand G.** 2007. Current considerations about Merkel cells. *European Journal of Cell Biology* 86(5):243-51.

Laboratoire de Neurosciences, Université de Franche-Comté, Besançon, France.

***Moll I, Roessler M, Brandner JM, Eisbert AC, Houdek P, Moll R.** 2005. Human Merkel cells- aspects of cell biology, distribution and functions. *European Journal of Cell Biology* 84(2-3):259-71.

Département de dermatologie et de vénérologie. Université et centre médical de Hambourg-Eppendorf, Hambourg, Allemagne.

***Morrison KM, Miesegaes GR, Lumpkin EA, Maricich SM.** 2009. Mammalian Merkel cells are descended from the epidermal lineage. *Developmental Biology* 336(1):76-83.

Département de Pédiatrie, Université Case Western Reserve, Cleveland, Etats Unis.

***Tilling T, Wladykowski E, Failla AV, Houdek P, Brandner JM, Moll I.** 2013. Immunohistochemical analyses point to epidermal origin of human Merkel cells. *Histochemistry and Cell Biology*.

Département de dermatologie et de vénérologie. Université et centre médical de Hambourg-Eppendorf, Hambourg, Allemagne.

Sources Internet citées dans cette partie :

- [Cours Université de Montpellier « le système somatique sensoriel ».](#)
- [Cours Université de Picardie « le système sensoriel somatique ».](#)
- [Cours Faculté de Médecine de Grenoble « le système somesthésique », Dr Colin Deransart, 2007-2008.](#)

BIBLIOGRAPHIE DE LA PARTIE VIEILLISSEMENT

*Publications non citées

☐ Publications importantes

Chang YC, Lin WM, Hsieh ST. 2004. Effects of aging on human skin innervation. *Neuroreport* 15:149-53.
Département de Neurologie, Hôpital Universitaire National de Taiwan, Taipei, Taiwan.

Decorps J, Saumet JL, Sommer P, Sigaucho-Roussel D, Fromy B. 2013. Effect of ageing on tactile transduction processes. *Ageing Research Reviews*.
Laboratoire de Biologie Tissulaire et d'Ingénierie Thérapeutique, CNRS, UMR 5305, Lyon, France.

Di Iorio A, Cherubini A, Volpato S, Sparvieri E, Lauretani F, Francesch C, Senin U, Abate G, Paganelli R, Martin A, Andres-Lacueva C, Ferrucci L. 2006. Markers of inflammation, vitamin E and peripheral nervous system function the InCHIANTI study. *Neurobiology of Aging* 27:1280–88.
Laboratoire d'Epidémiologie Clinique, Département de Médecine et des Sciences de l'Age, Université G. D'Annunzio, Chieti Scalo, Italie.

Fore J. 2006. A Review of Skin and the Effects of Aging on Skin Structure and Function. *Ostomy Wound Management* 52:24-35.
Centre Hyperbare, Hôpital Mémorial des Trois Etats, Clarkston, Etats Unis.

Goransson LG, Mellgren SI, Lindal S, Omdal R. 2004. The effect of age and gender on epidermal nerve fiber density. *Neurology* 62:774–77.
Département de Médecine Interne, Hôpital Central Rogaland, Stavanger, Norvège.

Lauria G, Bakkers M, Schmitz C, Lombardi R, Penza P, Devigili G, Smith AG, Hsieh ST, Mellgren SI, Umapathi T, Ziegler D, Faber CG, Merkies IS. 2010. Intraepidermal nerve fiber density at the distal leg: a worldwide normative reference study. *Journal of the Peripheral Nervous System* 15:202–07.
Unités des Maladies Neuromusculaires, Institut Neurologique, Fondation Carlo Besta, Milan, Italie.

Lauria G, Holland N, Hauer P, Cornblath DR, Griffin JW, McArthur JC. 1999. Epidermal innervation: changes with aging, topographic location, and in sensory neuropathy. *Journal of the Neurological Sciences* 164:172–78.
Département de Neurologie, Université Johns Hopkins, Baltimore, Etats-Unis.

Morisawa Y. 1998. Morphological study of mechanoreceptors on the coracoacromial ligament. *Journal of Orthopaedic Science* 3:102–10.
Département de Chirurgie Orthopédique, Faculté de Médecine, Université de Kochi, Kochi, Japon.

Reinke H, Dinse HR. 1996. Functional characterization of cutaneous mechanoreceptor properties in aged rats. *Neuroscience Letters* 216:171-74.
Institut de Neuroinformatique, Biologie Théorique, Université de la Ruhr à Bochum, Allemagne.

Rivner MH, Swift TR, Malik K. 2001. Influence of age and height on nerve conduction. *Muscle Nerve* 24:1134-41.

Département de Neurologie, Laboratoire EMG, Université Médicale de Georgia, Etats-Unis.

Rolke R, Baron R, Maier C, Tolle TR, Treede RD, Beyer A, Binder A, Birbaumer N, Birklein F, Botefur IC, Braune S, Flor H, Hoge V, Klug R, Landwehrmeyer GB, Magerl W, Maihofner C, Rolko C, Schaub C, Scherens A, Sprenger T, Valet M, Wasserka B. 2006. Quantitative sensory testing in the German Research Network on Neuropathic Pain (DFNS): standardized protocol and reference values. *Pain* 123: 231–43.

Institut de Physiologie et de Pathophysiologie, Université de Johannes Gutenberg, Mainz, Allemagne.

Wickremaratchi MM, Llewelyn JG. 2006. Effects of ageing on touch. *Postgraduate Medical Journal* 82: 301–04.

Département de Neurologie, Ecole de Médecine, Université de Cardiff, Angleterre.

Wu M, Fannin J, Rice KM, Wang B, Blough ER. 2011. *Effect of aging on cellular mechanotransduction.* *Ageing Research Reviews* 10:1-15.

Centre de Développement et de Différenciation Cellulaire, Université de Marshall, Etats Unis.

Zhang Z, Francisco EM, Holden JK, Dennis RG, Tommerdahl M. 2011. Somatosensory information processing in the aging population. *Frontiers in Aging Neuroscience* 18:1-9.

Département d'Ingénierie Biomédicale, Université de Caroline du Nord, Etats Unis.

BIBLIOGRAPHIE DE LA PARTIE ROBOTIQUE

- Ecole d'ingénierie et des Sciences Appliquées d'Harvard

Publication :

Tenzer Y, Jentoft L, Howe RD. 2012. Inexpensive and Easily Customized Tactile Array Sensors using MEMS Barometers Chips. *IEEE R&A Magazine*.

Articles :

Asimov I. 2013. Un capteur tactile opensource innovant, Humanoides.fr.

Loubens A. 2013. Donner le sens du toucher aux robots, *Techniques de l'Ingénieur*.

- Projet Roboskin : Université de Geneve (Italie), Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (Suisse), Institut Italien de Technologie IIT (Italie), Université de Hertfordshire (Angleterre), Université de Wales Newport (Angleterre), Université de Cagliari (Italie).

Publication :

Cannata G, Maggiali M, Metta G, Sandini G. 2008. An Embedded Artificial Skin for Humanoid Robots. *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*.

Articles :

Comte K. 2013. Afin de les rendre plus performants, les robots ont désormais accès au sens du toucher, Ateliers.net.

Cordis (portail public de la Commission européenne dédié à la diffusion des informations sur tous les projets de recherche financés par l'UE). 2013. Une peau parfaite, grâce à des robots émotionnels, Cordis.europa.eu

- Ecoles des Sciences des Matériaux et d'Ingénierie, Georgia Institute of Technology
Institut de Nano-énergie et des-Nano systèmes de Beijing, Académie des Sciences chinoise

Publication :

Wu W, Wen X, Wang ZL. 2013. Taxel-Addressable Matrix of Vertical-Nanowire Piezotronic Transistors for Active and Adaptive Tactile Imaging. *Science* 340:952-57.

Article :

Chaput J. 2013. Une peau artificielle aussi sensible au toucher que la peau humaine. Futura-Sciences.com.

- Université de Chicago

Publication :

Tabot GA, Dammann JF, Berg JA, Tenore FV, Boback JL, Vogelstein RJ, Bensmaia SJ. 2013. Restoring the sense of touch with a prosthetic hand through a brain interface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110(45):18279-84.

Articles:

Azizi K. 2012. Chicago Neuroscientists Aim to Develop First Prosthesis with Sense of Touch. [Site de l'Université de Medecine de Chicago.](#)

Fenner J. 2013. Prosthetic Limbs Set to Provide That Personal Touch to Amputees, [Guardian Liberty Voice.](#)

Rahman M. 2013. Reproduire le sens du toucher, par le biais d'une main prothétique, *Techniques de l'Ingénieur.*

- [Projet LifeHand2 : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne \(Suisse\), École supérieure Sainte-Anne de Pise \(Italie\), Hôpital IRCCS \(Rome\), Hôpital Gemelli \(Rome\), Université biomédicale de Rome \(Italie\), Département d'Ingénierie des microsystemes \(IMTEK\) Université de Freiburg \(Allemagne\).](#)

Articles:

Carter C. 2014. Bionic hand restores amputee's sense of touch lost for nine years. [National Post.](#)

Minet P. 2014. Une prothèse de main sensible au toucher. [LeTemps.ch.](#)

Morin H. 2014. Des mains artificielles dotées du sens du toucher. [Le Monde Sciences & Techno.](#)

Sanctuary H. 2014. Une prothèse de la main redonne le sens du toucher à un patient amputé. [Communiqué de Presse, Médias Internationaux EPFL.](#)

- [Projet Biotact : École internationale supérieure d'études avancées \(Italie\), Institut de Science Weizmann \(Israël\), Université Humboldt de Berlin \(Allemagne\), Université Ben Gourion du Néguev \(Israël\), Brain Vision Systems \(France\), Université Northwestern \(Etats-Unis\), Université de l'Ouest de l'Angleterre \(Angleterre\), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne \(Suisse\), Université de Bristol \(Angleterre\).](#)

Articles:

Cordis (portail public de la Commission européenne dédié à la diffusion des informations sur tous les projets de recherche financés par l'UE). 2012. Les moustaches des rongeurs inspirent une approche de la perception tactile, [Cordis.europa.eu.](#)

Goudet JL. 2012. Les robots à moustaches du projet Biotact prennent forme, [Futura-Sciences.](#)

BIBLIOGRAPHIE DE LA PARTIE AUTRES

Fleury C. 2007. Simulation sensorielle pour la réalité virtuelle : Cas du toucher et de la proprioception. *Exposé MOTR-Master 2eme année Recherche en Informatique.*
[Université de Rennes/INSA de Rennes, France.](#)

Kajimoto H, Kawakami N, Maeda T, Tachi S. 2001. Electro-Tactile Display with Force Feedback.
[Université de Tokyo, Japon.](#)