

**UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE DE LILLE 2**  
**FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE**

Année de soutenance : 2019

N°:

THESE POUR LE  
**DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 7 novembre 2019

Par César LEROUX

Né le 16 mai 1993 à Villeneuve d'Ascq - FRANCE

La suppléance de la fonction visuelle au moyen de  
l'électro-stimulation linguale

**JURY**

Président :	Monsieur le Professeur Thomas COLARD
Assesseurs :	Monsieur le Docteur Philippe BOITELLE
	Monsieur le Docteur Corentin DENIS
	Monsieur le Docteur <u>William PACQUET</u>

Président de l'Université : Pr. J-C. CAMART  
Directeur Général des Services de l'Université : P-M. ROBERT  
Doyen : E. BOCQUET  
Vice-Doyen : A. de BROUCKER  
Responsable des Services : S. NEDELEC  
Responsable de la Scolarité : M. DROPSIT

## PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.

### PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
E. DELCOURT-DEBRUYNE	Professeur Emérite Parodontologie
<b>C. DELFOSSE</b>	Responsable du Département d' <b>Odontologie Pédiatrique</b>
E. DEVEAUX	Dentisterie Restauratrice Endodontie

## **MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES**

K. AGOSSA	Parodontologie
T. BECAVIN	Dentisterie Restauratrice Endodontie
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
P. BOITELLE	Prothèses
<b>F. BOSCHIN</b>	Responsable du Département de <b>Parodontologie</b>
<b>E. BOCQUET</b>	Responsable du Département d' <b>Orthopédie Dento-Faciale</b> <b>Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire</b>
<b>C. CATTEAU</b>	Responsable du Département de <b>Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.</b>
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
<b>P. HILDEBERT</b>	Responsable du Département de <b>Dentisterie Restauratrice Endodontie</b>
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
G. MAYER	Prothèses
<b>L. NAWROCKI</b>	Responsable du Département de <b>Chirurgie Orale</b> Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
<b>C. OLEJNIK</b>	Responsable du Département de <b>Biologie Orale</b>
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
<b>M. SAVIGNAT</b>	Responsable du Département des <b>Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux</b>
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
<b>J. VANDOMME</b>	Responsable du Département de <b>Prothèses</b>

### ***Réglementation de présentation du mémoire de Thèse***

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille 2 a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

**Aux membres du Jury...**

# **Monsieur le Professeur Thomas COLARD**

**Professeur des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Section Réhabilitation Orale*

*Département Sciences anatomiques*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur au Muséum National d'Histoire Naturelle en Anthropologie Biologique

Assesseur à la Recherche

*Vous me faites l'honneur de présider le jury de cette thèse, je vous en remercie.  
Je vous adresse toute ma gratitude pour la qualité de votre enseignement ainsi que pour  
votre disponibilité.*

*Veillez trouver dans ce travail l'expression de mes sentiments les plus respectueux.*

# **Monsieur le Docteur Philippe BOITELLE**

**Maitre des Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Section Réhabilitation Orale*

*Département Prothèses*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Assesseur à la formation continue

*Je vous remercie de votre présence dans ce jury.*

*Quand je rédige ces mots, me reviennent des souvenirs de vos TP particuliers, ou de nos séances cliniques mêlant professionnalisme et taquineries.*

*Merci pour la richesse de vos enseignements cliniques et pratiques.*

*Pour votre disponibilité et votre gentillesse, veuillez trouver ici l'expression de ma reconnaissance et de ma profonde estime*

# **Monsieur le Docteur Corentin DENIS**

**Maitre des Conférences des Universités (Associé) – Praticien  
Hospitalier des CSERD**

*Section Réhabilitation Orale*

*Département Prothèses*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Assesseur Relations aux étudiants

CES Prothèses Fixées- Université d'Aix en Provence

Master 2 Sciences du Médicaments- Parcours Dispositifs Médicaux- Biomateriaux

*Je te suis reconnaissant d'avoir accepté de faire partie de ce jury de thèse.*

*A la fois un ami et un enseignant pour qui j'ai un profond respect.*

*Tout d'abord étudiants, nous avons partagé un retour de revue puis mes premiers cas de prothèses (avec madame sandwich), et, en ce jour, la fin de ma scolarité et ce en tant que futur confrère j'ose espérer.*

*Merci pour la richesse de tes enseignements cliniques et pratiques.*

*J'espère que tu trouveras au travers de ce travail, ma reconnaissance la plus sincère.*



# **Monsieur le Docteur William PACQUET**

**Assistant Hospitalo-Universitaire des CSERD**

*Section Réhabilitation Orale*

*Département Sciences anatomiques*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Master Ingénierie de la Santé et Biomateriaux

*William je souhaite te remercier pour ta disponibilité au cours de ma thèse, je ne pouvais  
espérer meilleure personne pour diriger ce travail atypique.*

*Notre attrait commun pour les nouvelles technologies n'a fait que me faciliter la tâche.  
De part la SFBD et la Bioteam, j'ai appris à connaître une personne consciencieuse ayant  
le goût de la chose bien faite.*

*Merci pour la richesse de ton enseignement mis au service de ma pratique.*

**« On ne voit pas avec nos yeux, on voit avec notre esprit. »**

**Paul BACH-Y-RITA**

**Je dédie cette thèse...**





## Table des matières

1 Introduction.....	15
2 La perception sensorielle et sa mesure.....	16
2.1 Qu'est ce que la perception ?.....	16
2.2 L'intégration sensorielle de notre environnement.....	16
2.2.1 La relation de l'Homme avec son environnement.....	16
2.2.2 L'intégration sensorielle.....	17
2.3 L'évaluation de la sensibilité : la psychophysique.....	18
2.3.1 « L'homonculus » de Penfield et Boldrey.....	18
2.3.2 L'échelle de Snellen et Monoyer.....	19
2.3.3 Le test « two point discrimination ».....	19
2.3.4 L'identification de lettre: la stéréognosie.....	20
3 La substitution sensorielle au moyen de la neuroplasticité.....	21
3.1 Le paradigme de la substitution sensorielle vs. suppléance sensorielle.....	21
3.1.1 Principe général de fonctionnement.....	21
3.1.2 Les prémices de Paul BACH-Y-RITA.....	21
3.1.3 Le paradigme : la substitution sensorielle vs. la suppléance perceptive.....	22
3.1.4 Les exemples de tous les jours.....	23
3.1.4.1 La canne blanche.....	23
3.1.4.2 Le langage des signes.....	23
3.2 Les bases structurelles de la neuroplasticité.....	23
3.2.1 La neuroplasticité et ses manifestations.....	23
3.2.2 La réorganisation du cerveau et son fonctionnement.....	25
3.2.3 Les facteurs influençant la neuroplasticité.....	26
3.2.3.1 Les effets de l'expérience sur la plasticité.....	26
3.2.3.2 Hormones et substances pharmacologiques.....	26
4 Etat de l'art : le système oculaire.....	27
4.1 Le système visuel et son fonctionnement.....	27
4.2 Anomalies de la vision.....	28
4.2.1 La dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA).....	28
4.2.2 La rétinopathie pigmentaire.....	29
4.2.3 Le glaucome.....	29
5 La langue et sa capacité multi-perceptive.....	30
5.1 Etat de l'art : la langue.....	30
5.1.1 La place fonctionnelle et anatomique de la langue.....	30
5.1.2 Histologie de la langue.....	30
5.1.3 Myologie linguale.....	32
5.1.3.1 La langue : un organe complexe.....	32
5.1.3.2 Les muscles extrinsèques et intrinsèques.....	32
5.1.4 Innervation linguale.....	34
5.2 La somesthésie linguale.....	35
5.2.1 La sensibilité mécano-réceptrice.....	35
5.2.2 L'intégration cérébrale de l'information tactile.....	36
5.2.3 Mesure qualitative de la somesthésie.....	38
5.2.3.1 Les travaux de Marlow.....	38
5.2.3.2 « L'Homonculus » de Penfield.....	38
5.2.3.3 Les travaux de Trulsson et Essick.....	39

5.2.4	Mesure quantitative de la perception.....	40
5.2.4.1	Mise en application du test « two point discrimination ».....	40
5.2.5	Cartographie de la langue.....	42
6	Le système de substitution visio-tactile : Brainport®.....	44
6.1	Indication.....	44
6.2	Fonctionnement.....	44
6.3	Pourquoi choisir la langue ?.....	46
6.3.1	L'importance du toucher.....	46
6.3.2	La langue: un outil de choix.....	46
6.4	Avantages et inconvénients.....	47
6.4.1	Les avantages.....	47
6.4.2	Les inconvénients.....	48
6.5	Mise en application : localisation et identification.....	49
6.5.1	Navigation et localisation d'obstacles.....	49
6.5.2	Les prothèses visio-tactiles: un avenir prothétique ?.....	50
7	Conclusion.....	52
	Références bibliographiques.....	53

# 1 Introduction

Selon les derniers rapports de l'OMS, on estime le nombre de déficients visuels à 217 millions dont 36 millions d'aveugles.(1)

La vision étant considérée comme un sens primitif et essentiel au développement humain que ce soit dans les rapports sociaux, l'interaction avec le monde (orientation, communication,...); en être privé, devient alors un handicap social et physique. (2) Il est donc cohérent de se demander comment les déficients visuels font pour combler ce manque.

Au fur et à mesure du temps, nous pouvons constater une nette augmentation de ces chiffres qui devraient tripler d'ici 2050. (3) Face à cette situation alarmante devenue une priorité pour les grandes nations industrialisées, de nouvelles politiques de santé ont été mises en place afin d'améliorer les conditions de vie des malades (VISION 2020 (4), substitution sensorielle,...). Cette préoccupation n'est pas récente et la volonté de progrès date du XIVe et XVIIIe siècles avec le braille, les chiens guide et la canne blanche.(2) (5) Cependant, avec la modernisation des prises en charges, on voit de nos jours apparaître de nouvelles thérapeutiques (Brainport®, implants rétinien).

Ces thérapeutiques peuvent être classées en deux catégories ; d'une part, les systèmes de substitution sensorielle invasifs (implants rétinien) que nous ne ferons que citer ; et d'autre part, ceux de substitution sensorielle non invasifs (cane blanche, Brainport®, système visio-auditif), qui seront au centre de ce travail. (2) (6)

Toutefois, malgré cette diversité de réponses, on remarque une diminution constante de l'accès aux systèmes de compensation (15% des déficients sont équipés, 2% seulement possèdent une canne blanche). (7) La principale raison étant la méconnaissance que ce soit pour les acteurs de santé comme pour les patients vis à vis de ces solutions thérapeutiques. (7)

Nous savons que la perte d'un sens fonctionnel (vision) provoque l'exacerbation des sens fonctionnels résiduels afin de le compenser. (8) Ce qui soulève la question suivante: la cavité buccale pourrait elle rendre plus performant, le processus de compensation d'une vision défaillante afin de restituer « la vue » à une personne déficiente sur le plan visuel ?

Afin de répondre à cette interrogation, nous étudierons dans un premier temps la perception sensorielle ainsi que les moyens d'y substituer à partir de nos sens résiduels.

Puis, nous procéderons à des rappels sur le système oculaire ainsi que la langue. En effet, nous souhaitons mettre en lumière, les arguments qui font de la langue un outil de choix pour cette compensation sensorielle.

Pour finir, nous présenterons le système Brainport® et les ouvertures technologiques qui en découlent.

## **2 La perception sensorielle et sa mesure**

### **2.1 Qu'est ce que la perception ?**

Étymologiquement « perception » est issu du latin de « perceptio » ainsi que de « percipio » ayant pour significations respectives : l'action de recueillir, de ressentir et de s'emparer. (9)

A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, le mot perception prend une signification sensorielle et permet alors d'introduire le processus psycho-physiologique qui lui a donné naissance. On évoque alors les termes « sens » et « sensation » afin de parler de la perception. (9)

C'est à partir de ce processus que l'étymologie « perceptio » prend tout son sens. (9) Grâce à la perception, l'homme est alors capable de « ressentir » et de « s'emparer » des informations sensorielles composant son environnement au perpétuel remaniement. (10)

### **2.2 L'intégration sensorielle de notre environnement**

#### **2.2.1 La relation de l'Homme avec son environnement**

L'homme appartient à un environnement avec lequel il entretient une interaction permettant un développement mutuel constant. (11) Cette interdépendance existe via des échanges d'informations entre ses composants sous la forme d'énergies présentes au sein de l'environnement.

Ces énergies sont à l'origine de la perception du monde et sont présentes dans notre quotidien afin de rendre les objets perceptibles (9) (12): (tableau 1)

- l'énergie mécanique
- l'énergie lumineuse
- l'énergie thermique
- l'énergie chimique
- l'énergie électrique

Elles constituent l'information sensorielle qui est, soit émise (énergie sonore) ou reflétée par les objets (énergie lumineuse) et perçue par les êtres vivants comme des stimuli grâce à leurs systèmes sensoriels. (9) (13)



Sensibilité	Système sensoriel	Stimulus adéquat
Mécanique	Toucher Audition Vestibule Articulation Muscle	Déformation ou contact sur la surface corporelle Vibration sonore dans l'air ou l'eau Mouvement de la tête Position et mouvement Tension
Lumineuse	vision	Rayonnement des photons
Thermique	Froid Chaud	Chute de température cutanée Élévation de température cutanée
Chimique	Odorat  Goût Chémo-sensible Voméronasal	Substance dissoute dans l'air ou l'eau arrivant à la cavité nasale Substance dissoute arrivant dans la cavité buccale Changement en dioxyde de carbone Pheromone dans l'air ou l'eau
Electrique	Electroceptif	Courant électrique

Tableau 1: Classification des systèmes sensoriels et de leurs stimuli respectifs (12)

La sensibilité est une caractéristique spécifique à chaque espèce. Tandis que l'homme est sensible à la lumière comprise entre 400 nm et 700 nm, le serpent perçoit les infrarouges. (12)

Afin de comprendre les fondements de cette relation, il est nécessaire d'introduire la notion d'intégration sensorielle.

## 2.2.2 L'intégration sensorielle

Anna JEAN AYRES fut la première à évoquer la notion d'intégration sensorielle. Elle la définit comme l'étude du traitement des stimuli sensoriels provenant de notre environnement en lien avec les réponses comportementales de l'individu. (14) Cette définition basée sur des observations empiriques reste contestée par la communauté scientifique. (15)

Ainsi Dale PURVES et ses collaborateurs abordent la dite notion comme un mécanisme neurophysiologique consistant à capter les stimuli sensoriels provenant de l'environnement via nos organes sensoriels et à les transmettre au système nerveux central pour en permettre le traitement. (16)

On constate que l'intégration sensorielle se construit en deux temps: la sensation et la perception (15) (16)

- la sensation est issue d'une excitation sous la forme d'un potentiel d'action provoquant un signal nerveux afférent. Cette première phase est considérée comme la détection d'un stimulus sensoriel pour ensuite le transmettre au système nerveux central
- la perception permettant l'interprétation de l'information sensorielle en une représentation mentale

L'homme possède alors de multiples systèmes sensoriels à sa disposition afin de percevoir son environnement (tableau 1) :(15)

- la vision
- le goût
- le toucher
- l'ouïe
- l'odorat

## 2.3 L'évaluation de la sensibilité : la psychophysique

### 2.3.1 « L'homonculus » de Penfield et Boldrey

En 1937, Penfield et Boldrey font partie des premiers groupes de chercheurs à s'intéresser aux effets de l'électro-stimulation du cortex humain. Cette étude a permis de définir les aires corticales à des fins chirurgicales et de découvertes des limites sensorielles du corps : organisation que l'on nomme somatotopie. (17) (18)

Grâce à l'électrostimulation, ils ont confirmé la topographie corticale et ont pu relier la stimulation d'une partie distincte du cerveau à des phénomènes moteurs et sensoriels. (17) (19)

Cette étude a permis la réalisation d'une représentation caricaturale de l'Homme avec des membres disproportionnés en fonction de la précision sensitive du membre associé (Figure 1). Cette cartographie reflète le nombre de neurones nécessaires au traitement de l'information. (20)

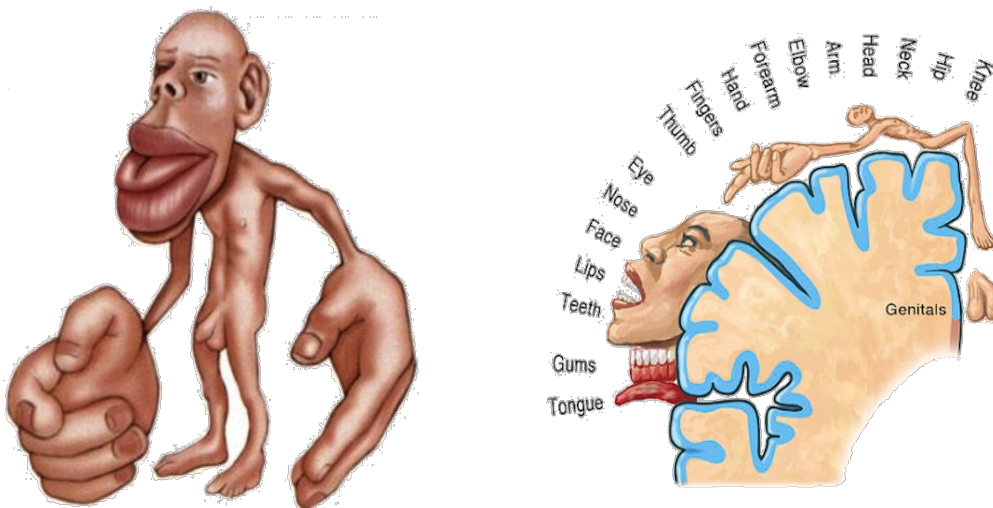


Figure 1: Représentation des territoires sensitifs : « l'Homonculus »  
[d'après Maciel et al (21) et Spencer Sutton]

Cette représentation (Figure 1) est souvent associée à un diagramme en coupe transversale des hémisphères cérébraux. Elle permet la localisation des zones corticales actives correspondantes aux territoires corporels stimulés.

« L'Homonculus » reste à ce jour l'une des premières études ayant traité la perception sensorielle dans son ensemble. (21)

### 2.3.2 L'échelle de Snellen et Monoyer

L'échelle de Snellen et Monoyer est à ce jour le gold-standard dans l'évaluation de la fonction visuelle. (22) (23) L'acuité visuelle correspond à la faculté de discerner un petit objet situé le plus loin possible. (24)

On mesure l'acuité visuelle via l'échelle de Snellen et Monoyer correspondant à des séries de lettres orientées à l'horizontale et de taille croissante dans la verticalité. (25) Elle est quantifiée en 10ème et le patient doit être placé à 5 mètres afin de distinguer chacune d'entre elles. (24)

L'acuité visuelle normale, évaluée à 10/10ème, permet l'identification des plus petites lettres.

### 2.3.3 Le test « two point discrimination »

Les tests habituellement menés pour évaluer les troubles sensoriels incluent trois niveaux de tests, à savoir la perception spatio-temporelle, la détection de contact et la nociception ou la température. Mais pour une meilleure fiabilité des tests, il est préférable d'évaluer la perception tactile à travers de multiples stimuli comme le toucher, les vibrations ou la pression. (26) (27)

Weber évoque le test « two point discrimination » pour la première fois en 1853 et le définit comme étant «la distance entre deux pointes de compas nécessaire pour ressentir deux contacts». (28) (29)

Le test « two point discrimination » est à ce jour le gold standard dans le cadre de l'évaluation de la perception sensorielle. Il est devenu le test le plus utilisé grâce à sa fiabilité inter-observateur, sa reproductibilité ainsi que sa simplicité d'usage. (26) (28) (30)

Effectué par le biais d'un esthésiomètre (Figure 2), il peut aussi être réalisé à l'aide d'un pied à coulisse ou d'un simple trombone. (28) (29) (31)

Ce test consiste à appliquer deux stimuli identiques sur une zone corporelle tout en variant la distance les séparant. Le but étant de déterminer la plus petite distance permettant l'identification des deux points de manière distincte.

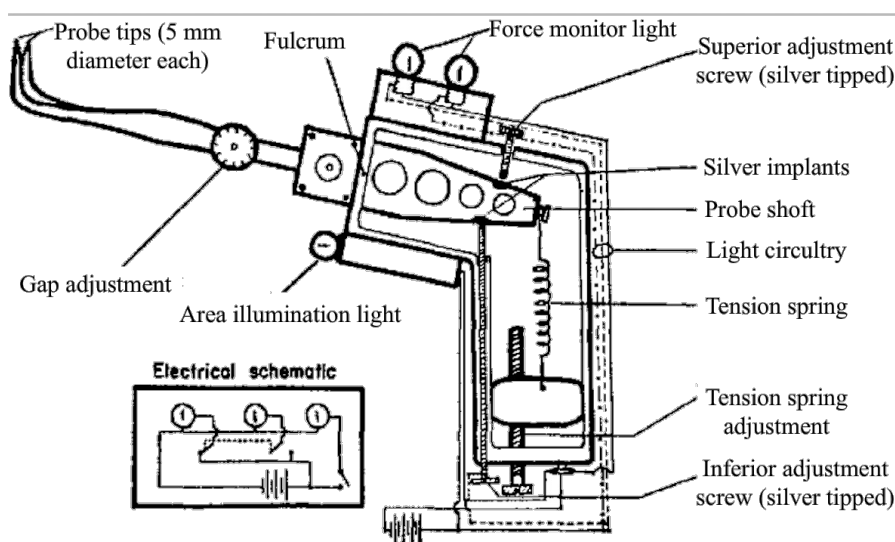


Figure 2: Outil de mesure: esthésiomètre (29)

Au départ appliqués manuellement, les stimuli n'étaient pas reproductibles du fait des vibrations de l'examineur qui faussaient le test. (30) Ainsi, l'automatisation de l'outillage est devenue la référence permettant une meilleure reproductibilité, calibration et fiabilité des mesures. (29) (30)

Mais la difficulté du test vient de l'appréhension du sujet. Etant donné que l'application de deux stimuli exerce moins de force qu'un seul, Il faut alors faire abstraction du poids exercé pour en garder que la sensation tactile. (31)

### **2.3.4 L'identification de lettre: la stéréognosie**

La stéréognosie est la capacité à reconnaître et à différencier des formes. (18) (32)

Cette faculté permet à la langue l'identification de lettre mettant en évidence son rôle d'exploration et de manipulation de celle ci (Figure 3). (33)

Pour tester la précision, les lettres sont conçues de six tailles allant de 3 à 8 mm et disposées de manière aléatoire. (34) Les lettres sont alors placées à tour de rôle sur la pointe de la langue afin d'être identifiées par l'opérateur qui a les yeux bandés. (33) (34)

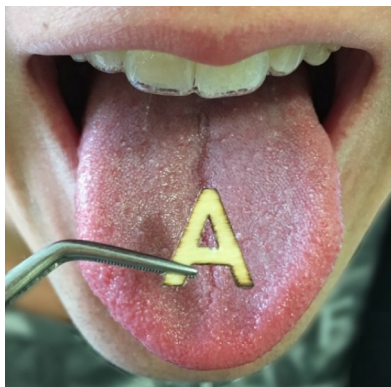


Figure 3: Identification de la lettre A [source personnelle]

Lors d'un succès, il passera à une lettre plus petite et à l'inverse, s'il n'y arrive pas, à une lettre plus grande.

Ce protocole peut être utilisé afin de tester la perception sensorielle du doigt.

## 3 La substitution sensorielle au moyen de la neuroplasticité

### 3.1 Le paradigme de la substitution sensorielle vs. suppléance sensorielle

#### 3.1.1 Principe général de fonctionnement

La substitution sensorielle est un processus de réhabilitation de la perception. Ce processus consiste à transformer des stimuli propres à une modalité sensorielle en des stimuli d'une autre modalité. (6) (35) L'objectif principal est de rétablir l'accès à une information sensorielle, n'étant plus perceptible par son entrée sensorielle d'origine, par le biais de technologie et/ou d'une autre entrée sensorielle.

**Exemple :** il est aujourd'hui possible pour une personne aveugle d'avoir accès à des informations visuelles par l'intermédiaire de son toucher. A travers le braille, cette personne accède à des stimuli censés être visuels (à l'image d'un texte à lire) (5)

Ce changement de modalité induit une réorganisation du cerveau qui est alors capable de transmettre l'information sensorielle au cortex cérébral. Cette réorganisation peut se faire grâce au caractère malléable du cerveau et à sa neuroplasticité.

#### 3.1.2 Les prémices de Paul BACH-Y-RITA

Paul Bach-y-rita ,qui consacra sa vie à la substitution sensorielle, est considéré comme le fondateur de ce concept. Il inventa le premier dispositif de substitution sensorielle (Tactile Vision Substitution System ou TVSS) que l'on aperçoit sur la figure 4.

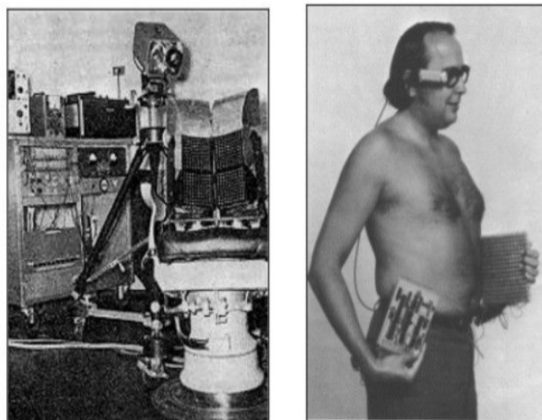


Figure 4: Le premier système de substitution sensorielle (TVSS) (6)

Il eut l'idée d'utiliser la sensibilité tactile de l'Homme pour suppléer la vue, à travers différentes zones corporelles. Bach-y-rita utilisa des zones corporelles peu stimulées au quotidien tel que le dos (Figure 4 à gauche), l'abdomen (Figure 4 à droite) pour finir ses travaux au niveau de la langue. (36) (37)

Le TVSS consiste en une caméra convertissant un stimulus visuel capté par une caméra en un stimulus tactile appliqué sur le dos du patient. Le dispositif était monté sur un fauteuil de dentiste (Figure 4 a gauche) afin que le patient puisse s'installer torse nu sur le fauteuil. (2) Il est alors possible de transmettre une information visuelle sur le dos du patient à travers le dispositif. (6) (38)

Ainsi les travaux de Bach-y-rita ont permis de créer le Tongue Display Unit qui représente l'aboutissement de son travail que nous étudierons plus tard dans cet exposé.

### **3.1.3 Le paradigme : la substitution sensorielle vs. la suppléance perceptive**

Si l'on prête plus attention à la définition de la substitution sensorielle, on peut constater qu'il existe des maladresses dans le choix de la terminologie. Ainsi la définition suivante est plus appropriée.

*« De manière générale, la substitution sensorielle ou suppléance perceptive se fonde sur le principe de remplacement et/ou suppléance d'un sens déficient ou occupé par un autre sens sain » (6)*

L'usage de « substitution sensorielle » est un écart de langage impliquant que le patient récupère la vue et tout ce qui en découle (l'émotion, la couleur). (6) (35) Or, la substitution ne retransmet pas ce qu'on appelle les « qualias » c'est à dire la valeur perçue des choses. (35)

On se rend compte que le concept de Bach-y-rita est basé sur la substitution sensorielle en tant que paradigme ainsi la suppléance sensorielle en est son application. (6)

Ce débat provient de l'étymologie du mot substitution qui sous-entend que le dispositif utilisé comble réellement le sens déficient, alors qu'il facilite l'acquisition d'information en le suppléant.

Face à cette maladresse, le terme de suppléance a été proposé par Sampaio et Dufier. Les avancées technologiques et l'évolution des techniques tendent à amoindrir peu à peu ce distinguo entre substitution sensorielle et suppléance perceptive. (39)

### 3.1.4 Les exemples de tous les jours

#### 3.1.4.1 La canne blanche

La canne blanche, outil de substitution tactile, permet aux personnes malvoyantes d'accéder à leur environnement. Cette canne blanche possède des fonctions de signalement, contrôle, protection et de détection d'obstacles.

#### 3.1.4.2 Le langage des signes

Le langage des signes permet la suppléance des fonctions auditives et vocales par l'intermédiaire de la fonction visuelle. A travers de multiples signes ayant chacun leur signification, il est alors possible pour les personnes sourdes et muettes de communiquer.

## 3.2 Les bases structurelles de la neuroplasticité

### 3.2.1 La neuroplasticité et ses manifestations

Alors qu'à la fin des années 1970, le cerveau était considéré comme une structure figée dont le fonctionnement était acquis lors de la période critique de l'enfance: à savoir la phase gestationnelle et post natale. (40) (41) Il se trouve que depuis 30 ans, une prise de conscience des capacités adaptatives du cerveau, le font passer d'une structure rigide et immuable à une structure au remodelage permanent. (12) (20)

Face à ce nouveau postulat, on constate que la neurogenèse du cerveau ne s'arrête pas à l'âge adulte. Il ne s'agit donc plus d'un processus occasionnel mais continu dont les caractéristiques et la finalité diffèrent selon le vécu de chacun (pathologies, expériences, apprentissage etc ) (42)

La neuroplasticité se définit donc comme une capacité du système nerveux central à subir des modifications de structure et de fonctionnement afin d'assurer le développement de l'individu. (20)

Nous faisons face à un phénomène de maturation et à un développement contrôlé aboutissant à la complexité du cerveau, qui présente trois types de neuroplasticités dissociables mais au fonctionnement indivisible:(20) (40)

- **la plasticité liée à l'expérience:** issue du vécu de chacun, elle est induite par l'exposition à l'expérience externe ou à des contraintes internes. Impliquée dans l'acquisition de nouveaux comportements ou capacités (jouer d'un instrument, apprentissage d'un sport, etc )

On peut voir cette plasticité comme l'amélioration d'une performance liée à l'entraînement à tout âge.

**Exemple :** Patrick RAGERT et ses collègues, ont étudié la neuroplasticité chez un pianiste professionnel. (43) Les personnes utilisant régulièrement leurs doigts que ce soit pour le travail (dactylographe) ou un hobby (pianiste), posséderaient une sensibilité tactile plus importante que la moyenne. (42) (43)

En plus d'une meilleure sensibilité, il semblerait qu'elles développent une meilleure capacité d'apprentissage.

Autrement dit, au lieu d'utiliser leurs synapses disponibles, elles acquièrent une capacité à en développer de nouvelles. (42)

- **la plasticité développementale:** permet le développement de l'individu essentiellement au cours de la période critique, puis à l'âge adulte. Impliquée dans la neurogenèse, elle est à l'origine de la maturation des réseaux neuronaux fonctionnels (langage, vision). On parle aussi de plasticité passant par l'expérience étant donné qu'elle nécessite une exposition à des stimuli.
- **la plasticité post lésionnelle:** mise en place lors d'atteinte du système nerveux central ou périphérique (voie afférente et/ou efférente). Subdivisée en 2 parties, nous avons une plasticité spontanée, précoce et induite par la lésion elle-même : on parle de plasticité réactionnelle. En deuxième lieu, la plasticité s'apparentant à celle liée à l'expérience.

**Exemple :** Ramachandran et ses collègues ont étudié la sensibilité tactile chez une personne amputée du bras gauche. (40) (42) (44) Il l'a invitée à fermer les yeux afin de tester ses capacités sensorielles, puis, Ramachandran lui demande d'identifier les différentes parties du corps stimulées.

Lorsque l'opérateur effleure la joue du sujet, il répond « à l'index gauche » puis suite à un deuxième stimulus de la joue « au pouce gauche ». Tandis que Ramachandran stimulait la joue du patient, ce dernier ressentait son « membre fantôme ».

La principale conclusion est que la zone corticale du visage a « envahi » celle du membre amputé.

Le même phénomène a pu être observé chez un singe à qui l'on a dénervé un doigt, par la suite, on observe une colonisation des aires corticales du doigt en question par ses voisins afin de combler le manque. (12) (40)



### 3.2.2 La réorganisation du cerveau et son fonctionnement

Nous avons vu qu'il existait différentes plasticités, nous allons maintenant traiter les différents moyens permettant ce processus. Le consensus annonce que les modifications du cerveau se déroulent au niveau des synapses, lieu d'interaction des neurones.

L'espagnol CAJAL fut le premier à suggérer que l'apprentissage provoque des modifications morphologiques à long terme des synapses. (42) (45) Pour ce faire, il a été nécessaire d'observer des espèces moins complexes que l'homme telle que l'aplysie.

Au cours de ces études, deux processus de modification du système synaptique ont été identifiés: il est possible de modifier des circuits existants ou d'en créer des nouveaux.

- **les modifications de circuit synaptique** : Elles sont facilement observables au niveau de neurones complexes (neurones pyramidaux) constitués à 95 % de dendrites. Il est intéressant de constater que plus un neurone possède de dendrites, plus il aura de place pour créer un réseau avec les neurones environnants.

Les techniques de marquages et de colorations permettent de mettre en évidence des changements constants. Alors qu'on pensait les neurones, dendrites et synapses statiques et inanimées. (20)



Figure 5: La règle de Hebb : « cells that fire together, wire together » [source personnelle]

La règle de Hebb dit que si deux neurones A et B sont assez proches pour s'exciter de manière répétée alors ils vont chercher à se connecter. Cette liaison provoque des accroissements de leurs structures dendritiques respectives jusqu'à en former un réseau comme l'illustre la figure 5. (45) (46)

- **la création de nouveaux réseaux synaptiques** : cette découverte découle de l'observation des oiseaux chanteurs, comme le canari, qui produisent de nouveaux neurones destinés au chant de parade lors de périodes d'accouplement. (41) (42)

Cette constatation provoqua une remise en question quant à la production de neurones chez l'adulte. Par la suite, des études ont été menées sur des rats montrant qu'après injection de Bromodéoxyuridine, on peut constater la création de nouveaux neurones. (47) Les raisons de la survenue d'un tel phénomène étant encore peu claires, il se pourrait que cette neurogenèse soit au service de l'apprentissage et de la mémoire.

### 3.2.3 Les facteurs influençant la neuroplasticité

#### 3.2.3.1 Les effets de l'expérience sur la plasticité

Dans l'étude de Ramachandran, nous avons pu constater que l'expérience provoque des modifications du cerveau. (41) (42) (44) Toutefois, cela a été montré par des méthodes empiriques et il faudrait étudier ce phénomène à l'échelle de l'organisation structurelle et fonctionnelle. C'est pourquoi deux études ont traité ce sujet en pratiquant la dissection de cerveau provenant de personnes décédées.

Dans la première étude, Scheibel et Jacob comparent la structure neuronale ainsi que le niveau d'éducation de deux groupes. (48) Au cours de cette étude, il a été mis en évidence une corrélation entre la taille des dendrites dans l'aire corticale du langage et le niveau d'éducation.

Il a été démontré une densité et un développement dendritique plus important chez les personnes ayant un niveau universitaire comparé à un niveau de fin de lycée.

Des résultats similaires ont été constatés par Scheibel dans une étude comparant les capacités verbales entre les hommes et les femmes. Les résultats de cette étude tendent à montrer des structures dendritiques plus développées chez la femme et donc des capacités verbales supérieures à celles de l'homme.

#### 3.2.3.2 Hormones et substances pharmacologiques

Il existe de nombreuses substances d'origine naturelle ou non pouvant influencer la neuroplasticité du cerveau. La plupart de celles ci ont un double effet sur le cerveau quand elles n'induisent pas des modifications menaçant son intégrité (Figure 6), elles permettent son développement.

Parmi ses composés, on y retrouve :

- **les hormones gonadiques:** selon les variations du cycle menstruel d'une femme. Les fluctuations du taux d'oestrogènes auraient une incidence sur la structure des neurones. (49) Il existerait une corrélation entre le taux d'oestrogènes et le nombre de synapses. Il semblerait que la testostérone ait des effets similaires chez l'homme en influençant sur ses capacités spatiales. (42)
- **les glucocorticoïdes:** hormones sécrétées en situation de stress, auraient un effet neurotoxique lors de sécrétions soutenues surtout en cas de stress prolongé. (42)
- **les drogues:** la cocaïne, la nicotine, l'amphétamine,... potentiellement toxiques, sont des substances psychostimulantes induisant des modifications des systèmes synaptiques. Elles provoqueraient une augmentation drastique de la croissance dendritique ainsi que du nombre des épines dendritiques. (42)

## 4 Etat de l'art : le système oculaire

### 4.1 Le système visuel et son fonctionnement

La vision résulte d'un processus complexe où l'oeil capte les images. La plupart des éléments anatomiques nécessaires à la vision sont compris dans le globe oculaire pour ensuite laisser place au nerf optique. Une fois que l'information est assimilée par le nerf elle se dirige vers le cortex cérébral afin de retranscrire l'image perçue. (6) (50)

La complexité de ce système provient de la cascade de mécanismes nécessaires pour transformer une information optique (à savoir photons) en une information chimique puis électrique.

Nous étudierons la structure de l'oeil en suivant le trajet de la lumière à travers ce dernier à savoir (Figure 6) (24) (25) (51) (52):

- la conjonctive est une muqueuse tapissant l'arrière de la paupière
- la cornée assure le passage de la lumière, elle doit alors rester parfaitement propre. Elle joue un rôle important dans la protection, la focalisation et la réfraction de la lumière au niveau de l'oeil
- l'humeur aqueuse se situe entre l'iris et la cornée. Elle permet de maintenir la pression et la forme du globe oculaire

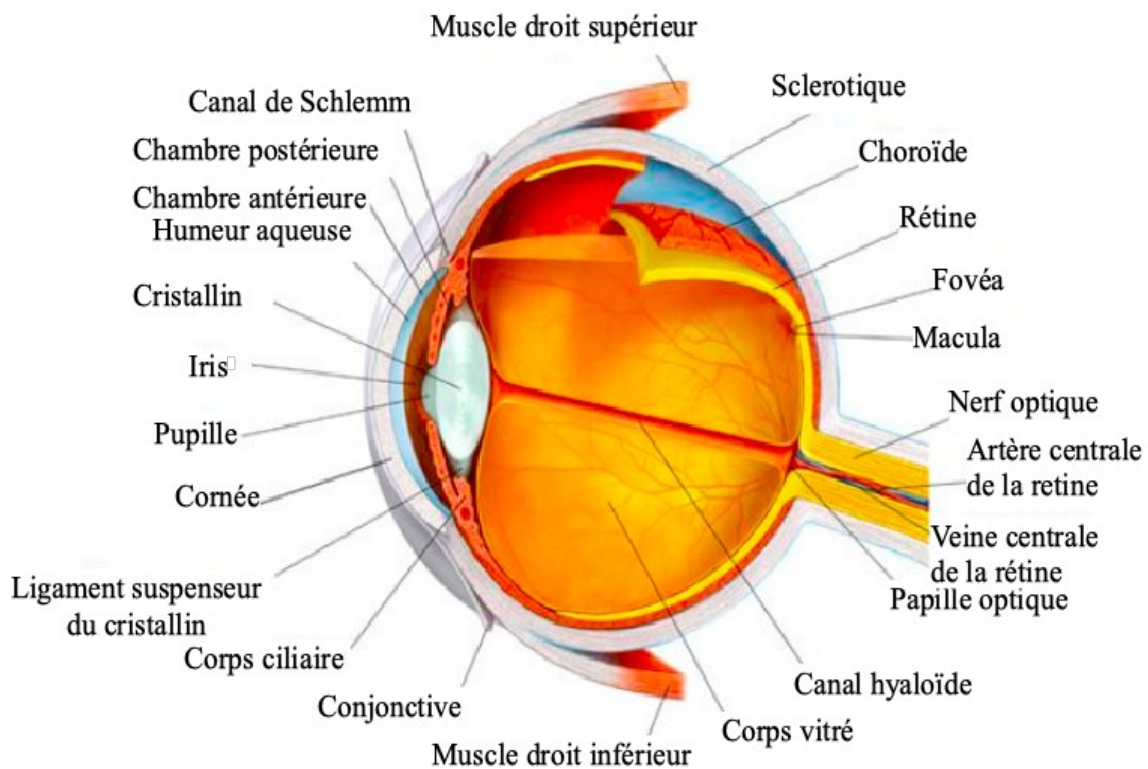


Figure 6: Vue d'une coupe du globe oculaire (52)

- l'iris par sa constitution musculaire contrôle la dilatation pupillaire et la quantité de lumière atteignant la rétine.
- la pupille joue le rôle de diaphragme en s'ouvrant ou se fermant pour laisser passer la lumière
- le cristallin en forme de disque change sa courbure afin de contrôler les ajustements nécessaires à l'accommodation
- la rétine est une membrane nerveuse hypersensible tapissant le fond de l'oeil. Elle capte la lumière afin de la transformer en signal électrique. grâce à ses cellules nerveuses photo-réceptrice (bâtonnets et cônes) qui transforment l'énergie lumineuse en signal électrique.
  - les cônes (6 à 7 millions) se concentrent au centre de la rétine au niveau de la macula. Ils sont responsables de l'acuité visuelle. et de la perception de la lumière en décomposant les trois couleurs primaires (53)
  - les bâtonnets (130 millions) sont répartis sur l'ensemble de la rétine et sont responsables de la détection des mouvements et de la vision nocturne (53)
- le nerf optique transmet les informations vers le cortex cervical via des fibres optiques concentrées en une zone : la papille. La papille est une zone qui ne « voit » (on parle aussi de tache aveugle) car elle ne contient pas de cellules visuelles, mais seulement les fibres nerveuses qui forment le nerf optique

Il mesure 4 mm de diamètre et 5 cm de long et il en existe un pour chaque œil.

## 4.2 Anomalies de la vision

### 4.2.1 La dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA)

À ce jour, la DMLA est la principale cause de cécité dans les pays développés touchant plus de 1,5 millions des plus de 65 ans en France. (45)

Le vieillissement altère la macula (partie centrale de l'oeil) et débute par un dépôt, appelé « drusen », produit du fonctionnement normal de la rétine. Il provoque par la suite une altération de l'épithélium pigmentaire ainsi que des photo-récepteurs.

Après la phase initiale, la DMLA se développe sous deux formes :

- la forme atrophique (75 % des cas) se caractérise par une disparition spontanée et progressive des cônes de la rétine maculaire
- la forme « humide » (25 % des cas) occasionnée par le développement de néo-vaisseaux sous-maculaire (6) (25) (51) (53)

### **4.2.2 La rétinopathie pigmentaire**

La rétinopathie pigmentaire fait partie d'un groupe de maladies dégénératives héréditaires atteignant la rétine, et touchant 1 personne sur 4000.

Elle est caractérisée par une perte progressive et graduelle des photo-récepteurs qui évolue vers la cécité. Elle est due à une altération des gènes impliqués dans le fonctionnement des photo-récepteurs et une formation de dépôt pigmentaire sur la rétine.

Cela affecte l'absorption de la lumière par l'oeil, du fait de la destruction progressive des bâtonnets puis des cônes.

A ce jour, il n'existe que des solutions préventives, comme des lunettes grossissantes ou d'aide non optiques. (6) (25) (51)

### **4.2.3 Le glaucome**

Le glaucome est dû à un défaut de vascularisation de la base du nerf optique (au niveau de la papille optique).

Dans une situation normale, la pression de perfusion sanguine des artérioles papillaires doit être supérieure à la pression intra-oculaire. (25) (51)

## 5 La langue et sa capacité multi-perceptive

### 5.1 Etat de l'art : la langue

#### 5.1.1 La place fonctionnelle et anatomique de la langue

Située dans la cavité buccale, elle s'étend de l'os hyoïde jusqu'à la mandibule par ses insertions musculaires pour former le plancher buccal et la limite inférieure de la bouche (Figure 7).

De par sa localisation, elle est impliquée dans de multiples fonctions essentielles au développement humain. Parmi ses principaux rôles, elle sera sollicitée dans la mastication, la déglutition et la phonation par le biais de ses aptitudes motrices. (19) Mais elle possède aussi des aptitudes organoleptiques, mises au profit de la perception sensorielle à travers sa sensibilité tactile et gustative. (6)

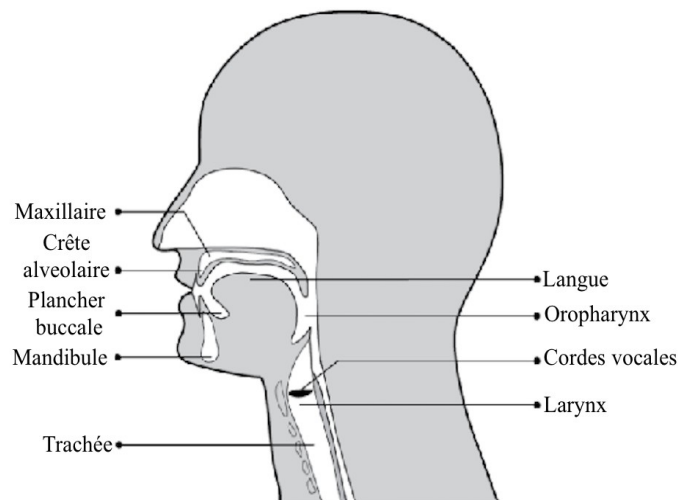


Figure 7: Vue sagittale médiane de la cavité buccale (52)

La langue occupe la plus grande partie de la cavité buccale. Elle est reliée aux structures anatomiques environnantes par les différentes muqueuses et sert de jonction entre la cavité buccale et l'oropharynx. (54)

#### 5.1.2 Histologie de la langue

Dans le sens antéro-postérieur, la langue est divisible en deux parties délimitées par le « V » lingual formé par les papilles circumvallées (ou caliciformes)(Figure 8) :

- la partie mobile ou son corps (2/3 antérieur)
- la partie fixe qui constitue sa base (1/3 postérieur)

La partie mobile (2/3 antérieur) se décompose à son tour en plusieurs faces (Figure 8): les bords latéraux, la pointe, la face dorsale s'étendant du « V » lingual à sa pointe et la face ventrale limitée par le frein lingual.

**-La face dorsale :** présente un sillon médian inconstant (Figure 8). Elle est entièrement tapissée d'un épithélium malpighien pavimenteux stratifié et non kératinisé. (18) (54) On y retrouve un grand réservoir de papilles linguales qui sont à l'origine essentiellement du goût mais aussi de la sensibilité tactile (Figure 8):

- les papilles filiformes donnent à la langue son aspect rugueux et en occupe la plus grande partie. Elle prennent la forme de filament afin de mieux capter les saveurs en bouche. Outre le goût, elles ont surtout une fonction tactile (55)
- les papilles fongiformes, moins nombreuses, jouent un rôle dans la perception des sensations chimiques et tactiles. Ce qui explique leur présence majoritaire sur le bout de la langue (55)
- les papilles caliciformes présentent une perception fine du goût tandis que le toucher y est grossier (provoquant des nausées lors de la stimulation tactile) (55)
- les papilles foliées, situées en avant et aux extrémités du « V »lingual , sont affiliées au goût (55)

**-la face ventrale :** tapissée d'un épithélium malpighien non kératinisé et d'une quantité faible voire négligeable de papilles gustatives. (56) On peut y apercevoir la veine sublinguale par transparence ainsi que les caroncules de la glande sublinguale. (57)

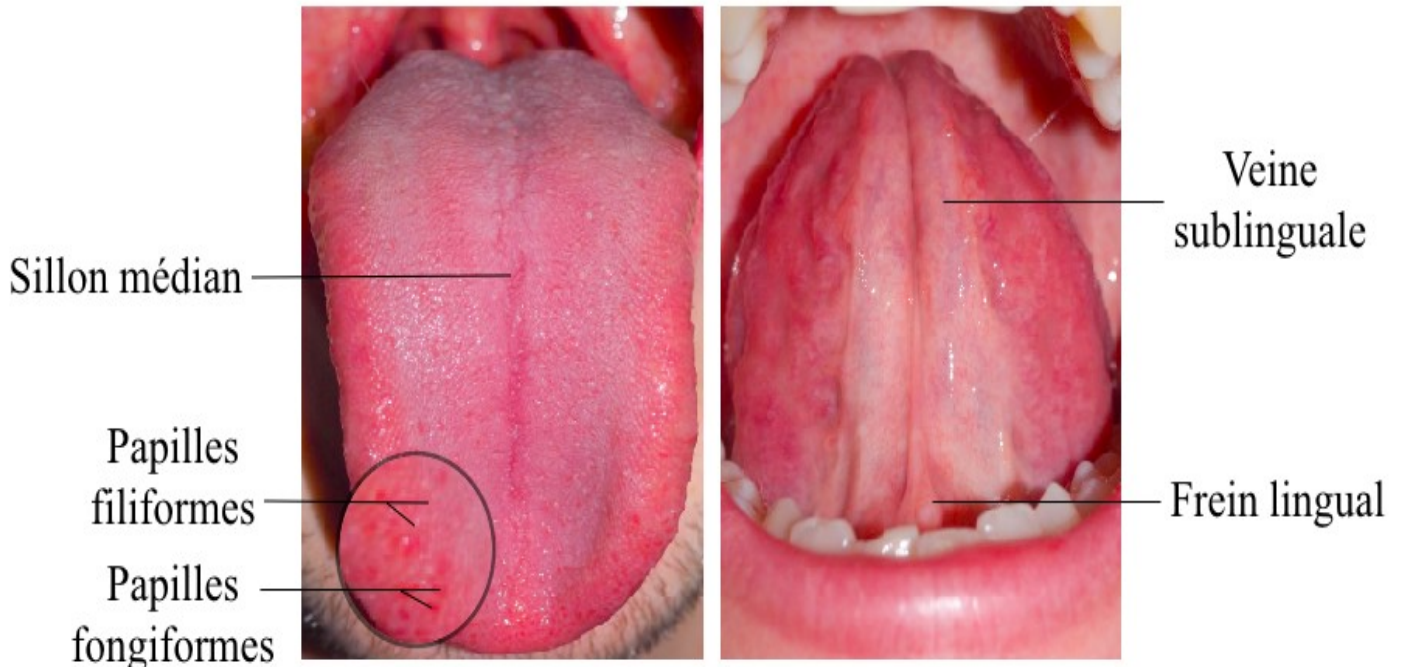


Figure 8: Vue de la face dorsale (gauche) et de la face ventrale (droite) [source personnelle]

### 5.1.3 Myologie linguale

#### 5.1.3.1 La langue : un organe complexe

La langue est un organe musculo-membraneux difficile à appréhender étant donné sa structure anatomique complexe (Figure 9). Malgré de multiples études concernant son fonctionnement et sa composition, il persiste des incompréhensions. (58) (59)

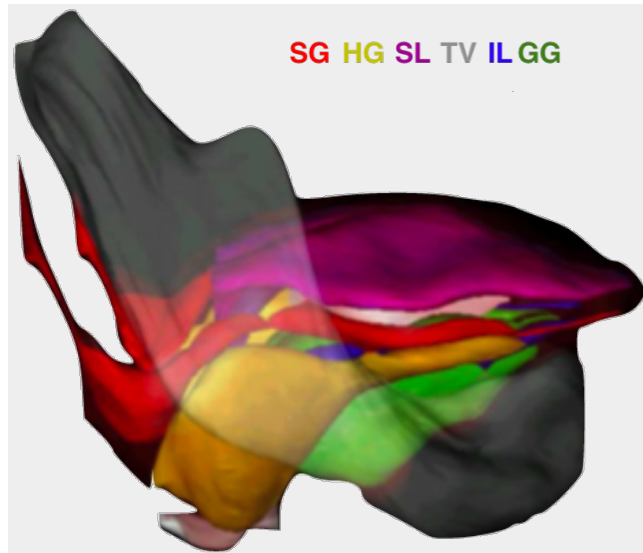


Figure 9: Vue en 3D de la myologie linguale (59)

En effet, elle fait partie d'une catégorie de muscles de type « hydrostat musculaire » ce qui signifie que le muscle se déforme lors d'une contrainte physique tout en gardant son volume initial. Ces muscles ont une biomécanique plus proche d'un système hydraulique que des bras de leviers plus souvent utilisés pour les muscles squelettiques qui composent le corps. (59)

#### 5.1.3.2 Les muscles extrinsèques et intrinsèques

La langue est composée à la fois de muscles pairs et impairs. Ils ont tendance à s'entrelacer dans les trois dimensions de l'espace formant ainsi une structure musculaire et cartilagineuse complexe dont les limites sont parfois difficiles à identifier (Figure 9). (59) (60) (61) Parmi ses muscles, il faudra différencier :

-les muscles extrinsèques (Figure 10)

- genio-glosse (GG)
- hyo-glosse (HG)
- stylo-glosse (SG)
- palato-glosse
- amygdalo-glosse
- pharyngo-glosse

Ils sont à l'origine de la mobilité grossière et des changements de position de la langue (Tableau 2 : protraction, rétrusion, abaissement et élévation). (54)



-les muscles intrinsèques (Figure 10)

- Longitudinal supérieur (SL) (muscle impair)
- Longitudinal inférieur (IL)
- Transverse (T)
- Vertical (V)

Ils assurent les changements de forme et la mobilité fine de la langue et de sa pointe (Tableau 2 : dorsoflexion, ventroflexion et mouvements complexes)

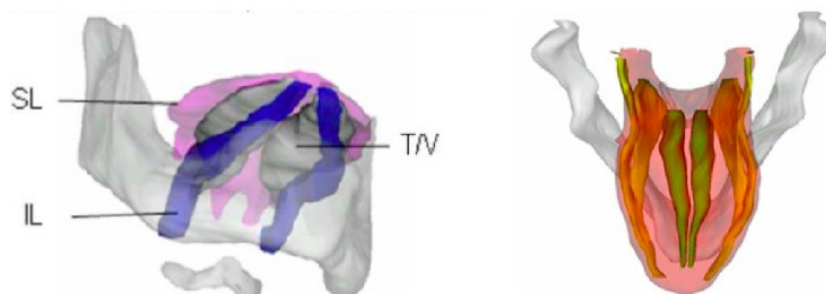


Figure 10: Représentation 3D des muscles extrinsèques (droite) et intrinsèques (gauche)(59)

Cette composition essentiellement musculaire permet à la langue une grande panoplie de mouvement (Tableau 2). (59) (62) L'absence de cartilage dans la partie antérieure autorise une grande liberté de mouvement permettant d'assurer la mobilité fine. (63)

LES MOUVEMENTS LINGUAUX		
1. RETRUSION	2. PROTRACTION	3. MOUVEMENTS COMPLEXES
 Retrusion	 Protraction	 Dorsoflexion
 Raccourcissement	 Elongation	 Ventre-flexion
 Mouvements combinés	 Mouvements combinés	 Retro-flexion

Tableau 2: Description des mouvements linguaux (59)

Quand la langue n'est pas en mouvement, elle occupe une position dite de repos. (64) (65) Elle se trouve alors en situation haute au contact du palais et derrière la papille rétro-incisives.

### 5.1.4 Innervation linguale

A l'inverse de la plupart des structures anatomiques qui ont une fonction sensitive ou motrice, la langue possède grâce à sa fonction d'organe du goût un troisième niveau d'innervation: motrice, sensitive et sensorielle.

L'innervation de ce seul organe est complexe car cinq nerfs différents y participent (Figure 11) :

- le nerf trijumeau V (par le nerf lingual provenant du nerf mandibulaire) assure la somesthésie de la langue
- le nerf facial VII est à l'origine de l'innervation sensorielle
- le nerf glossopharyngien IX essentiellement sensoriel avec une fonction motrice
- le nerf vague X essentiellement sensitif et sensoriel
- le nerf hypoglosse XII essentiellement moteur

Le système nerveux somatique est la partie du système nerveux qui commande la proprioception du corps et permet de percevoir à travers la peau, diverses sensations, qui permettent de découvrir son environnement par les autres organes du sens. (58) (54) (65) (66) (67)

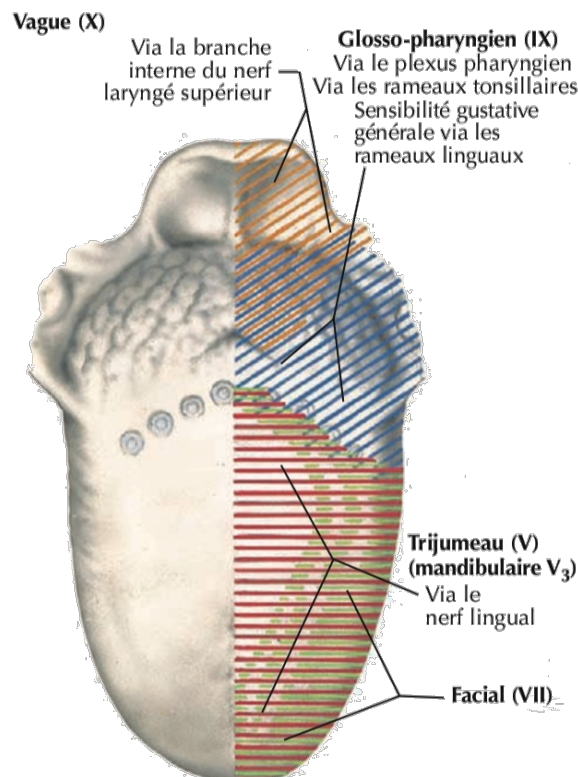


Figure 11: Innervation de la langue (57)

Malgré des localisations anatomiques différentes, la main et la sphère orofaciale possèdent un fonctionnement similaire de part l'implication du nerf trijumeau. (18) (33).

## 5.2 La somesthésie linguale

La somesthésie correspond à l'ensemble des mécanismes nerveux responsables du recueil de l'information sensorielle. Elle permet à l'organisme la détection de stimuli externes. (27)

La sensibilité somatique peut être décomposée en trois catégories (18) (27):

- la sensibilité mécano-réceptrice mise en jeu dans le déplacement des tissus ainsi que le tact, la pression, les vibrations et la position
- la sensibilité thermique mise en jeu dans la détection du chaud et du froid
- la sensibilité nociceptive activée en présence d'un risque d'endommagement des tissus

Chacune de ces sensibilités est caractérisée par des récepteurs spécifiques à des stimuli : les thermorécepteurs, les mécano-récepteurs, les nocicepteurs,...

### 5.2.1 La sensibilité mécano-réceptrice

La sensibilité tactile est assurée par les mécanorécepteurs sensibles à la pression, au toucher ainsi qu'aux vibrations.

Ceux ci sont présents à la surface de la peau ainsi qu'au niveau de la langue dans des proportions similaires, on retrouve (Figure 12) (18) (33) (27) (68):

- **les corpuscules de Ruffini** : situés en profondeur, ils sont encapsulés à des connexions multiples. De par leur adaptation faible, ils sont spécialisés dans la détection de stimulus prolongé.
- **les corpuscules de Pacini** : situés immédiatement sous les muqueuses, sont des récepteurs à adaptation très rapide (quelques millimètres ou millisecondes). Ils ne sont stimulés que par des mouvements rapides ou par des vibrations
- **les disques de Merkel** : non présents en bouche
- **les corpuscules de Meissner** : formés par l'encapsulation d'une terminaison nerveuse d'une fibre myélinisée de gros calibre (type A $\beta$ ). Ils sont spécialisés dans la discrimination tactile de précision. Ce sont des récepteurs à adaptation rapide et sont positionnés très superficiellement.

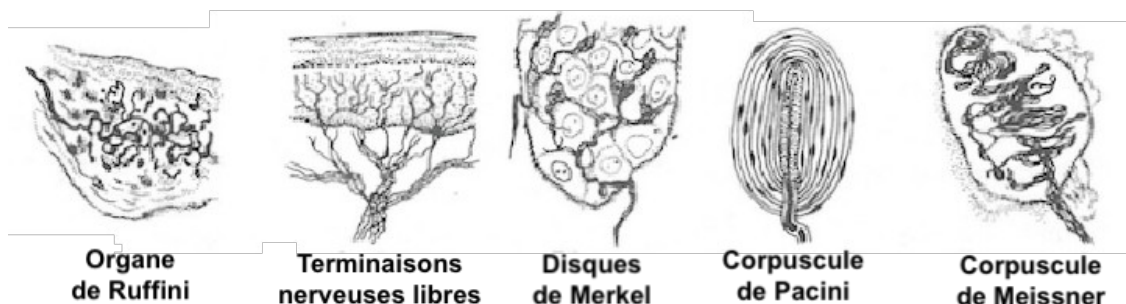


Figure 12: Types de récepteurs somesthésiques (27)

- **les récepteurs organisés et non encapsulés** : Ils sont situés en grande partie au niveau de la muqueuse gingivale, linguale et palatine. Ils constituent des amas nerveux terminaux très volumineux.
- **les récepteurs non encapsulés et non organisés** : les terminaisons nerveuses libres sont spécialisées dans la détection des sensations tactiles et de pressions. Elles sont faiblement spécialisées et à adaptation faible

Les régions du corps qui sont utilisées pour découvrir et interagir avec notre environnement (tels que la peau glabre de la main et la muqueuse de la langue) présentent une prédominance de récepteurs à adaptation rapide. (68)

### 5.2.2 L'intégration cérébrale de l'information tactile

Une fois le stimulus reçu, son effet instantané provoque une modification de la perméabilité transmembranaire du récepteur. On parle de potentiel récepteur fonctionnant selon un effet seuil. Lorsque ce dernier s'élève au dessus du seuil, il engendre un potentiel d'action se propageant le long des fibres nerveuses. (18) (27)

A ce stade, la voie de transmission dépend de la nature du stimuli.

Il existe deux voies (Figure 13):

- **conduction rapide via les fibres de type A:** fibres myélinisées caractéristiques des nerfs spinaux (120 m /s) (27) (69)
- **conduction lente via les fibres de type C:** fibres amyélinisées de petites tailles (0,5m/s) (27) (69)

A partir de ces fibres, l'information se dirige vers la racine dorsale de la moelle épinière. Après leur entrée dans la moelle, les fibres sont amenées à se séparer en deux groupes empruntant l'une des voies suivantes (Figure 13) (27) (69) (70) :

- **le système lemniscal:** constitué de fibres myélinisées de gros calibre permettant une conduction rapide (30 à 110 m/s). Il se distingue de l'autre voie par son haut degré de somatotopie.

Les sensations transmises par la voie lemniscale sont (27):

- les sensations tactiles nécessitant un degré élevé de discrimination spatiale
- les sensations tactiles nécessitant un degré élevé de discrimination d'intensité
- les sensations phasiques
- les sensations provoquées par la position du corps
- les sensations informant la peau d'un frottement
- les sensations de pression à haut degré de discrimination d'intensité

- **Le système spinothalamique antéro-latéral:** constitué de fibres myélinisées de faible calibre et à conduction lente (8 à 40 m/s)

Les sensations transmises par la voie spinothalamique sont (27) :

- la douleur
- la sensibilité thermique
- les sensations diffuses de tact et de pression ne permettant qu'une faible capacité de discrimination spatiale ou d'intensité
- les sensations de chatouillements ou démangeaisons
- les sensations sexuelles

Contrairement au système spinothalamique qui transmet tout type d'information, le système lemniscal est réservé aux informations provenant des mécano-récepteurs.

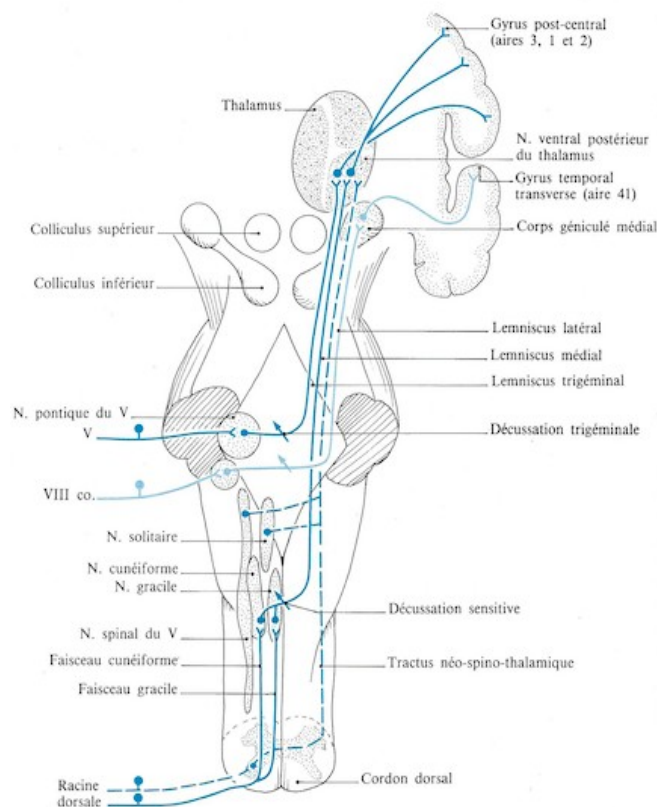


Figure 13: Conduction neuronale de la sensibilité tactile (99)

Une fois la voie lemniscale empruntée, l'information sensorielle se dirige vers la colonne dorsale de la moelle épinière, en direction du noyau cunéiforme et gracile. Afin de s'orienter vers sa destination finale: l'aire somesthésique du cortex.

## 5.2.3 Mesure qualitative de la somesthésie

### 5.2.3.1 Les travaux de Marlow

Marlow et al ont mis en évidence la densité d'innervation de la langue. (58) Ils ont été amenés à disséquer plusieurs langues provenant de personnes décédées d'âge variable.

Au cours des dissections, ils ont pu séparer la langue en 5 zones sensorielles :

- le 1/3 postérieur de la langue
- la pointe de la langue
- la partie antérieure de la langue
- le partie postérieure de la face ventrale
- la partie antérieure de la face ventrale

Les conclusions de cette étude sur la sensibilité de la langue mettent en évidence :

- la présence d'un maximum de sensibilité lors des deux premières décennies de la vie. La sensibilité aurait alors tendance à décroître avec l'âge

- il n'y a pas de différence significative entre l'homme et la femme

- elle dépend de l'état général du sujet: l'alcoolisme comme le diabète sont responsables d'une diminution de la sensibilité. La fatigue et le stress seraient des facteurs pouvant influencer la sensibilité linguale (71)

- la partie ventrale de la langue possède peu voire pas du tout de mécano-récepteurs et la densité de filets nerveux est plus importante sur la face dorsale.

- la pointe de la langue et le 1/3 postérieur présentent des filets nerveux très denses et très superficiels. La pointe de la langue reste la zone avec la densité nerveuse la plus importante

A la suite de cette étude, il est possible d'affirmer que la langue possède une sensibilité décroissante d'avant en arrière avec un maximum de perception situé à sa pointe.

### 5.2.3.2 « L'Homunculus » de Penfield

« L'Homunculus » (Figure 1) de Penfield est la première représentation de la somesthésie générale du corps. On peut y apercevoir cette caricature de l'homme avec des membres proportionnels à leurs sensibilités. Sur la figure 1, on peut constater que les minima de perception sont localisés au niveau de structures telles que la cuisse, le bras et le genou.

Tandis que les maxima de perception sont localisés au niveau de la face et des mains, étant donné que les principaux sens par lesquels l'homme découvre son monde sont :

- le goût
- le toucher
- l'odorat

La langue possédant une surface tout aussi importante que le doigt, considéré comme l'organe le plus sensible du corps, on pressent des sensibilités somesthésiques très proches.

Ces sens travaillent de manière complémentaire au point que si l'on perd l'utilité de l'un d'entre eux, les autres s'adapteront afin de combler le manque sensoriel.

**Exemple :** En cas de perte de la vue, la cécité entraîne une sollicitation naturelle par substitution sensorielle des mains et des pieds afin de s'orienter (à l'image du braille). De par leurs similarités de fonctionnement (innervation, composition et somesthésie), une substitution sensorielle serait possible entre la main et la cavité buccale. Le caractère intime et non visible de la cavité buccale, oriente le choix vers la langue mais cela nécessite une éducation thérapeutique du sujet.

### 5.2.3.3 Les travaux de Trulsson et Essick

Après l'étude de Marlow, on a commencé à s'intéresser plus précisément à la langue afin d'essayer de mesurer sa capacité perceptive. (58)

Trulsson et Essick se penchent sur le problème de la perception sensorielle de la langue. (68)

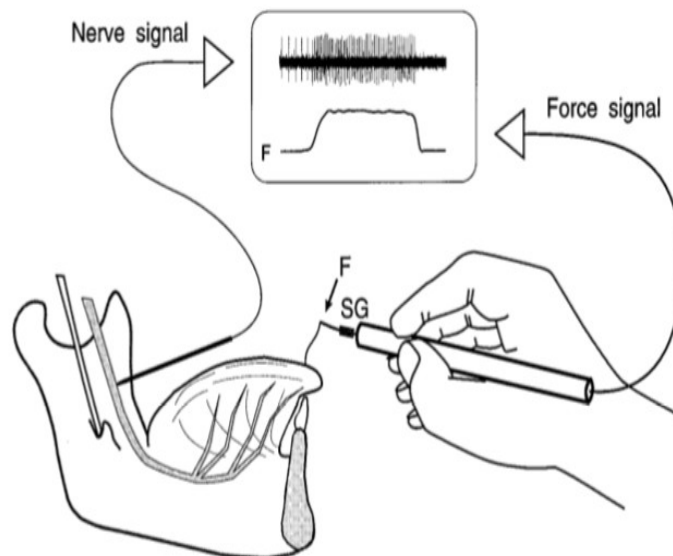


Figure 14: Stimulation et enregistrement de l'activité nerveuse du nerf lingual (68)

A travers une étude portée sur 6 patients différents, ils ont enregistré l'activité du nerf lingual. L'électrostimulation via un filament de nylon a permis l'identification de 9 territoires d'innervation du nerf lingual (Figure 14 et 15). Chaque territoire était plus ou moins vaste allant parfois jusqu'à la face ventrale. On peut constater l'omniprésence de la pointe de la langue sur chacun des territoires nerveux.

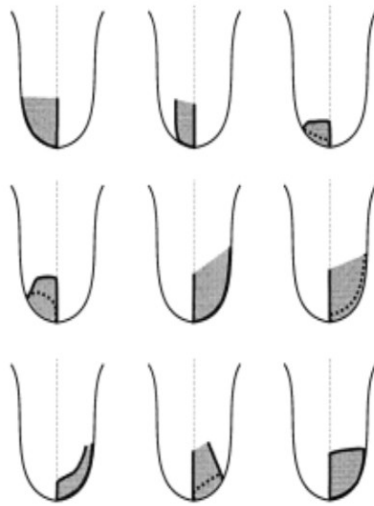


Figure 15: Cartographie du nerf lingual chez 6 patients. (68)

Les études Marlow et Trulsson et Essick semblent alors confirmer une capacité sensorielle élevée de la langue et surtout de sa pointe. La langue est donc un choix de qualité pour la perception de stimuli tactiles de par sa densité en fibres nerveuses afférentes et les propriétés de ses récepteurs.

## 5.2.4 Mesure quantitative de la perception

### 5.2.4.1 Mise en application du test « two point discrimination »

Les travaux de Ringel et Ewanowski, font partie des premières études ayant permis de quantifier la sensibilité tactile de la cavité buccale. (29) Ils ont mené leur étude selon le protocole « two point discrimination » malgré un manque d'information lié aux connaissances de l'époque relativement restreintes sur le sujet. Ils ont réussi, sans pouvoir comparer leurs résultats à quantifier la sensibilité tactile de la sphère orofaciale.

Se basant sur l'étude de 25 patients, ils ont testé la sensibilité des lèvres, du bout des doigts et de la pointe de la langue.

Selon le même protocole, Trulsson et Essick, complètent cette étude en y ajoutant un comparatif pour la mettre à jour. (68) De par leur travail de synthèse, il a été possible de fournir une représentation résumant leur travail et celui de leurs prédécesseurs ayant aussi étudié :

- la sphère orofaciale (nez, joue, menton et lèvres)
- le bout des doigts
- la langue (corps et pointe)



Les résultats de Trulsson et Essick se trouvent sur la représentation (Figure 16) et sont associés aux résultats d'études similaires concernant la pointe de la langue (Figure 16 encadré rose)

Il ressort de cette étude, une acuité de distinction de l'ordre de 1 à 2 mm pour la pointe de la langue et de l'ordre de 2 à 3 mm pour le bout du doigt. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Ringel et Ewanowski (Tableau 3)

Localisation	«two point discrimination»
Pointe de la langue (centre)	1,7 mm
Pointe de la langue (droite)	1,72 mm
Pointe de la langue (gauche)	1,82 mm
Pointe du doigt	2,09 mm

Tableau 3: Résultats de Ringel et Ewanowski (29)

Il est alors possible d'affirmer que la pointe de langue a une sensibilité tactile plus élevée que celle du bout du doigt. (72) (73) Le tableau 3, confirme les résultats vus ci dessous ,la langue est l'organe le plus sensible du corps avec un maximum à sa pointe et une décroissance dans le sens antéro-postérieur. (58) (74) (75)

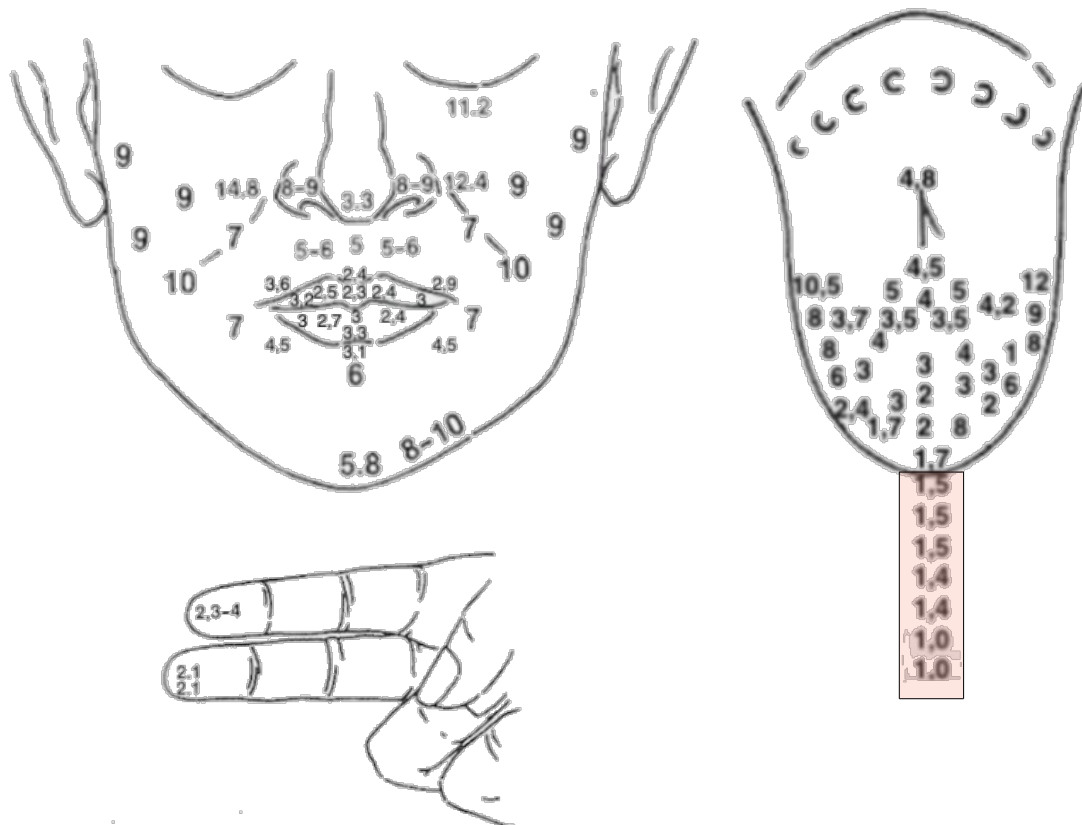


Figure 16: Comparaison de la sensibilité tactile de la sphère orofaciale selon le protocole « two point discrimination » (33)

### 5.2.5 Cartographie de la langue

Dans ces travaux, Robineau cherche à effectuer un geste chirurgical de type ponction par l'intermédiaire d'un Tongue Display Unit (Tongue Display Unit). (19) (76)

Le Tongue Display Unit (Figure 17) consiste en une matrice plastifiée constituée d'électrodes que l'on dispose sur la langue.

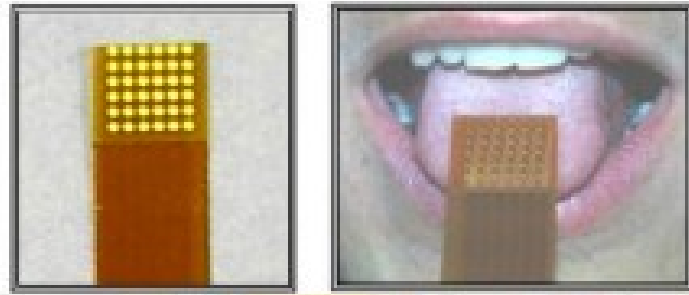


Figure 17: Représentation de la matrice du Tongue Display Unit (100)

Par l'intermédiaire des électrodes, il est possible de transmettre des informations directionnelles à l'opérateur selon une trajectoire idéale pré-définie au cours du geste opératoire.

Les électrodes sont alors organisées selon un certain « pattern » de forme (Figure 18) qui permettra la transmission d'informations plus précises à la langue. Dans le cadre de l'étude, il a été utilisé une configuration basée sur les 4 points cardinaux ainsi qu'une croix pour servir d'indication.

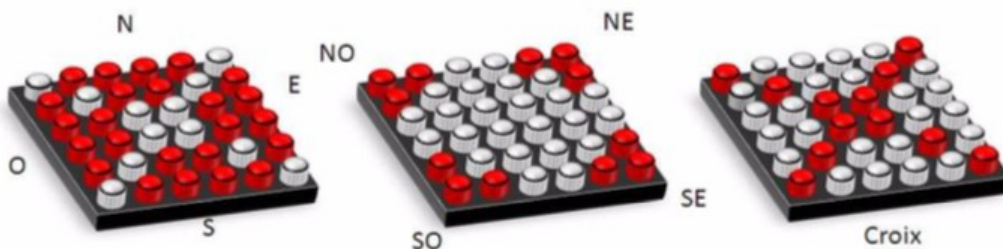


Figure 18: Schématisation des stimuli basés sur les points cardinaux.

En considérant que chacune des électrodes peut s'allumer de manière indépendante, il est alors possible de créer différents « patterns » de stimuli (neufs stimuli potentiels) (19) (74) (76)

Dès lors que l'aiguille sort de sa trajectoire idéale, un stimulus décrivant la situation est alors envoyé à l'opérateur lui indiquant comment rectifier l'erreur (N, NO, croix).

Le but du Tongue Display Unit étant de guider l'opérateur par des stimulations électro-tactile de la langue, afin qu'il puisse se fier entièrement à sa langue.

Avant de commencer à simuler le geste chirurgical, il a été nécessaire d'évaluer les différents seuils de perception de la langue (liminaire, supra liminaire et de confort).

La psychophysique nous permet d'isoler une grandeur physique dans le but d'établir la manière dont elle est raccordée à sa perception. (71)

Il est alors possible d'identifier 3 seuils :

- **le seuil liminaire:** il s'agit du plus petit seuil d'intensité perceptible par la langue
- **le seuil supra liminaire:** il s'agit du seuil d'intensité permettant une perception parfaite du stimuli, aussi appelé seuil de confort.
- **le seuil douloureux:** il s'agit du seuil d'intensité à partir duquel la stimulation devient douloureuse.

Cette électro-stimulation linguale est indolore. Cependant, selon les sujets, elle peut être ressentie tel un picotement à la surface de la langue, à l'image d'une pile qu'on lèche. Cela aurait aussi tendance à augmenter la salivation. (58)

Les études de Robineau ainsi que celle de Marlow et al, Ringel & Ewanowski et Trulsson & Essick ont permis de fournir une cartographie précise. (19) (58) (68) (76)

Grâce à la quantification des différents seuils de confort de la langue, il est possible d'affirmer que la perception optimale dépend du paramétrage des stimuli.

Cela met en évidence l'asymétrie globale. (77) Afin de stimuler la pointe de la langue, il sera nécessaire de générer un stimulus de l'ordre de 1 à 2 volts tandis que 10 volts seront nécessaires pour stimuler l'arrière de la langue (Figure 19). (62)

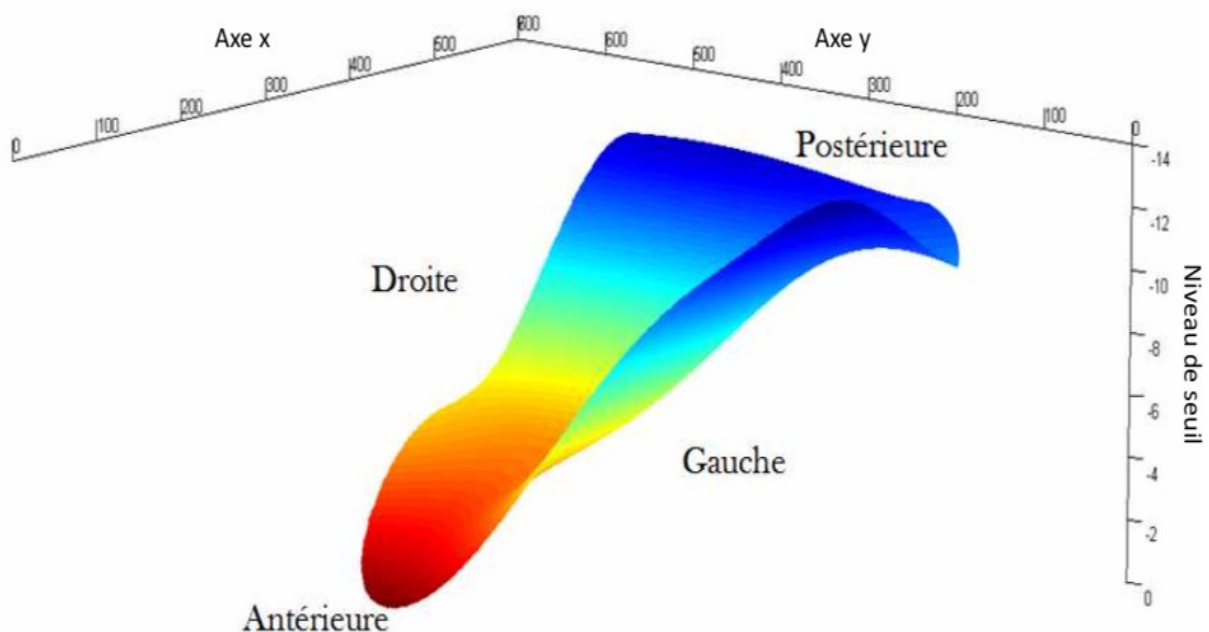


Figure 19: Schéma représentant les seuils de confort de la langue en volt (19)

On constate comme dit précédemment une sensibilité plus élevée pour la pointe de la langue ainsi que sur le côté droit. La couleur rouge indique un seuil plus bas et le bleu un seuil plus élevé avec une légère baisse de perception à gauche. (19)

## 6 Le système de substitution visio-tactile : Brainport®

### 6.1 Indication

Le système Brainport® ne nécessitant pas de traitement chirurgical, il est de ce fait adapté à tout patient atteint de cécité congénitale ou acquise (cataracte, glaucome, rétinopathie diabétique, tumeur,...) ainsi qu'aux personnes malvoyantes. (72) (78) (79)

A ce jour, seule la cécité corticale ne peut pas être prise en charge par le système Brainport® étant donné le manque d'études et de tests concernant cette étiologie. (22)

### 6.2 Fonctionnement

Le système de substitution visio-tactile (SSVT) est constitué d'une caméra montée sur des lunettes de vue teintées (Figure 21). Cette caméra a pour but de transmettre le champ visuel du patient à un processeur vidéo. Une fois que l'information visuelle atteint le processeur, elle est transcrite en noir et blanc. Le processeur effectue une moyenne spatiale des images pour en récupérer une image contrastée de 400 pixels afin d'en coder la luminosité ( voir Figure 20).

Par ailleurs, elle est convertie en stimulations électriques qui seront transmises à la langue par le biais d'une matrice. Les zones claires de l'image sont représentées par des impulsions de niveaux de tension supérieurs transmises à la matrice, tandis que les zones sombres sont codées par des niveaux de stimulations inférieurs.

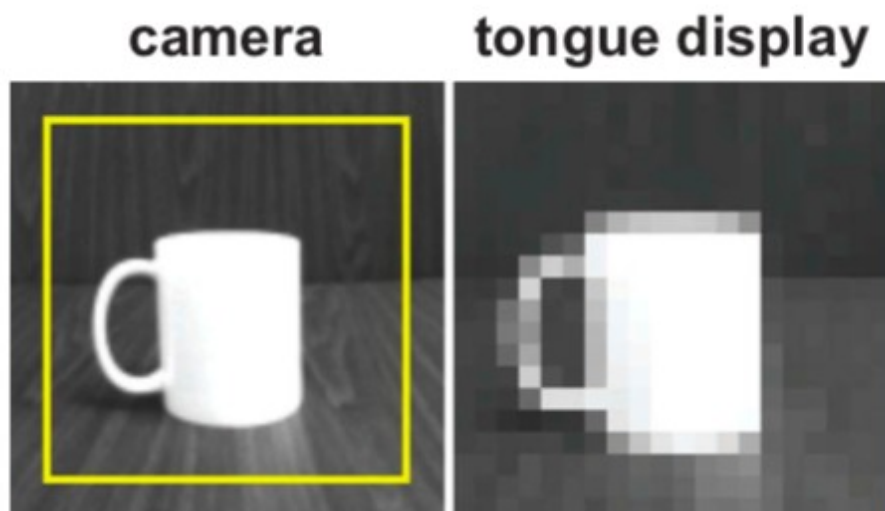


Figure 20: Visualisation d'une tasse après transduction via Brainport®

Afin de couvrir le champ visuel, le système Brainport® est équipé d'un zoom réglable permettant de varier l'angle de vue à plus ou moins de 5°.

La matrice peut à ce jour être trouvée sous différentes formes. Le prototype de base inventé sous le nom de Tongue Display Unit est formé de 100 ou 144 électrodes.

Les électrodes en acier inoxydable permettent une conduction plus stable contrairement à celle en or, ou titane que l'on peut apercevoir dans d'autres études.

La taille des électrodes ainsi que leur espacement ont été déterminés par une étude pilote qui a démontré la plus petite distance pouvant séparer deux électrodes distinctes.

Le réseau d'électrodes est enrobé de résine époxy formant la matrice. La matrice mesure 29,5 mm × 33,8 mm × 7 mm. Les électrodes transmettent des décharges électriques à la surface de la langue stimulant les récepteurs tactiles. La stimulation électro tactile est ressentie comme une vibration ou une sensation de picotement s'apparentant à une bulle de champagne.

Le processeur vidéo servant aussi de boîtier de commande permet à l'utilisateur de contrôler les différents réglages (Figure 21):

- l'inclinaison de la caméra
- l'augmentation du contraste
- le réglage de la stimulation
- le zoom de la caméra
- l'inversion du contraste
- le bouton marche-arrêt

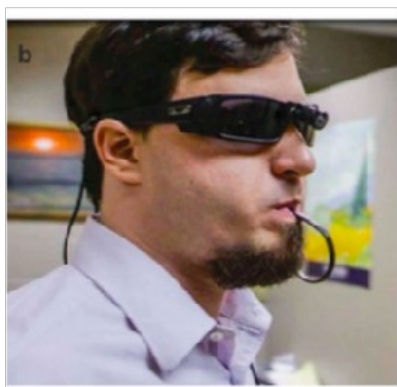


Figure 21: Système Brainport® en application (22)

## 6.3 Pourquoi choisir la langue ?

### 6.3.1 L'importance du toucher

Il existe de multiples alternatives sensorielles afin de permettre une substitution sensorielle de qualité (prothèse auditive à conduction intra osseuse du son, le braille, ...) (35) (80)

Mais à ce jour, la fonction sensorielle la plus prometteuse est la stimulation tactile de la peau ou des muqueuses. (35) Les dispositifs électroniques de suppléance sensorielle visio-tactile (tel Brainport®) permettent un accès à des informations plus complexes de nature optique (telles que la profondeur, la forme d'un objet et la perspective,...). (7)

L'utilisation de la modalité tactile nous permet la stimulation de régions corporelles peu sollicitées, empêchant de potentielles surcharges attentionnelles et des interférences avec les autres modalités perceptives nécessaires aux handicapés sensoriels. (7) (81)

On préfère favoriser la modalité tactile à celle auditive chez une personne aveugle, étant donné qu'elle lui est essentielle pour se repérer dans son environnement.

Enfin l'information tactile captée par les récepteurs cellulaires est transmise au système nerveux central en parallèle. Si l'on considère le cerveau tel un ordinateur alors il existe des milliards d'unités de traitement interconnectées (neurones) traitant l'information sensorielle de manière globale avec des spécificités différentes. (82)

Ce parallélisme pouvant être exploité par le système Brainport® permet, grâce à un couplage perception/action de donner accès à des résolutions perceptives supérieures. Cette propriété de perception « naturelle » est nommée hyper acuité. (7) (35)

**Exemple :** il est difficile de convertir une image en stimulation sonore via la stéréophonie. Tandis qu'il sera plus aisé de reproduire sur la peau la topographie d'une image.

### 6.3.2 La langue: un outil de choix

Le choix de la langue pour la substitution sensorielle se justifie par :

- **sa localisation anatomique :** située dans la cavité buccale, la langue loge dans un environnement dépourvu d'interférences.
  - étant protégée dans la cavité buccale, elle possède alors des récepteurs sensoriels très proches de sa surface. (83) Toutefois, lors de la phonation ou de la mastication, elle ne subit jamais d'interférence avec le monde extérieur contrairement au dos, au thorax et les doigts qui sont beaucoup plus sollicités et moins protégés face aux diverses agressions externes. (35)
  - l'appareillage étant placé dans la bouche, cela permet une meilleure portabilité

- **sa composition anatomique** : principalement constituée de muscles (cf 5.1.2), la langue présente une grande mobilité dans la cavité buccale et possède une grande panoplie de mouvement. (59) (62) De par ce tonus musculaire, elle occupe une position de repos en se positionnant en arrière de la papille rétro-incisive. (64) (65) Cette position est relativement importante étant donné que la matrice du Brainport® se place souvent au contact du palais pour recevoir l'information. (84)
- **son histologie**: la muqueuse linguale présente une déformabilité importante expliquant une grande sensibilité parce que même une faible force produit une déformation et une stimulation des terminaisons nerveuses spécialisées. (68)
- **la conductivité de la salive** : située dans la cavité buccale et surtout baignant dans la salive.
  - Par ailleurs, de par sa composition essentiellement aqueuse (99 % d'eau et 1 % de constituant organique et inorganique), elle permet la conduction électrique sans avoir besoin de gel. (22) (85)
  - La conduction électrique est d'autant plus importante étant donné la composition électrolytique de la salive: on y relève la présence importante d'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) et bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ). (22) (33) (85) (86)
- **sa sensibilité sensorielle** : la langue est l'organe le plus sensible du corps (cf 5.4) et possède une résolution spatiale ainsi qu'une densité de récepteurs sensoriels supérieure à celle du doigt. (22) (84)  
Son seuil de stimulation s'étend de 1 à 15 V contrairement au doigt. (35) (76) (81) (62) De plus, il a été démontré une faible variabilité interindividuelle concernant la sensibilité de la langue. (22)

## 6.4 Avantages et inconvénients

### 6.4.1 Les avantages

- **la compatibilité du système**: il est adapté à tous les types de cécité, excepté la cécité corticale. Le système est aussi ouvert aux personnes malvoyantes. (22)
- **une représentation visuelle**: le patient accède à une représentation en noir et blanc de son environnement. Les dernières études travaillent pour y intégrer la perception de la couleur à la substitution sensorielle. (87)
- **la chirurgie n'est pas nécessaire** : il n'y a donc pas de contre-indications particulières concernant les antécédents médicaux (excepté la cécité corticale).(22)
- **l'ergonomie et la simplicité d'usage du système** : le système est simple d'usage. Il suffit d'un entraînement de minimum quinze heures comparé aux implants rétiniens nécessitant 6 mois de rééducation. (7) (22) (88)
- **le prix** : le Brainport® est moins onéreux que l'implant rétinien, leur coût respectif s'élève à 10 000 dollars et 100 000 dollars. (22) (89)
- **une substitution dépourvue de contact** : le système Brainport® permet de s'apparenter d'avantage à la vue que les systèmes habituels qui nécessitent un contact physique (cane blanche, braille).

## 6.4.2 Les inconvénients

- **hyposialie** : La salive servant de conducteur, il a été prouvé que la sensibilité tactile est réduite en cas de dessèchement des muqueuses. (32)  
De plus, la hausse des pathologies systémiques et celle de la consommation de médicaments, impliquent des risques d'hyposialie (10% des adultes souffrent d'hyposialie). (33)
- **défaut lié à la langue** : si la mobilité linguale est réduite, cela complique l'utilisation du système (ankyloglossie). Si la langue ne permet pas l'insertion ou l'exploitation du système (macroGLOSSIE et microGLOSSIE). Si le patient est incapable de garder langue fixe. (90)
- **l'état neurologique du patient** : Si le patient souffre de désordres mentaux provoquant une réduction de sa sensibilité linguale. (90)
- **La cécité corticale** : non adaptée pour cette étiologie étant donné le manque d'étude sur le sujet.
- **une méconnaissance patient/praticien** : les technologies informatiques sont de plus en plus intéressantes en cas de déficience visuelle profonde. Néanmoins, elles sont peu répandues (moins de 2 % des personnes aveugles y ont accès) de par le manque d'accès à internet. Les besoins sont sûrement sous estimés en raison d'une méconnaissance des différentes aides visuelles existantes pour le patient comme le corps médical. (7)
- **impossibilité de manger ou boire pendant l'utilisation** : (22)
- **une faible précision spatiale** : le patient peut par moment ne pas ressentir les stimuli provenant de l'ensemble des électrodes. Afin de compenser ce manque, il est possible de zoomer sur un objet afin d'en améliorer la précision spatiale. (22)
- **sensation sur la langue** : l'électrostimulation linguale est ressentie tel un picotement / chatouillement souvent assimilé à des bulles de champagne. On relève aussi des témoignages concernant un goût métallique en bouche suite à l'électro-stimulation. (91)
- **une représentation en noir et blanc** : le patient accède à une représentation noir et blanc de son environnement. Mais des travaux essaient de développer la perception de la couleur en jouant sur les différents paramètres de la stimulation (longévité, intensité et ...) (83)



## 6.5 Mise en application : localisation et identification

### 6.5.1 Navigation et localisation d'obstacles

Une fois le principe assimilé, il est nécessaire d'en démontrer son efficacité. Ainsi il a été nécessaire d'évaluer la capacité d'identification et de navigation des personnes aveugles appareillées. Dans la plupart des études, une comparaison cas/témoin a été nécessaire. Permettant une comparabilité de l'efficacité chez les personnes aveugles (cas) et des personnes saines aux yeux bandés (témoin).

Pour ce faire Stronks résume dans une revue systématique les différents tests ayant été menés : (92)

- **perception d'une source lumineuse :**

Nau et ses collègues ont testé cette capacité auprès de 30 personnes (24 personnes aveugles et 6 saines). (93) Après un entraînement de 20 heures, les sujets aveugles réussissent à percevoir une source de lumière dans la majorité des cas.

- **l'acuité tactile et visio-tactile :**

(cf 5.2)

- **sensibilité au contraste :**

Résultant d'une faible acuité spatiale du système, il est difficile de quantifier la mesure du contraste. (92) Malgré la meilleure des performances, les tests ne sont pas assez spécifiques pour en permettre l'évaluation.

- **Identification de forme, d'objet et de mot :**

Bach-y-rita et Chebat ont étudié la reconnaissance de forme et ont obtenu des résultats concluants. (62) (94) Selon leurs études respectives, les personnes aveugles ont un taux de réussite variant de 80 % à 90 %.

- **orientation et navigation :**

Daniel Chebat a mené une étude sur la navigation des personnes aveugles équipées du système Brainport® comprenant 27 sujets (16 aveugles et 11 voyants). (79) Avant l'étude, une période de familiarisation avec le système, suivie d'une explication sur la détection d'objet a été donnée aux candidats.

Au cours de l'étude, les participants traversent un parcours rempli d'obstacles. Les obstacles sont de deux types : à franchir verticalement (marche) ou à contourner. Ainsi tout en avançant, ils devaient pointer du doigt les obstacles afin de les identifier.

Au terme de cette étude, il ressort que les personnes aveugles ont plus de facilité à contourner les obstacles qu'à les franchir. Tandis qu'au niveau de la détection et de l'évitement des obstacles, le groupe d'aveugles obtient de meilleurs résultats que le groupe contrôle sain.

Il est donc possible d'affirmer que les personnes aveugles sont meilleures dans la navigation assistée par un système de substitution sensorielle que les personnes saines.

Avec le recul, les résultats de cette étude sont controversés (72) (79) (95) (92) (96):

- il s'agit de la première étude à aboutir à de telles conclusions. Malgré des résultats concluants, il semblerait qu'avec plus d'entraînement le groupe contrôle pourrait atteindre des résultats similaires.
- il existe un biais lié à la familiarisation des personnes aveugles qui ont déjà utilisé le système avant l'entraînement
- l'expérience assimilée au quotidien par les personnes aveugles dans la détection d'objet, aurait tendance à fausser les résultats
- à contrario, il a été suggéré que l'expérience visuelle au début de la vie est essentielle. Elle permet de modeler les autres sens en leur fournissant une contribution visuelle directe.
- cela mérite d'être étudié à nouveau, afin de confirmer les résultats

Malgré ces réticences, il est tout de même possible d'affirmer qu'il semble ne pas exister de différences significatives entre une personne aveugle et une personne saine. Ce qui pourrait expliquer les divergences dans les résultats que ce soit du côté voyant comme non voyant.

### 6.5.2 Les prothèses visio-tactiles: un avenir prothétique ?

De plus en plus présent dans les thérapeutiques médicales, le Tongue Display Unit tend à diversifier ces champs d'applications. Tout d'abord utilisé afin de palier un déficit visuel, il est utilisé dans le suivi de patient atteint d'escarres et de trouble de l'équilibre. (97) (98) Avec une utilisation en hausse, il a été nécessaire de rendre le système plus ergonomique et surtout plus adapté à un usage ambulatoire.

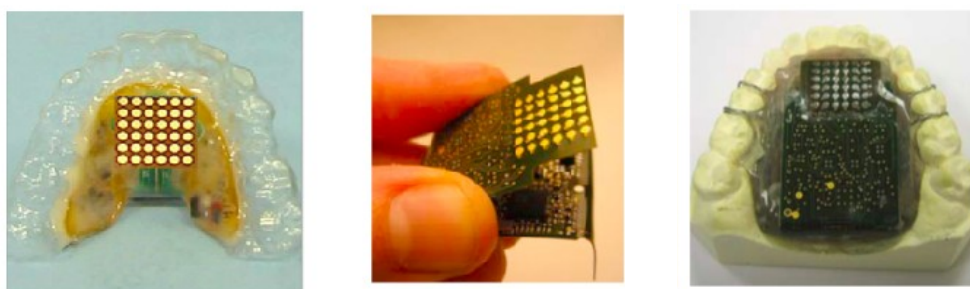


Figure 22: Représentation du système sans fil (97) (98) (prototype sur gouttière à gauche, système sans fil au centre, prototype de Moreau-Gaudry droite)

Ainsi, il a été nécessaire d'optimiser le système afin de réduire les composants pour fournir un système sans fil. Alexandre Moreau-Gaudry et son équipe ont fourni au cours d'une étude sur la prévention des escarres chez les patients paraplégiques, un prototype d'un Tongue Display Unit sans fil. (97)

Il s'agit d'un appareillage orthodontique contenant une version miniaturisée sans fil du Tongue Display Unit. Le système peut aussi être intégré à une gouttière en résine (Figure 22)

On aperçoit le système Tongue Display Unit miniaturisé inclus dans une prothèse. Préalablement conçu à partir d'une empreinte dentaire du patient, cela garantit une acceptabilité maximale. En voyant ce résultat, il est alors possible de se demander s'il ne serait pas possible d'intégrer le Tongue Display Unit sans fil aux thérapeutiques dentaire habituellement proposées en cabinet.

Face à un patient aveugle présentant ou non des édentements, le chirurgien dentiste est capable de proposer diverses solutions thérapeutiques. A savoir en cas d'édentements, il est possible de concevoir une prothèse amovible (métallique ou en résine).

Dans le cas contraire, on peut remarquer (figure 22) , la conception d'une gouttière en résine (similaire aux gouttières d'éclaircissement ou d'occlusodontie) ou d'un appareillage orthodontique. La potentielle intégration du système Tongue Display Unit aux thérapeutiques dentaires proposées en cabinet, ouvre des portes concernant l'accessibilité du système. Et si l'on arrive à le placer sur une gouttière, ne serait-il pas possible de l'intégrer sur une tétine d'enfant ou sur une prothèse amovible ? (7)

## 7 Conclusion

De par sa polyvalence, la langue est un organe indispensable au développement de l'Homme.

Malgré sa complexité, elle reste un organe dont le rôle est sous estimé, eu égard à ses fonctions sensori-motrices encore méconnues de nos jours. Avec les progrès technologiques basés sur ses capacités sensorielles chez les personnes aveugles, de nouvelles thérapies s'offrent à nous. Ainsi nous avons vu qu'il était possible de capter des stimuli visuels afin de les traduire, puis de les interpréter par le biais d'une stimulation vibro-tactile sur la langue. Bien que novatrice, on a pu remarquer que la suppléance sensorielle possède des limites, en commençant par le paradigme de « substitution » de la vision. Il est pertinent de spécifier que ces dispositifs de suppléance ne peuvent pas se substituer à la vision étant donné qu'ils ne rendent pas la vue mais permettent un accès à une représentation réaliste de notre environnement.

Tandis que les compétences sur le domaine ainsi que les technologies prennent un essor grandissant. Il reste tout de même des zones d'ombre quant à la qualité de la résolution du système et son intégration dans les thérapies. Bien que perfectible, l'électrostimulation linguale et la suppléance sensorielle semblent être des solutions d'avenir pour pallier la perte de la vision.

## Références bibliographiques

1. OMS [Internet]. Cécité et déficience visuelle. 2018.  
Disponible sur: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
2. Dramas F. Localisation d'objets pour les non-voyants : augmentation sensorielle et neuroprothèse. 2010.
3. Bourne RRA, Flaxman SR, Braithwaite T, Cicinelli MV, Das A, Jonas JB, et al. Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Glob Health*. 2017;5(9):10.
4. OMS [Internet]. VISION 2020: The Right to Sight.  
Disponible sur: <http://www.iapb.org/vision-2020>
5. Centre de recherche sur les aspects culturels de la vision de Bruxelles. Repères culturels de la cécité. II, II,. Ligue Braille; 2011.
6. Chekhchoukh A. Substitution visuelle par électro-stimulation linguale: étude des procédés affectant la qualité de perception [Thèse d'informatique]. Université de Grenoble; 2016.
7. Segond H, Maris S, Desnos Y, Belusso P. IHM de Suppléance Sensorielle Visuo-Tactile pour Aveugles et d'Intégration Sensorielle pour Autistes. *Journal d'Interaction Personne-Système*. 2011;2(1):16.
8. Arnold G, Pesnot-Lerousseau J, Auvray M. Individual Differences in Sensory Substitution. *Multisensory Res*. 2017;30(6):579-600.
9. Luyat M. La perception. Dunod; 2014. 128 p.
10. Lőrincz ML, Adamantidis AR. Monoaminergic control of brain states and sensory processing: Existing knowledge and recent insights obtained with optogenetics. *Prog Neurobiol*. 2017;151:237-53.
11. Ingold T. Culture, nature et environnement. *Tracés Rev Sci Hum*. 2012;(22):169-87.
12. Breedlove SM, Rosenzweig MR, Watson NV. Psychobiologie: de la biologie du neurone aux neurosciences comportementales, cognitives et cliniques. De Boeck; 2012. 739 p.
13. Danilov Y, Tyler M. Brainport: an alternative into the brain. *J Integr Neurosci*. 2005;04(04):537-50.
14. Ayres AJ, Robbins J, McAtee S. Sensory integration and the child: understanding hidden sensory challenges. *Pediatric Therapy Network*, éditeur. WPS; 2016. 211 p.
15. Dubois C. L'intégration sensorielle: revue de littérature [Mémoire d'orthophonie]. Université de lille; 2018.

16. Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, Volterra A, Jeannerod M. *Neurosciences*. De Boeck Supérieur; 2015. 79 p.
17. Schott GD. Penfield's homunculus: a note on cerebral cartography. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 1993;56(4):329-33.
18. Tronet J. Sensibilité de l'espace lingual: approche théorique et expérimentale. Thèse d'université de Lille; 2017.
19. Robineau F. Etude d'un dispositif de guidage de geste chirurgical de ponction par stimulation électrotactile linguale [Thèse de psychologie]. Université Joseph-Fourier; 2009.
20. Allart E, Bauer P, Boissezon X de, Entretiens de médecine physique et de réadaptation. La plasticité cérébrale. Froger J, Laffont I, Dupeyron A, Entretiens de rééducation et réadaptation fonctionnelles, éditeurs. Montpellier, France: Sauramps médical; 2017. 156 p.
21. Maciel A, Sarni S, Buchwalder O, Boulic R, Thalmann D. Multi-Finger Haptic Rendering of Deformable Objects. The Eurographics Association; 2004.
22. Stronks HC, Mitchell EB, Nau AC, Barnes N. Visual task performance in the blind with the BrainPort V100 Vision Aid. *Expert Rev Med Devices*. 2016;13(10):919-31.
23. Colenbrander A. Assessment of functional vision and its rehabilitation. *Acta Ophthalmol (Copenh)*. 2010;88(2):163-73.
24. Institut Bordelais de la Vision, centre ophtalmologique bordeaux. Institut Bordelais de la Vision, centre ophtalmologique bordeaux.
25. Batterbury M, Bowling B, Gaudric A, Richardson PE, Britton R. *Ophtalmologie*. Paris, France: Elsevier; 2005. 122 p.
26. Won S-Y, Kim H-K, Kim M-E, Kim K-S. Two-point discrimination values vary depending on test site, sex and test modality in the orofacial region: a preliminary study. *J Appl Oral Sci*. 2017;25(4):427-35.
27. Guyton AC. *Anatomie et physiologie du système nerveux*. Montréal, France: Décarie; 1989. 423 p.
28. Lundborg G, Rosén B. The Two-Point Discrimination Test – Time For a Re-Appraisal? *J Hand Surg*. 2004;29(5):418-22.
29. Ringel RL, Ewanowski SJ. Oral Perception: 1. Two-Point Discrimination. *J Speech Lang Hear Res*. 1965;8(4):389.
30. Bell-Krotoski J, Weinstein S, Weinstein C. Testing Sensibility, Including Touch-Pressure, Two-point Discrimination, Point Localization, and Vibration. *J Hand Ther*. 1993;6(2):114-23.
31. Johnson KO, Phillips JR. Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition. *J Neurophysiol*. 1981;46(6):1177-92.

32. Grossman RC, Hattis BF, Ringel RL. Oral tactile experience. *Arch Oral Biol.* 1965;10(4):691.
33. Miles T, Nauntofte B, Svensson P, éditeurs. *Clinical oral physiology.* 2004. 288 p.
34. Essick GK, Chen CC, Kelly DG. A letter-recognition task to assess lingual tactile acuity. *J Oral Maxillofac Surg.* 1999;57(11):1324-30.
35. Lenay C, Gapenne O, Hanneton S, Marque C, Genouëlle C. La substitution sensorielle: limites et perspectives. *Toucher pour Connaître Psychologie Cognitive de la Perception Tactile Manuelle.* 2003;287-306.
36. Bach-Y-Rita P, Collins CC, Saunders FA, White B, Scadden L. Vision Substitution by Tactile Image Projection. *Nature.* 1969;221(5184):963-4.
37. Bach-y-rita P. Tactile Vision Substitution: Past and Future. *Int J Neurosci.* 1983;19(1-4):29-36.
38. Loomis J. In the late 1960s, Paul Bach-y-Rita, Carter Collins, and their colleagues burst onto the scientific scene with tantalizing rep. *Hist Theory.* 2010;1:3.
39. Sampaio E, Duffier J. Suppléance sensorielle électronique pour les jeunes enfants aveugles. *J Fr Ophtalmol.* 1988;161-7.
40. Gazzaniga MS, Ivry RB, Mangun GR, Macar F. *Neurosciences cognitives: la biologie de l'esprit.* Paris, Belgique, France; 2001. 585 p.
41. Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, éditeurs. *Neuroscience.* Sunderland, Etats-Unis d'Amérique: Sinauer Associates; 2004. 39 p.
42. Kolb B, Whishaw IQ, Beuter AÉ scientifique. *Cerveau et comportement.* Cassel J-C, éditeur. Bruxelles, Belgique: De Boeck; 2008. 1013 p.
43. Ragert P, Schmidt A, Altenmüller E, Dinse HR. Superior tactile performance and learning in professional pianists: evidence for meta-plasticity in musicians: Meta-plasticity in musicians. *Eur J Neurosci.* 2004;19(2):473-8.
44. Ramachandran VS. Behavioral and magnetoencephalographic correlates of plasticity in the adult human brain. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 1993;90(22):10413-20.
45. Lestienne R. *Le cerveau cognitif.* Paris, France: CNRS éditions; 2016. 171 p.
46. Purves D, Voyvodic JT. Imaging mammalian nerve cells and their connections over time in living animals. *Trends Neurosci.* 1987;10(10):398-404.
47. Gould E. Neurogenesis in adulthood: a possible role in learning. *Trends Cogn Sci.* 1999;3(5):186-92.
48. Jacobs B, Schall M, Scheibel AB. A quantitative dendritic analysis of wernicke's area in humans. II. Gender, hemispheric, and environmental factors. *J Comp Neurol.* 1 janv 1993;327(1):97-111.

49. Hampson E, Kimura D. Reciprocal Effects of Hormonal Fluctuations on Human Motor and Perceptual-Spatial Skills. 1988;4.
50. Chebat D-R. Un œil sur la langue : aspects neuro-cognitifs du processus de la navigation chez l'aveugle-né. [Thèse de psychologie]. Université de Montréal; 2010.
51. Kovarski C, éditeur. La malvoyance chez l'adulte: la comprendre, la vivre mieux : causes, pathologies, utiliser au mieux le potentiel visuel restant, aides techniques, optiques, humaines..., prises en charge. Vuibert; 2007. 399 p.
52. Qu'est-ce que le cancer de la cavité buccale? - Société canadienne du cancer.  
Disponible sur <https://www.cancer.ca/fr-ca/?region=qc>.
53. La Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age - Centre Hospitalier National d'Ophthalmologie [Internet].  
Disponible sur: [https://www.quinze-vingts.fr/maladies\\_de\\_l\\_oeil](https://www.quinze-vingts.fr/maladies_de_l_oeil)
54. Amandine B. Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre. [Thèse de médecine]. Université de lille; 2014.
55. Dridi S-M, Ejeil A-L. Brossage de la langue. Quand devons nous le conseiller ? Rev D'Odonto-Stomatol. 2011;9.
56. Vigarios E, Bataille C de, Boulanger M, Fricain J-C, Sibaud V. Variations physiologiques de la langue. 2015;
57. Netter FH. Atlas of human anatomy. 5th ed. Philadelphia, PA: Saunders/Elsevier; 2011. 605 p.
58. Marlow CD, Winkelmann RK, Gibilisco JA. General sensory innervation of the human tongue: innervation of human tongue. Anat Rec. 1965;152(4):503-11.
59. Sanders I, Mu L. A Three-Dimensional Atlas of Human Tongue Muscles: Human Tongue Muscles. Anat Rec. 2013;296(7):1102-14.
60. Pinto S, Sato M. Traité de neurolinguistique: Du cerveau au langage. De Boeck Supérieur; 2016. 418 p.
61. Norton NS, Netter FHI/ G, Machado CAG, Craig JA, Carter K. Netter, Précis d'anatomie clinique de la tête et du cou. Duparc F, éditeur. Elsevier-Masson; 2009. 610 p.
62. Bach-y-Rita P, Kaczmarek KA, Tyler ME, Garcia-Lara J. Form perception with a 49-point electrotactile stimulus array on the tongue: A technical note. :427-30.
63. Huschke E. Traité de splanchnologie et des organes des sens. Chez J./ B. Baillière; 1845. 934 p.
64. Gil H, Fougeront N. Dépister un dysfonctionnement lingual : bilan à l'usage des prescripteurs. Rev Orthopédie Dento-Faciale. 2015;49(3):277-92.



65. Fournier M, Marquet F. Langue et posture. *Rev Orthopédie Dento-Faciale*. 2008;42(4):459-71.
66. Sobotta J. Atlas d'anatomie humaine., Tête, cou et neuroanatomie. Médecine Sciences Publications-Lavoisier; 2013. 376; 76 p.
67. Gould DJ, Brueckner-Collins JK, Fix JD. Neuroanatomie. De Boeck Supérieur; 2017. 226 p.
68. Trulsson M, Essick GK. Low-Threshold Mechanoreceptive Afferents in the Human Lingual Nerve. *J Neurophysiol*. 1997;77(2):737-48.
69. Fitzgerald MJT, Folan-Curran J, Tibbitts RM, Richardson PE. Neuro-anatomie clinique et neurosciences connexes. Paris, France: Maloine; 2003. 323 p.
70. Rohkamm R. Atlas de poche de neurologie. Paris, France: Lavoisier Médecine sciences; 2016. 541 p.
71. Marchandise X, Bordenave L, Certaines J de, Ducassou D, Tubiana M. Biophysique: pour les sciences de la vie et de la santé. Omniscience; 2006. 1079 p.
72. Nau AC, Pintar C, Arnoldussen A, Fisher C. Acquisition of Visual Perception in Blind Adults Using the BrainPort Artificial Vision Device. *Am J Occup Ther*. 2014;69(1):8.
73. Miles BL, Van Simaey K, Whitecotton M, Simons CT. Comparative tactile sensitivity of the fingertip and apical tongue using complex and pure tactile tasks. *Physiol Behav*. 2018;194:515-21.
74. Robineau F, Vuillerme N, Orliaguet J-P, Payan Y. Tongue liminary threshold identification to electrotactile stimulation. *4th Int Conf Enactive Interfaces*. 2007;4.
75. Bach-y-Rita P, W. Kerckel S. Sensory substitution and the human-machine interface. *Trends Cogn Sci*. 2003;7(12):541-6.
76. Robineau F, Boy F, Orliaguet J-P, Demongeot J, Payan Y. Guiding the Surgical Gesture Using an Electro-Tactile Stimulus Array on the Tongue: A Feasibility Study. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2007;54(4):711-7.
77. Chekhchoukh A, Vuillerme N, Glade N. Vision substitution and moving objects tracking in 2 and 3 dimensions via vectorial electro-stimulation of the tongue. 2011;14.
78. Lee VK, Nau AC, Laymon C, Chan KC, Rosario BL, Fisher C. Successful tactile based visual sensory substitution use functions independently of visual pathway integrity. *Front Hum Neurosci*. 2014;8.
79. Chebat D-R, Schneider FC, Kupers R, Ptito M. Navigation with a sensory substitution device in congenitally blind individuals: *NeuroReport*. 2011;22(7):342-7.
80. Caroline L. L'audition par la cavité buccale: une prothèse auditive intra-orale [Thèse de chirurgie dentaire]. Université de lille; 2015.
81. Bach-Y-Rita P. Tactile Sensory Substitution Studies. *Ann N Y Acad Sci*. 2006;1013(1):83-91.

82. Seron X, Baron J-C, Jeannerod M. Neuropsychologie humaine. Editions Mardaga; 1998. 620 p.
83. Bach-y-Rita P, Tyler ME, Kaczmarek KA. Seeing with the Brain. *Int J Hum-Comput Interact.* 2003;15(2):285-95.
84. Kaczmarek KA. The tongue display unit (TDU) for electrotactile spatiotemporal pattern presentation. *Sci Iran.* 2011;18(6):1476–1485.
85. Devoize L., Dallel R. Salivation. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Médecine buccale, 28-150-M-10, 2010.
86. Dany G. Pathologies generales et salive [Thèse de chirurgie dentaire]. Université de Nancy; 2012.
87. Maidenbaum S, Abboud S, Amedi A. Sensory substitution: Closing the gap between basic research and widespread practical visual rehabilitation. *Neurosci Biobehav Rev.* 2014;41:3-15.
88. Handicap.fr. Cécité, un implant rétinien « dernier cri » posé avec succès.
89. Le Réseau canadien pour l'analyse de l'environnement en santé. Implant rétinien pour améliorer la vision chez les patients atteints de rétinite pigmentaire. :1.
90. Lozano CA, Kaczmarek KA, Santello M. Electrotactile stimulation on the tongue: intensity perception, discrimination and cross-modality estimation. *Somatosens Mot Res.* 2009;26(2):50-63.
91. Lawless HT, Stevens DA, Chapman KW, Kurtz A. Metallic Taste from Electrical and Chemical Stimulation. *Chem Senses.* 2005;30(3):185-94.
92. Stronks HC, Nau AC, Ibbotson MR, Barnes N. The role of visual deprivation and experience on the performance of sensory substitution devices. *Brain Res.* 2015;1624:140-52.
93. Nau A, Bach M, Fisher C. Clinical Tests of Ultra-Low Vision Used to Evaluate Rudimentary Visual Perceptions Enabled by the BrainPort Vision Device. *Transl Vis Sci Technol.* 2013;2(3):12.
94. Chebat D-R, Rainville C, Kupers R, Ptito M. Tactile–‘visual’ acuity of the tongue in early blind individuals: *NeuroReport.* 2007;18(18):1901-4.
95. Kupers R, Chebat DR, Madsen KH, Paulson OB, Ptito M. Neural correlates of virtual route recognition in congenital blindness. *Proc Natl Acad Sci.* 2010;107(28):12716-21.
96. Chebat D-R, Maidenbaum S, Amedi A. Navigation Using Sensory Substitution in Real and Virtual Mazes. Sathian K, éditeur. *Plos One.* 2015;10(6):18.
97. Moreau-Gaudry A, Prince A, Demongeot J, Payan Y. Prévention des escarres chez les paraplégiques : une nouvelle approche par électrostimulation linguale. In *IFRATH*; 2006. p. 216-20.

98. Chenu O, Vuillerme N, Demongeot J, Payan Y. A wireless lingual feedback device to reduce overpressures in seated posture: a feasibility study. *Plos One*. 2009;4(10):20.
99. Bossy J, Gouazé A. *Neuro-anatomie*. Heidelberg / Springer-Verlag; 1990. 475 p.
100. Aisen C. Chacin. *pop matrix: tonguedisplay unit*. Thèse; 2012.

## Liste des figures

Figure 1: Représentation des territoires sensitifs : « l’Homunculus ».....	18
Figure 2: Outil de mesure: esthésiomètre (29).....	19
Figure 3: Identification de la lettre A [source personnelle].....	20
Figure 4: Le premier système de substitution sensorielle (TVSS) (6).....	21
Figure 5: La règle de Hebb : « cells that fire together, wire together » [source personnelle].....	25
Figure 6: Vue d’une coupe du globe oculaire (52).....	27
Figure 7: Vue sagittale médiane de la cavité buccale (52).....	30
Figure 8: Vue de la face dorsale (gauche) et de la face ventrale (droite) [source personnelle].....	31
Figure 9: Vue en 3D de la myologie linguale (59).....	32
Figure 10: Représentation 3D des muscles extrinsèques (droite) et intrinsèques (gauche)(59).....	33
Figure 11: Innervation de la langue (57).....	34
Figure 12: Types de récepteurs somesthésiques (27).....	35
Figure 13: Conduction neuronale de la sensibilité tactile (99).....	37
Figure 14: Stimulation et enregistrement de l’activité nerveuse du nerf lingual (68).....	39
Figure 15: Cartographie du nerf lingual chez 6 patients. (68).....	40
Figure 16: Comparaison de la sensibilité tactile de la sphère orofaciale selon le protocole « two point discrimination » (33).....	41
Figure 17: Représentation de la matrice du Tongue Display Unit (100).....	42
Figure 18: Schématisation des stimuli basés sur les points cardinaux.....	42
Figure 19: Schéma représentant les seuils de confort de la langue en volt (19).....	43
Figure 20: Visualisation d’une tasse après transduction via Brainport®.....	44
Figure 21: Système Brainport® en application (22).....	45
Figure 22: Représentation du système sans fil (97) (98) (prototype sur gouttière à gauche, système sans fil au centre, prototype de Moreau-Gaudry droite).....	50

## Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des systèmes sensoriels et de leurs stimuli respectifs (12).....	17
Tableau 2: Description des mouvements linguaux (59).....	33
Tableau 3: Résultats de Ringel et Ewanowski (29).....	41

**Thèse d'exercice : Chir. Dent. : Lille 2 : Année 2019 – N°:**

La suppléance de la fonction visuelle au moyen de l'électro-stimulation linguale

**LEROUX César.**- 61 p. 22 ill. 100 réf.

**Domaines :** Anatomie, Neurologie, Physiologie,

**Mots clés Rameau:** Acuité visuelle, Handicapés visuels, Langue, Neurosciences cognitives, Perception visuelle, Plasticité neuronale, Sens et Sensation, Substitution (psychologie), Troubles de la vision

**Mots clés FMeSH:** Acuité visuelle, Langue (anatomie), Neurosciences cognitives, Perception du toucher, Plasticité neuronale, Sensation, Somesthésie, Troubles de la vision

**Résumé de la thèse :**

Par ce travail, j'ai voulu traiter le sujet de la substitution sensorielle. Ce processus développé par Paul BACH Y RITA, permet au cerveau humain de palier la cécité, par l'utilisation de la stimulation tactile de la cavité buccale. Ce travail cherche donc à mettre en avant les capacités sensori-motrices de la langue, qui lui permettent de suppléer la vision. Après avoir abordé l'axe médical de ce document, nous étudierons les avancées technologiques qui en découlent au travers de l'étude du système Brainport®.

Ainsi nous verrons comment l'essor des nouvelles technologies, nous permet d'intégrer des solutions thérapeutiques innovantes, à celles proposées au quotidien. Nous citons en exemple, le système Brainport® qui constitue un outil basé sur la substitution sensorielle, dont le fonctionnement est abordé dans cette recherche.

**JURY :**

**Président : Monsieur le Professeur Thomas COLARD**

**Assesseurs: Monsieur le Docteur Philippe BOITELLE**

**Monsieur le Docteur Corentin DENIS**

**Monsieur le Docteur William PACQUET**