

Université de Montréal

**L'intégration de modalités sensorielles : l'influence de l'olfaction sur la
vision**

Présenté par :

Mylène Blanchette, B. Sc.

École d'Optométrie

Faculté des études supérieures et postdoctorales

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales en
vue de l'obtention du grade de la Maîtrise en sciences de la vision, option
sciences fondamentales et appliquées

Février 2012

© Mylène Blanchette, 2012

Université de Montréal

Université de Montréal

Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

**L'intégration de modalités sensorielles : l'influence de l'olfaction sur la
vision**

Présenté par :

Mylène Blanchette, B. Sc.

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Vasile Diaconu, Ph.D.

Président rapporteur

Maurice Ptito, Ph.D.

Directeur de recherche

Ron Kupers, Ph.D.

Examineur externe

Résumé

La plupart des études sur la perception isolent une modalité sensorielle pour mieux l'étudier et la comprendre. Malheureusement, aucun de nos sens ne représente la seule source d'information, car une intégration sensorielle se fait en tout moment lors de la perception de l'environnement. L'information d'un sens est donc plutôt en accord ou en conflit avec l'apport d'information des autres sens. Le but de la présente étude était d'investiguer, par IRMf, les activations cérébrales d'une intégration visuelle et olfactive lorsque ces deux perceptions sont congruentes. Pour ce faire, une image et/ou une odeur étaient présentées au sujet et ce dernier devait identifier si le stimulus perçu était congruent. Ce protocole permettait d'observer les activations cérébrales lors de l'analyse d'un stimulus et la prise de décision selon la congruité du stimulus présenté. La condition de congruence vision-odeur activa les zones visuelles et olfactives plus fortement que lors des conditions contrôle (image seule, odeur seule). Ces résultats illustrent une potentialisation des aires visuelles et olfactives par une intégration d'information congruente venant de ces deux modalités. Par conséquent, l'intégration d'un stimulus visuel et odorant congruent semble rehausser la perception du stimulus.

Mots clés : olfaction, vision, intégration sensorielle, IRMf, congruence

Abstract

Most studies on perception isolate one sensory modality in order to better study and comprehend it. Unfortunately, none of our senses represents the only source of information, since sensory integration is underway at all times during environmental perception. The information from one sense is therefore usually in agreement with or in conflict with the input of information from other senses. The goal of the present study was to investigate, by fMRI, the cerebral activations caused by visual and olfactory integration when these two perceptions are congruent. To do this, an image and/or an odour were presented to the subject who then had the task of identifying whether the perceived stimulus was congruent. This protocol allowed the observation of the cerebral activations during stimulus analysis and decision-making depending on the congruity of the presented stimulus. The vision-odour congruent condition activated the visual and olfactory areas more strongly than the control conditions (image only, odour only). These results illustrate a potentialization of the visual and olfactory areas by an integration of the congruent information coming from these two modalities. As a result, the integration of a visual and olfactory congruent stimulus seems to enhance the perception of a stimulus.

Key words: olfaction, vision, sensory integration, fMRI, congruency

Table des matières

| | |
|---|-------------|
| Résumé..... | i |
| Abstract..... | iii |
| Table des matières..... | v |
| Liste des tableaux..... | ix |
| Liste des figures..... | xi |
| Remerciements..... | xiii |
| Introduction..... | 1 |
| LE SYSTÈME VISUEL..... | 1 |
| <i>Organisation anatomique du système visuel.....</i> | <i>1</i> |
| <i>Voies visuelles dorsale et ventrale.....</i> | <i>4</i> |
| <i>Activations cérébrales par stimulation visuelle.....</i> | <i>5</i> |
| LE SYSTÈME OLFACTIF..... | 6 |
| <i>Organisation anatomique du système olfactif.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Nerf olfactif et nerf trigéminé.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Activations cérébrales par stimulation olfactive.....</i> | <i>10</i> |
| L'ODORAT CHEZ L'HUMAIN..... | 12 |
| <i>Fonctions du système olfactif.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Maladies et conditions de santé affectant le système olfactif.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Habilités olfactives des êtres humains.....</i> | <i>18</i> |
| INTÉGRATION VISION-OLFACTION..... | 20 |
| <i>Dominance visuelle lors de conflits.....</i> | <i>21</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Circuits neuronaux reliant la vision et l'olfaction</i> | 23 |
| <i>Congruence de l'information visuelle et olfactive</i> | 24 |
| PROBLÉMATIQUE | 27 |
| OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES | 28 |
| Approche méthodologique | 30 |
| PARTICIPANTS | 30 |
| <i>Critères d'inclusion et d'exclusion</i> | 30 |
| ÉQUIPEMENT | 31 |
| <i>« Sniffin' Sticks »</i> | 31 |
| <i>L'olfactomètre</i> | 32 |
| <i>Odeurs et images</i> | 32 |
| <i>IRMf</i> | 33 |
| PROCÉDURE | 34 |
| <i>Comportementale</i> | 34 |
| <i>IRMf</i> | 40 |
| ANALYSES STATISTIQUES | 42 |
| <i>« Sniffin' Sticks »</i> | 42 |
| <i>Adaptation aux odeurs</i> | 42 |
| <i>Entraînement IRMf</i> | 43 |
| <i>IRMf</i> | 43 |
| Résultats | 45 |
| COMPORTEMENT | 45 |

| | |
|--|------------|
| « Sniffin' Sticks »..... | 45 |
| <i>Adaptation aux odeurs</i> | 47 |
| <i>Entraînement IRMf</i> | 49 |
| IRMf | 50 |
| <i>Contraste vision - repos</i> | 50 |
| <i>Contraste olfaction - repos</i> | 50 |
| <i>Contraste congruence – (interaction vision + olfaction)</i> | 51 |
| Discussion | 52 |
| RÉSULTATS COMPORTEMENTAUX..... | 52 |
| « Sniffin' Sticks »..... | 52 |
| <i>Adaptation aux odeurs</i> | 53 |
| <i>Entraînement IRMf</i> | 56 |
| IRMf | 56 |
| <i>Contraste vision - repos</i> | 57 |
| <i>Contraste olfaction - repos</i> | 59 |
| <i>La voie visuelle ventrale – une aire d'intégration?</i> | 60 |
| Conclusion | 63 |
| Perspectives Futures | 63 |
| Références | 67 |
| Appendices | xiv |

Liste des tableaux

Tableau I p. xx

Tableau II p. xxii

Tableau III p. xxiv

Liste des figures

Figure 1 p. xiv

Figure 2 p. xvi

Figure 3 p. xviii

Figure 4 p. xxvi

Figure 5 p. xxviii

Figure 6 p. xxx

Liste des Abréviations

IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

fMRI : functional magnetic resonance imaging

BOLD : blood oxygenation level dependent

TDI : threshold discrimination identification

Remerciements

Je tiens à remercier, tout d'abord, mon superviseur Dr. Maurice Ptito pour son aide et son support durant tout ce temps, ainsi que sa contribution au niveau du protocole, de l'analyse de données et de la rédaction du présent document. Je ne peux négliger de remercier Dr. Marie-Odile Richard pour l'idée du projet, et pour m'avoir donné l'opportunité de mener cette étude avec elle. Je la remercie pour la recherche de sujets, la collecte de données, l'analyse comportementale et son support continu. Je veux aussi remercier le Dr. Jen-Kai Chen pour l'analyse des données IRMf, M. Ron Kupers pour son apport intellectuel au niveau du protocole et de l'analyse de données, M. Marc Mellilo pour la création du programme informatique pour l'olfactomètre ainsi que son aide irremplaçable lors de la résolution de problèmes informatiques, M. François Vaillancourt pour le montage de l'olfactomètre et sa créativité pour résoudre les problèmes physiques, et Mme Carolyn Hurst et M. André Cyr pour leur apport lors de la collecte de données IRMf. Finalement, un petit merci à Jonathan Pitre pour sa révision du présent mémoire.

Introduction

Le système visuel

Le système visuel est sans doute le plus étudié, et probablement le plus estimé, de tous les sens chez l'être humain. C'est donc une cible extrêmement intéressante pour une étude d'intégration sensorielle, dans le but de mieux comprendre comment ce système peut être influencé par l'information multi-sensorielle acquise par l'humain à chaque instant.

Organisation anatomique du système visuel

Les objets perçus dans notre environnement le sont grâce aux ondes lumineuses reflétées sur la rétine de notre œil. La rétine possède deux groupes de photorécepteurs stimulés par cette lumière : les bâtonnets fonctionnant dans la pénombre, et les cônes fonctionnant en présence de forte lumière et responsables de notre vision en couleur. Les bâtonnets sont présents en périphérie de la rétine, et possèdent donc une acuité beaucoup moins grande que celle des cônes présents dans la fovéa (Wald,

1945). Les cônes, quant à eux, sont divisés en trois types : les cônes sensibles aux longueurs d'onde courtes (bleu-violet), aux longueurs d'onde moyennes (vert), et aux longueurs d'onde longues (rouge). C'est grâce à ces récepteurs que les êtres humains sont catégorisés tri-chromates, et peuvent distinguer le bleu-violet, le vert et le rouge, et toute couleur créée par une combinaison de ces trois couleurs (Roorda, 1999). Tous ces photorécepteurs envoient alors l'information reçue aux cellules ganglionnaires de la rétine, via de nombreux intermédiaires (cellules bipolaires, amacrines et horizontales) qui modulent cette entrée d'information. Ces neurones peuvent être de deux types : type M (plus larges, de type magnocellulaire) et type P (plus petites, de type parvocellulaire).

- Neurones de type P : sensibles aux couleurs et aux bas contrastes, perception lente, haute acuité.
- Neurones de type M : essentiellement aveugles aux couleurs, perception rapide, sensibles aux hauts contrastes, basse acuité.

Ces deux types de cellules sont divisés fonctionnellement tout au long du décodage visuel. Leurs axones sont envoyés de l'œil au collicule supérieur et au corps géniculé latéral via le nerf optique. Dans le corps géniculé latéral (la voie directement reliée à la

perception visuelle consciente), les deux types de neurones ganglionnaires projettent leur information par deux divisions anatomiques – les 4 couches dorsales de type P et les deux couches ventrales de type M. Chaque œil est représenté dans trois des six couches du corps géniculé latéral de chaque hémisphère, de manière alternée, ce qui divise les champs visuels de manière à ce qu'ils projettent à l'hémisphère controlatéral (i.e. champ visuel gauche à l'hémisphère droit et champ visuel droit à l'hémisphère gauche). Cette division des champs visuels et des types de cellules ganglionnaires continue même dans V1 (voir figure 1, p. xiv).

- Cellules M : projettent à la couche $4C\alpha$, puis à la couche 4B, et par la suite passent par V2 pour se rendre à l'aire corticale V5/MT.
- Cellules P : projettent à la couche $4C\beta$, puis aux couches 2 et 3, et finalement passent par V2 pour se rendre à V4.

De ces aires, l'information visuelle sera envoyée aux deux voies (dorsale et ventrale) visuelles selon ses caractéristiques (Livingstone, 1988).

Voies visuelles dorsale et ventrale

L'aire V5/MT est spécialisée pour l'analyse du mouvement et de la profondeur stéréoscopique. Elle reçoit l'information visuelle de la couche 4B de V1, zone d'information sur la direction de mouvement, et l'information de V2 sur la disparité binoculaire. Cette aire projette principalement son information à la jonction pariéto-occipitale et au cortex pariétal, régions nécessaires pour les tâches prenant en compte la position spatiale et temporelle d'objets (voie dorsale « où »).

L'aire V4, quant à elle, reçoit l'information de V2 sur la couleur et l'orientation des objets. Cette aire projette plutôt à la région temporo-occipitale et au cortex temporal inférieur (gyri lingual et fusiforme), régions importantes pour l'identification et la mémorisation d'objets (voie ventrale « quoi »). Cette région traite l'information physique des stimuli pour l'identification d'objets telle la perception des couleurs, la forme et le motif, et permet l'examen approfondi d'objets. Sa perception se fait de manière beaucoup plus lente, est plutôt sensible au contraste bas et possède une très bonne acuité (Livingstone, 1988). Cette voie est particulièrement sensible à l'apprentissage de l'identification d'objets par expérience (Courtney, 1997).

Les deux voies possèdent, dans les aires de traitement primaires, une représentation de tout le champ visuel, organisée de manière rétinotopique. Puis, plus nous avançons dans le traitement de l'information, plus cette organisation est perdue et plus nous retrouvons une spécificité pour des stimuli beaucoup plus complexes. Les deux voies ont aussi des projections à certaines régions du lobe frontal qui envoient à leur tour des projections réciproques aux aires de traitement visuel pour ainsi moduler l'attention à certains stimuli choisis.

Activations cérébrales par stimulation visuelle

Lors de tâches visuelles, l'aire V1 est toujours active. Par contre, l'étendue de son activation ainsi que les aires secondaires activées dépendent de la tâche et du stimulus présenté. Une étude de Gulyás en 1994 démontre justement que l'analyse et le traitement de différentes caractéristiques visuelles activent des régions différentes.

De plus grande importance, une dissociation des voies visuelles dorsale et ventrale se fait clairement lorsque le stimulus est changé, soit par son orientation, soit par son identité (Valyear, 2006). Par exemple, lorsque le même stimulus est présenté avec

une orientation différente, une activation est trouvée dans la voie dorsale de l'hémisphère droit alors que lorsqu'un stimulus est changé pour un autre de même orientation, une activation est trouvée dans la voie ventrale de l'hémisphère droit.

Le système olfactif

Le système olfactif est un des systèmes sensoriels les moins étudiés; c'est pourquoi l'information que nous possédons sur ce sens est limitée. C'est une des raisons pour lesquelles cette modalité sensorielle représente un si grand intérêt pour les sciences fondamentales et appliquées.

Organisation anatomique du système olfactif

Une odeur est, comme nous le savons, perçue par le nez. Mais comment ce processus se produit-il et comment reconnaissons-nous les odeurs que nous rencontrons? En fait, une odeur est une molécule gazeuse relâchée par un objet ou une personne dans l'air ambiante, où elle va se disperser dans toutes les directions. Cette molécule odorante peut arriver au nez de deux

manières : par voie rétronasale et/ou voie orthonasale. Lorsque les molécules odorantes entrent dans le nez via la bouche (par exemple lorsque nous mangeons), nous appelons cela une entrée rétronasale. Lorsque les molécules odorantes entrent via les narines, nous appelons cela la voie orthonasale. Ces molécules vont alors se lier aux récepteurs des neurones olfactifs de l'épithélium nasal, une région spécialisée de 2,5 cm² retrouvée dans le haut de chaque narine (Leffingwell, 1999). Cette molécule possède une grande affinité pour un récepteur particulier, et ira s'y lier de préférence, bien qu'elle puisse tout de même se lier à plusieurs autres types de récepteurs avec lesquels son affinité est moins grande. De fait, l'être humain possède 380 types de récepteur, mais un seul type n'est présent sur un neurone olfactif en tout temps. La manière dont les molécules se lient à ces récepteurs, et sur quelle information le récepteur se base pour décoder l'information, sont des questions toujours sans réponse, bien que plusieurs hypothèses existent sous forme de modèle (Brookes, 2010).

Bien que la manière dont le récepteur est activé ne soit pas connue, lorsque ceci se produit, les axones des neurones olfactifs stimulés vont se lier aux glomérules du bulbe olfactif, où ils forment des synapses avec les terminaux dendritiques des

cellules mitrales et à panaches. Ces cellules sont alors modulées par de nombreux inter-neurones inhibiteurs, faisant partie d'un mécanisme de rétroaction provenant des aires corticales. C'est donc déjà au niveau du bulbe olfactif que l'entrée d'information olfactive est organisée et triée, avant même d'être perçue consciemment dans les aires olfactives primaires.

Les axones des cellules mitrales et à panaches sont alors transmis par le tractus olfactif latéral au cortex olfactif primaire. Ce cortex est composé de plusieurs aires cérébrales, incluant le noyau olfactif antérieur, le cortex piriforme, le cortex périamygdalien, le cortex entorhinal latéral, le tubercule olfactif et la ténia tecta ventrale (voir figure 2, p. xvi).

Ces régions cérébrales peuvent alors envoyer des connexions aux aires olfactives secondaires, telles que le cortex orbitofrontal, l'insula, l'hypothalamus, le cortex périrhinal, l'hippocampe et le cortex strié. Ce réseau englobe, comme nous pouvons le constater, plusieurs cortex limbiques et paralimbiques, importants pour la modulation des réponses physiologiques et comportementales à certains événements émotionnels (voir figure 2, p. xvi).

(Pour une revue sur l'olfaction, voir Gottfried, 2010)

Nerf olfactif et nerf trigéminé

Il est important de noter, lors d'études olfactives, que les mammifères terrestres possèdent certains éléments de cinq systèmes neuronaux spécialisés et reliés à l'olfaction (Doty, 2001) :

- Système olfactif principal (nerf crânien I);
- Système olfactif voméronasal;
- Système somatosensoriel trigéminé (nerf crânien V);
- Organe septal de Masera;
- Nerf terminal (nerf crânien O).

Deux systèmes sont particulièrement importants chez l'humain pour les études olfactives – les nerfs crâniens I et V.

Le système olfactif principal nous permet de détecter des odeurs et de savourer nos aliments et boissons. C'est ce système qui nous avertit lorsque nos aliments sont expirés ou encore si un produit chimique environnemental représente un danger pour notre santé (Doty, 2001). Ce système projette son information principalement de manière ipsilatérale (Brand, 1999).

D'un autre côté, le système somatosensoriel trigéminé s'occupe des sensations somatosensorielles telles que l'irritation, les

brûlements, le froid, et les chatouillis au niveau du visage. Il induit des réponses réflexes telles que la sécrétion de mucus ou l'arrêt de l'inhalation pour prévenir ou minimiser les blessures chimiques ou thermales aux passages nasaux ou pulmonaires (Doty, 2001). Ce système, quant à lui, projette son information de manière contralatérale (Brand, 1999).

Ces deux systèmes sont fortement inter-reliés. Par exemple, la dysfonction olfactive est corrélée avec une diminution de la sensibilité trigémينية, et les deux sont affectés par l'âge (Hummel, 2003). D'ailleurs, certains croient qu'aucune odeur ne stimulerait un nerf sans stimuler l'autre, et que seulement le degré d'activation de chacun varierait (Schneider, 1967).

Activations cérébrales par stimulation olfactive

Lors de tâches olfactives, comme on peut s'en douter, les aires olfactives primaires sont fortement activées. Mais suivant la nature du stimulus, les aires additionnelles activées peuvent différer, une asymétrie de ces activations peut être observée, et une préférence latéralisée peut se produire. La nature de la tâche, les conditions de recueil des données et le sexe des participants peuvent aussi influencer les activations.

Par exemple, un stimulus activant fortement le système trigéminé (tel que l'eucalyptus) ne stimulera pas les mêmes aires cérébrales qu'un odorant activant le système trigéminé très faiblement (tel que la vanille). De plus, le signal BOLD dans certaines régions ne sera pas de la même force selon le niveau d'activation du nerf V. La phase inspiratoire elle-même active des zones différentes selon s'il y a présence ou absence d'une odeur. Par ailleurs, les stimuli plaisants activeront plutôt le cortex orbitofrontal droit, et les stimuli déplaisants le cortex orbitofrontal gauche et le cortex piriforme antérieur gauche. (Brand 1999 & Gottfried 2003)

La présentation d'un stimulus par les voies orthonasale ou rétronasale est aussi importante au niveau des activations cérébrales. Par exemple, la voie rétronasale activera plus fortement le gyrus post-central ventral gauche (proche du cortex somatosensoriel oral). Cette voie est aussi influencée par le type de stimulus, et donc un stimulus alimentaire activera plus fortement le cortex orbitofrontal médial, le cortex cingulaire et le gyrus temporal supérieur qu'un stimulus non-alimentaire. Un stimulus alimentaire présenté de manière orthonasale activera, quant à lui, le cortex orbitofrontal caudolatéral, l'insula, le thalamus, la région enjambant le cortex piriforme supérieur et

l'amygdale plus fortement qu'un stimulus non-alimentaire. (Small 2005, cité dans Gottfried 2005)

Une tâche de discrimination, de reconnaissance ou d'identification d'odeurs activera plutôt des régions temporales et frontales, alors que la mémorisation d'odeurs montrera une prédominance de l'hémisphère droit au niveau des régions temporale, orbitofrontale et hippocampale (Brand, 2001).

L'odorat chez l'humain

Puisque l'olfaction est un sens peu connu, et démontrant de plus en plus d'intérêt au niveau des sciences fondamentales et appliquées, révisons ce que nous connaissons de ce système, ce qui le rend intéressant à étudier, ce qui est important à connaître lors d'une étude de ce type, et comment comparer nos résultats.

Fonctions du système olfactif

Le système olfactif joue un rôle critique lors de la sélection de nourriture, pour la mémoire et le comportement, pour la

reconnaissance des pairs, des prédateurs et des proies, au niveau des fonctions reproductives et maternelles, de la régulation neuro-endocrine, de l'agression, sur la navigation, et sur les réponses émotionnelles (Shibley, 1996).

Alimentation

Le développement des aliments, des mets cuisinés, des plats variés, etc., a mené à une plus grande importance de l'odorat rétronasal et d'une plus grande modulation de l'entrée d'information olfactive par le cortex (Shepherd, 2004). Le mélange de cet odorat rétronasal et de la sensation de goût sur la langue crée la saveur d'un aliment, et nous permet d'apprécier nos aliments et boissons.

Dangers

Les odeurs nous permettent de distinguer la nourriture périmée ou encore nocive pour la santé des aliments sains, et de nous avertir de la présence de fumée ou de gaz, parfois même avant de pouvoir voir ou entendre ces dangers. Plusieurs réactions aux dangers sont apprises lors du développement, alors que l'individu fait face à certaines situations. D'ailleurs, le seuil de détection de l'isoamyl mercaptane, un

composé ajouté aux réservoirs de propane, est de 0,77ppt, un des seuils de détection les plus bas mesurés chez l'humain, équivalent à une infime quantité (0,77 parties par billion) (Nagata, 1990). Cet exemple appuie la plasticité continue du système alors qu'il recueille de nouvelles données.

Interactions sociales

Il va sans dire que de nombreuses personnes aujourd'hui décrivent des molécules nommées phéromones – des molécules odorantes détectées inconsciemment et ayant un rôle important lors de l'attraction sexuelle et de la reproduction. D'ailleurs, des femmes vivant ensemble et interagissant continuellement entre elles ont tendance à synchroniser leurs cycles menstruels, et donc leurs cycles hormonaux. De surcroît, une odeur ambiante et indétectable peut avoir un effet sur le jugement du charme d'un visage. Il semblerait donc que notre environnement olfactif influence nos interactions sociales (Sela, 2010).

Navigation

Un grand nombre d'animaux se servent de leurs nez pour naviguer dans leur environnement. Il y a très peu de raisons pour croire que l'odorat

ne servirait pas une cause semblable chez l'humain, bien que moins prononcée étant donné la prédominance de la vision. Par contre, le nez pourrait tout de même servir pour la localisation, de manière inconsciente ou peut-être lorsque la vision ne peut nous être utile – dans le noir, gaz incolores, etc.

Mémoire

Le cortex piriforme, une région cérébrale essentielle à l'odorat, se trouve très près de l'hippocampe, une région hautement reliée à la mémoire humaine. Outre cela, l'olfaction est fortement liée au circuit limbique et émotionnel, incluant l'amygdale (Swanson 1999), qui joue un rôle important lors de l'acquisition d'information – un événement fortement émotionnel sera beaucoup plus vivide et restera ancré dans la mémoire beaucoup plus longtemps qu'un événement anodin (Maren, 2000). Il n'est donc pas curieux que ce sens influence la mémoire. En effet, lorsqu'une odeur de citrus, souvent retrouvée dans les produits nettoyants, était répandue dans une salle expérimentale, les participants répondaient plus rapidement à des mots reliés au nettoyage (Sela, 2010).

Émotions

Comme décrit plus haut, le cortex olfactif secondaire inclut certaines aires limbiques et paralimbiques, très importantes pour la modulation des réponses émotionnelles aux stimuli ambiants. Des stimuli olfactifs peuvent donc avoir un impact significatif au niveau des émotions des êtres humains.

Par exemple, une odeur d'orange dans la salle d'attente d'un dentiste a des effets positifs sur l'humeur des femmes présentes dans la pièce. Également, lorsqu'une odeur plaisante ou déplaisante est présentée inconsciemment durant un questionnaire, un impact sur l'humeur du participant est observé. Le participant peut même être conditionné par cette odeur, et ressentir les mêmes émotions lorsque retourné dans la même salle, même si l'odeur n'est plus présente (Sela, 2010).

Les femmes sont souvent plus affectées par les odeurs, et auront tendance à évaluer l'hédonicité d'une odeur de manière plus extrême (Thuerauf, 2009), bien qu'hommes et femmes aient des réactions émotives face aux odeurs.

Maladies et conditions de santé affectant le système olfactif

Plusieurs maladies et conditions causent une perte totale ou partielle des fonctions olfactives de l'individu. Des plus communs et de plus grand intérêt sont (Doty, 2001) :

- Alcoolisme et dépendance aux drogues;
- Déficit d'attention et hyperactivité;
- Alzheimer;
- Exposition aux produits chimiques;
- Fibrose kystique;
- Épilepsie;
- Traumatismes crâniens;
- Parkinson;
- Sinusite rhinale;
- Schizophrénie;
- Interventions chirurgicales/radiologiques.

Il est important donc de s'assurer des répercussions potentielles de certains troubles de santé présents ou passés sur les résultats obtenus lors d'études du comportement ou d'imagerie, et cela surtout lorsque ces études sont olfactives.

Habiletés olfactives des êtres humains

Seuils de détection, discrimination, et identification

Les habiletés olfactives des humains sont souvent testées à l'aide de tests psychophysiques standardisés (Doty, 2001). Ces tests comportent souvent des tâches de détection, de discrimination ou d'identification d'odeurs - les tâches les plus communes pour évaluer les habiletés olfactives.

Il est maintenant reconnu que les êtres humains sont intrinsèquement bons à la détection d'odeurs et peuvent même devenir meilleurs avec la pratique. Des tests de seuil de détection d'odeurs démontrent qu'ils peuvent performer tout aussi bien que les chiens, et même mieux que les rats pour certaines molécules odorantes (Shepherd, 2004). Ils sont aussi extrêmement bons à la discrimination d'odeurs (Sela, 2010). Malheureusement, ils ne sont pas aussi bons pour l'identification libre d'odeurs – c'est-à-dire identifier une odeur sans choix de réponse (Thuerauf, 2009).

Les femmes ont, en moyenne, de meilleures habiletés olfactives que les hommes. Cette supériorité existe dans toutes les cultures et peut être observée dès l'âge de 4 ans. Elles ont des seuils de détection d'odeurs

plus bas (Thuerauf, 2009), et ont tendance à réussir des scores plus élevés que les hommes lors de tâches de discrimination, d'identification et de mémorisation (Brand, 2001).

Par contre, hommes et femmes souffriraient d'un déclin progressif de leurs habiletés de détection et d'identification d'odeurs après avoir atteint l'âge de 60 ans (Brand, 2001), bien que les femmes retiendraient généralement leurs habiletés olfactives plus longtemps que les hommes (Doty, 2001).

Le test des « *Sniffin' Sticks* » (Hummel, 1997) est un test standardisé de plus en plus populaire, qui mesure ces trois critères – le seuil de détection de butanol, et les capacités de discrimination et d'identification de certaines odeurs. Certaines études ont utilisé ce test sur de grandes populations, nous permettant donc de comparer une population de sujets à une moyenne « normale » du score TDI obtenu. Ceci permet de s'assurer de la représentation la plus normale d'une population par les sujets utilisés lors d'une étude. Ces scores standardisés permettent aussi de déterminer avec une plus grande certitude la normosmie des sujets recrutés, et pouvoir rejeter tout individu hyposmique ou anosmique.

Intégration vision-olfaction

Chacune de nos modalités sensorielles nous permet d'interagir avec le monde extérieur. Chacune a ses propres caractéristiques, ses propres utilités, et un certain niveau d'importance lors de la conscientisation de l'information qui nous parvient. Les recherches fondamentales et appliquées nous permettent d'apprendre et de comprendre chaque modalité en modulant l'entrée d'information.

Mais l'information que l'organisme acquiert en temps normal est continue et stimule souvent plusieurs modalités sensorielles en même temps. Qu'arrive-t-il alors lorsque deux modalités sensorielles sont stimulées simultanément? Puisque l'humain est un être à prédominance visuelle, ce sens a été énormément étudié et comparé aux autres modalités sensorielles. Comment interagit-il avec l'apport d'information olfactive?

Nous savons que la vision a un impact important sur notre système olfactif. Même au niveau alimentaire, les indices visuels permettent l'identification des aliments, et après une certaine expérience répétitive, peuvent évoquer des sensations orales par simple anticipation. La couleur même d'un breuvage peut altérer la saveur que nous y associons – un breuvage à l'orange est identifié 80% du temps si coloré orange, mais seulement 30% si incolore, ou coloré de manière inappropriée. Une boisson colorée de manière appropriée sera aussi jugée comme étant plus intense que la même boisson incolore ou

colorée de manière inappropriée (Christensen, 1983). La saveur d'un aliment étant fortement influencée par le système olfactif, il est probable alors que l'information visuelle module l'apport gustatif et olfactif.

D'un autre côté, l'olfaction peut tout aussi bien altérer la vision. Le mouvement des yeux lors de l'observation d'une scène - contenant un indice visuel pouvant être odorant – a été observé, et ce, pendant que l'odeur en question était présentée inconsciemment au sujet (Seigneuric, 2010). Les résultats démontrent que l'indice visuel était exploré plus rapidement et pour un laps de temps plus court lorsqu'en présence de l'odeur congruente, comme si l'identification se faisait de manière plus rapide.

Si ces deux sens sont reliés aussi étroitement, y a-t-il une dominance d'un sens sur l'autre? Comment et où se fait cette intégration dans le cerveau humain?

Dominance visuelle lors de conflits

L'olfaction est un sens souvent ignoré car il n'y a pas d'espace spatial où diriger l'attention olfactive sélective, ce qui rend l'effet « *cocktail party* » minime pour l'olfaction. Ceci est causé par la manière que nous percevons les stimuli olfactifs – l'information nous est disponible par moments brefs souvent suivis de périodes

prolongées sans apport olfactif. D'ailleurs, la cécité et surdité au changement (un moment d'inattention va causer un arrêt de l'apport sensoriel, ce qui mène l'individu à ne pas remarquer un changement flagrant dans son environnement) suggèrent que la continuité temporelle de l'apport sensoriel est nécessaire à la conscience de ces phénomènes. L'anosmie au changement décrit donc l'inhabileté des humains à détecter spontanément des changements moins que drastiques dans l'espace naturel olfactif puisque l'apport olfactif n'est jamais continu. Les humains ont conséquemment une conscience de leur environnement olfactif très basse. Ils feront d'abord confiance à leurs yeux s'il y a conflit entre l'information visuelle et olfactive leur étant présentée (Sela, 2010).

En effet, la couleur d'une solution odorante altère l'odeur perçue par l'individu. Une étude de Zellner en 1990 démontre que l'intensité de l'odeur perçue peut être rehaussée par la présence d'une couleur, et encore plus si cette couleur est fortement associée à l'odeur.

Circuits neuronaux reliant la vision et l'olfaction

Nous avons donc prouvé que la vision, surtout, a une forte influence sur l'olfaction, et que le contraire peut se produire. Mais où donc se font cette intégration et cette comparaison de l'apport de ces deux modalités?

Plusieurs sites anatomiques reçoivent l'information visuelle et olfactive convergente, incluant l'hippocampe, le cortex orbitofrontal, le sulcus pariétal inférieur et le sulcus temporal supérieur, et représentent des cibles intéressantes pour l'intégration visuelle et olfactive.

D'ailleurs, l'hippocampe peut être accédé directement ou indirectement par toutes les modalités sensorielles, et se retrouve qu'à quelques synapses de la voie visuelle ventrale et des neurones olfactifs (Gottfried, 2003). Chez des patients épileptiques, suite à une chirurgie ayant endommagé l'hippocampe et les structures adjacentes, une déficience est observée lors d'une variété de tâches olfactives intégrées à d'autres modalités, bien qu'ils conservent leurs fonctions olfactives primaires (Eskenazi 1983).

Le cortex orbitofrontal, quant à lui, reçoit des afférences du cortex piriforme ainsi que des aires visuelles associatives, et

participe à l'établissement des associations entre modalités visuelles et olfactives (Gottfried 2003).

Les sulci temporal et pariétal sont activés lors de tâches olfactives dans de nombreuses études récentes en neuro-imagerie et magnétoencéphalographie (Gottfried 2003), et nous savons que ces aires font partie des voies dorsale et ventrale visuelles.

Il ne serait donc pas surprenant que ces aires soient importantes lors de l'intégration d'information visuelle et auditive et deviennent des sites de modulation lors de conflits d'information entre ces deux modalités sensorielles.

Congruence de l'information visuelle et olfactive

Nous savons qu'il y a probablement dominance visuelle lors d'une incongruité avec le stimulus odorant, mais qu'arrive-t-il lorsque les deux sources sont congruentes?

Lorsqu'un stimulus congruent est présenté simultanément avec le stimulus odorant, il y a une augmentation de la perception d'intensité et d'attraction de l'odeur. Seo en 2010 (a) démontre qu'une odeur est jugée plus intense et plus plaisante (si d'abord

jugée plaisante), ou plus déplaisante (si d'abord jugée déplaisante), si présentée avec un symbole congruent plutôt que seule, et le même effet est remarqué lorsqu'un son congruent est présenté simultanément avec une odeur (Seo, 2010b).

Une étude d'imagerie fonctionnelle de Tubaldi en 2010 présentait des clips visuels aux sujets, dans lesquels une main était placée à côté d'un objet. L'objet pouvait être vu, ou caché derrière une cloison, et la main pouvait soit être statique, ou saisissait l'objet en question. Et puis, alors que le sujet regardait le clip, un flux d'air inodore ou odorant était envoyé au sujet. Lorsque la tâche était motrice (la main saisissait l'objet) et odorante, une plus grande activité était observée dans le cortex temporal moyen bilatéral, le cortex pariétal inférieur bilatéral, le cortex pré-moteur dorsal bilatéral et le cortex pré-moteur ventral droit, des régions associées soit à l'observation d'un mouvement ou, possiblement, associées à l'intégration visuelle et olfactive.

L'étude de Gottfried en 2003 tente de localiser les activations cérébrales lorsqu'un individu est soumis à des stimuli visuels et odorants selon si ces stimuli sont congruents ou incongrus, plaisants ou déplaisants, comestibles ou non. Pour une tâche simple de détection d'odeur, le temps de réaction était plus rapide et le taux de réussite plus élevé lorsque les stimuli étaient

congruents plutôt qu'incongrus. L'intégration odeur-vision activait plus fortement le cortex orbitofrontal rostromédial gauche, le sulcus pariétal inférieur postérieur, le sulcus temporal supérieur et le cortex cingulé postérieur qu'un stimulus odorant seul. Ces aires font partie du circuit neuronal possible d'intégration visuelle et olfactive mentionnée plus haut, excepté le cortex cingulé normalement associé à un stimulus odorant. Le stimulus odeur-vision congruent activait plus particulièrement le cortex orbitofrontal rostromédial, le sulcus pariétal inférieur postérieur et le sulcus temporal supérieur comparativement au stimulus odorant seul. Ces résultats ne différaient pas selon si le stimulus était plaisant ou déplaisant, comestible ou non.

Malheureusement, les études intégrant la vision et l'olfaction sont peu nombreuses, et généralement n'utilisent pas des images et des odeurs parfaitement congruentes (par exemple une odeur de pomme avec une image de pomme), mais plutôt sémantiquement ou symboliquement congruentes (par exemple une odeur de vanille avec une image de gâteau). Ce type de pairage requiert beaucoup plus d'effort mental pour créer des liens entre les images ou les symboles et le stimulus olfactif présenté. D'autre part, la tâche du sujet n'est souvent qu'une simple tâche de détection d'odeurs, alors que le sujet doit appuyer sur un bouton

lorsqu'il ou elle a détecté une odeur. Le sujet ne devait alors se prononcer sur la congruité du pairage qu'avant ou après les tests, par des questionnaires. Une tâche de simple détection d'odeur ne permet pas d'examiner le processus mental menant à la perception consciente d'une congruence du pairage olfactif-visuel. De plus, la congruité des pairages n'est établie par les sujets que par mémoire et non au moment même de l'enregistrement d'images cérébrales.

Problématique

Puisque les études sur l'intégration visuelle et olfactive sont peu nombreuses, le but de cette étude est de monter un protocole permettant d'étudier les conséquences d'une congruité entre deux stimuli sur les activations cérébrales. La seule étude ayant précédemment tenté cette expérience est le groupe de Gottfried et al (2003). Par contre, son protocole présentait quelques lacunes, notamment l'utilisation de stimuli sémantiquement congruents, et d'une tâche de détection d'odeur simple. Notre étude, quant à elle, utilise un protocole permettant d'observer le processus mental lors de la prise de décision (le stimulus est-il congruent?), en utilisant des pairages image-odeur parfaitement congruents. Ce protocole permettra d'observer les

activations cérébrales alors que les sujets doivent analyser le stimulus qui leur est présenté et déterminer si ce stimulus est congruent. Cela nous permettra d'établir les conséquences d'une intégration d'information reçue par deux modalités sensorielles différentes.

Objectifs et hypothèses

Le but de cette étude est de déterminer les zones cérébrales activées lors de l'intégration de stimuli visuels et olfactifs congruents comparativement à des stimuli uni-modaux visuels ou olfactifs, et ainsi comprendre où et comment se fait l'intégration de ces deux sens. Nos hypothèses pour cette étude sont les suivantes :

- Les stimuli visuels activeront principalement V1 et la voie ventrale (V2, V4, et cortex temporal inférieur);
- Les stimuli olfactifs activeront principalement le cortex olfactif primaire, le cortex orbitofrontal, le thalamus, l'insula, et l'amygdale;
- La congruence activera le cortex orbitofrontal, l'hippocampe, le sulcus pariétal inférieur et le sulcus temporal supérieur.
- Les temps de réaction, du plus court au plus long, seront : stimulus visuel, stimulus congruent, stimulus olfactif.

L'étude de Gottfried (2003) démontre un temps de réaction plus court lors de la détection d'odeur pour un stimulus image+odeur congruent comparativement à un stimulus seulement odorant. Nous nous attendons donc à ce que le temps de réaction de nos sujets soit plus rapide pour un stimulus congruent qu'un stimulus olfactif. De plus, puisqu'une cloche annonciatrice différente est utilisée pour la condition visuelle, ceci devrait raccourcir le temps de réaction à cette condition.

Approche méthodologique

Participants

Critères d'inclusion et d'exclusion

Intégration vision-odeur

En tout, 46 hommes ont été recrutés par annonces sur sites web. Tous les sujets sont droitiers, de descendance nord-américaine ou européenne, entre 20 et 40 ans (moyenne de 25 ans), et en bonne santé. 21 de ces sujets ont par la suite participé à l'étude de neuro-imagerie (moyenne de 26 ans).

Tout individu souffrant/ayant déjà souffert d'antécédents psychiatriques ou de problèmes neurologiques ou étant/ayant été en contact répétitif avec des substances chimiques (drogues, produits chimiques, tabac, etc.) ont été exclus de cette étude, ainsi que tout individu claustrophobe,

ayant des implants métalliques, des difformités ou fractures nasales, une obstruction nasale, des allergies ou problèmes respiratoires.

Les individus dont le score TDI était en-dessous de 30/48 ont été rejetés de l'étude.

Équipement

« Sniffin' Sticks »

Les « *Sniffin' Sticks* » sont des bâtons odorants utilisés comme test psychophysique standardisé pour déterminer un seuil de détection du butanol, ainsi que l'habileté de discrimination et d'identification d'odeurs chez le sujet (Hummel, 1997). Plusieurs études ayant utilisé ce test, il est utile pour comparer les scores des sujets et ainsi déterminer si chaque individu testé est normosmique.

L'olfactomètre

L'olfactomètre utilisé pour cette étude est le même que celui utilisé pour l'étude de Beaulieu-Lefebvre (2011). Cet olfactomètre fonctionne par pression d'air envoyée par une bonbonne d'air comprimée dont le débit est régulé. Un ordinateur contrôle l'envoi de stimuli odorants pour un temps et un ordre prédéterminé. Le délai entre chaque stimulation est lui aussi prédéterminé et contrôlé par ordinateur. Trois solutions odorantes peuvent être insérées et le flux d'air y est dirigé par des valves contrôlées par ordinateur. En même temps, un second ordinateur synchronisé avec le premier présente les stimuli visuels sur un écran placé devant le sujet. Ainsi, le sujet recevait simultanément les odeurs, par des tubes téflons non-odorants installés sous le nez, et les images, sur l'écran devant lui. Le sujet répondait sur un boîtier comprenant 4 touches placées sous ses doigts.

Odeurs et images

Deux odeurs ont été utilisées pour cette expérience : huile de pomme, odeur essentiellement pure, (J. Crow's Marketplace, New Hampshire) et huile essentielle de pamplemousse, odeur activant

fortement le système trigéminé (Grand Monde des Huiles Essentielles, Montréal), diluées à 5% dans de l'huile minérale légère (Grand Monde des Huiles Essentielles, Montréal). Ces odeurs ont été choisies suite à un test pilote déterminant qu'elles avaient une hédonicité moyenne semblable et plutôt plaisante. Également, ces odeurs étaient les plus facilement et correctement identifiables. Les images congruentes associées à ces deux odeurs ont aussi été déterminées par un test pilote sur 11 sujets. La pomme jaune et le pamplemousse rose ont été choisis comme images car elles étaient le plus souvent identifiées comme étant congruentes avec leurs odeurs respectives (11 des 11 sujets les ont identifiées congruentes).

IRMf

Le signal BOLD enregistré par la technique d'IRMf est dépendant du niveau de désoxyhémoglobine dans le sang. Cette molécule varie en concentration selon le niveau d'activation des tissus, requérant plus d'oxygène plus ils sont recrutés. Cette mesure permet donc d'enregistrer indirectement la force d'activation d'une région cérébrale pendant une tâche. Par contre, cette mesure est une mesure relative entre un état de repos ou une

tâche contrôle et une tâche ciblée. Dans cette étude, trois tâches étaient ciblées : une tâche visuelle, une tâche olfactive, et une tâche de congruence visuelle et olfactive. Le contrôle était un état de repos durant lequel le sujet ne recevait aucune odeur, et regardait un écran blanc.

Procédure

Comportementale

Évaluation des habiletés olfactives des hommes par « *Sniffin' Sticks* »

Pour s'assurer de ne recruter aucun homme anosmique ou hyposmique pour l'IRMf, chaque individu sera soumis au test des « *Sniffin' Sticks* » pour déterminer si ses habiletés olfactives sont normales. Un score TDI (total) plus faible que 30/48 sera jugé comme étant hyposmique (Mackay Sim 2004) et sera refusé pour les tests, pour s'assurer de la normosmie des sujets. Ce test permettra non seulement d'exclure les sujets n'ayant pas un bon sens de l'odorat, mais aussi d'établir un score

moyen pour l'échantillon d'hommes de cette étude et de le comparer aux études précédentes utilisant ce même test psychophysique.

Le test des « *Sniffin' Sticks* » est divisé en trois tâches d'environ 10 minutes chacune, séparées par des pauses de 5 minutes pendant lesquelles le sujet avait une brève explication de la tâche suivante. Chaque tâche se fait avec des bâtons odorants présentés à 2 cm du nez du sujet pendant 2-3 secondes. Un délai de 20-30 secondes était donné après une réponse avant la prochaine stimulation.

La première tâche était une tâche de détection du butanol. Le sujet était d'abord familiarisé avec la plus haute concentration de butanol, et par la suite, trois bâtons lui ont été présentés – deux contenant seulement un solvant, et l'autre contenant une certaine concentration de butanol, dilué dans le même solvant. Le sujet devait identifier le bâton contenant du butanol. Ceci a été répété plusieurs fois, en augmentant la concentration de butanol à chaque mauvaise réponse, ou diminuant la concentration à chaque bonne réponse (considéré comme une bonne réponse pour le même triplet deux fois de suite), jusqu'à 7 changements de direction. La moyenne des 4 dernières concentrations ayant menées à un changement de direction devenait le seuil de détection du butanol de ce sujet. Ce score pouvait être entre 1 et 16.

Lors de la deuxième tâche, celle de discrimination, le sujet devait encore sentir des triplets, mais cette fois les trois bâtons étaient odorants. Deux de ces bâtons contenaient la même odeur, et un bâton contenait une odeur différente. Le sujet devait identifier le bâton contenant une odeur différente. Cette identification par le sujet a été répétée pour les 16 triplets présents et un point a été alloué pour chaque bonne réponse.

La tâche finale d'identification contenait 16 bâtons aillant chacun une odeur différente que devait identifier le sujet dans une liste de 4 choix donnés. Chaque bonne réponse allouait un point pour un total maximal de 16 points.

Le score TDI, ou le score total, a été calculé par la somme des points des trois tâches pour un total de 48 points.

Période d'adaptation pour le rafraîchissement psychologique

Une étude ultérieure avait déterminé qu'un délai de 30 secondes était suffisant pour s'assurer de l'absence de tout résidu olfactif (Beaulieu-Lefebvre 2011). Malgré cela, une étude récente de Gottfried (2010) démontre que chez les rongeurs, bien qu'une activation constante du bulbe olfactif soit

présente même 30 secondes après la stimulation, au niveau du cortex piriforme (région cérébrale où la perception odorante devient consciente), l'excitation est presque complètement nulle après seulement 10 secondes. Pour tenter de raccourcir le délai entre les stimulations, un test court a été créé, dans le but d'établir la vitesse d'adaptation aux stimuli olfactifs du groupe de sujets recrutés, et ainsi déterminer le temps d'attente idéal entre chaque stimulation. Selon les deux études citées, un temps d'attente entre 10 et 30 secondes devrait être mesuré.

Pour tester le temps d'adaptation aux odeurs, le sujet était installé devant l'olfactomètre alors que les deux odeurs (pomme et pamplemousse) lui étaient présentées de manière pseudo-aléatoire de sorte à ce que chaque odeur soit présentée 3-4 fois. Une cloche avertissait l'arrivée d'une odeur, et le sujet devait alors se concentrer sur l'odeur perçue, présentée durant 2 secondes, tout en respirant normalement. Lorsqu'il ne pouvait plus sentir l'odeur qu'il avait d'abord perçue, le sujet devait cliquer sur un bouton-réponse (sur un boîtier connecté à l'ordinateur). La stimulation suivante n'était présentée que 30 secondes suivant la fin de la première stimulation pour s'assurer qu'il n'y ait aucun résidu olfactif. Durant ces 30 secondes, un flux continu d'huile minérale légère était envoyé au nez du sujet pour favoriser

l'expulsion d'odeur. Une moyenne des trois ou quatre temps de réaction pour chaque odeur était calculée pour chaque individu. Une étude pilote menée sur 10 sujets donna une moyenne de temps d'adaptation d'environ 10 secondes pour les deux odeurs. C'est pour cette raison que pour toute étude subséquente, un délai de 15 secondes a été utilisé entre chaque stimulation. Ce test a été mené sur tous les sujets inclus dans l'étude pour s'assurer qu'ils répondaient eux aussi à l'intérieur de ces 15 secondes prédéterminées.

Entraînement IRMf

Lors de l'entraînement pour la tâche d'imagerie, le sujet était allongé sur un lit de camp devant lequel était installé un écran projetant les stimuli visuels. Les tubes téflon étaient tenus en place par le sujet à deux centimètres de son nez pendant toute l'expérience.

Les stimuli étaient présentés de manière pseudo-aléatoire de sorte à ce qu'à la fin du test, le sujet ait été exposé à 16 stimulations odorantes (8 stimulations de pomme, 8 stimulations de pamplemousse), 16 stimulations visuelles (8 fois l'image de pomme jaune, 8 fois l'image de pamplemousse rose), et 16 stimulations congruentes (8 fois odeur de pomme et image de pomme jaune, 8 fois odeur de pamplemousse et image de pamplemousse rose). Chaque stimulus durait 2 secondes et

était séparé du prochain stimulus par un délai de 15 secondes, durant lequel un flux continu d'huile minérale légère était présent (voir figure 3, p. xviii). Une seconde précédant chaque stimulation, une cloche avertissait le sujet de l'arrivée imminente du stimulus. Cette cloche annonciatrice était différente lorsqu'elle annonçait l'arrivée d'un stimulus visuel, pour éviter que le sujet ne cherche une odeur alors qu'il n'y en avait pas. Ceci était pour éviter des activations cérébrales causées par une respiration plus profonde ou plus saccadée, typique lorsqu'un individu recherche une odeur. Après chaque stimulation, le sujet devait attendre qu'une troisième cloche sonne avant de donner sa réponse. Cette cloche avait un délai variable entre 0 et 3 secondes suivant la fin du stimulus avant de sonner. Le sujet pouvait alors répondre, sur le boîtier-réponse, comme suit :

1. Stimulus odorant;
2. Stimulus visuel;
3. Stimulus congruent.

La réponse et le temps de réaction étaient enregistrés par ordinateur.

*IRMf*Tâche

Lors de l'expérience de neuro-imagerie, seulement 21 des sujets ont été rappelés. Chacun des sujets était d'abord soumis à un scan anatomique d'environ 10 minutes, puis devait reproduire exactement la même tâche qu'accomplie lors de l'entraînement au laboratoire, seulement avec un ordre pseudo-aléatoire différent. En plus, à la toute fin de la session, 30 secondes de repos ont été ajoutées, pendant lesquelles un écran blanc était présenté au sujet et qu'aucun flux d'air n'était envoyé (voir Figure 3, p. xviii).

L'écran était visible par le sujet grâce à un miroir au-dessus des yeux, et les tubes téflon étaient attachés à l'antenne de tête par un mécanisme de vis plastiques sur un embout permettant de placer les tubes directement sous le nez du sujet, à une distance de 2 cm. Le sujet répondait sur un boîtier comme celui de l'entraînement.

Paramètres d'acquisition

Les images ont été acquises par un scanner 3 Tesla (Siemens Magnetom Trio, Montréal, Canada) et une antenne de tête 32 canaux, à l'unité de neuro-imagerie fonctionnelle du Centre de Recherche de l'Institut de Gériatrie de Montréal. Avant toute acquisition fonctionnelle, une image par résonance magnétique pondérée en T1 a été obtenue avec les paramètres suivants : TR – 1,55s, TE – 3,04ms, TI – 800ms, FA – 9°, matrice 256 x 256, résolution spatiale de 1 mm³.

Les acquisitions fonctionnelles ont produites des images écho-planaires, écho-gradient, avec un contraste BOLD et une couverture complète du cerveau (45 tranches, épaisseur des tranches 3 mm), obtenues avec une orientation oblique de 30° au plan commissural, avec les paramètres suivants : TR – 2,95s, TE – 30ms, FA – 90°, matrice 64 x 64, temps de lecture total 38,4ms, champ de vision 192mm. 305 volumes ont été acquis durant la session de scan. Le mouvement de la tête a été restreint avec une courroie au niveau du front et du rembourrage confortable autour de la tête du participant. Le rythme cardiaque et la respiration étaient enregistrés durant les scans par un système BIOPAC et ont été retirés durant l'analyse.

Analyses statistiques

« Sniffin' Sticks »

Un score pour le seuil de détection de butanol, un score de discrimination et un score d'identification d'odeurs ont été enregistrés pour chaque sujet, sur un total de 16 points. Le score TDI a alors été calculé pour chaque sujet par l'addition de ces trois scores. 41 hommes ont été acceptés pour l'étude, ayant un score TDI au-dessus de 30/48, et cinq sujets ont été rejetés de l'étude suite à un score en dessous de 30.

Adaptation aux odeurs

Une moyenne des trois à quatre temps de réponse pour chaque individu a été calculée pour chaque odeur (pour tenir compte de leurs différences en termes d'activation du système trigéminé) pour obtenir son temps d'adaptation à chaque odeur.

Une moyenne générale a alors été obtenue avec SPSS Statistics 17.0 pour chaque odeur (pomme et pamplemousse) pour

déterminer le temps moyen d'adaptation pour les participants de cette étude.

Entraînement IRMf

La réponse de l'individu a été obtenue pour chaque stimulation, ainsi que son temps de réaction.

Une moyenne du temps de réaction pour chaque type de stimulation a été obtenue, pour les bonnes réponses seulement. Ces temps de réaction ont alors été comparés selon le fruit (pomme ou pamplemousse) et selon le type de stimulation – odeur, image, ou congruence, par ANOVA avec SPSS Statistics 17.0.

IRMf

Un modèle linéaire général sur une base voxel-par-voxel a été utilisé avec SPM8 pour déterminer les contrastes des sujets selon chaque condition – odeur seule, image seule ou intégration image-odeur – et ainsi déterminer les aires activées par chaque

stimulus. Toute mauvaise réponse du sujet était exclues de l'analyse. Les contrastes analysés sont :

1. Vision – repos;
2. Olfaction – repos;
3. Congruence – (Interaction Vision + Olfaction);

le repos étant les 30 secondes d'acquisition d'images à la toute fin de chacune des sessions pour chaque sujet.

Résultats

Comportement

« Sniffin' Sticks »

Détection

La moyenne du seuil de détection du butanol chez les hommes recrutés pour l'étude comportementale (N = 41) était de 8,64/16,00, et la moyenne pour les hommes recrutés pour l'IRMf (N = 21) était de 8,99/16,00, tous deux significativement plus élevés que le score normatif (Hummel, 1997) de 8,00/16,00 ($t = 2,283$, $p = 0,028$; $t = 2,57$, $p = 0,018$). Les deux scores de 8,64 et 8,99 n'étaient pas statistiquement différents l'un de l'autre ($t = -0,729$, $p = 0,469$). Ceci indique que nos sujets détectaient bien les odeurs, habileté cruciale pour notre étude.

Discrimination

Le score moyen de discrimination des hommes recrutés pour l'étude comportementale (N = 41) était de 12,91/16,00, et la moyenne pour les hommes recrutés pour l'IRMf (N = 21) était de 12,95/16,00, tous deux significativement plus élevés que le score normatif (Hummel, 1997) de 12,00/16,00 ($t = 3,36$, $p = 0,002$; $t = 2,37$, $p = 0,027$). Les deux scores de 12,91 et de 12,95 n'étaient pas statistiquement différents l'un de l'autre ($t = -0,100$, $p = 0,920$). Ceci indique que nos sujets discriminent bien entre différentes odeurs, une autre habileté vitale pour notre étude.

Identification

Le score moyen d'identification d'odeurs des hommes recrutés pour l'étude comportementale (N = 41) était de 12,84/16,00, et la moyenne pour les hommes recrutés pour l'IRMf (N = 21) était de 13,05/16,00, tous deux significativement plus bas que le score normatif (Hummel, 1997) de 14,00/16,00 ($t = -4,995$, $p = 0,000$; $t = -2,615$, $p = 0,016$). Les deux scores de 12,84 et 13,05 n'étaient pas statistiquement différents l'un de l'autre ($t = 0,538$, $p = -0,020$). Ceci indique que nos sujets étaient

légèrement moins habiles à l'identification d'odeurs. Malgré cela, lorsque l'odeur leur était révélée, tous étaient en mesure de la reconnaître et de différencier les deux odeurs présentées.

Score TDI total

Malgré ces différences au niveau des scores pour chaque tâche, aucune différence n'a été trouvée au niveau du score total tant chez les hommes recrutés pour l'étude comportementale (N = 41, score = 34,38/48,00) que chez les hommes recrutés pour l'IRMf (N = 21, score = 35,03/48) comparativement au score normatif (MacKay-Sim, 2004) de 34,00/48,00 ($t = 0,837$, $p = 0,408$; $t = 1,507$, $p = 0,147$). Les deux scores de 34,38 et 35,03 n'étaient pas statistiquement différents l'un de l'autre ($t = -0,806$, $p = 0,423$). Ceci indique que nos sujets étaient normosmique.

Adaptation aux odeurs

Le test d'adaptation aux odeurs pour les hommes recrutés pour l'étude comportementale (N = 41) donna en moyenne un temps d'adaptation de 4,05 secondes pour la pomme, et de 4,30

secondes pour le pamplemousse. La différence entre les deux odeurs n'était pas significativement différente ($t = -1,55$, $p = 0,129$). Ces temps d'adaptation étaient significativement plus bas que le score d'au moins 10 secondes établi par l'étude de Gottfried (2010) ($t = -14,107$ (pomme), $-14,015$ (pamplemousse); $p = 0,000$). La moyenne pour les hommes recrutés pour l'IRMf ($N = 21$) était de 3,82 secondes pour la pomme et 4,24 secondes pour le pamplemousse. Ces temps d'adaptation étaient également significativement plus bas que le score de 10 secondes établi par Gottfried (2010) ($t = -12,767$ (pomme), $-11,119$ (pamplemousse), $p = 0,000$). De plus, les deux temps d'adaptation pour la pomme et pour le pamplemousse étaient significativement différents l'un de l'autre ($t = -2,384$, $p = 0,027$). Le temps d'adaptation pour la pomme et le pamplemousse n'étaient pas statistiquement différents entre le groupe comportemental et le groupe de neuro-imagerie ($t = 0,341$ (pomme), $0,100$ (pamplemousse), $p = 0,734$ (pomme), $0,921$ (pamplemousse)). Ceci indique que nos sujets adaptaient aux odeurs présentées dans un laps de temps beaucoup plus court que le 15 secondes qui leur était donné.

Entraînement IRMf

Les sujets ont répondu de manière erronée, en moyenne, que 0,5 fois sur les 48 stimulations de l'entraînement. Pour toute bonne réponse des sujets, la comparaison des temps de réaction entre chaque condition (odeur seule, image seule, ou congruence), ne donne aucune différence significative ($p > 0,05$). Le temps de réaction moyen était de 0,79 secondes. Ceci indique qu'aucune des conditions ne facilitait ou ne ralentissait la prise de décision alors que le sujet devait indiquer sa réponse.

Durant le scan, les sujets ont répondu de manière erronée, en moyenne, que 0,7 fois sur les 48 stimulations. La comparaison des temps de réaction pour les bonnes réponses ne donna aucune différence significative lors des scans non plus ($p > 0,05$). Le temps de réaction moyen était ici de 0,87 secondes.

IRMf*Contraste vision - repos*

Le contraste vision – repos donne des activations dans le cuneus bilatéral, le cortex lingual (V2) droit, l'aire V3 bilatéral, le gyrus fusiforme bilatéral, l'insula gauche, le sulcus temporal supérieur bilatéral, le cortex somatosensoriel gauche, l'aire motrice supplémentaire gauche et le cortex pré-moteur gauche. (Voir tableau I, p. xx, et figure 4, p. xxvi).

Contraste olfaction - repos

Le contraste olfaction – repos donne des activations dans le thalamus médiodorsal bilatéral, l'amygdale droite, l'insula gauche, le sulcus temporal supérieur bilatéral, l'aire temporopolaire bilatérale, l'aire auditive primaire gauche, le cortex entorhinal antérieur gauche, le cortex somatosensoriel bilatéral, l'aire motrice supplémentaire gauche et le cortex pré-moteur gauche. (Voir tableau II, p. xxii, et figure 5, p. xxviii).

Contraste congruence – (interaction vision + olfaction)

Le contraste congruence – (interaction vision + olfaction) donne des activations dans les aires visuelles (V1 et V2 et V3) bilatérales, l'amygdale bilatéral, le cortex entorhinal antérieur gauche, le cortex somatosensoriel gauche et le cortex pré-moteur gauche. (Voir tableau III, p. xxiv, et figure 6, p. xxx).

Discussion

Résultats comportementaux

Nos résultats comportementaux ont démontré que les hommes recrutés pour cette étude ont de bonnes habiletés de détection et de discrimination, et sont normosmiques. De plus, ils adaptent aux odeurs dans un laps de temps en dessous des 15 secondes allouées. Ils n'ont démontré aucune différence comportementale au niveau des temps de réaction par condition.

« *Sniffin' Sticks* »

Seulement 5 sujets recrutés pour l'étude ont été refusés car ils ont obtenu un score TDI en-dessous de 30/48. Ceci représente 10,9% de l'échantillon de cette étude, une proportion plausible puisque 10% de la population est considérée non-normosmique lorsqu'on utilise un seuil de 30/48 (Mackay-Sim, 2004).

Les résultats du test des « *Sniffin' Sticks* » pour les sujets normosmiques ne suivent pas les scores normatifs de Hummel (1997). Nos sujets ont obtenu un score meilleur que le score

normatif pour la détection du butanol et la discrimination d'odeurs, mais ont performé moins bien que la norme pour l'identification. Malgré cela, le score TDI total de nos sujets n'était pas significativement différent du score normatif de Hummel (1997). Ceci indique donc que notre population d'hommes est effectivement normosmique, et ont de bonnes habiletés de détection et de discrimination d'odeurs. Ceci était impératif pour notre étude car la tâche dépendait et de la détection d'une odeur, et de sa discrimination (pomme ou pamplemousse).

Adaptation aux odeurs

Les moyennes de temps de réponse se retrouvent sensiblement en dessous des 10 secondes établies par Gottfried (2010), tant pour la pomme (4,05 secondes pour le groupe comportemental N = 41 et 3,82 secondes pour le groupe de neuro-imagerie N = 21) que pour le pamplemousse (4,30 secondes pour le groupe comportemental N = 41 et 4,24 secondes pour le groupe de neuro-imagerie N = 21). Ceci indique que le temps d'attente entre des stimuli olfactifs peut effectivement être réduit sans avoir d'impact significatif pour les sujets, car ceux-ci ne sentent

plus l'odeur après seulement 5 secondes suivant l'interruption du flux d'air odorant.

La différence entre les temps mesurés dans cette étude et celle de Gottfried (2010) peut être expliquée de deux façons : l'espèce utilisée et la méthode expérimentale. D'abord, l'étude de Gottfried (2010) mesurait ces latences chez des rats, qui ont un odorat plus développé que les humains, et donc détectent de plus petites concentrations d'odeurs (Slotnick, 1977). De plus, leur étude mesurait l'activité du bulbe olfactif directement par électrophysiologie, alors que notre étude utilisait une méthode psychophysique qui demandait une attention soutenue de la part du sujet et qui dépendait de sa perception consciente d'une odeur. Il se pourrait donc que l'activation du bulbe olfactif par une odeur dure plus longtemps chez le rat que l'humain étant donné sa supériorité en termes d'odorat. Il se pourrait également que l'individu ne sente plus l'odeur après 5 secondes seulement car les activations du bulbe olfactif ne se rendent plus dans les zones olfactives de plus haut niveau qui permettent à l'individu de devenir conscient de la présence d'une odeur.

En outre, aucune différence n'a été trouvée entre le temps d'adaptation à l'odeur de pomme et l'odeur de pamplemousse lors de l'étude comportementale. Bien qu'une différence ait été

trouvée pour les scores des hommes recrutés pour l'IRMf, l'échantillon comportemental plus grand représente plus vraisemblablement la réalité. Il semblerait donc que l'adaptation aux odeurs se fait dans un laps de temps similaire, peu importe le niveau d'activation du système trigéminé.

Ces résultats appuient conséquemment l'hypothèse selon laquelle le temps d'adaptation des stimuli olfactifs se fait plus vite que précédemment cru. Effectivement, les études antérieures utilisaient un temps d'attente plus long entre les stimuli. Par exemple, dans l'étude de Beaulieu-Lefebvre (2011), un délai de 30 secondes était présent entre chaque stimulus olfactif. Ce laps de temps énorme produisait des longueurs dans les temps de scan, sacrifiant ainsi la quantité de données pouvant être obtenues pour s'assurer de la qualité des activations. De plus, ces longueurs causaient des problèmes de somnolence chez certains sujets, qui éventuellement s'endormaient dans le scanner. Nous avons entrepris ce test pour démontrer que la pause entre chaque stimulation peut être réduite à 10-15 secondes sans négliger la qualité des données obtenues, et ainsi augmenter la quantité de données enregistrées, et diminuer l'ennui chez le sujet.

Entraînement IRMf

Seulement une étude a mesurée les effets d'une interaction odeur-vision (Gottfried, 2003) et a montré une facilitation de la détection d'odeur pour une condition congruente. Dans notre étude, aucune différence dans les temps de réaction n'a été observée entre les conditions, ni lors de l'étude comportementale, ni lors du scan. Ceci est probablement dû à la différence de tâche dans les deux études. Les sujets de Gottfried et al (2003) ne devaient répondre qu'à une simple tâche de détection d'odeur : une odeur est-elle présente ou non? Lorsqu'une image congruente à l'odeur était présentée, le sujet semblait détecter l'odeur plus rapidement. Dans notre étude, le sujet faisait face à une tâche plus complexe : le stimulus est-il visuel, olfactif, ou congruent? La complexité de la tâche a peut-être réduit la possibilité d'une facilitation.

IRMf

Nos résultats de neuro-imagerie ont démontré que la condition visuelle activait les zones visuelles, la condition olfactive les zones olfactives, et que

de manière très intéressante, la condition congruente créait une potentialisation des zones visuelles et olfactives.

Contraste vision - repos

Le contraste vision – repos donna des activations dans toutes les aires visuelles, appuyant l'hypothèse de départ. Une activation bilatérale évidente est observée dans la voie visuelle ventrale (V1, V2, V3, et gyrus fusiforme). Ces régions sont tous associées à la perception, l'identification et la mémorisation d'objets. L'activation de ces aires démontre que les sujets détectaient et examinaient les images, percevaient les couleurs, formes et motifs, et ainsi identifiaient l'image présentée (Livingstone, 1988). D'un autre côté, des activations fortes ont été mesurées dans l'aire motrice supplémentaire gauche et le cortex pré-moteur gauche, ainsi que dans l'aire somatosensorielle gauche. L'activation de l'aire motrice supplémentaire est importante pour l'initiation d'un mouvement, donc nos sujets activaient probablement cette aire cérébrale en anticipation de la réponse motrice qu'ils allaient donner suite à la stimulation. L'activation du cortex pré-moteur représente probablement le mouvement de la main ou des doigts du sujet pour atteindre le

bouton de la réponse à donner (Freund, 1984). Le cortex somatosensoriel est important pour la perception tactile, incluant les sensations tactiles au niveau de la peau du visage, causées par un flux d'air (Nguyen, 2004). Ces activations pourraient donc être causées par le flux d'air (inodore) envoyé au sujet constamment tout au long de la session de scan. Une activation au niveau du sulcus temporal supérieur bilatéral est observée et peut être expliquée par les stimuli auditifs avant et après chaque stimulation (Howard, 2000). L'activation de l'insula gauche est captivante car elle est aussi présente dans le contraste (olfaction – repos). Il est aussi intéressant de noter que l'activation par l'olfaction se retrouve beaucoup plus antérieurement dans l'insula que celle causée par la vision. L'insula antérieure joue un rôle dans les fonctions olfactives et gustatives, ainsi que pour l'apprentissage et la mémoire. L'insula postérieure quant à elle reçoit des afférences visuelles, auditives, et somesthétiques. Cette région est souvent citée comme une zone potentiellement multi-modale (Flynn, 1999).

Contraste olfaction - repos

Le contraste olfaction – repos donna des activations dans les aires reliées à l'olfaction, telles que l'insula gauche, l'amygdale droite, et le cortex entorhinal antérieur. L'insula et l'amygdale sont des aires cérébrales fortement liées aux émotions. L'olfaction jouant un grand rôle au niveau des émotions, et ayant de nombreuses connexions au système limbique, il n'est pas étonnant de voir de telles activations. De plus, ce sont des régions généralement activées par des stimuli comestibles (Small 2005, cité dans Gottfried 2005). Le cortex entorhinal antérieur est une région souvent associée à l'olfaction, et jouant également un rôle au niveau de la mémoire associative (Klingberg, 1994). Il se peut que les sujets aient développé une association entre les odeurs et un souvenir ou une image durant l'entraînement, pour les aider à mémoriser l'odeur et son identification, développant ainsi une stratégie pour les aider à répondre à la question. Par contre, aucun signal BOLD n'a été mesuré dans le cortex olfactif primaire, ni le cortex orbitofrontal. Ceci pourrait avoir été causé par une odeur ambiante dans le scan ayant activé ces régions même durant la condition de repos, éliminant ainsi toute région olfactive primaire lors du contraste. Ou il se pourrait tout simplement que les odeurs aient été de trop faible concentration

pour trouver des activations avec les paramètres d'analyse. D'une autre part, malgré le manque d'activation du cortex orbitofrontal, une activation du thalamus médiodorsal bilatéral a été mesurée. L'activation de cette région cérébrale est en accord avec une étude précédente (Beaulieu-Lefebvre, 2011) et semble importante pour le relai de l'information du cortex piriforme au cortex orbitofrontal lors de la modulation d'attention pour un stimulus olfactif (Plailly, 2008). Cette activation confirme donc l'attention portée aux stimuli olfactifs par les sujets. Cette région est aussi généralement activée par des stimuli comestibles (Small 2005, cité dans Gottfried 2005). Une activation dans l'aire auditive primaire est également présente, prévisible étant donné les cloches utilisées. Encore une fois, de fortes activations sont présentes dans l'aire motrice supplémentaire gauche, le cortex pré-moteur gauche et le cortex somatosensoriel bilatéral, causées par la réponse motrice du sujet et le flux d'air (odorant cette fois).

La voie visuelle ventrale – une aire d'intégration?

Le contraste congruence – (interaction vision + olfaction) résulte en une potentialisation évidente des activations visuelles et

olfactives mesurée dans les aires visuelles (V1, V2, V3) bilatérales, et dans les aires olfactives - l'amygdale, et le cortex entorhinal antérieur. Cet effet facilitateur appuie les études de Zellner (1990) et de Seigneuric (2010). L'étude de Zellner démontre une potentialisation de l'intensité d'une odeur lorsque couplée avec un stimulus visuel – dans ce cas, alors que le liquide odorant est coloré - et que cette potentialisation est encore plus prononcée lorsque la couleur est congruente avec l'odeur perçue. L'intégration de la vision et de l'olfaction augmente donc l'activité des zones olfactives reliées aux émotions et à la mémoire, et peut ainsi modifier l'aspect comportemental de l'individu face à cette odeur. L'étude de Seigneuric, quant à elle, démontre l'effet potentialisateur de l'olfaction sur la vision. Dans son étude, un objet odorant est observé moins longtemps lorsque présenté avec une odeur congruente que lorsqu'aucune odeur n'est présente. Les résultats de cette étude, montrant une activation rehaussée des aires cérébrales visuelles lorsqu'en présence d'une odeur congruente, appuient ce résultat comportemental. La présence d'une odeur congruente à l'image observée semblerait donc potentialiser l'activation visuelle et ainsi accélérer l'identification de cet objet. D'un tout autre point de vue, il est intéressant qu'un signal BOLD ait été trouvé dans le gyrus supramarginal gauche,

région reconnue comme faisant partie de l'aire de Wernicke. Cette activation dans la condition congruente seulement représente peut-être une réponse aux stimuli auditifs, bien que cela soit peu probable étant donné son absence dans les autres conditions. Plus vraisemblablement, il se pourrait que cette zone représente l'intégration de l'information visuelle et auditive de manière sémantique, recrutant donc cette aire nécessaire au décodage du langage. Une activation a aussi été trouvée dans le cortex pré-moteur gauche, représentant peut-être une facilitation du choix de réponse lorsque la condition congruente était présentée.

Conclusion

Les résultats de cette étude confirment l'utilisation de la voie visuelle ventrale lors de l'examen et l'identification d'images. Ils accréditent de plus l'activation des zones reliées aux émotions (l'insula et l'amygdale) dans la détection de stimuli olfactifs, ainsi que l'activation du cortex entorhinal et du thalamus médiodorsal. De plus grande importance, cette étude établit la potentialisation des zones visuelles et olfactives lors de l'intégration des deux modalités sensorielles alors qu'un individu fait face à un stimulus présentant une odeur et une image congruentes.

Perspectives Futures

Notre étude établit une potentialisation de la vision par l'olfaction et vice-versa. Il y a donc interaction des sens lors de la perception. Évidemment, lorsque nous interagissons avec l'environnement, nous percevons plusieurs stimuli par plusieurs de nos sens. Notre vie de tous les jours, par

conséquence, est une interaction et une intégration de l'information acquise perpétuelle.

Ce processus et ces implications au niveau du comportement sont une cible extrêmement intéressante au niveau marketing. Quel effet a donc des stimuli congruents contrairement à des stimuli incongrus? Par exemple, un restaurant italien qui sent la pizza et joue de la musique italienne devrait être très attirant selon nos résultats car l'interaction de la vision et de l'olfaction augmenterait leur perception, et peut-être même que la musique rehausserait l'expérience sensorielle encore plus. Par contre, un restaurant de pizza sentant le chou et jouant de la musique rock serait-il aussi attrayant? Quel effet cette incongruité des perceptions sensorielles aurait-elle au niveau cérébral et au niveau comportemental? Nous avons donc établi un protocole avec notre système olfactif et visuel nous permettant d'observer l'interaction de nos odeurs et de nos images lorsque couplées de manière congruente, incongrue et légèrement incongrue (l'odeur et l'image ne sont pas exactement les mêmes mais se ressemblent, par exemple : une odeur de pomme avec une image de pomme-poire). Il sera intéressant de déterminer les différences au niveau cérébral entre ces conditions, ainsi que les différences comportementales (établies grâce à des questionnaires). Les résultats de cette étude pourraient représenter un gros développement au niveau marketing.

D'un autre côté, cette étude est un début vers une meilleure connaissance des modalités sensorielles et de l'intégration de stimuli multi-sensoriels. La vaste majorité d'études n'utilisent que des stimuli simples, alors que cela ne représente pas la réalité de la perception humaine de tous les jours. C'est pourquoi de plus en plus d'études tentent d'étudier la congruité entre des stimuli de modalités différentes. L'impact d'une modalité sur une autre peut servir à expliquer plusieurs comportements et peut-être même expliquer certaines interactions dans plusieurs maladies neurologiques ou psychiatriques. Cet impact peut aussi être un début pour mieux comprendre certaines conditions telles que la synesthésie, la mémoire photogénique ou encore la coordination athlétique. Mais surtout, une potentialisation des modalités par une intégration sensorielle pourrait être une cible attrayante pour des méthodes de réadaptation chez des personnes dont un sens a été affaibli ou endommagé, ou encore chez des clientèles cliniques comme les aveugles congénitaux ou les individus anosmiques. L'olfaction n'était généralement pas aussi centrale lors de la perception, un outil se servant de cette modalité sensorielle serait beaucoup moins encombrant et limitant, tout en permettant d'aider ces populations cliniques possiblement au niveau de la navigation, de la mémoire, de la reconnaissance et même au niveau des interactions sociales.

Finalement, intégrer plus que deux sens dans une étude présente un grand défi, mais qui permettrait d'approcher de plus en plus la réalité de la

perception sensorielle. Kassuba et al (2011) a réussi à créer un protocole utilisant trois modalités sensorielles – la vision, l’audition et le toucher. Grâce à notre olfactomètre, il est possible de présenter des odeurs et des images en même temps. Un nouvel appareil a été construit pour présenter des goûts. Il serait possible dans une étude future donc d’allier images, odeurs et sons, ou bien goûts, sons, textures, etc.

Références

1. Beaulieu-Lefebvre M, Schneider FC, Kupers R & Ptito M (2011). Odor perception and odor awareness in congenital blindness. *Brain Research Bulletin* **84**, p. 206-209.
2. Bolognini N, Rasi F & Làdavas E (2005). Visual localization of sounds. *Neuropsychologia* **43**, p. 1655- 1661.
3. Brand G (1999). La lateralisation olfactive chez l'homme – Revue de la littérature. *Neurophysiol Clin* **29**, p. 495-506.
4. Brand G, Millot JL & Henquell D (2001). Complexity of olfactory lateralization processes revealed by functional imaging: a review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* **25**, p. 159-166.
5. Brookes JC (2010). Science is perception: what can our sense of smell tell us about ourselves and the world around us? *Phil. Trans. R. Soc. A* **368**, p. 3491-3502.
6. Christensen CM (1983). Effects of Color on Aroma, Flavor and Texture Judgments of Foods. *Journal of Food Science* **48**, p. 787-790.
7. Courtney SM & Ungerleider LG (1997). What fMRI has taught us about human vision. *Current Opinion in Neurobiology* **7**, p. 554-561.
8. Doty RL (2001). Olfaction. *Annu. Rev. Psychol.* **52**: p. 423-452.

9. Eskenazi B, Cain WS, Novelly RA & Friend KB (1983). Olfactory functioning in temporal lobectomy patients. *Neuropsychologia* **21**(4), p. 365-374.
10. Flynn FG (1999). Anatomy of the insula functional and clinical correlates. *Aphasiology* **13**(1), p. 55-78.
11. Frasnelli J, Charbonneau G, Collignon O & Lepore F (2009). Odor Localization and Sniffing. *Chem. Senses* **34**, p. 139-144.
12. Freund HJ (1984). Premotor areas in man. *Trends in Neurosciences* **7**(12), p. 481-483.
13. Galton F (1883). Inquiries into human faculty and its development. *Online Galton Archives*, <http://galton.org/>, consulté le 10 juillet 2011.
14. Gori M, Mazzilli G, Sandini G & Burr D (2011). Cross-sensory facilitation reveals neural interactions between visual and tactile motion in humans. *Frontiers in Psychology* **2**, p. 1-9.
15. Gottfried JA & Dolan RJ (2003). The Nose Smells What the Eye Sees: Crossmodal Visual Facilitation of Human Olfactory Perception. *Neuron* **39**, p. 375-386.
16. Gottfried JA (2005). A Truffle in the Mouth Is Worth Two in the Bush: Odor Localization in the Human Brain. *Neuron* **47**(4), p. 473-476.
17. Gottfried JA (2010). Central mechanisms of odour object perception. *Nature Reviews Neuroscience* **11**, p. 628-641.
18. Gulyás B & Roland PE (1994). Processing and Analysis of Form, Colour and Binocular Disparity in the Human Brain: Functional

- Anatomy by Positron Emission Tomography. *European Journal of Neuroscience* **6**, p. 1811-1828.
19. Howard MA, Volkov IO, Mirsky R, Garell PC, Noh MD, Granner M, Damasio H, Steinschneider M, Reale RA, Hind JE & Brugge JF (2000). Auditory Cortex on the Human Posterior Superior Temporal Gyrus. *The Journal of Comparative Neurology* **416**, p. 79-92.
20. Hummel T, Futschik T, Frasnelli J & Hüttenbrink KB (2003). Effects of olfactory function, age, and gender on trigeminally mediated sensations: a study based on the lateralization of chemosensory stimuli. *Toxicology Letters* **140-141**, p. 273-280.
21. Hummel T, Sekinger B, Wolf SR, Pauli E & Kobal G (1997). 'Sniffin' Sticks': Olfactory Performance Assessed by the Combined Testing of Odor Identification, Odor Discrimination and Olfactory Threshold. *Chem Senses* **22**, p. 39-52.
22. James W (1890). Discrimination and Comparison. In *The Principles of Psychology*, <http://psychclassics.yorku.ca/James/Principles/prin13.htm>, consulté le 10 juillet 2011.
23. Kassuba T, Klinge C, Hölig C, Menz MM, Ptito M, Röder B & Siebner HR (2011). The left fusiform gyrus hosts trisensory representations of manipulable objects. *NeuroImage* **56**, p. 1566-1577.
24. Kleemann AM, Albrecht J, Schöpf V, Haegler K, Kopietz R, Hempel JM, Linn J, Flanagin VL, Fesl G & Wiesmann M (2009). Trigeminal

- perception is necessary to localize odors. *Physiology & Behavior* **97**, p. 401-405.
25. Klingberg T, Roland PE & Kawashima R (1994). The human entorhinal cortex participates in associative memory. *NeuroReport* **6**, p. 57-60.
26. Kobal G, van Toller S & Hummel T (1989). Is there directional smelling? *Experientia* **45**, p. 130-132.
27. Konkle T, Wang Q, Hayward V & Moore CI (2009). Motion Aftereffects Transfer between Touch and Vision. *Current Biology* **19**, p. 745-750.
28. Kupers R, Beaulieu-Lefebvre M, Schneider FC, Kassuba T, Paulson OB, Siebner HR & Ptito M (2011). Neural correlates of olfactory processing in congenital blindness. *Neuropsychologia* **49**(7), p. 2037-2044.
29. Leffingwell JC (1999). Olfaction. *Leffingwell & Associates website* <http://www.leffingwell.com/olfaction.htm>, consulté le 10 juillet 2011.
30. Livingstone M & Hubel D (1988). Segregation of Form, Color, Movement, and Depth: Anatomy, Physiology, and Perception. *Science* **240**, p. 740-749.
31. Mackay-Sim A, Grant L, Owen C, Chant D & Silburn P (2004). Australian norms for a quantitative olfactory function test. *Journal of Clinical Neuroscience* **11**(8), p. 874-879.

32. Maren S (2000). Long-term potentiation in the amygdala: a mechanism for emotional learning and memory. *Trends in Neurosciences* **22**(12), p. 561-567.
33. Meyer GF & Wuerger SM (2001). Cross-modal integration of auditory and visual motion signals. *NeuroReport* **12**(11), p. 2557-2560.
34. Nagata Y & Takeuchi N (1990). Measurement of Odor Threshold by Triangle Odor Bag Method. *Bull Jpn Environ Sanit Center* **17**, p. 77-89.
35. Nakashita S, Saito DN, Kochiyama T, Honda M, Tanabe HC & Sadato N (2008). Tactile-visual integration in the posterior parietal cortex: A functional magnetic resonance imaging study. *Brain Research Bulletin* **75**, p. 513-525.
36. Nguyen BT, Tran TD, Hoshiyama M, Inui K & Kakigi R (2004). Face representation in the human primary somatosensory cortex. *Neuroscience Research* **50**, p. 227-232.
37. Plailly J, Howard JD, Gitelman DR & Gottfried JA (2008). Attention to Odor Modulates Thalamocortical Connectivity in the Human Brain. *The Journal of Neuroscience* **28**(20), p. 5257-5267.
38. Roorda A & Williams DR (1999). The arrangement of the three cone classes in the living human eye. *Letters to Nature* **397**, p. 520-522.
39. Rosenbluth R, Grossman ES & Kaitz M (2000). Performance of early-blind and sighted children on olfactory tasks. *Perception* **29**, p. 101-110.

40. Schneider RA & Schmidt CE (1967). Dependency of Olfactory Localization on Non-olfactory Cues. *Physiology and Behavior* **2**, p. 305-309.
41. Schutte W & Zubeck JP (1967). Changes in olfactory and gustatory sensitivity after prolonged visual deprivation. *Canad. J. Psychol./Rev. Canad. Psychol.* **21**(4), p. 337-345.
42. Seigneuric A, Durand K, Jiang T, Baudouin JY & Schaal B (2010). The nose tells it to the eyes: Crossmodal associations between olfaction and vision. *Perception* **39**, p. 1541-1554.
43. Sela L & Sobel N (2010). Human olfaction: a constant state of change-blindness. *Exp Brain Res* **205**(1), p. 13-29.
44. Seo HS, Arshamian A, Schemmer K, Scheer I, Sander T, Ritter G & Hummel T (2010). Cross-modal integration between odors and abstract symbols. *Neuroscience Letters* **478**, p. 175-178.
45. Seo HS & Hummel T (2010). Auditory-Olfactory Integration: Congruent or Pleasant Sounds Amplify Odour Pleasantness. *Chem. Senses* **36**(3), p. 301-309.
46. Shepherd GM (2004). The Human Sense of Smell: Are We Better Than We Think? *PLoS Biology* **2**(5), p. 0572-0575.
47. Shipley MT & Ennis M (1996). Functional Organization of Olfactory System. *Journal of Neurobiology* **30**(1): p. 123-176.

48. Slotnick BM & Ptak JE (1977). Olfactory Intensity-Difference Thresholds in Rats and Humans. *Physiology & Behavior* **19**, p. 795-802.
49. Smith RS, Doty RL, Burlingame GK & McKeown DA (1993). Smell and taste function in the visually impaired. *Perception & Psychophysics* **54**(5), p. 649-655.
50. Staufenbiel SM, van der Lubbe RHJ & Talsma D (2011). Spatially uninformative sounds increase sensitivity for visual motion change. *Exp Brain Res* **213**(4), p. 457-464.
51. Swanson LW & Petrovich GD (1999). What is the amygdala? *Trends in Neurosciences* **21**(8), p. 323-331.
52. Thuerauf N, Reulbach U, Lunkenheimer J, Lunkenheimer B, Spannenberger R, Gossler A, Maihöfner C, Bleich S, Kornhuber J & Markovic K (2009). Emotional reactivity to odors: Olfactory sensitivity and the span of emotional evaluation separate the genders. *Neuroscience Letters* **456**, p. 74-79.
53. Tubaldi F, Turella L, Pierno AC, Grodd W, Tirindelli R & Umberto C (2010). Smelling odors, understanding actions. *Social Neuroscience iFirst*, p. 1-17.
54. Valyear KF, Culham JC, Sharif N, Westwood D & Goodale MA (2006). A double dissociation between sensitivity to changes in object identity and object orientation in the ventral and dorsal visual streams: A human fMRI study. *Neuropsychologia* **44**, p. 218-228.

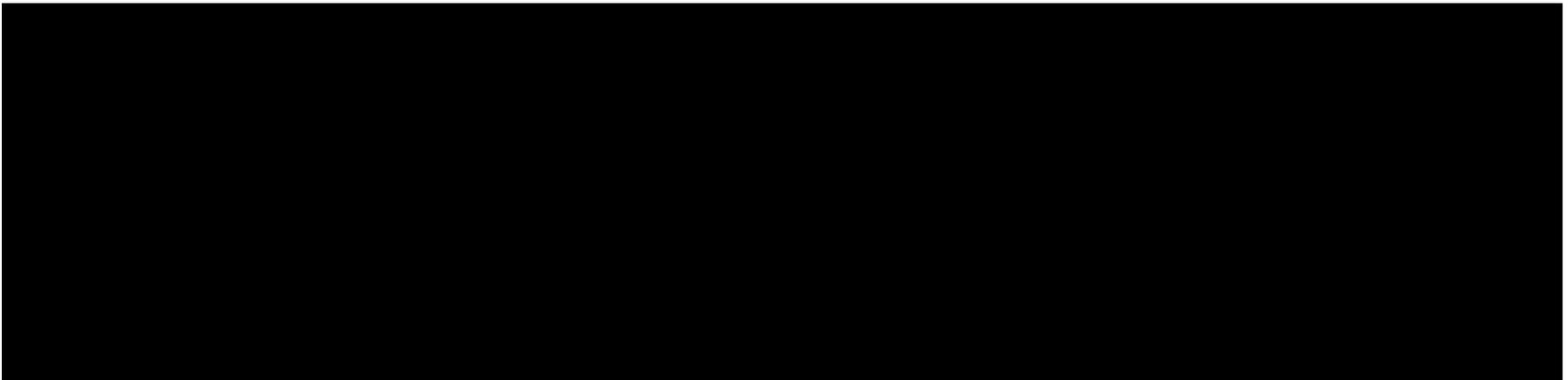
- 55.von Békésy G (1964). Olfactory analogue to directional hearing. *J. Appl. Physiol.* **19**(3), p. 369-373.
- 56.Wald G (1945). Human Vision and the Spectrum. *Science* **101**(2635), p. 653-658.
- 57.Witten IB & Knudsen EI (2005). Why Seeing is Believing: Merging Auditory and Visual Worlds. *Neuron* **48**, p. 489-496.
- 58.Zeki S, Watson JDG, Lueck CJ, Friston KJ, Kennard C & Frackowiak RSJ (1991). A Direct Demonstration of Functional Specialization in Human Visual Cortex. *The Journal of Neuroscience* **11**(3), p. 641-649.
- 59.Zellner DA & Kautz MA (1990). Color Affects Perceived Odor Intensity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **16**(2), p. 391-397.

Appendices

Figure 1. Organisation du système visuel (Livingstone, 1988)

(Voir prochaine page)

Figure 2. Organisation du système olfactif (Brand, 1999)



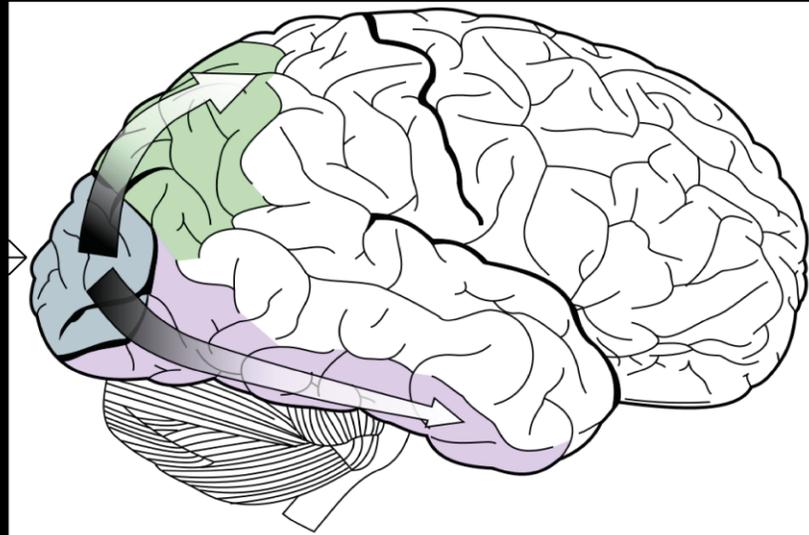
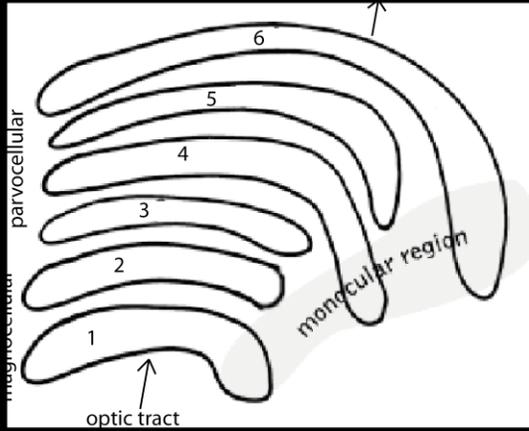
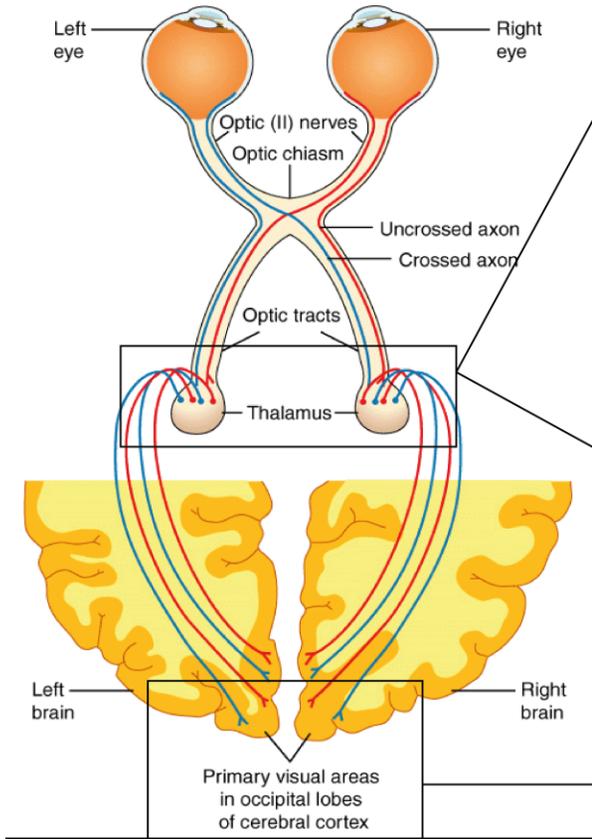


Figure 3. Protocole expérimental pour l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

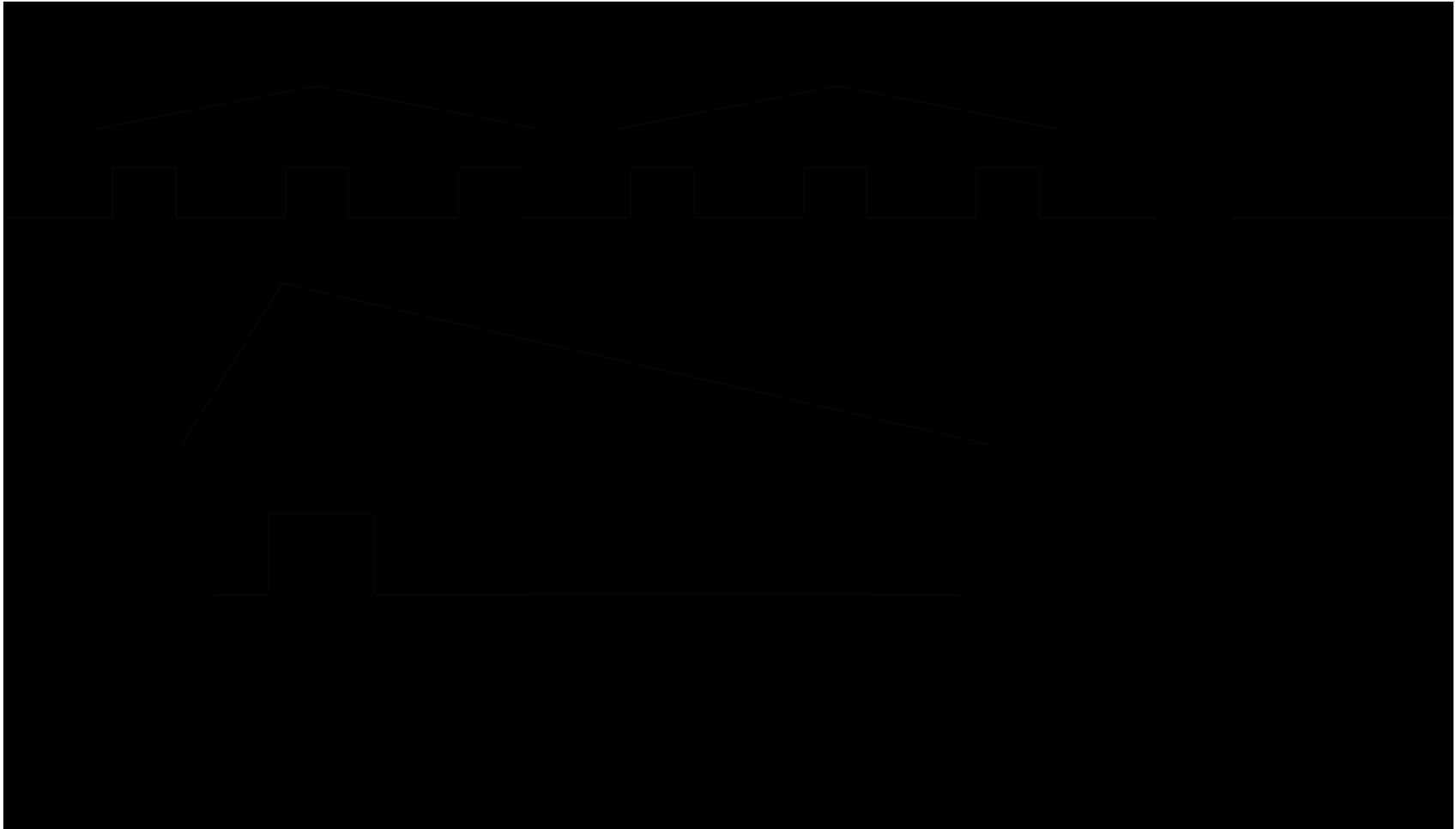


Tableau I. Coordonnées Talairach du contraste vision - repos

| Contraste vision – repos | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|---|----|-----------------------|------|-----|----------|
| Région cérébrale | Aire activée | | BA | Coordonnées Talairach | | | Valeur T |
| | | | | X | Y | Z | |
| <i>Cortex occipital</i> | Cuneus (V1) | D | 17 | 16 | -98 | 8 | 6,85 |
| | | G | 17 | -12 | -100 | 6 | 7,77 |
| | Cortex lingual (V2) | D | 18 | 24 | -76 | -8 | 6,32 |
| | Gyrus occipital inférieur (V3) | D | 19 | 40 | -76 | -4 | 8,68 |
| | | G | 19 | -42 | -70 | -4 | 7,08 |
| | | G | 19 | -30 | -80 | -12 | 6,32 |
| <i>Cortex temporal</i> | Gyrus fusiforme | G | 37 | -34 | -52 | -12 | 9,68 |
| | | D | 37 | 36 | -52 | -12 | 8,76 |
| | Insula | G | 13 | -54 | -38 | 23 | 5,78 |

| | | | | | | | |
|------------------------|---------------------------------------|---|----|-----|-----|----|------|
| | | D | 22 | 60 | -8 | 0 | 6,70 |
| | Sulcus temporal supérieur | D | 22 | 62 | -38 | 14 | 8,30 |
| | | G | 22 | -54 | -12 | 4 | 5,86 |
| <i>Cortex pariétal</i> | Gyrus post-central (S1) | G | 2 | -58 | -18 | 22 | 6,47 |
| <i>Cortex frontal</i> | Aire motrice supplémentaire | G | 6 | -2 | 0 | 52 | 11,5 |
| | Gyrus pré-central (Cortex pré-moteur) | G | 6 | -40 | -16 | 60 | 9,29 |

Tableau II. Coordonnées Talairach du contraste olfaction - repos

| Contraste olfaction – repos | | | | | | | |
|------------------------------------|--|---|-----------|------------------------------|----------|----------|-----------------|
| Région cérébrale | Aire activée | | BA | Coordonnées Talairach | | | Valeur T |
| | | | | X | Y | Z | |
| <i>Cortex temporal</i> | Sulcus temporal supérieur | D | 22 | 58 | -8 | 6 | 9,78 |
| | | D | 22 | 56 | -38 | 12 | 6,18 |
| | | G | 22 | -62 | -26 | 10 | 6,73 |
| | Aire temporopolaire | D | 38 | 38 | 4 | -10 | 6,45 |
| | | G | 38 | -36 | 0 | -10 | 6,39 |
| | Gyrus temporal transversal postérieur (A1) | G | 42 | -58 | -12 | 8 | 8,02 |
| | Cortex entorhinal antérieur | G | 34 | -26 | 2 | -16 | 6,52 |
| | Insula | G | 13 | -38 | -6 | 4 | 7,34 |
| | Amygdale | D | | 19 | -2 | -20 | 5,71 |

| | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|---|---|-----|-----|----|-------|
| <i>Cortex pariétal</i> | Gyrus post-central (S1) | D | 2 | 62 | -20 | 28 | 6,05 |
| | | G | 2 | -60 | -20 | 24 | 7,00 |
| <i>Cortex frontal</i> | Aire motrice supplémentaire | G | 6 | -4 | 2 | 50 | 10,26 |
| | Cortex pré-moteur/Gyrus pré-central | G | 6 | -36 | -16 | 64 | 10,33 |
| <i>Cortex sous-lobaire</i> | Thalamus médiodorsal | D | | 10 | -18 | 6 | 6,73 |
| | | G | | -8 | -18 | 6 | 6,52 |

Tableau III. Coordonnées Talairach du contraste congruence – (interaction vision + olfaction)

| Contraste congruence – (interaction vision + olfaction) | | | | | | | |
|--|--------------------------------|-----------|------------------------------|----------|----------|-----------------|------|
| Région cérébrale | Aire activée | BA | Coordonnées Talairach | | | Valeur T | |
| | | | X | Y | Z | | |
| <i>Cortex occipital</i> | Cuneus (V1) | G | 17 | -6 | -88 | -6 | 6,67 |
| | | G | 17 | -14 | -100 | 6 | 6,61 |
| | | D | 17 | 14 | -100 | 2 | 5,39 |
| | Cortex lingual (V2) | D | 18 | 8 | -80 | -2 | 6,67 |
| | Gyrus occipital inférieur (V3) | D | 19 | 42 | -78 | -6 | 8,99 |
| | | G | 19 | -44 | -78 | -4 | 7,95 |
| <i>Cortex temporal</i> | Amygdale | D | | 22 | -2 | -16 | 3,53 |
| | | G | | -26 | 0 | -20 | 4,23 |
| | Cortex entorhinal antérieur | D | 34 | 12 | -2 | -22 | 3,82 |

| | | | | | | | |
|------------------------|-------------------------|---|---|-----|-----|----|------|
| <i>Cortex pariétal</i> | Gyrus post-central (S1) | G | 2 | -58 | -18 | 18 | 3,65 |
| <i>Cortex frontal</i> | Cortex pré-moteur | G | 6 | -38 | -20 | 68 | 3,94 |

Figure 4. Contrast vision – repos

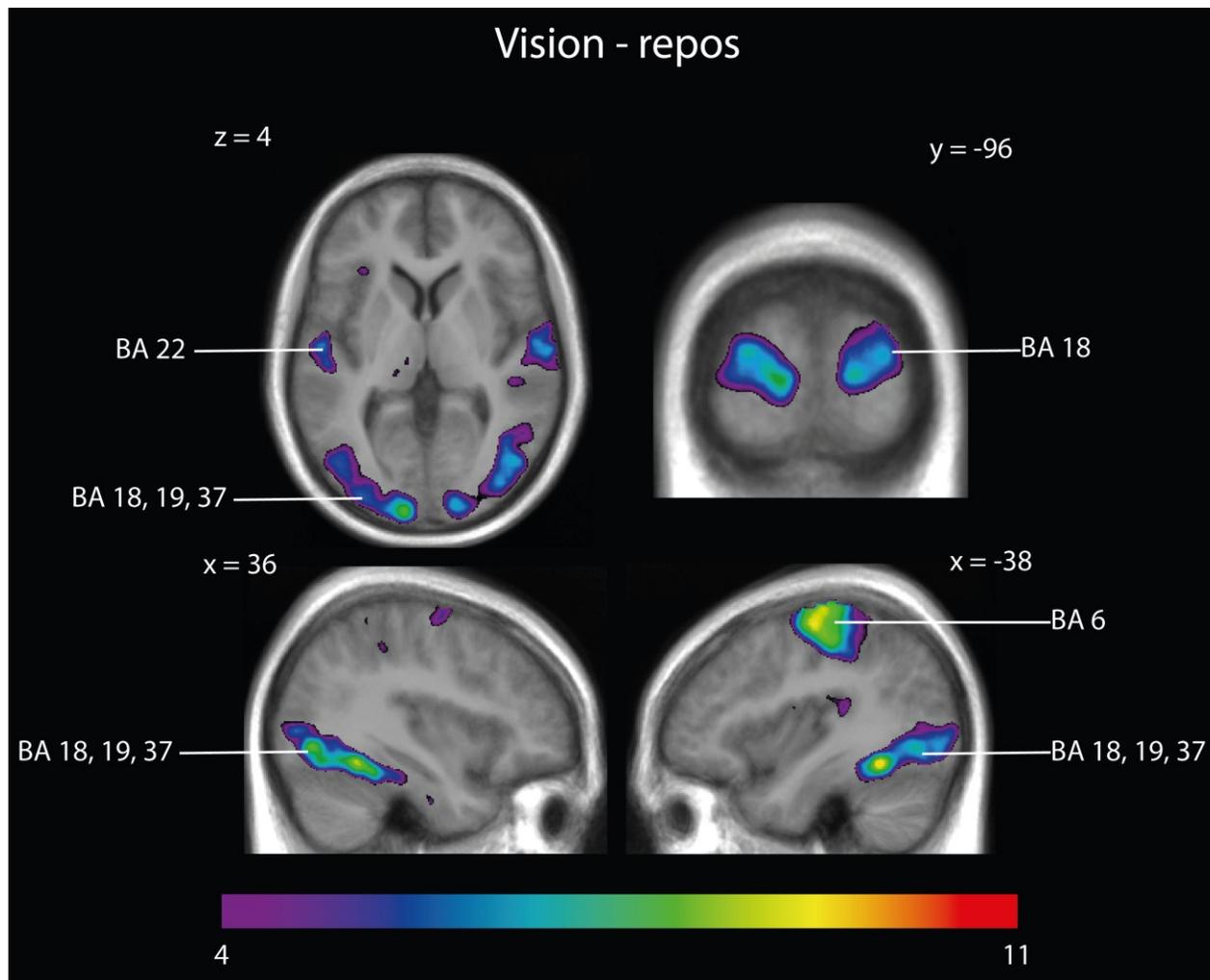


Figure 5. Contrast olfaction – repos

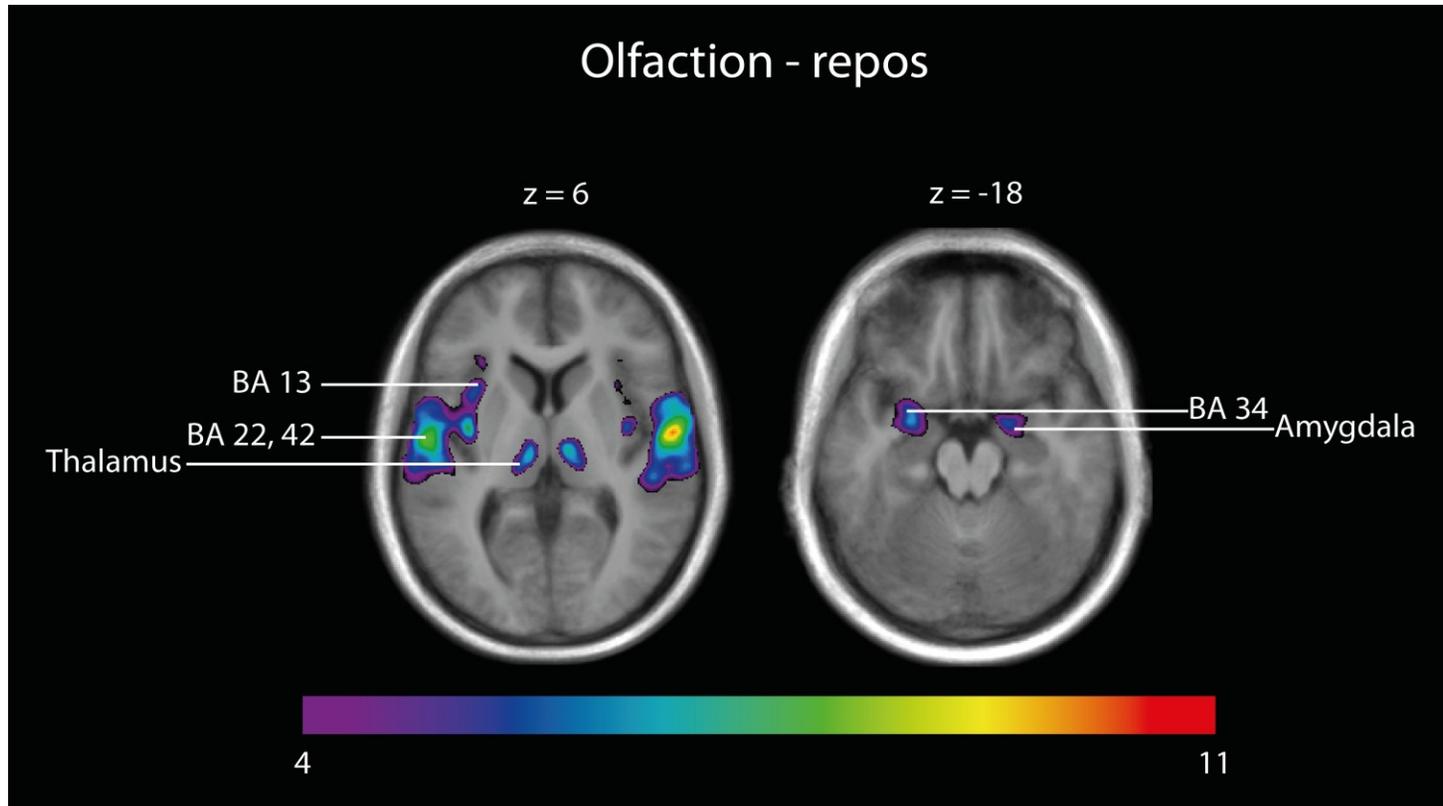


Figure 6. Contrast congruence – (interaction vision + olfaction)

