

THESE Présentée devant L'Université Lumière LYON 2  
Pour l'obtention du DIPLOME DE DOCTORAT  
de SCIENCES COGNITIVES mention NEUROSCIENCES (arrêté du 30 mars 1992)  
Soutenue le 07 Juin 2005  
Par  
**Samy BARKAT**

***La qualité perçue des mélanges Odorants :  
Analyses Psychophysiologicalues***

Directeur de Thèse : Dr. Gilles SICARD

JURY Professeur Olivier Koenig (Université Lyon II) : Président du Jury Docteur Nathalie  
Martin (INRA – NESTLE) : Rapporteur Docteur Gilles De Revel (Université Bordeaux II) : Rapporteur  
Professeur Tyler S. Lorig (Wash. & Lee University, Lexington, VA, USA) Docteur Gilles  
Sicard (CESG) : Directeur de thèse Docteur Thierry Thomas-Danguin (INRA)



# Table des matières

Remerciements . .	1
RESUME .	3
SUMMARY . .	5
Epigraphe .	7
INTRODUCTION GENERALE . .	9
Présentation de nos travaux .	10
<b>Chapitre 1. Caractérisation des odeurs et catégorisation .</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction et cadre théorique .	13
Problématique de nos travaux . .	15
Expérience 1. Catégorisation et évaluation de 20 odorants du « champ des odeurs » . .	16
1.1.2 Résultats . .	23
1.1.3 Discussion .	29
1.1.4 Conclusions générales et perspectives d'étude .	30
2.1 EXPERIENCE PRINCIPALE . .	31
2.1.1 Objectifs de l'étude .	31
2.1.2 Matériel & méthode . .	33
2.1.3 Résultats . .	38
2.2 EXPERIENCE COMPLEMENTAIRE : Vérification de l'aptitude en imagerie mentale olfactive . .	44
2.2.1 Matériel & méthode . .	45
2.2.2 Résultats . .	46
2.3 Discussion générale .	50
2.4 Conclusions . .	51
<b>Chapitre 2. PERCEPTION DE LA QUALITE ODORANTE DANS LES MELANGES BINAIRES</b>	<b>53</b>
..	53
2.1 Introduction et cadre théorique .	53
2.2 La physiologie de l'olfaction .	54

2.2.1 Eléments d'anatomie . . .	54
2.3 Les effets portant sur la perception de l'intensité d'un mélange d'odeurs : Définitions . . .	59
2.4 Les théories de la perception de la qualité odorante . . .	61
2.4.1 La théorie moléculaire ou chimique ou théorie des «odotopes» . . .	61
2.4.2 La théorie des vibrations ou théorie vibrationnelle . . .	63
2.4.3 Vers une nouvelle théorie vibrationnelle . . .	63
2.5 Effets portant sur la qualité de l'odeur d'un mélange binaire . . .	64
Problématique de nos travaux . . .	65
2.6 Etude de l'accord « Ananas » . . .	67
2.6.1 Objectifs de l'étude . . .	67
2.6.2 Matériel et procédure expérimentale . . .	67
2.6.3 Résultats & Discussion . . .	68
2.6.4 Matériel et méthode . . .	71
2.6.5 Résultats . . .	74
2.6.6 Discussion . . .	77
2.7 Etude de l'accord Vanille . . .	78
2.7.1 Objectifs de l'étude . . .	78
2.7.2 Matériel et méthode . . .	80
2.7.3 Résultats . . .	81
2.7.4 Conclusion préliminaire . . .	82
2.7.5 Matériel et méthode . . .	83
2.7.6 Résultats . . .	85
2.7.7 Discussion . . .	89
2.7.8 Conclusions générales sur les accords aromatiques . . .	91
2.8 Les théories du masquage olfactif . . .	91
2.8.1 Cadre théorique . . .	92
2.8.2 Matériel et méthode. . .	93
2.8.3 Résultats . . .	96
2.8.4 Discussion . . .	101

2.8.5 Conclusions .	103
2.8.6 Conclusions générales .	104
<b>Chapitre 3. Notes et Accords .</b>	<b>107</b>
3.1 Introduction .	107
3.2 Interactions qualitatives dans la modalité visuelle .	108
3.3 Interactions qualitatives dans la modalité auditive .	109
3.4 Interactions qualitatives en olfaction : notes olfactives et accords .	111
3.4.1 Les accords aromatiques : l'Accord-Fusion .	112
3.4.2 Composition d'accords olfactifs et caractérisation par des experts .	113
3.5 Accords, formulations et descripteurs sémantiques .	118
3.6 Conclusions . .	125
<b>Chapitre 4. DISCRIMINATION DES ODEURS &amp; POTENTIELS EVOQUES OLFACTIFS .</b>	<b>127</b>
4.1 Introduction .	127
4.2 Preuves électrophysiologiques de l'effet des odeurs sur la cognition . .	129
4.2.1 Les odeurs modulent les ondes $\alpha$ et $\beta$ du tracé électroencéphalographique . .	129
4.2.2 Le potentiel évoqué olfactif et ses caractéristiques .	130
4.3 Cadre théorique et objectifs de l'étude .	134
4.4 Matériel et méthode .	136
4.4.1 Olfactométrie .	136
4.4.2 Matériel d'enregistrement EEG (Biosemi) .	138
4.5 Résultats . .	146
4.6 Discussion . .	155
4.7 Conclusions . .	157
<b>CONCLUSION GENERALE .</b>	<b>161</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .</b>	<b>165</b>



## Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Gilles Sicard, pour m'avoir accueilli il y a déjà 6 ans en stage de maîtrise, et pour m'avoir fait confiance jusqu'à aujourd'hui. Je salue ici ses qualités tant humaines que scientifiques.

J'ai été plus qu'honoré de rencontrer Tyler Lorig lors de mon séjour à Lexington en 2003. Qu'il en soit ici remercié avec mon profond respect. Tyler, Thank you so much my friend.

J'exprime toute ma reconnaissance à Madame Nathalie Martin et à Monsieur Gilles de Revel pour avoir montré de l'intérêt pour mes travaux, d'avoir accepté de juger cette thèse et d'en être les rapporteurs.

Merci à Lionel Collet qui m'a accueilli au sein du laboratoire Neurosciences & Systèmes Sensoriels.

J'exprime également toute ma gratitude aux chercheurs du laboratoire Neurosciences & Systèmes Sensoriels, ceux qui n'ont fait que passer et ceux qui y sont encore, ils ont rendu, de près ou de moins près, ce travail possible :

- Catherine Rouby pour sa générosité et son aide précieuse pendant ces 6 années.
- Jean-Pierre Royet pour ses qualités de scientifiques indiscutables et sa présence dans les moments difficiles.
- Thierry Thomas-Danguin, sans qui, sans l'ombre d'un doute, je serais encore dans la rédaction de mon mémoire de DEA !
- Moustapha Bensafi pour ses conseils éclairés !

Mais aussi à Samuel G., Vincent F., Bernard B., Michel V., Nathalie B., Fabien P., Barbara T. et Nicolas G. et à ceux que j'oublie honteusement...

A Jane Plailly, une 'collocataire' de bureau qui est devenue une amie, et à qui je dois ENORMEMENT depuis le début de notre aventure au labo.

Aux étudiants du laboratoire NSS : Alexandra, Damien, Alexandre, Etienne, Géraldine, Tristan, Fred, Idrick, Mickael, Delphine, Agnès, Marion & Germain : BONNES FORCES !

Je tiens tout particulièrement à dédier ce travail à mes parents, à qui je souhaite d'avoir une retraite aussi épanouissante et remplie que l'a été leur vie professionnelle.

A ma sœur Mélissa, qui n'a jamais refusé de m'aider et qui a su trouver les mots pour apaiser les craintes quotidiennes de la vie du 'petit frère doctorant'. A Fred, pour sa relecture et ses corrections.

A Johanna qui m'a soutenu dans les moments de doutes, de panique et de résignation comme dans les moments de joies et de détente. Joe, je te dois beaucoup et te souhaite tout le bonheur et la réussite que tu mérites.

Enfin, à ma grand-mère Mamou et à mes tantes Anny et Mimi, qui m'accompagnent à chaque instant... Et à ceux qui sont partis trop tôt, Azo et Papou, mais qui sont avec moi quand même.

Evidemment, je ne pourrai conclure ses remerciements sans saluer tous les sujets qui ont

accepté de mettre leur nez dans mes expériences.

Une petite expérience :

Humez l'air qui vous entoure...

Que sentez-vous ?

...CONCENTREZ-VOUS...

Humez une nouvelle fois !

Et cette fois-ci, que sentez-vous ?

Voyez vous-même, en matière d'odeur, il est difficile d'être en accord avec soi-même deux fois de suite !



## RESUME

### **TITRE : La qualité perçue des mélanges odorants : Analyses psychophysologiques.**

En olfaction, la qualité des mélanges odorants est une thématique peu étudiée. Pourtant, il s'agit là d'une dimension primordiale pour comprendre comment le sujet humain détecte, reconnaît, et identifie les odeurs de son environnement et pour préciser les processus périphériques et centraux mis en jeu dans le traitement de l'information olfactive. De plus, les odeurs que nous rencontrons au quotidien sont exclusivement des mélanges complexes de molécules odorantes. L'objectif principal de cette thèse est de contribuer à la compréhension de la perception de la qualité odorante, et plus particulièrement dans le cas de mélanges binaires (constitués de 2 composés odorants).

Nous avons tout d'abord montré que des sujets non experts sont capables d'organiser un espace odorant, c'est-à-dire de regrouper des odorants selon leurs airs de famille et que cette aptitude naturelle peut être améliorée par l'apport d'une information sémantique (généralement le nom de l'objet source de l'odeur).

Puis, dans un second temps, nous avons élaboré des procédures expérimentales originales qui permettent de mettre en évidence des interactions perceptives particulières dans les mélanges odorants. Ces interactions surviennent dans des mélanges de composés odorants déterminés, à des concentrations et proportions particulières. Dans certains cas, ces mélanges particuliers peuvent conduire à la perception d'une nouvelle note odorante (accord-fusion) qui n'était pas perceptible avant le mélange ; ou dans d'autres cas, à la disparition d'une des notes odorantes (masquage) correspondant à un des constituant du mélange. Les résultats que nous avons obtenus nous ont conduit à redéfinir la notion d'*interaction qualitative* dans les mélanges binaires odorants.

Enfin, grâce à une collaboration avec le laboratoire de neurosciences cognitives de T. Lorig (Washington & Lee University, Lexington, VA – USA), nous avons pu mettre en évidence l'effet de la sensibilisation olfactive (apprentissage perceptif) d'une note odorante particulière sur les capacités de discrimination olfactive dans un mélange binaire.

Les travaux présentés dans cette thèse apportent donc de nouvelles informations sur la perception de la qualité odorante, soulignant l'importance des processus bottom-up (du perceptif au cognitif) et top-down (du cognitif au perceptif) dans le traitement de la perception olfactive.

**Mots clés :** Qualité odorante ; mélange binaire ; accord-fusion ; masquage olfactif ; potentiel évoqué olfactif ; discrimination olfactive.



## SUMMARY

### **TITLE: The perceived quality of odorous mixtures: Psychophysiological analysis.**

In olfaction, the quality of odorous mixtures is quite an under studied field of investigation. Nevertheless, this dimension is crucial to understand how human subjects detect, recognize and identify the odors of its environment and to specify both the peripheral and the central processes brought into operation during the process of olfactory information. Moreover, the odors which we encounter in our everyday life are exclusively made of complex mixtures of odorous molecules. The main purpose of this thesis is to contribute towards the understanding of the perception of odor quality, and especially in the case of binary mixtures (constituted by 2 components).

First, we have shown that naïve subjects are able to organize a field of odors, which corresponds in grouping together odorants on the basis of their qualitative resemblances. This natural capability could be enhanced by the addition of a semantic indication (generally the name of the object which brings the odor).

Second, we have elaborated original experimental procedures allowing us to underline some specific perceptive interactions in binary mixtures. These interactions occurred in mixtures of particular compounds, at specific concentrations and ratio. In some cases, these mixtures could bring to the perception of a new odorous hint (harmony) which was not perceptible before mixing; in other cases, it could bring to the fading of an odorous hint corresponding to one of the component. Our results have led us to redefine the notion of *qualitative interactions* in binary odor mixtures.

Finally, during a period in the Cognitive Neuroscience Laboratory of the Professor Tyler Lorig (Washington & Lee University, Lexington, VA – USA), using his OERP/olfactometer platform, we have showed the psychophysiological effects of olfactory sensitization (perceptive learning) to a specific odorous hint on olfactory discrimination in binary mixtures.

The results brought in the thesis provide new information on the perception of odor quality, underlying the significance of both the bottom-up and the top-down components in the process of olfactory perception.

**Key-words:** odor quality; binary mixtures; odor harmony; masking; OERP; olfactory discrimination.



## Epigraphe

***« L'âne va au chardon comme l'Homme va au Savoir » Henri Gougaud***

***« La science naît du jour où des erreurs, des échecs, des surprises désagréables nous poussent à regarder le réel de plus près » René Thom***



# INTRODUCTION GENERALE

D'un point de vue pragmatique, l'odeur est définie au moins selon trois propriétés (ou caractéristiques) perceptives : Son intensité, dépendante de la concentration de la substance odorante dans l'air inspiré, est la dimension perceptive majoritairement étudiée (Duchamp et al., 1991; Patterson et al., 1993) ; sa valence hédonique – c'est-à-dire son caractère agréable ou désagréable – et enfin sa qualité qui peut être traduite par le nom usuel que l'on donne à l'odeur perçue mais qui reste la propriété la plus subjective de la perception olfactive car elle fait appel à des souvenirs plus ou moins disponibles dans notre mémoire, et n'est pas soumise à un apprentissage structuré ou systématique.

Pourtant, rien ne nous rappelle aussi bien des souvenirs qu'une odeur. Un lieu, une personne ou un événement précis de notre existence passée peut être associé à la présence (ou à la perception) d'odeur et il suffit parfois d'une infime quantité de substance odorante volatile pour provoquer en nous une sensation familière. Mais lorsqu'on nous demande simplement de nommer une odeur quelconque, notre enthousiasme disparaît pour laisser place au doute. Exposé au stimulus olfactif, le néophyte éprouve une difficulté à identifier, ou même à décrire son odeur : La qualification des odeurs souffre d'une déficience du vocabulaire (Engen, 1982).

Ainsi, ces dernières années ont vu naître des projets de grandes envergures visant à comprendre le pouvoir des odeurs sur des humains. La question est vaste, ambitieuse peut-être puisqu'il s'agit de décrire comment l'homme perçoit les odeurs de son environnement et ce qu'il peut en dire. Une solution consiste à explorer les réponses des sujets aux questions directes sur leurs perceptions afin d'en extraire des informations plus

ou moins précises sur la perception olfactive, armés des outils de la psychophysique, voire de la linguistique. Mais, pratiquement, lorsque nous demandons à quelqu'un de sentir une odeur de banane, peut-on être sûr qu'elle l'identifiera comme étant une odeur de banane ? Malheureusement, nous savons bien que dans ce genre d'exercice, il est bien difficile d'obtenir une réponse correcte du sujet et de plus, que sa réponse, si elle existe, soit commune à toute une population.

Le système récepteur olfactif est un récepteur / intérateur qui permet de détecter et de discriminer (en théorie) au moins 10 000 molécules odorantes différentes (avec  $n$  récepteurs on a  $2^n$  combinaisons discriminantes : si  $n=100$  alors le nombre de combinaisons vaut 1030, un nombre très supérieur à ce qui serait théoriquement nécessaire pour discriminer 10 000 odeurs). Le plus souvent, la perception d'une odeur de notre environnement ne résulte pas de la détection d'un seul composé chimique, mais de mélanges pouvant comprendre des dizaines voire des centaines de molécules odorantes (Laing & Jinks, 2001). Si nous rapprochons cette remarque au fait qu'il est difficile de caractériser une substance pure isolée, il paraît encore plus difficile de caractériser l'odeur résultante des mélanges moléculaires dans lesquels nous « baignons ». Pourtant, la majorité d'entre nous est capable de détecter l'odeur d'un pain chaud qui s'échappe d'une boulangerie, malgré l'odeur des pots d'échappements mêlée aux effluves de goudron chaud alors qu'un collègue de travail souffle la fumée de sa cigarette dans notre direction. Comment arrive-t-on à trouver notre chemin dans le labyrinthe olfactif de notre quotidien ? Cette aptitude à extraire une information olfactive dans une scène odorante a été trop peu explorée et n'est pas expliquée jusqu'ici (ce qui représente une faille que les chercheurs en olfaction doivent explorer) (Laing & Francis, 1989; Laing & Livermore, 1992; Li & Hertz, 1999).

C'est dans ce cadre que nous avons cherché à développer notre connaissance de la perception olfactive.

Nous pensons que le sujet humain a une capacité naturelle d'extraction ou de segmentation olfactive qui est sous-estimée et que l'expérience olfactive au quotidien peut nous permettre d'acquérir des aptitudes olfactives beaucoup plus développées, en terme de détection, qui dépend de la quantité minimum suffisante pour déclencher la perception, en terme de discrimination qui représente l'aptitude à différencier les odeurs les unes des autres (qui est de loin notre aptitude la plus développée et c'est à cause de cette capacité extraordinairement puissante que nous pouvons espérer développer les autres aptitudes olfactives) et en terme de caractérisation qui implique les connaissances sémantiques nécessaires à la reconnaissance et à la dénomination, plus lointaine).

## Présentation de nos travaux

Prenant acte de la difficulté que le sujet humain éprouve à discuter de la qualité des odeurs, nous constatons notre ignorance des caractéristiques qui permettraient de distinguer les odeurs. Force est de constater, découlant de cette difficulté, que malgré un grand nombre de tentatives de classifications (Godinot, 1999 pour une revue de la



littérature), aucune n'est universellement reconnue. Ce constat ne peut que nous inciter à sonder de nouvelles dimensions, en restreignant ou en précisant les critères de classifications imposés aux sujets (comme par exemple une catégorisation basée sur l'air de famille entre les odeurs). Ainsi, la première partie de ce travail traitera de telles dimensions qui régissent l'espace des odeurs (c'est-à-dire la configuration mentale de la représentation du monde des odeurs) chez l'humain et qui ont été négligées jusqu'à présent. A partir des travaux sur « le champ des odeurs » de J. N. Jaubert (Jaubert *et al.*, 1987), nous illustrerons nos aptitudes et nos limites dans l'organisation de l'espace des odeurs. Conscient de cette lacune, nous aborderons la question de la caractérisation des odeurs en explorant plus en avant les aspects linguistiques de la qualification des odeurs. Nous poserons l'hypothèse, entre autres, que l'information sémantique (associée à la perception de l'odeur) participe à l'organisation de notre espace olfactif.

Fort d'une meilleure compréhension de la composante linguistique dans la perception de la qualité des odeurs, nous poursuivrons dans un second chapitre par l'étude de la perception de la qualité odorante des mélanges odorants. La difficulté que l'on rencontre à caractériser les mélanges odorants, mêmes ceux constitués de deux ou trois éléments, provient du fait de la modification de leurs propres caractéristiques intensives et qualitatives dans l'odeur résultant du mélange. S'il est entendu qu'au dessus de trois composantes moléculaires, l'odeur du mélange ne se complexifie plus (Moskowitz & Barbe, 1977), cela ne veut pas dire qu'il devient plus aisé de caractériser cette odeur pour autant. Il semble alors important de préciser ces phénomènes d'interactions qualitatives particuliers survenant dans les mélanges, faits exceptionnels dont l'analyse est nécessaire afin d'éclaircir les mécanismes perceptivo-cognitifs sous-jacents à ces sensations originales telles que l'émergence d'une nouvelle odeur ou la disparition partielle ou totale d'une des odeurs d'un mélange. Afin de minimiser la complexité des odeurs résultantes et rendre notre travail possible, nous nous sommes limités à n'étudier que des mélanges assez simples, binaires uniquement, c'est à dire mélangeant 2 molécules odorantes pures. Bien sûr, les mélanges que nous avons sélectionnés présentent des propriétés qualitatives particulières : Ils sont des exemples soit d'un phénomène de fusion qualitative autrement appelé « accord aromatique » soit, ou inversement, du phénomène de « masquage » ou neutralisation olfactive, mieux documenté par la littérature (Köster, 1971; Rouby & Holley, 1995; Pierce *et al.*, 1996).

A la lumière de ces nouveaux résultats, il nous a semblé important de synthétiser les informations relatives aux interactions qualitatives de la littérature scientifique afin de les confronter à nos observations expérimentales. Ainsi, dans le troisième chapitre, nous avons d'abord rassemblé les principaux résultats du projet « Accord Fusion » mené en collaboration avec l'équipe « Arômes » de l'INRA de Dijon ainsi que les résultats d'une analyse réalisée sur les formulations « fruits » et « fleurs » de Poucher (Poucher, 1975). Cette étude nous a permis de poser et de redéfinir la notion d'accord aromatique elle-même et par suite de proposer de nouvelles hypothèses concernant la perception de la qualité dans les mélanges odorants.

Dès le début de ce travail, nous avons postulé que nos capacités à détecter, discriminer mais surtout à caractériser les odeurs pouvaient être considérablement accrues par un simple travail d'entraînement régulier. D'autre part, nous savons par notre

expérience empirique des odeurs, par exemple en ouvrant notre réfrigérateur, qu'il est facile de déterminer « au nez » si tel fruit est suffisamment mûr pour être consommé ou si tel aliment n'est plus comestible car trop vieux. Les stimulus olfactifs auxquels nous nous référons ici sont tous des mélanges odorants complexes dont nous sommes tous plus ou moins capables d'extraire l'indice olfactif qui orientera notre comportement (décision) alimentaire.

Certains auteurs ont étudié l'effet d'apprentissage sur les capacités de détection de substances pures isolées ou en mélanges (Livermore & Laing, 1996). A l'instar de ces travaux, nous supposons que cette sensibilisation par la répétition du stimulus a une influence positive sur les capacités à la détecter dans un mélange odorant. Si tel est le cas, quelle conséquence cela a sur l'appréciation quantitative et qualitative de l'odeur de tels mélanges odorants ? Nous avons tenté de mettre en évidence les processus centraux (par électroencéphalographie) mis en jeu lors d'une telle activité (et impliqués dans le jugement qualitatif). Pour tester ces hypothèses, nous avons élaboré des modèles odorants (mélanges binaires) mimant l'altération d'une odeur alimentaire (beurre qui rancit) et nous y avons "sensibilisé" des sujets avec l'objectif de les rendre « experts » à ces différentes notes odorantes.

# Chapitre 1. Caractérisation des odeurs et catégorisation

## 1.1 Introduction et cadre théorique

La catégorisation peut se définir comme l'action de classer des éléments par catégorie, de les regrouper suivant un certain nombre de critères établis (Rosch, 1978). Par exemple, un des critères consiste à classer des objets sur la base de leur ressemblance. Ainsi, deux objets partageant un certain nombre de similitudes seront rassemblés dans la même catégorie tandis que deux objets ne partageant pas ou peu de similitude(s) devront être classés dans deux catégories distinctes. On peut distinguer les catégorisations basées sur les propriétés physiques (objectives, donc invariantes) des objets qui s'opposent à celles fondées sur l'observation de ces mêmes traits physiques, tels qu'ils sont perçus par le sujet (perceptives, donc subjectives). C'est vers ce dernier type de catégorisation que nous orientons notre attention dans ce chapitre.

Une des questions récurrentes dans les études relatives à la catégorisation perceptive est donc la suivante : Les catégories perceptives peuvent-elles être considérées comme invariantes (innées) et donc partagées par la totalité des êtres humains ou bien existe-t-il des facteurs subjectifs, individuels ou culturels (extrinsèques)

qui guident la formation de catégories perceptives et cognitives ?

Malgré l'hypothèse d'un universalisme perceptif postulé par « *Basic Color Terms* » (Berlin & Kay, 1969), de nombreuses études ont déjà montré la variabilité qui entre en jeu dans la construction de catégories perceptives visuelles (Saunders & Van Brakel, 1997; Davidoff, 2001) ou sonores (McAdams, 1994).

Par ailleurs, après l'abandon des frontières marquant les limites des jugements catégoriels (Wittgenstein, 1953) et « *Principles of Categorization* » (Rosch, 1978), nous savons que par souci d'économie du coût cognitif, le sujet humain regroupe les objets de son environnement qui se ressemblent en se référant à un élément prototypique. Ainsi, en mémoire, les catégories se réduiraient à un seul de leurs éléments, le plus typique et représentatif pour une classe donnée. La seule tâche qu'il faille alors accomplir est d'extraire les traits qu'un nouvel élément a en commun avec le prototype d'une classe pour savoir dans quelle catégorie il peut être effectivement « rangé ». Cette hypothèse a été profondément explorée pour les objets visuels par exemple, mais n'a pas vraiment de substance dans le domaine olfactif.

Quels sont précisément les facteurs qui influenceraient la catégorisation ? Plus précisément encore, quels sont les processus cognitifs impliqués dans la catégorisation ?

Quelques études relatives à la modalité visuelle ou encore auditive ont mis en évidence certains critères décisifs en catégorisation.

Dans la modalité visuelle, les couleurs, par exemple, pourraient être considérées comme des stimuli « autonomes », perceptivement universels (Saunders & Van Brakel, 1997). On sait décrire les couleurs à l'aide de trois attributs indépendants : une teinte, un éclat et une saturation. Il serait donc possible de caractériser les couleurs en se basant sur une théorie « physique », sorte d'invariant universel. Mais une revue de la littérature nous montre que l'état actuel des recherches ne permet pas de retrouver une telle règle universelle régissant la caractérisation des couleurs dans l'espèce humaine et démontre qu'il existe un large répertoire lexical (au travers des langues du monde) pour décrire ces différents stimuli colorés. Il est vrai que la modalité visuelle se trouve hautement exprimée en langue et alimente depuis peu le débat sur la détermination des formes linguistiques en sciences cognitives.

En ce qui concerne la modalité auditive, on a montré que lors de la catégorisation de sons purs, plusieurs facteurs sont impliqués dans la formation des regroupements réalisés par des sujets humains. Nombre d'entre eux ont des représentations physiques telles que la structure harmonique, la durée, la hauteur ou encore le ton du son. Mais les paramètres pragmatiques primordiaux qui influencent la catégorisation des sons restent d'abord hédoniques, directement attachés à la valence émotionnelle induite par le stimulus sonore (Björk, 1985) et apparaissent systématiquement dans les analyses unidimensionnelles réalisées sur les catégories perceptives créées (Guski, 1997).

Comme il existe des catégories sonores ou visuelles, il n'y a pas d'emblée de questionnement sur l'existence de catégories olfactives. Nous reconnaissons une odeur de fruit ou de fleur, de pin, d'eucalyptus ou de menthe et nous sommes capables de regrouper dans des catégories distinctes les odeurs animales et les odeurs florales. Pour mieux comprendre comment nous parvenons à construire ce type de catégories et de

quelle manière nous leur donnons une représentation linguistique, les sciences cognitives se tournent vers la psychologie afin de déterminer les processus mis en jeu dans la perception des ressemblances qualitatives et de leur traduction en langue.

Pourtant, les approches neurophysiologiques, loin d'être naïves, ont montré que dans la modalité olfactive, il est entendu qu'un même récepteur moléculaire peut servir d'entrée à des signaux moléculaires appartenant à plusieurs catégories olfactives différentes (Holley *et al.*, 1974; Sicard, 1985). Un constat primordial s'imposa selon lequel les récepteurs détectent plusieurs espèces moléculaires différentes, alors qu'une même molécule active plusieurs types différents de récepteurs. Nous entrons de plain-pied dans l'activité classificatoire, comme si avait lieu à ce niveau d'organisation, une extraction de traits, dont certains probablement partagés, et il apparaît possible de classer les stimuli chimiques selon une technique qui mime celle que réalisent les cellules réceptrices en répondant sélectivement à certaines d'entre elles (Sicard & Holley, 1984).

Par ailleurs, les chimistes tentent directement de relier la structure moléculaire à l'odeur d'un composé (Amoore, 1963; Beets, 1982; Doré *et al.*, 1984), en extrayant grâce à leur science, des points communs entre les molécules odorantes appartenant aux mêmes groupes perceptifs, avec des succès de plus en plus évidents, mais partiels (Eminet & Chastrette, 1983; Chastrette *et al.*, 1993). Partiels dans la mesure où les règles ainsi révélées ne sont valables que pour des fragments très limités de l'espace olfactif et dont la dispersion est loin de recouvrir l'ensemble de cet espace.

Toute l'odeur n'est à l'évidence pas explicable par ces seuls points de vue. Nous n'oublierons plus que l'odeur est une perception, qu'elle représente une intersection entre les signaux de l'environnement et les constructions cognitives du monde intérieur.

Par exemple, il ne semble pas scientifiquement acceptable d'imaginer qu'il existe des récepteurs aux bonnes odeurs qui s'opposeraient à des récepteurs aux mauvaises odeurs et nous pensons comme beaucoup d'auteurs que la représentation cognitive des odeurs inclut de nombreuses dimensions qu'il nous reste à qualifier plus précisément.

C'est ainsi que, en effet, les premières études sur la classification des odeurs, qui remontent à Platon (-427 -347 av. J.C.), montraient déjà que la principale partition des odeurs est organisée selon leur caractère agréable ou désagréable, distinguant les « bonnes » odeurs des « mauvaises » (Schiffman, 1974). Cette dimension hédonique de l'odeur constitue la première dimension explicative de l'organisation cognitive des odeurs et comme l'explique Berglund *et al.* (Berglund *et al.*, 1973), les espaces de similitudes entre odeurs seraient tellement différents d'un individu à l'autre que la seule dimension commune serait hédonique. Par le fait, cette organisation basique se retrouverait dans la majorité des études relatives à la catégorisation olfactive. Sa dépendance et donc sa variabilité vis à vis de l'environnement culturel, ou même de l'état interne des sujets, est patente.

### Problématique de nos travaux

---

Comme nous l'avons brièvement souligné dans cette introduction, toutes les odeurs rassemblées dans une même catégorie doivent partager des critères. Bien que ce

postulat soit simple et qu'un grand nombre de chercheurs aient tenté de représenter des classifications savantes des odeurs, ces hiérarchies restent très peu explicitées, du fait — entre autres — de la variabilité observée d'un individu à l'autre, d'une classification à l'autre. Quelles sont alors ces propriétés, ces critères qui comptent lors de la création d'un groupe d'odeurs ? Quels sont les éléments qui permettent ou non de trouver deux odeurs perceptivement voisines ou distantes dans notre espace olfactif ?

Ce premier chapitre comprend deux expériences. La première est relative à la classification naturelle (perceptive) réalisée sur des odorants purs sélectionnés dans la base odorante du champ des odeurs (Jaubert *et al.*, 1987) et nous a permis de vérifier l'existence d'une « méta organisation » de l'espace des odeurs et le rôle des critères naturels jouant un rôle dans l'activité classificatoire. Dans la seconde expérience, nous avons mis en place une procédure originale nous permettant d'examiner plus précisément l'influence des connaissances sémantiques sur la formation subjective ou individuelle des catégories cognitives relatives aux odeurs.

### **Expérience 1. Catégorisation et évaluation de 20 odorants du « champ des odeurs »**

---

#### **Objectifs de l'étude**

Dès 1983, pour pouvoir décrire les arômes utilisés dans l'industrie cosmétique et agroalimentaire, Doré et Jaubert ont élaboré une liste de descripteurs des notes odorantes par un processus d'émergence empirique. Répondant à un besoin, ils développaient un outil de communication sur les odeurs selon une démarche instinctive et normalement simplificatrice. Cette démarche réductionniste a naturellement conduit à des rapprochements, à des associations et à des classifications de substances odorantes.

La technique utilisée, censée simuler cette activité réductionniste naturelle, a donc été déployée expérimentalement et restreint le nombre de termes utilisés pour identifier et décrire les molécules odorantes. Pour assurer la reproductibilité de la référence, les auteurs ont choisi de faire reposer leur système sur des échantillons odorants représentés par des corps purs plutôt que sur des mélanges aromatiques.

L'auteur procéda en trois étapes :

- Etape 1 : Sélection d'un échantillon significatif de molécules odorantes

Les auteurs ont d'abord recueilli les différentes caractéristiques de la totalité des composés odorants et les principales expressions utilisées pour les caractériser. Il s'agissait de rassembler et classer les informations dont on dispose sur les composés odorants. Il était nécessaire de délimiter l'espace (les corpus étudiés) exploré et les auteurs choisirent de faire un inventaire relatif aux molécules odorantes usuelles, les produits naturels utilisés en parfumerie et en aromatique. Au total, 1396 substances ont été ainsi retenues.

- Etape 2 : Sélection des descripteurs sémantiques

Il s'agissait de constituer un référentiel susceptible d'apporter une correspondance 'archétype sémantique' – 'archétype moléculaire' afin de parvenir à une liste représentative limitée de substances les plus distinctes possibles les unes des autres.

L'étude se limitait aux seuls composés utilisés dans la profession de la parfumerie et de l'aromatique : Croisement du contenu des informations de plusieurs documents tels que « *Perfume and Flavor Chemicals* » (Arctander, 1969), « **le Répertoire des substances artificielles de l'aromatique examinées par les experts du conseil de l'Europe dans le cadre de recommandations concernant la toxicologie** », ou encore la compilation du TNO présentant 35000 molécules odorantes identifiées dans 142 produits alimentaires naturels de base (Van Straten, 1977).

En ce qui concerne les descripteurs sémantiques, les auteurs élaborèrent un inventaire des termes employés tant en France que dans les pays anglo-saxons à partir de divers corpus tels que les termes de diverses classifications empiriques, des répertoires et catalogues de produits odorants, des cahiers de parfumeurs et aromaticiens, des descripteurs de négociants et des travaux universitaires sur des produits odorants. Trois cents termes en tout ont été recensés. Ce nombre a été comparé avec ceux obtenus par d'autres auteurs (650 pour Harder, 1975 ; 800 pour Dravnieks, 1985 ; 96 pour Arctander, 1960) ce qui permit d'éliminer des synonymes, de rassembler les notes odorantes voisines (exercice réalisé par des sujets experts : parfumeurs, aromaticiens...). A la fin de cet exercice, 64 descripteurs élémentaires ont donc été filtrés et ont été retenus.

· Etape 3 : Adéquation entre molécules et descripteurs étalon.

Les 1396 composés sélectionnés ont été parfaitement décrits grâce aux termes retenus. La recherche de l'adéquation des champs structuraux et odorants a permis d'extraire 41 archétypes moléculaires dont les 41 descripteurs les plus fréquemment utilisés ont servi à établir les bases du « champ des odeurs de Jaubert » présenté sur la figure 1.

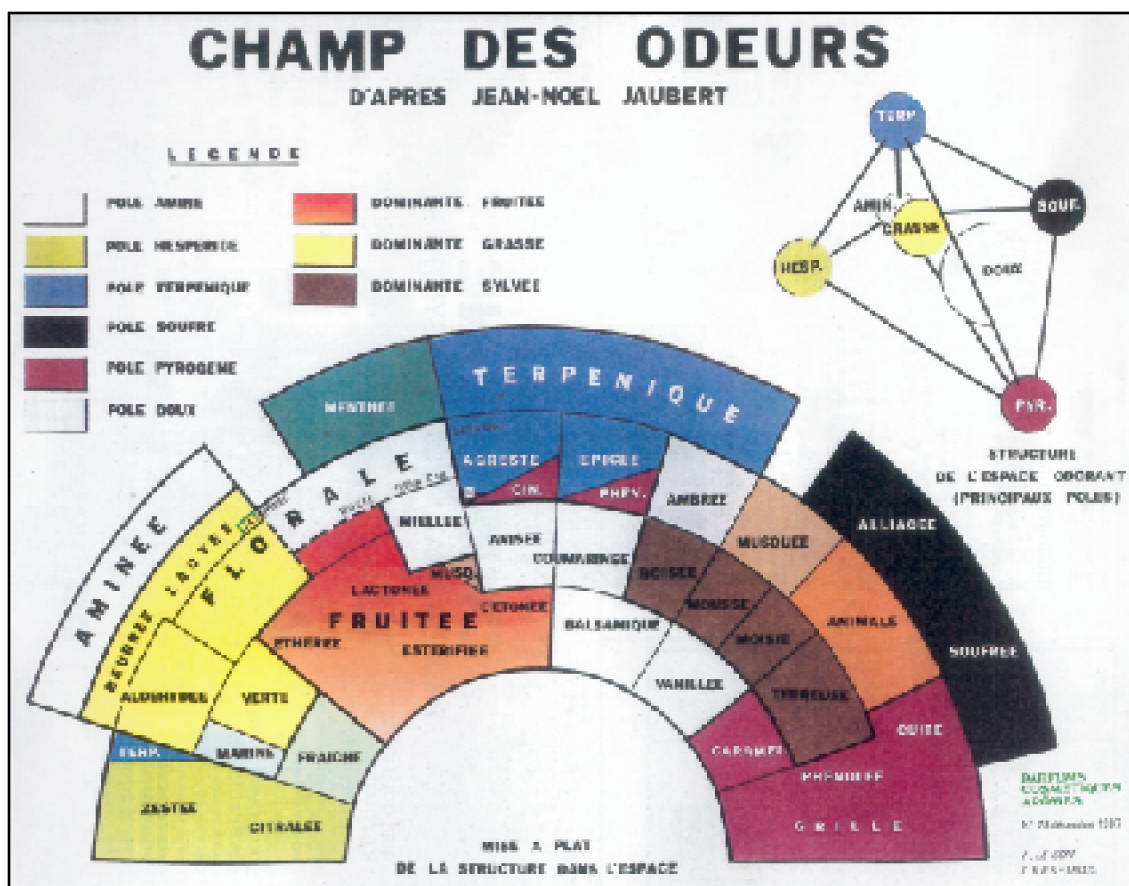


Fig. 1 : Présentation de la structure plane et tridimensionnelle du « champ des odeurs ».

Le schéma illustre une organisation de l'espace des odeurs de la totalité des « notes odorantes » existantes dans les domaines de la parfumerie et de l'aromatique. Au total, neuf pôles et dominantes balisent l'espace des odeurs et permettent de reconstituer la totalité des catégories olfactives.

Indéniablement, la structure présentée ne laisse aucun doute sur l'existence d'une organisation hiérarchisée de l'espace des odeurs en restituant très objectivement l'essentiel des différents points communs reliant entre elles les plus grandes catégories « théoriques » des notes odorantes. Selon Jaubert, il existe 9 grandes catégories odorantes (9 familles de notes odorantes). La totalité des évaluations de cette étude n'a été réalisée que par des experts provenant des domaines de la parfumerie et de l'aromatique. Ce mode opératoire ne nous permet pas de prévoir ou d'estimer son « applicabilité » à la perception des sujets néophytes (i.e. non experts), c'est à dire à la catégorisation de ces odeurs ainsi qu'à la terminologie employée pour les décrire.

C'est la raison pour laquelle, nous avons cherché à savoir si des odorants « du



champ des odeurs » présentés sans indication sémantique pouvaient être regroupés naturellement selon une organisation comparable et si les qualificatifs verbaux produits naturellement pouvaient se rapprocher des termes fournis par Jaubert *et al.*

Nous avons sélectionné 20 molécules odorantes du « champ des odeurs » que nous avons soumis à un grand nombre de volontaires afin qu'ils réalisent une tâche de catégorisation libre. Notre objectif était de tester la validité « écologique » de l'organisation proposée dans une population de sujets non experts.

### Matériel et méthode

- Sujets

Ce test a été effectué par 50 sujets volontaires (34 femmes et 16 hommes), âgés en moyennes de 24,6 ans ( $\pm 7,4$  ans). Parmi ces 50 sujets, 11 étaient fumeurs.

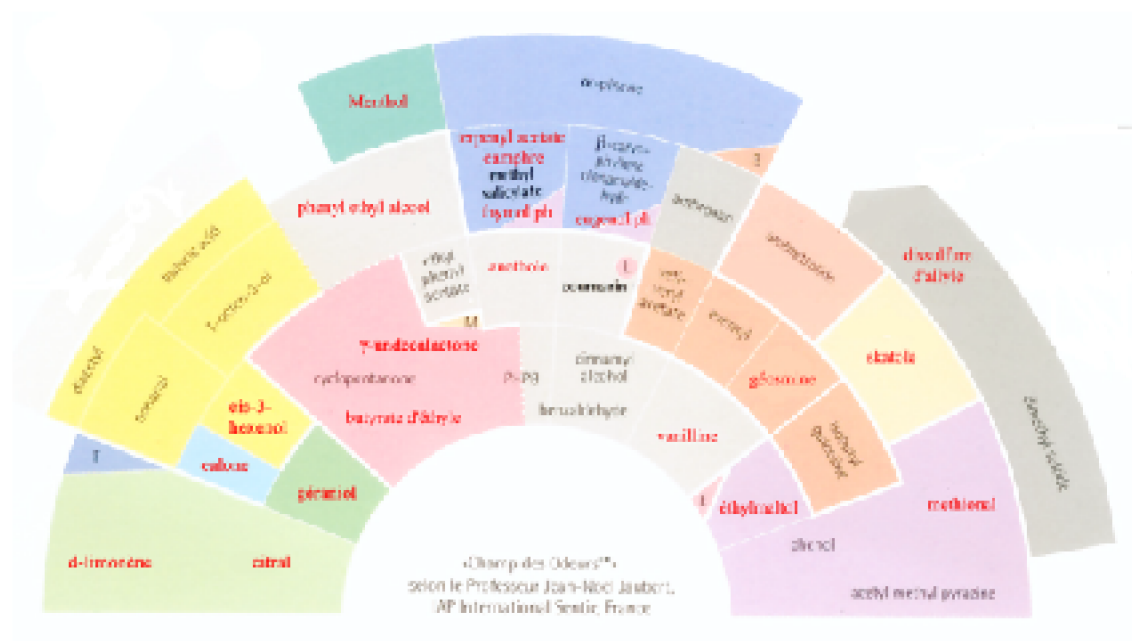
- Stimuli

Vingt corps purs odorants commerciaux (tab. I), ayant une pureté supérieure à 98 % ont été sélectionné de manière à balayer l'ensemble du « champ des odeurs » comme indiqué sur le tableau 1.

**Tab. 1 : Récapitulatif des corps utilisés, du code à trois lettres qui les identifie et des dilutions effectuées dans de l'alcool éthylique à 95°. Parmi ces composés, la calone, la vanilline, le menthol, le camphre, le thymol et l'éthylmaltol étaient sous forme de poudre qu'il a fallu solubiliser. Les solutions mères (saturées) de ces composés ont alors été diluées de manière à obtenir les concentrations désirées (conduisant à la perception de la note odorante désirée). Les autres composés disponibles sous forme liquide ont directement été dilués jusqu'à leur concentration finale.**

## La qualité perçue des mélanges Odorants : Analyses Psychophysologiques

Composés	Codes	Dilutions (vol / vol ou mg / ml)	Notes odorantes
d-limonène	LIM	1/10	Zestée
Citral	CIT	1/100	Citralée
Géranol	GER	1/100	Fraiche
Calone	CAL	110 mg / 5 ml	Marine
cis-3-hexenol	HEX	1/10	Verte
gamma undecalactone	UND	100 mg / 5 ml	Lactonée
Alcool phényl éthylique	PHE	1/10	Rosée
Trans-anéthol	ANE	1/100	Anisée
Vanilline	VAN	50 mg / 5 ml	Vanillée
1-menthol	MEN	75 mg / 5 ml	Menthée
d-camphre	CAM	50 mg / 5 ml	Camphrée
Acétate de terpinyle	TER	1/10	Lavandée
Eugénol	EUG	1/100	Epicicée phénolée
Thymol	THY	75 mg / 5 ml	Agreste phénolée
Géosmine	GEO	1/100	Moisie terreuse
Scatole	SCA	30 mg / 5 ml	Animale
Dissulfure d'allyle	ALL	1/100	Alliacée
Ethylmaltol	MAL	75 mg / 5 ml	Caramélisé
Butyrate d'éthyle	BUT	1/10	Esthérifiée
méthional	MET	1/100	Cuite



**Fig. 2 :** Positionnement des odorants (en rouge) sur la carte du champ des odeurs. Les 20 corps purs (en rouge) ont été sélectionnés de manière à représenter les différentes parties de l'espace odorant.

Parmi ces 20 corps purs, 12 sont liquides à température ambiante (21°5) et sont dilués, soit au centième, soit au dixième dans de l'alcool éthylique inodore dilué à 95°. Les 8 composés restant sont cristallisés et sont dissous de telle manière que pour les sujets,

vertu de la loi du droit d'auteur.

leurs intensités soient du même ordre que celles obtenues pour les corps liquides. Vingt solutions stock de 5 ml chacune ont été fabriquées dans des flacons de verre ambré de 15 ml.

Avant chaque session expérimentale, un jeu de stimuli odorants est fabriqué. Il s'agissait de déposer une goutte de 30µl de chaque solution sur une mouillette (type parfumerie) de papier filtre de dimensions 10 mm x 170 mm, puis de la placer dans un tube à essai de type Pyrex (Merck-Eurolab) de dimensions 16 x 160 mm.

Les tubes étaient numérotés de 01 à 20, et présentés aux sujets dans un portoir métallique de 40 emplacements (10 \* 4). Deux jeux d'odorants, ordonnancés différemment selon 2 tirages aléatoires ont été préparés de manière à limiter l'effet d'ordre (tab. 2 et 3) et respectivement proposés à deux groupes de 20 sujets.

**Tab. 2 et 3 : Deux jeux de stimulation correspondant à deux ordonnancements différents (A et B) des 20 échantillons odorants ont été préparés de manière à limiter l'effet d'ordre. Ordonnement A :**

01 : THY	05 : VAN	09 : CAM	13 : CIT	17 : UND
02 : BUT	06 : PHE	10 : ALL	14 : MAL	18 : HEX
03 : LIM	07 : TER	11 : ANE	15 : EUG	19 : MET
04 : CAL	08 : GEO	12 : MEN	16 : GER	20 : SCA

**Ordonnement B :**

01 : MEN	05 : SCA	09 : HEX	13 : GEO	17 : THY
02 : MET	06 : MAL	10 : EUG	14 : ANE	18 : ALL
03 : UND	07 : CIT	11 : LIM	15 : CAL	19 : GER
04 : TER	08 : CAM	12 : BUT	16 : VAN	20 : PHE

**Procédure expérimentale**

La moitié des sujets ont réalisé la tâche à partir de l'ordonnement du jeu A, l'autre moitié à partir de l'ordonnement du jeu B.

Les sujets s'installaient sur une chaise dans un local (2m x 4m x 4m) normalement ventilé et éclairé, face à une table sur laquelle était posé le portoir métallique contenant les 20 tubes et un formulaire d'enregistrement des réponses.

Nous avons décidé d'employer une procédure de catégorisation libre (ou '*free sorting*') comme celle pratiquée et décrite par Godinot (Godinot, 1999) : Les sujets ont un accès libre aux sources odorantes, sans qu'aucune limite de durée de la tâche, ni qu'aucune contrainte quant au nombre de groupes ou à leur effectif ne leur soient imposées. Nous leur intimions simplement de ne pas échantillonner deux sources odorantes simultanément.

Au cours de cette épreuve, nous avons considéré des périodes d'échantillonnages et des périodes de repos. Une période d'échantillonnage débute à l'ouverture d'un tube à essai jusqu'à sa fermeture. Une période de repos s'intercale naturellement entre deux périodes d'échantillonnages. Nous avons fixé la durée de la période de repos à 25

secondes, ce qui nous est suffisant pour permettre un recouvrement des capacités olfactives du sujet, pour une tâche relative à la qualité de l'odeur tout du moins.

La consigne donnée aux sujets pour cette tâche était la suivante :

Vous vous trouvez face à 20 tubes contenant chacun une mouillette odorisée.

Nous vous demandons de n'ouvrir qu'un seul tube à la fois. Ouvrir pour sentir la mouillette puis refermer. Avant de tester un autre tube, attendez toujours au moins 25 secondes.

Votre tâche consiste à regrouper les odeurs selon leurs « airs de famille », sans tenir compte de leur intensité. Ainsi, deux tubes contenant des odeurs qui se ressemblent seront placés dans un même groupe, et deux tubes contenant des odeurs dissemblables seront placés dans deux groupes distincts.

Vous n'êtes limité ni dans le nombre de groupes que vous désirez constituer, ni dans le nombre d'odeurs que vous comptez placer dans chaque groupe.

Une fois les groupements réalisés, nous avons révélé aux sujets la consigne de la seconde tâche qui consistait à décrire chacun des odorants (20) et de chaque groupe constitué.

Essayer de définir, de qualifier par un ou par quelques termes, chacune des odeurs et chacun des regroupements d'odeurs que vous avez effectué.

### Traitements des résultats

Notre objectif était de mesurer les ressemblances entre les odorants sélectionnés dans le champ des odeurs. Nous avons employé une procédure de catégorisation libre dans laquelle on demandait aux sujets de réaliser des groupes d'odeurs selon des critères de ressemblance qualitative, sans aucune contrainte majeure.

Dans cette expérience, des catégories formées par un ensemble de sujets, nous avons pu déduire le nombre de cooccurrences entre les odeurs, c'est-à-dire le nombre de fois que deux odeurs ont été mise ensemble dans un même groupe. De ces cooccurrences, nous pouvons déduire des indices de similitude perçue entre les odeurs. Finalement, la matrice de similitude obtenue permet de rendre compte de la distance perceptive entre tous les odorants.

Pendant, certains résultats obtenus par Godinot montraient qu'il semble plus difficile pour des sujets naïfs de percevoir des ressemblances entre odeurs et que naturellement, ils sont amenés à percevoir ce qui différencie les odeurs les unes des autres plus que ce qui les rapproche. C'est ainsi que nous avons décidé de transformer la matrice de similitude en une matrice de « dissimilarité », qui rendrait d'avantage compte du processus mis en jeu lors de l'activité classificatoire. Cette matrice a servi de base aux analyses descriptives utilisées pour représenter l'espace des odeurs tel qu'il est déduit de la perception de l'ensemble des sujets.

- Matrice de cooccurrences, dissimilarité et taxinomie hiérarchique :

Pour chaque sujet, les regroupements formés sont inscrits dans une matrice binaire symétrique, avec comme entrées, selon les colonnes et les lignes, la série d'odorants de

stimulation. A l'intersection d'une ligne représentant un odorant (A) et d'une colonne qui en représente un autre (B), est inscrit le chiffre 1 si les deux odorants ont été placés dans un même groupe, et le chiffre 0 s'ils ont été placés dans deux groupes distincts.

La somme algébrique des différentes matrices binaires obtenues pour tous les sujets donne une matrice de cooccurrence : le nombre à l'intersection d'une ligne (substance A) et d'une colonne (substance B) est le nombre de cas où les deux odorants A et B correspondants ont été placés dans un même groupe. Plus ce nombre est grand, plus la similitude des 2 odorants est grande. Ainsi par exemple, dans la matrice de cooccurrences bâtie sur les réponses des 50 sujets, à qui deux items n'ont jamais été regroupés dans le même groupe correspondra un 0, ou 50 si les deux items ont été systématiquement réunis dans une même classe. Pour transformer cette matrice de similitude en matrice de dissimilarité, il suffit d'inverser ces valeurs de telle manière que deux items qui n'ont jamais été regroupés dans la même catégorie soient représentés par le nombre 50, et par le nombre 0 s'ils ont toujours été réunis dans un même groupe. On remarquera que si l'on divise les cooccurrences (similitude ou dissimilarité) obtenues par le nombre de sujets, on obtient des indices compris entre 0 et 1, équivalents aux indices de similitudes d'Ochiai.

Cette matrice de cooccurrence est ensuite utilisée comme entrée d'un algorithme de taxinomie hiérarchique ascendante conduisant à la description d'un dendrogramme. La procédure choisie est dite ascendante car elle débute sur l'ensemble des items, tous individualisés, puis se poursuit par une agrégation des items, puis des groupes d'items, deux à deux...et ainsi de suite jusqu'à obtention d'un seul groupe contenant tous les items.

- Présentations simultanées des points représentatifs des odorants — Analyse factorielle des correspondances (AFC) et superposition des commentaires des sujets :

Ce type de traitement repose sur la matrice de cooccurrence déjà utilisée pour la taxinomie hiérarchique. Cette matrice a été utilisée comme entrée d'une analyse factorielle des correspondances dans le but d'obtenir une projection des odorants dans un espace plan. Nous avons systématiquement reproduit les 3 premières dimensions dans les exposés de nos résultats. Sur la première projection de la figure 7, les commentaires les plus répandus ont été superposés au plan, révélant ainsi le type de descripteurs utilisés pour définir les groupes.

### 1.1.2 Résultats

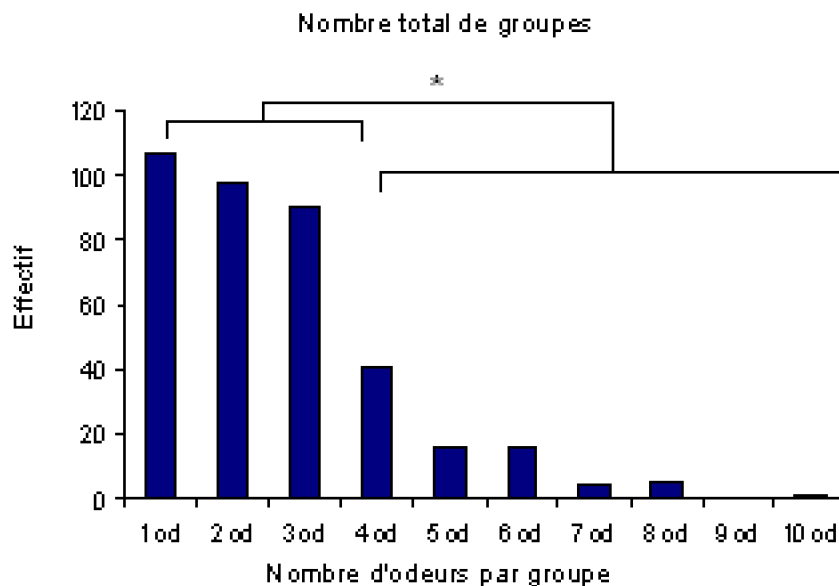
---

En moyenne, les sujets ont formé 7 groupes ( $\pm 2$ ) et le nombre moyen d'odorants par groupe était de 3 ( $\pm 1$ ). Aucun sujet n'a déclaré rencontrer de difficulté à sentir les odorants, même en fin d'expérience. Tous les sujets ont détecté les odorants et les ont perçus comme différents les uns des autres.

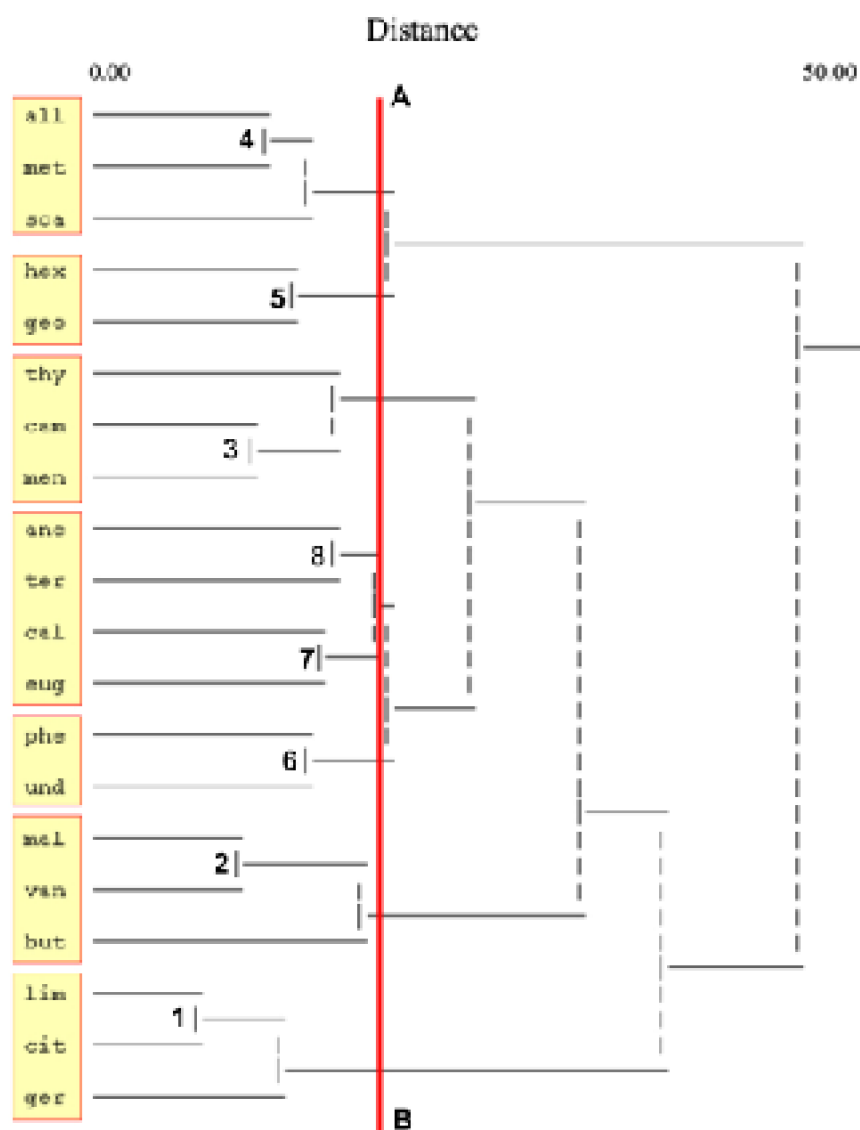
L'analyse des taxinomies du groupe « sujet » (regroupant les 25 sujets de l'ordonnancement A et les 25 autres de l'ordonnancement B), en fonction des catégories formées, permet de constater que tous les sujets se regroupent à un même niveau de l'arborescence. Ceci indique que le groupe de sujets peut être considéré comme

homogène quant aux catégories formées. Ceci nous autorise donc à regrouper les données afin d'obtenir des résultats sur 50 sujets.

On note d'abord que sur l'ensemble des sujets, 378 groupes d'odeurs différents ont été formés, comptant entre 1 et 10 éléments (fig. 3), avec une très large proportion de groupes comprenant 1, 2 et 3 odeurs par rapport aux groupes composés de 4, 5, 6, 7, 8 et 10 odeurs  $F[49,8=36,082, p < .0001]$ .



*Fig. 3 : Répartition de l'effectif des groupes selon le nombre d'odeurs qui les composent. On remarque un grand nombre de groupes composés de 1, 2 et 3 odeurs par rapport aux groupes composés de 4, 5, 6, 7, 8 et 10 odeurs.*



*Fig. 4 : Résultat du traitement par taxinomie hiérarchique ascendante de la matrice de cooccurrences obtenue d'après les regroupements réalisés par les 50 sujets.*

Les odorants (symbolisés par leur trois premières lettres) sont regroupés au fur et à mesure que l'on parcourt l'arbre de la gauche vers la droite. La distance horizontale entre deux éléments, odorants ou groupes d'odorants, et le nœud qui les réunit en symbolise la proximité. Ainsi, les branches portant LIM et CIT se regroupent rapidement (1), reflétant leur étroite proximité. A l'inverse, UND et MAL ne se relient qu'à un niveau élevé de l'arborescence ce qui illustre leur grande différence. Au fur et à mesure que l'on parcourt l'arbre, les groupes d'odeurs se réunissent. Au niveau de regroupement formant 7 groupes (symbolisé par l'axe rouge vertical AB), on obtient les regroupements indiqués par les cadres jaunes à gauche de la figure. [Codes odeurs, voir tableau 1].

La taxinomie hiérarchique ascendante que nous avons effectuée sur la matrice de cooccurrences des 20 odorants regroupés par les 50 sujets est présentée sur la figure 4. En parcourant cet arbre de la gauche vers la droite, on peut remarquer que les composés les plus proches entre eux sont :

Limonène et Citral	1.
Maltol et Vanilline	2.
Camphre et Menthol	3.
Dissulfure d'allyle et Méthional	4.
Cis-3-Hexenol et Géosmine	5.
Gamma Undecalactone et Alcool Phényle Ethylique	6.
Calone et Eugéno	7.
Anéthol et Acétate de terpinyle	8.

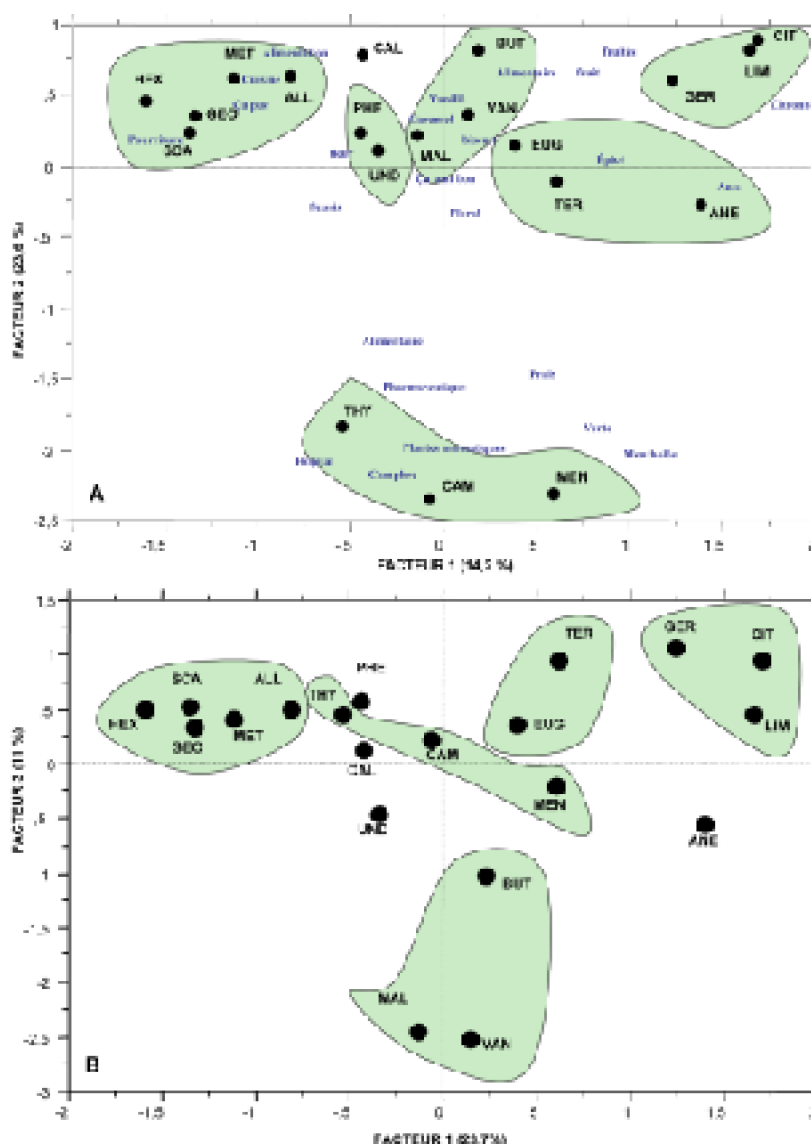
Ces paires et triplets s'associent les uns aux autres comme par exemple (7 : Calone + Eugéno) + (8 : Anéthol + Acétate de terpinyle) ou agrègent un nouvel élément comme par exemple (4 : Dissulfure d'allyle + Méthional) + Scatole.

En considérant le niveau à 7 branches symbolisé par l'axe AB (en rouge sur la figure 6) qui correspond au nombre moyen de catégories réalisées par les sujets, on obtient les groupements suivants :

- Limonène+ Citral + Géranio
- Maltol + Vanilline + Butyrate d'éthyle
- Alcool phényle éthylique + Gamma undecalactone
- Anéthol + Acétate de terpinyle + Calone + Eugéno
- Thymol + Camphre + Menthol
- Cis-3-hexenol + Géosmine
- Dissulfure d'allyle + Méthional + Scatole

Le nuage des points représentatif des odeurs construit sur la base des regroupements de substances lors de l'épreuve de catégorisation indique que plusieurs dimensions régissent l'espace des odeurs présentées. Les trois premiers facteurs orthogonaux expliquent à peine 48 % de la variance totale. Le premier facteur ne porte que 23,7 % de la variance, le second 14,2 % et le troisième 11 %. Les plans factoriels construits avec les facteurs 1 et 2 d'une part, et les facteurs 1 et 3 d'autre part, sont présentés sur la figure 5 ci-après.





**Fig. 5 :** – **A et B** – Représentation de deux plans factoriels issus de l'analyse des données de catégorisation et de la description des groupes.

Les projections des 20 odorants sont représentées en noir (**A et B**) et les qualificatifs les plus fréquents utilisés pour décrire les groupes en bleu (**A**). Les grands groupes d'odorants sont figurés par les ensembles verts. On note que le premier facteur isole trois composés du reste des odorants : le limonène (LIM), le citral (CIT) et le géraniol (GER) qu'il oppose à un groupe constitué de l'hexenol (HEX), le scatole (SCA), le méthional (MET), le dissulfure d'allyle (ALL) et la géosmine (GEO) que l'on peut considérer comme le pôle des odeurs désagréables. Le deuxième facteur isole le thymol (THY), le camphre (CAM) et le menthol (MEN) et les oppose au reste des odorants et le troisième isole le maltol (MAL), la vanilline (VAN) et le butyrate d'éthyle (BUT). Le plan défini par les facteurs 1 et 2 (**A**) explique près de 38 % de la variance totale, celui défini par les facteurs 1 et 3 représente 34 % de cette variance. [Codes odeurs, voir tableau 1].

L'analyse factorielle des correspondances effectuées sur les regroupements réalisés par les 50 sujets confirme les proximités décrites par la taxinomie. La projection des

classes taxinomiques montre les différents groupes dans l'espace factoriel :

- Le premier facteur oppose deux groupes d'odorants : [HEX, SCA, MET, GEO, ALL] et [GER, LIM, CIT].
- Le second facteur extrait 3 odorants : [THY, CAM et MEN] du reste des odorants.
- Le troisième facteur isole [MAL, VAN et BUT] de tous les autres odorants.
- Le quatrième extrait UND et PHE qu'il oppose à [MET, ALL et SCA].

Les descriptions que les sujets ont produites pour définir les groupes qu'ils ont formés permettent de qualifier les groupes formés.

- Le groupe contenant MET, ALL et SCA est qualifié par les expressions suivantes :
  - « Ça pue »
  - « Aliments putréfiés »
  - « Repoussant »
- Le groupe constitué de LIM, CIT et GER est décrit comme :
  - « Acide »
  - « Fruité »
  - « Citronné »
- Le groupe MEN, CAM et THY est décrit comme :
  - « Mentholé »
  - « Pharmaceutique »
  - « Hôpital »
- Le groupe UND et PHE est décrit comme :
  - « Floral »
  - « Fleur »
  - « Parfums »
- Le groupe MAL, VAN et BUT est décrit comme :
  - « Biscuit »
  - « Caramel »
  - « Gâteau »

- Et enfin, le groupe constitué de HEX et GEO est perçu comme :
  - « Sous-bois »
  - « Jardin »
  - « Terre »

### 1.1.3 Discussion

---

La procédure que nous avons utilisée a permis aux sujets de s'affranchir de certaines contraintes relatives aux critères de catégorisation comme par exemple l'absence d'un indice sémantique (nom de l'odeur) mais aussi la liberté du nombre de groupes et du nombre d'odeurs par groupes. De plus pour décrire les groupes, les sujets s'exprimaient par écrit, ce qui leur a permis de se laisser aller à un type de description que l'on ne donne pas forcément à l'oral (autocensure due au caractère intime généré par la perception des odeurs).

D'autres points sont à remarquer : Afin de limiter le phénomène d'adaptation (Köster, 1991), il nous a paru normal d'imposer un temps de pause de 20 secondes entre chaque flairage. Cependant, il faut préciser que ce temps imposé est légèrement en dessous de la limite imposée par Köster pour s'assurer d'une remise à zéro de l'organe récepteur, durée estimée à environ 30 secondes. Mais il fallait aussi prendre en considération l'aspect mnésique de la perception olfactive, c'est-à-dire leur capacité de rétention de l'information sensorielle. En effet, pour s'assurer que les sujets puissent comparer les odeurs entre elles, nous n'avons imposé qu'un intervalle de temps entre flairages relativement court. Toutefois, dans des épreuves telles que la reconnaissance ou l'identification des odeurs, il est nécessaire de prendre en considération d'avantage la composante mémorielle que le phénomène d'adaptation sensorielle (Fritjers, 1977). Il ne s'agit toutefois ici que d'un compromis et nous n'avons pas testé son opportunité dans nos résultats.

En se basant sur la totalité des variables que nous avons mesurées (nombre de groupes formés, nombre d'odeurs par groupe), les sujets qui ont participé à la tâche de catégorisation se sont montrés homogènes. Aucun sous-groupe n'a été mis en évidence sur la base des résultats des regroupements réalisés. Les 7 groupes qui sont apparus à l'issue de la taxinomie hiérarchique ascendante constituent un noyau catégoriel autour duquel les sujets ont finalement peu varié.

La taxinomie hiérarchique associée à l'analyse factorielle des correspondances nous permet d'expliquer la quasi-totalité des regroupements réalisés. De plus, en superposant les descripteurs les plus marquants des catégories, nous faisons ressortir les grands traits qui organisent l'espace des odeurs.

Tout d'abord, un axe hédonique caractérisé oppose les odeurs perçues comme désagréables (MET, ALL, SCA étendu à GEO et HEX) des odeurs dites agréables symbolisées par CIT, GER, LIM et par extension par ANE.

Ensuite, les dimensions organisatrices deviennent « secondaires » et les qualificatifs

utilisés pour décrire les groupes nous permettent de penser que l'axe 2 isole les odeurs provoquant une sensation de fraîcheur où la note mentholée joue un rôle important et que l'axe 3 isole les odeurs considérées comme douces dans laquelle une note « sucrée », même s'il s'agit d'un abus de langage ou simplement d'une association d'idées (doux au nez = sucré au goût), joue un rôle primordial.

En comparant l'organisation du champ des odeurs de Jaubert à l'organisation de l'espace olfactif tel que les sujets de notre étude l'ont perçu, nous pouvons penser que des sujets naïfs sont tout à fait capables de réaliser des catégories d'odeurs sur des bases perceptives et qu'ils semblent également aptes, avec plus ou moins de précisions, à en identifier la famille.

En effet, en sélectionnant les vingt odorants parmi les 45 présents dans le champ des odeurs, nous avons couverts au moins 8 pôles et dominantes sur 9 du « champ des odeurs » (tous sauf le pôle amine, voir figure 1) : les pôles hespéridé, soufré, pyrogéné, doux et les dominantes fruitée, grasse et sylvée.

Nous avons remarqué que les sujets testés ont été capables de réaliser 7 groupes en moyenne que nous avons pu attribuer à différentes catégories (à l'aide des descriptions fournies) que nous avons détaillées dans la partie résultats.

Comme dans d'autres études, nos résultats montrent que la dimension principale qui organise cet espace olfactif est un axe hédonique, qui permet dans un premier temps une première partition du lot d'odeurs fournies (Schiffman, 1977). Ensuite, les sujets cherchent à scanner une nouvelle fois les odorants de chacune de deux « méta-catégorie » afin d'effectuer de nouvelles partitions. Habituellement, les deuxième et troisième axes organisateurs concernent l'intensité et la familiarité des odeurs (Rouby & Sicard, 1997), mais dans notre expérience, nous avons tenté de nous affranchir de ces variables en précisant aux sujets de ne pas les considérer dans leurs jugements. Enfin, un quatrième organisateur serait qualitatif et permettrait la création de catégories selon des critères plus élaborés. Il semble que la présence de certains odorants, extrêmement familiers, ait permis aux sujets d'articuler leur mode opératoire. Par exemple, la présence du menthol, du citral et de la vanilline permet la création d'au moins 3 sous-catégories du côté des odeurs agréables, et celle du scatole et du méthional induit 2 sous-catégories du côté des odeurs désagréables.

Nous nous devons néanmoins de remarquer que les sujets rencontrent plus de difficultés à décrire les odeurs qu'à les regrouper selon leurs ressemblances et bien que leurs productions verbales nous permettent de retracer les grandes lignes de l'organisation des odeurs, une importante variabilité des descriptions est à souligner. En effet, si la terminologie fournie par Jaubert pour définir les différentes catégories du « champ des odeurs » a été judicieusement choisie, et à juste titre, n'oublions pas que ce choix a été effectué par des professionnels ; nous avons pu vérifier que ce choix ne semble pas spontané pour des sujets non entraînés.

### 1.1.4 Conclusions générales et perspectives d'étude

---

Malgré l'évidence d'une organisation de l'espace des odeurs en grandes catégories telles

qu'elles sont décrites par le champ des odeurs de Jaubert *et al.* (1987), nous avons constaté qu'il existe bien des pôles olfactifs, dominés par une note odorante majoritaire (fruitée, fleurie, ...etc.), à partir desquels les sujets peuvent construire une « pensée olfactive ». Des sujets n'ayant qu'une connaissance implicite, fruit de leur propre expérience, sont capables de réaliser des catégories odorantes sur la base des ressemblances « perceptives » entre les odeurs.

Nous avons cependant souligné l'importante variabilité des descriptions. Bien que l'émergence d'un consensus global dans la population testée soit possible, il est apparu que la terminologie employée dans le champ des odeurs n'est pas superposable à celle produite par des sujets non entraînés.

Quelles sont les grandes règles didactiques qui nous permettent de construire une cartographie cognitive de l'espace des odeurs ? Pour répondre à cela, nous pensons qu'il faut chercher du côté des odeurs les plus saillantes, des « balises olfactives » qui organiseraient l'ensemble des odeurs autour d'elles et qui nous permettraient de regrouper les odeurs qui possèdent un « air de famille ». Ces balises pourraient, dans certains cas au moins, constituer un prototype. Le problème étant que la prototypie tiendrait plus aux objets supports de l'odeur qu'à la sensation olfactive elle-même, reste à trouver la méthodologie adaptée pour tester cette hypothèse.

Très récemment, une étude a montré que les odeurs les plus saillantes d'un point de vue émotionnel (les plus agréables et les plus désagréables) étaient significativement plus faciles à identifier. Ce nouveau résultat permet de confirmer l'importance de la valence émotionnelle des odeurs perçues dans le processus de catégorisation et d'un point de vue plus global, dans la fonction cognitive que certains auteurs ont nommé « métamémoire » (Chu & Downes, 2000; Jönsson & Olsson, 2003; Jönsson *et al.*, 2005; Jönsson *et al.*, 2005) dans laquelle les odeurs, entre autres, sont rattachées aux souvenirs individuels de chaque être humain.

Ainsi, il serait également intéressant de tester l'influence des connaissances sémantiques relatives aux odeurs (qui joue un rôle primordial en perception et dans toute la cascade des processus cognitivo-perceptifs) sur la catégorisation des odeurs et également sur leur caractérisation.

**Expérience 2. Influence des connaissances sémantiques sur la catégorisation des odeurs.**

## 2.1 EXPERIENCE PRINCIPALE

### 2.1.1 Objectifs de l'étude

---

Notre expérience commune des odeurs se passe le plus souvent en dehors de notre conscience. Les odeurs sont fréquemment subies, parfois appréciées, et moins souvent nommées. De nombreux auteurs ont souligné la difficulté et le caractère approximatif de

la dénomination des odeurs, et la relation entre les représentations mentales des odeurs et le langage est toujours problématique (pour une revue voir (Richardson & Zucco, 1989).

L'analyse linguistique des verbalisations associées aux odeurs en français (David, 1997, 2002) montre qu'elles comportent peu de noms spécifiques, se référant à l'odeur comme étant une propriété d'un « objet source » (odeur de...), et beaucoup plus souvent encore à son effet sur le locuteur. Les odeurs ne se présentent donc pas comme des entités abstraites mais :

1. Soit comme des effets inséparables de la subjectivité de celui qui perçoit.
2. Soit comme des propriétés des objets qui les engendrent.

Un corollaire du marquage subjectif est l'importance de la dimension hédonique dans la perception des odeurs : Toutes les études qui ont tenté de faire apparaître une organisation des odeurs à partir de leurs similitudes perceptives montrent que celles-ci jouent un rôle secondaire par rapport à un organisateur hédonique principal, qui oppose les mauvaises odeurs aux autres (Rouby & Bensafi, 2002). Selon Berglund (Berglund *et al.*, 1973), les espaces de similitude entre odeurs sont tellement différents d'un individu à l'autre que la seule dimension commune est hédonique ; par ailleurs, aucune loi « générale » régissant l'organisation perceptive n'a été mise en évidence, même si la physicochimie permet d'en éclaircir certains aspects (Chastrette, 2002).

Pourtant, on ne peut pas affirmer que les odeurs sont dépourvues d'une organisation sémantique plus élaborée que la dimension hédonique, et l'on sait par ailleurs que sous une forme ou une autre, les connaissances sémantiques participent non seulement à la mémorisation ou à l'identification (Larsson, 1997), mais aussi à la discrimination des odeurs (De Wijk & Cain, 1994).

Si l'existence de connaissances sémantiques associées aux percepts olfactifs ne fait pas de doute, l'organisation de ces connaissances est très mal connue. Les travaux déjà cités laissent supposer que cette organisation est très variable d'un sujet à l'autre ; contrastant avec le domaine visuel où des représentations partagées, collectives et sur-apprises sont très reproductibles et organisées en catégories (Rosch *et al.*, 1976). On constate que le domaine olfactif est moins structuré et « collectivement » partagé, et c'est d'ailleurs pour pallier cette difficulté que l'analyse sensorielle a développé ses méthodes.

Dans cette étude nous avons voulu, grâce à une tâche de catégorisation, comparer une situation où seule l'information perceptive est disponible, avec une situation où seuls les noms d'odeurs sont fournis. Les recherches en psychologie cognitive ont montré que la perception ne dépend pas seulement de l'entrée sensorielle actuelle (« bottom-up<sup>1</sup> ») mais aussi des connaissances déjà mémorisées (« top-down<sup>2</sup> »).

Notre hypothèse était que l'organisation des catégories serait différente dans les deux situations, de même que leur expression linguistique, traduisant un effet «top-down»

<sup>1</sup> Bottom-up fait référence à une voie ascendante selon laquelle la perception influence la cognition.

<sup>2</sup> Top-down fait référence à l'influence de la cognition sur la perception olfactive selon une voie ascendante.

des connaissances sur la catégorisation produite.

Parallèlement, nous avons voulu comparer deux situations de catégorisation : l'une à base perceptive, avec une situation où les mêmes odorants étaient étiquetés d'un nom de source odorante.

### 2.1.2 Matériel & méthode

---

- Sujets

Soixante-six sujets féminins uniquement (car les femmes possèdent une meilleure sensibilité olfactive) répartis en 3 groupes de 22 sujets ont participé à l'expérience. Leur moyenne d'âge était de 24 ans ( $\pm$  4.5 ans) et 23 d'entre elles étaient fumeuses. Sur 66 sujets, 58 étaient droitiers, 4 gauchères et 2 ambidextres.

- Stimuli

Trois jeux de matériel expérimental à classer ont été utilisés :

1. Seize flacons contenant chacun un odorant familier, chaque flacon étant étiqueté avec le nom de l'odeur, c'est-à-dire, le nom de la source à laquelle l'odeur fait référence.
2. Seize flacons contenant chacun l'un de ces 16 mêmes odorants étiquetés uniquement avec un numéro (code).
3. Seize étiquettes portant chacune l'un des « noms » utilisés en 1).

Les seize odorants utilisés sont tous des arômes commerciaux.

**Tab. 4 :** Liste des composés odorants utilisés dans les expériences de catégorisation et de caractérisation.

Notes odorantes	Dilutions (vol/vol)
Vanille	1/100
Lavande	1/100
Eucalyptus ☐	1/100
Fuel	1/100
Poisson	1/100
Violette	1/100
Ail	1/100
Herbe	1/100
Orange	1/100
Pomme	1/100
Cannelle	1/100
Citron	1/100
Anis	1/100
☼ Mûre ☐	1/10 ☼
Chlorophylle ☐	1/100
Menthe	1/100

Les composés sont listés avec leur rapport de dilution volume à volume (vol/vol). Hormis la mûre (☼) qui a été diluée dans du diéthylphtalate (Sigma), les odorants ont été dilués dans de l'huile minérale (Sigma). Trois arômes sur les 16 présentés ne sont constitués que d'une seule substance chimique pure (☐), c'est le cas de « Eucalyptus » (1,8-cinéole), « Mûre » (pentadécalactone) et « Chewing-gum » (L-carvone). [Ce jeu d'odeurs a été proposé par Sicard et al. en vue de la préparation d'un test olfactif clinique].

### Procédure expérimentale

Ce matériel expérimental introduit 2 variables :

- Présence ou absence de stimulus olfactif ;
- Présence ou absence du nom de la source odorante dans les conditions avec stimulus olfactif.

Les différentes conditions seront désignées comme suit :

**Tab. 5 :** Présentation des 3 conditions expérimentale. Dans la condition « avec noms », les odorants sont présentés accompagnés du nom de la source auxquels ils font référence ; dans la condition « perception », seuls les odorants sont présentés et dans la condition « imagerie », seuls le nom des sources odorantes est fourni sur des étiquettes.

Avec stimulus olfactif		Sans stimulus olfactif
<b>'Avec Noms'</b> Identification des odorants par le nom de la source auxquels ils se réfèrent.	<b>'Perception'</b> (sans les noms) Identification des odorants par un numéro de code	<b>'Imagerie'</b> ('étiquettes') Identification des stimuli par le nom de la source



Dans les conditions « Avec noms » et « Perception », nous avons demandé aux sujets d'effectuer une tâche de catégorisation libre : il s'agissait de regrouper les odeurs qui se ressemblaient en fonction de « l'air de famille » entre les odeurs. Dans la condition « Imagerie », les regroupements devaient être réalisés sur la base des ressemblances des odeurs évoquées par le nom indiqué sur l'étiquette (généralement, le nom de la source odorante elle-même : par exemple le nom 'Pomme' pour 'odeur de pomme'). Les consignes données aux sujets dans chaque condition expérimentale sont présentées ci-après :

- Consigne donnée aux sujets dans la condition expérimentale « **Avec Noms** » :

“ Voici un ensemble de 16 flacons étiquetés, contenant chacun une odeur différente; nous vous demandons de les regrouper selon leurs ressemblances. Vous pouvez constituer autant de groupes que vous le souhaitez. Un groupe peut comprendre autant de flacons que vous le voulez.

Vous pouvez flairer un même flacon plusieurs fois, mais il ne doit pas y avoir plus d'un seul flacon ouvert au même moment.

Quand vous aurez constitué les groupes, inscrivez sur la feuille jointe les noms des flacons qui le constituent, et une brève description de chaque groupe ”

Après la tâche de catégorisation et de description des groupes réalisés, les sujets devaient flairer à nouveau chaque flacon afin d'évaluer plusieurs paramètres tels que l'intensité, la familiarité, la typicité et l'hédonicité en attribuant un chiffre entre 1 (pas du tout intense, familier...) et 9 (extrêmement intense, familier...).

- Consigne donnée aux sujets dans la condition expérimentale « **Perception** » :

“ Voici un ensemble de 16 flacons numérotés, contenant chacun une odeur différente; nous vous demandons de les regrouper selon leurs ressemblances. Vous pouvez constituer autant de groupes que vous le souhaitez. Un groupe peut comprendre autant de flacons que vous le voulez.

*Vous pouvez flairer un même flacon plusieurs fois, mais il ne doit pas y avoir plus d'un seul flacon ouvert au même moment.*

*Quand vous aurez constitué les groupes, inscrivez sur la feuille jointe les noms des flacons qui le constituent, et une brève description de chaque groupe ”*

Après la tâche de catégorisation et de description des groupes réalisés, les sujets devaient flairer à nouveau chaque flacon afin d'évaluer plusieurs paramètres tels que l'intensité, la familiarité et l'hédonicité en attribuant un chiffre entre 1 (pas du tout intense, familier...) et 9 (extrêmement intense, familier...), puis tenter d'identifier par un ou plusieurs termes, l'odeur présentée dans les flacons. Pour finir, les sujets devaient évaluer la typicité de l'odeur par rapport au nom de la source réelle de l'odeur fournie.

- Consigne donnée aux sujets dans la condition expérimentale « **Imagerie** » :

“ Voici un ensemble de 16 étiquettes portant des 'noms d'odeurs', nous vous demandons de les regrouper selon la ressemblance des odeurs qu'elles vous suggèrent.

Vous pouvez constituer autant de groupes que vous le souhaitez.

Un groupe peut comprendre autant d'odeurs que vous le voulez.

Quand vous aurez constitué les groupes, inscrivez sur la feuille jointe les noms des étiquettes qui le constituent, et une brève description de chaque groupe. ”

Après la tâche de catégorisation et de description des groupes réalisés, les flacons odorants utilisés dans la consigne « **Perception** » étaient fournis aux sujets pour leur permettre d'évaluer l'intensité, la familiarité, l'hédonicité des odeurs et qu'ils les identifient. Enfin, ils devaient évaluer la typicité selon le même principe que dans la condition « **Perception** ».

**Tab. 6 : Récapitulatif des trois conditions expérimentales.**

Condition	Tâche 1	Tâche 2	Tâche 3	Tâche 4
Perception avec noms	Catégorisation Flacons odorisés + Nom de la source	Description des groupes	- Intensité - Familiarité - Hédonicité - Typicité	
Perception seule	Catégorisation Flacons odorisés numérotés	Description des groupes	- Intensité - Familiarité - Hédonicité + Identification des odeurs	- Typicité ( <i>par rapport au nom de la source</i> )
Imagerie olfactive	Catégorisation Étiquettes 'nom de la source'	Description des groupes	- Intensité - Familiarité - Hédonicité	Identification des odeurs ( <i>flacons odorants numérotés</i> ) Typicité ( <i>flacons + nom de la source</i> )

Dans la condition Perception « Avec noms », les sujets devaient regrouper les odeurs selon leurs ressemblances, puis décrire chacun des groupes réalisés, ensuite évaluer l'intensité, la familiarité, l'hédonicité et la typicité des odeurs par rapport au nom de la source odorante à laquelle l'odeur faisait référence. Dans la condition « Perception seule », les 2 premières tâches étaient identiques à celles de la condition « Avec Noms » mais en plus des 4 paramètres à évaluer, les sujets devaient tenter d'identifier chacune des odeurs après quoi nous fournissions les noms des sources odorantes pour l'évaluation de la typicité. Dans la condition « Imagerie olfactive », les sujets ne réalisaient les groupes qu'à partir des noms des sources odorantes inscrites sur des étiquettes. Nous ne fournissions les flacons odorants numérotés qu'après la catégorisation et la description des groupes achevés, enfin, ils terminaient par l'évaluation de la typicité avec les flacons étiquetés des noms de sources odorantes.

### · Traitements des résultats

#### - Analyse des classifications réalisées :

Pour chaque condition, le nombre de groupes total a été comptabilisé ainsi que le nombre de groupes constitués d'une seule odeur ou étiquette (élément isolé). Ce nombre

de classes uniques a été utilisé par la suite comme un indice de difficulté de regroupement : un sujet qui a des difficultés à regrouper deux odorants aura tendance à réaliser deux groupes distincts restreints plutôt qu'un seul groupe plus global.

- Arborisation des regroupements réalisés :

Les résultats de la tâche de catégorisation ont été traités par un programme informatique (Guénoche & Garreta, 2001) qui génère une organisation topologique des regroupements émergeant à partir de données individuelles. La méthode de calcul est fondée sur les arbres de similarité additifs, qui évaluent des scores d'association de paires d'objets (Sattah & Tversky, 1977) et représentent les objets comme les feuilles d'un arbre de manière à ce que la distance entre deux feuilles reflète la ressemblance entre les deux objets. Le logiciel fournit des critères permettant d'évaluer la qualité de la représentation fournie. Dans cette expérience, par souci de précision, nous n'avons considéré comme « robuste » que les regroupements reproduits avec 95 % de certitude ou plus.

- Analyse des verbalisations :

Nous avons mené une analyse sémantique et une analyse référentielle sur l'ensemble des données. La première est une analyse linguistique, qui permet d'appréhender de quelle manière les sujets parlent ; la seconde, à base psycholinguistique, est une analyse de contenu, elle permet d'appréhender de quoi les sujets parlent.

· Analyse des expressions linguistiques de types sémantiques

L'analyse sémantique que nous avons menée est fondée sur l'hypothèse des « types » sémantiques, proposée par Godard & Jayez (Godard & Jayez, 1993, 1996, 1999), à la suite de Vendler (Vendler, 1967), et Marandin (Marandin, 1984, 1984, 1992). On peut retenir de la typologie proposée par les auteurs et du travail mené par Flaux et Van de Velde (Flaux & Van de Velde, 2000) les types suivants : le type « événement » avec le sous-type « activité », le type « objet » avec deux sous-types « objets naturels », « objets artefactuels », le type « propriété », le type « période ».

Dans ce corpus particulier, nous n'avons finalement considéré que les types « propriété » (douceur, fraîcheur) et « objet » (vanille, fruit, médicament), lequel rassemble deux sous-types : le type « objets naturels » (fleur, cannelle, vanille, fruit) et le type « objets artefactuels » (carburant, parfum, bonbon, médicament). Les adjectifs relèvent eux du type « propriété » (agréable, frais, fort, comestible). Signalons que « propriété » et « objet » sont les deux types sémantiques les plus représentés (plus de 90 % des occurrences dans les trois conditions), les autres types (« événement » (picotement), « période » (printemps), etc.), apparaissent de manière marginale.

· Analyse des expressions linguistiques de types référentiels

L'analyse référentielle consiste à ranger les termes en fonction des domaines de connaissance auxquels ils sont associés. Les catégories ont été isolées sur la base des hypothèses que nous souhaitons explorer : « dimension » hédonique, « dimension »

d'intensité, classification des odeurs en prise avec la classification des objets et des pratiques auxquelles elles sont associées.

Dans ce corpus, nous avons distingué les catégories suivantes : « hédonique » (agréable, douceur, dégoût, écoeurant, piquant), « intensité » (fort, faible, léger), « nature » (citron, agrume, floral, campagne, maritime), « alimentation » (bonbon, repas, assaisonnements), « pollution » (essence, pot d'échappement), « frais » (rafraîchissant, qui dégage le nez).

Les catégories « hédonique », « intensité », « nature », « alimentation » sont les plus représentées (au moins 10 % d'occurrences dans une des trois conditions, et plus de 72 % du total).

Les effets de la condition (3 conditions) sur les regroupements réalisés et sur les types d'expressions linguistiques effectuées sur ces regroupements par les sujets ont été testés à l'aide d'analyses de variance (ANOVA). Les comparaisons de moyennes (a posteriori) ont systématiquement été réalisées à l'aide du test *t* de Student avec un seuil de significativité fixé à 5%.

- Analyse des évaluations psychophysiques :

Les moyennes des évaluations psychophysiques (Intensité, Familiarité, Hédonicité, Typicité) ont été calculées pour l'ensemble des sujets dans les trois conditions.

- Analyses Multivariées (MDS : Multi Dimensional Scaling) :

Cette méthode a été introduite par Shepard (Shepard, 1962) et Kruskal (Kruskal, 1964) et permet de représenter une configuration spatiale des stimuli à partir des cooccurrences entre stimuli au sein d'un même groupement. Cette matrice de cooccurrences est ensuite considérée comme une matrice de similitude et permet de projeter sur un plan la proximité entre les odorants. D'autre part, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre MDS et évaluations psychophysiques afin de déterminer les facteurs explicatifs des regroupements réalisés.

### 2.1.3 Résultats

---

- Expérience 1 : Condition « Perception » vs. « Imagerie »

**Tab. 7 :** Moyenne sur 22 sujets du nombre de groupes et du nombre classes uniques réalisées. Le nombre de groupes ainsi que le nombre de groupes composés d'un seul objet (odeur ou étiquette) n'est pas différent entre les deux conditions.

	Perception	Imagerie
Moyenne du nombre de groupes	7	7
Moyenne du nombre de classes uniques	51	53

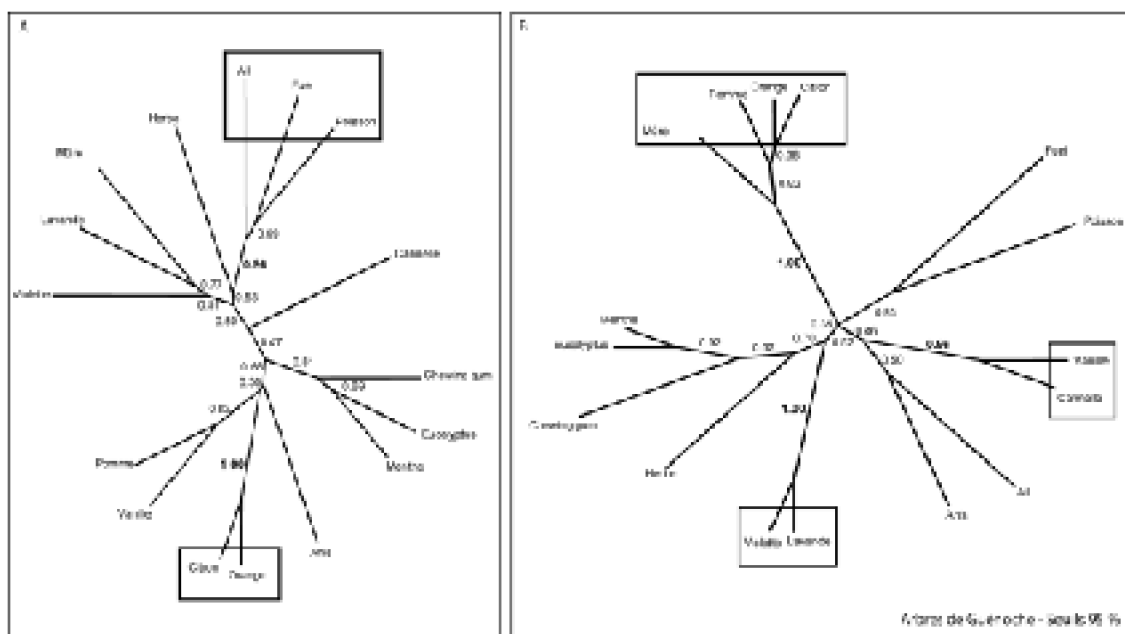


Fig. 6 : Arborisations de Guénoche relatives aux conditions « Perception » (A) et « Imagerie » (B).

Les arborisations réalisées à partir des regroupements effectués représentent les objets comme des feuilles sur un arbre, la distance entre les feuilles reflète le degré de ressemblance entre les objets. Dans la condition « Perception » (a), 2 groupes sont à remarquer : [Citron-Orange] et [Ail-Fioul-Poisson] alors que dans la condition « Imagerie » (b), 3 groupes ont été réalisés : [Violette-Lavande], [Pomme-Mûre-Orange-Citron] et [Vanille-Cannelle].

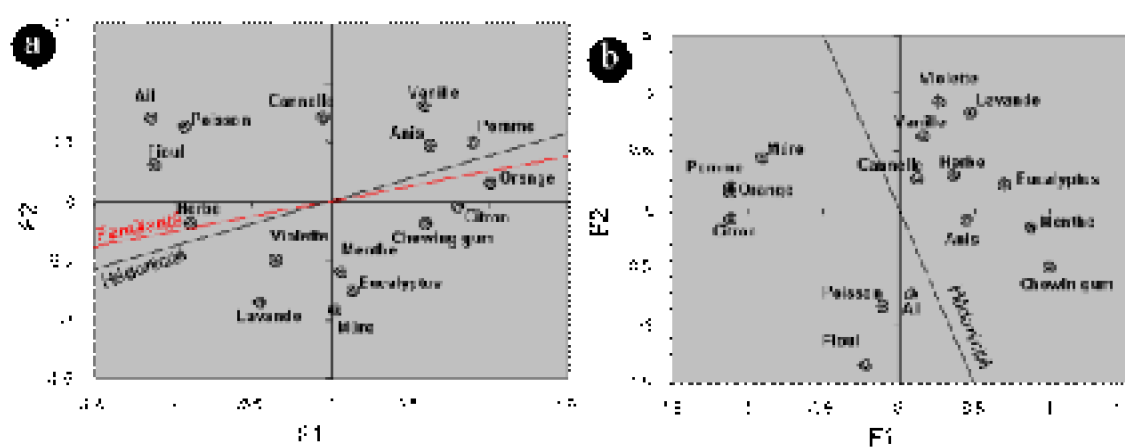


Fig. 7 : Les MDS permettent de représenter les odorants sur un plan et de corrélérer les dimensions organisatrices de l'espace aux variables psychophysiques qui expliquent le plus de la variance totale de la population testée. La représentation multidimensionnelle de la condition « Perception » (a) indique que le premier facteur organisateur de l'espace est corrélé aux dimensions d'hédonicité et de familiarité. En ce qui concerne la représentation de la condition « Imagerie » (b), le facteur 1 n'est corrélé qu'à la dimension hédonique.

L'arborisation de la condition « Perception » (fig. 6A) illustre les regroupements

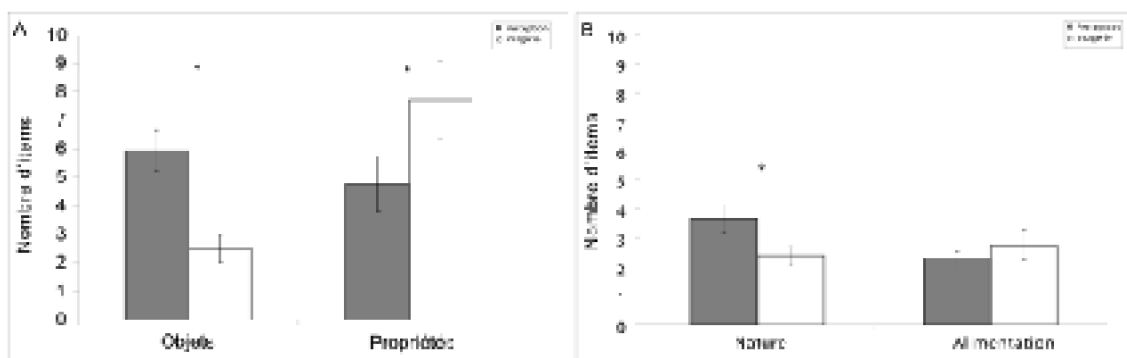
réalisés par les sujets ainsi que la puissance de ces regroupements. On peut voir que seulement 2 groupes sont robustes et supportés à 96 % par la représentation (Ail – Fioul – Poisson) et à 100 % (Citron - Orange). L'arborisation de la condition « Imagerie » (fig. 6B) montre que 3 groupes sont robustes. Deux groupes sont supportés à 100 % (Violette Lavande – Mûre – Pomme – Orange – Citron) et un groupe est supporté à 96 % (Vanille – Cannelle).

L'analyse multidimensionnelle effectuée confirme les premières observations en « Perception » (fig. 7a) et donne une proportion de variance expliquée de 96.85 %.

- Le facteur F1 :  $F[4,15]=21.772, p<0.0001$  est corrélé à la dimension hédonique avec  $t = 5.057, p<0.00041$  et Familiarité avec  $t=2.276, p<0.044$ .
- Les facteurs F2 :  $F[4,16]=1.385, p>0.05$  et F3 :  $F[4,15]=0.551, p>0.05$  ne sont pas corrélés significativement à une des dimensions psychophysiques.

Dans la condition « Imagerie » (fig. 7b), la proportion de variance expliquée atteint 94.96 %.

- Le facteur F1 :  $F[4,16]=1.813, p>0.05$  n'est pas significativement corrélé à une des dimensions psychophysiques.
- Le facteur F2 :  $F[4,15]=5.512, p<0.011$  est corrélé à la dimension hédonique avec  $t=4.418, p<0.0011$ .
- Le facteur F3 :  $F[4,15]=0.371, p>0.05$  n'est pas significativement corrélé à une des dimensions psychophysiques.



**Fig. 8 :** Types d'expressions linguistiques utilisées dans les conditions « Perception » et « Imagerie ». En condition Perception, les sujets ont utilisé plus d'expressions de type sémantique objets alors qu'ils utilisent plus d'expressions de type sémantique propriétés dans la condition « Imagerie » (A). En (B), on remarque que les sujets font appel à des référents naturels pour décrire les odeurs seules (Perception).

L'analyse sémantique (fig. 8a) montre que les sujets ont utilisés des verbalisations différentes selon la condition expérimentale  $F[21,1]=8.794, p<.008$ ].

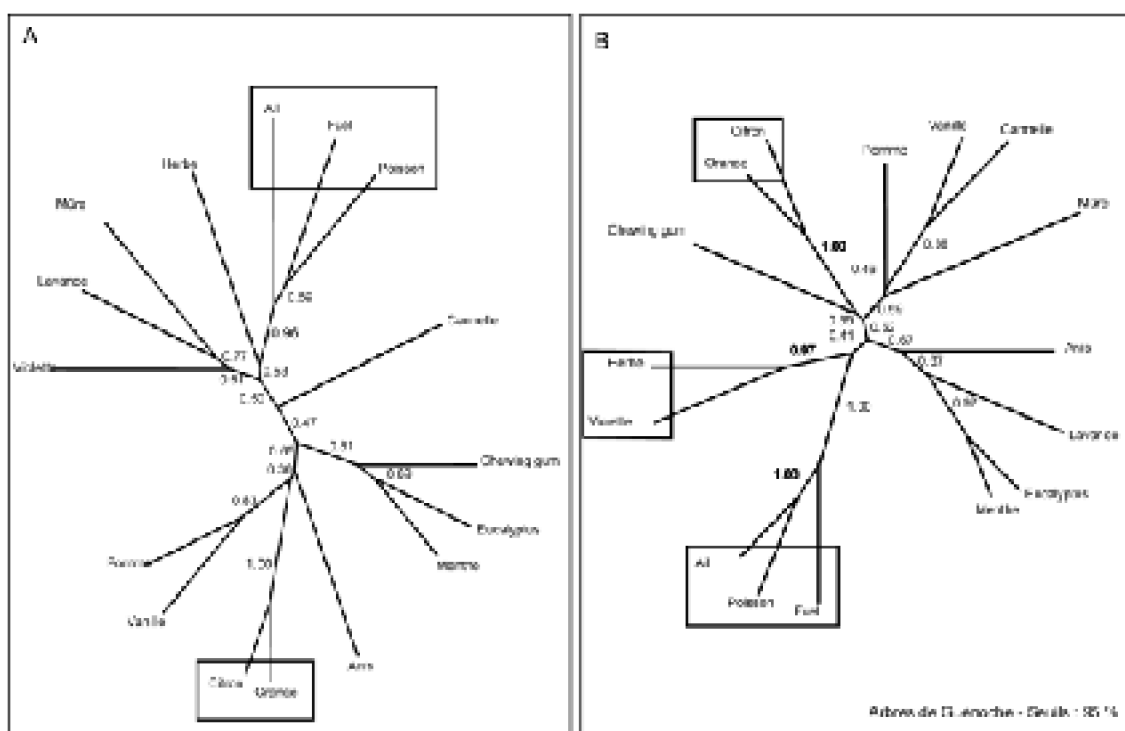
L'emploi de descripteurs sémantiques de type « objets » est plus important dans la condition « Perception » ( $t=4.012, p=0.0002$ ) tandis qu'ils ont utilisé plus de propriétés dans la condition « Imagerie » ( $t=-1.75, p=0.086$ ).

De la même manière, l'analyse référentielle (fig. 8b) a montré un effet de la condition sur la verbalisation  $F[21,1]=4.620, p<.05$ . Les sujets ont utilisé plus de référents de type « objets naturels » pour décrire les odeurs dans la condition « Perception » que dans la condition « Imagerie » ( $t=2.161, p=0.0364$ ).

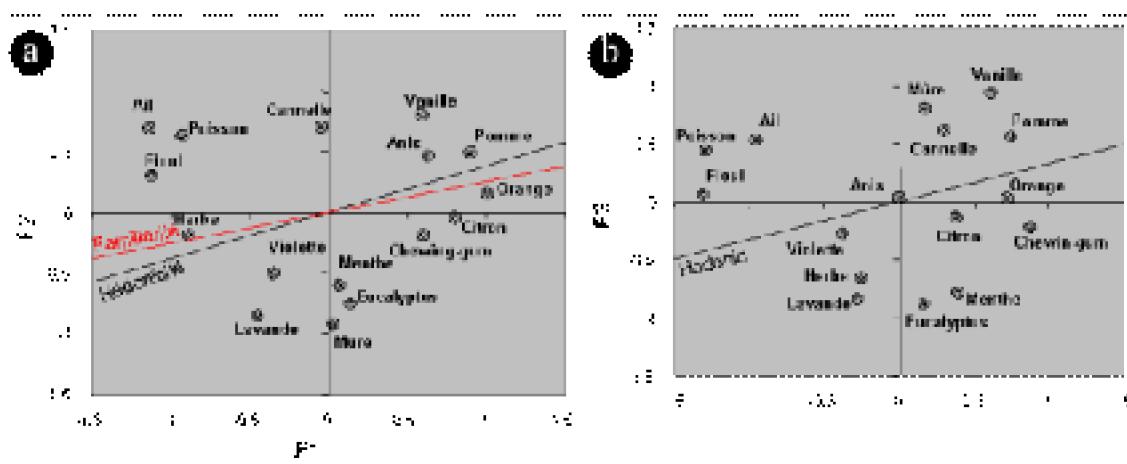
- Expérience 2 : Condition « Perception » et « Avec Noms »

**Tab. 8 :** Moyenne sur 22 sujets du nombre de groupes et du nombre classes uniques réalisées. Le nombre de groupes ainsi que le nombre de groupes composés d'un seul objet (odeur ou étiquette) est significativement plus petit dans la condition « Avec Noms ».

	Perception	Avec Noms
Moyenne du nombre de groupes	7	5
Moyenne du nombre de classes uniques	51	22



**Fig. 9 :** Arborisations de Guénoche relatives aux conditions « Perception » (A) et « Avec Noms » (B). Ces représentations réalisées à partir des regroupements effectués représentent les objets comme des feuilles sur un arbre, la distance entre les feuilles reflète le degré de ressemblance entre les odeurs. Dans la condition « Perception » (A), 2 groupes apparaissent : [Citron-Orange] et [Ail-Fioul-Poisson] alors que dans la condition « Avec Noms » (B), 3 groupes ont été constitués : [Violette-Herbe], [Orange-Citron] et [Ail-Fioul-Poisson].



**Fig. 10 :** Les MDS permettent de représenter les odorants sur un plan et de corrélérer les dimensions organisatrices de l'espace aux variables psychophysiques qui explique le plus la variance totale de la population testée. La représentation multidimensionnelle de la condition « Perception » (c) indique que le premier facteur organisateur de l'espace est corrélé aux dimensions d'hédonicité et de familiarité. En ce qui concerne la représentation de la condition « Imagerie », le facteur 1 n'est corrélé qu'à la dimension hédonique.

L'arborisation de Guénoche de la condition « Perception » (fig. 9a) illustre les regroupements réalisés par les sujets ainsi que la puissance de ces regroupements. On peut voir que seulement 2 groupes sont robustes et supportés à 96 % par ce type de représentation (Ail – Fioul - Poisson) et à 100 % (Citron - Orange). L'arborisation concernant la condition « Avec Noms » (fig. 9b) fait apparaître 3 groupes robustes. Deux d'entre eux sont supportés à 100 % (Citron – Orange) et (Ail – Fioul - Poisson) et un dernier supporté à 97 % (Herbe – Violette).

Les analyses multidimensionnelles réalisées permettent de confirmer les regroupements observés à l'aide des arborisations.

Dans la condition « Perception » (fig. 10a) donne une proportion de variance expliquée de 96.85 %.

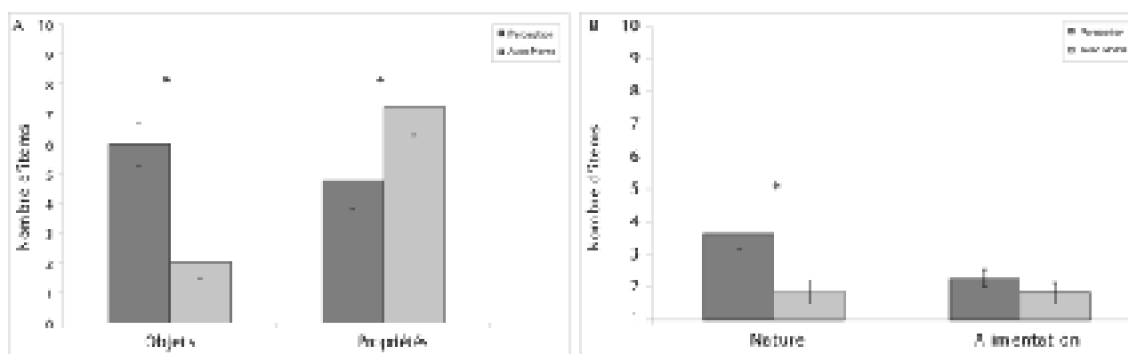
- Le facteur F1 :  $F[4,15]=21.772, p<0.0001$  est corrélé à la dimension hédonique avec  $t=5.057, p<0.00041$  et familiarité avec  $t=2.276, p<0.044$

- Les facteurs F2 :  $F[4,16]=1.385, p>0.05$  et F3 :  $F[4,15]=0.551, p>0.05$  ne sont pas significativement corrélés à une sdes dimensions psychophysiques.

Pour la condition « Avec Noms » (fig. 10b), la MDS montre que la proportion de variance expliquée atteint 91.015 %.

- Le facteur F1:  $F[4,15]=14.967, p<0.00021$  est corrélé à la dimension hédonique ( $t=5.607, p<0.00021$ ), mais les facteurs F2:  $F[4,15]=1.422, p>0.05$  et F3 :  $F[4,15]=0.899, p>0.05$  n'est pas significativement corrélé à une des dimensions psychophysiques.





**Fig. 11 :** Types d'expressions linguistiques utilisées dans les conditions « Perception » et « Avec Noms ». En « Perception » (a), les sujets ont utilisé plus d'expressions de type sémantique « objets » alors qu'ils utilisent plus d'expressions de type sémantique « propriétés » dans la condition « Imagerie ». En (b), on remarque que les sujets font appel à des référents naturels pour décrire les odeurs seules (Perception).

L'analyse sémantique (fig. 11a) indique que la condition « Avec Noms » ou « Perception » a un effet sur le type de verbalisation employée pour décrire les odeurs  $F[21,1=8.245, p<.008]$ . Les sujets utilisent d'avantage d'expressions linguistiques de type « objets » dans la condition « Perception » que dans la condition « Avec Noms » ( $t=4.512, p<0.0001$ ).

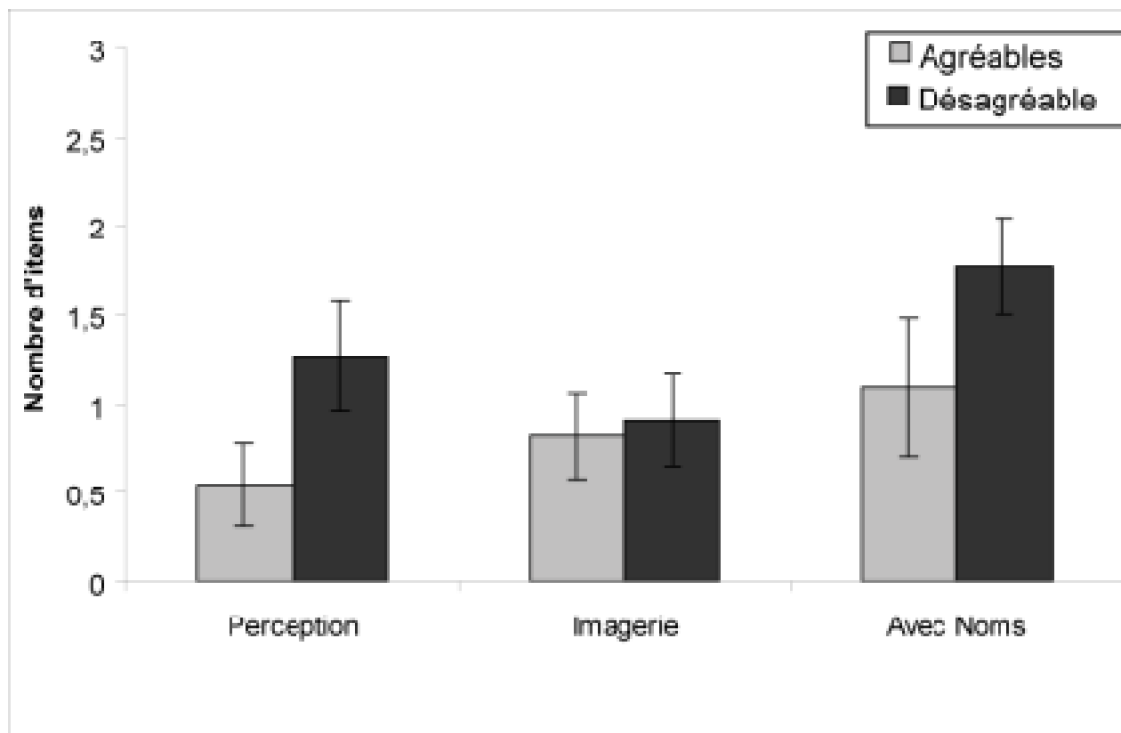
En ce qui concerne l'analyse référentielle (fig. 11b), bien que la double dissociation ne soit pas significative (la condition n'influence pas le type de référents choisi pour décrire les odeurs)  $F[21,1=3.959, p=.0598]$ , on trouve significativement plus de référents naturels dans la condition « Perception » que dans la condition « Avec Noms » ( $t=2.875, p<0.007$ ).

Parmi les référentiels utilisés pour décrire les odeurs, nous avons comptabilisé le nombre d'occurrences des référents « hédoniques » (positives : agréables ou négatives : désagréables) pour chaque condition. Un tableau de contingence a donc été calculé de manière à effectuer un test Chi2.

Notre hypothèse était que la fréquence d'utilisation des termes hédoniques était significativement différentes selon la condition expérimentale. Le Chi 2 calculé à partir de ces résultats pour  $N=66$  sujets et un degré de liberté  $df=2$  ( $X^2_{obs} = 2,49$ ) a été comparé au Chi 2 théorique ( $X^2_{thé} = 5,99$ , à un seuil de .05) de la table Chi2 et a confirmé notre hypothèse de départ. La condition expérimentale a un effet sur la fréquence de référents hédoniques utilisés pour décrire les odeurs.

**Tab. 9 :** Tableau de contingence sur le nombre d'occurrences de référents hédoniques pour les trois conditions expérimentales. Les nombres en gras représentent les fréquences d'occurrences observées et les chiffres en clairs sont les fréquences d'occurrences théoriques. Dans ce plan expérimental, le degré de liberté  $ddl = (3-1)(2-1)$  et  $N = 66$  sujets.

	H +	H -	Total
Avec noms	2424,1	3938,8	6363
Perception	1215,3	2824,6	4040
Imagerie	18 14,55	20 23,45	38
Total	54	87	141



*Fig. 12 : Comparaison du nombre d'expressions linguistiques de type « hédoniques » utilisées selon la condition expérimentale. On remarque que dans les conditions « Perception » et « Avec Noms », les sujets utilisent plus de termes hédoniques négatifs (désagréables) que de termes hédoniques positifs (agréables). Dans la condition « Imagerie », le nombre de termes agréables et désagréables est considéré comme équivalent.*

Dans ces conditions, l'analyse de la variance a montré que les sujets utilisaient plus de termes reflétant une valence émotionnelle négative dans les conditions « Perception » ( $t=4,608$ ,  $p<.0001$ ) et « Avec Noms » ( $t=5,971$ ,  $p<.0001$ ). Dans la condition « Imagerie », aucune orientation hédonique dans la description verbale des odeurs n'est à souligner (figure 12).

## 2.2 EXPERIENCE COMPLEMENTAIRE : Vérification de l'aptitude en imagerie mentale olfactive

Pour s'assurer que les sujets qui ont participé à l'expérience ont été capables de réaliser

une tâche d'imagerie mentale olfactive, comme il était convenu dans la consigne pour la condition « étiquette », nous avons réalisé une expérience complémentaire. Il s'agissait de vérifier si la consigne que nous avons donnée aux sujets était valide pour la modalité olfactive en la comparant à une modalité visuelle (imagerie mentale visuelle). Nous avons donc évalué la capacité des sujets à créer des images mentales olfactives et visuelles en leur demandant d'évaluer certains paramètres psychophysiques à partir du nom de l'objet source.

D'autre part, l'expérience principale a montré une grande variabilité hédonique entre certains odorants imaginés *versus* odorants perçus. Nous avons voulu objectiver la variabilité relative à la composante hédonique des odeurs imaginées.

Enfin, nous avons cherché à savoir s'il était possible de corrélérer un paramètre psychophysique (intensité, hédonicité...) entre modalité perceptive et imagerie mentale olfactive comme par exemple, une corrélation positive pour l'intensité entre imagerie mentale olfactive et perception (Cain & Algorn, 1997; Schifferstein, 1997).

### 2.2.1 Matériel & méthode

---

- Sujets

Dix huit sujets (6 femmes, 12 hommes âgés en moyenne de 26 ans ( $\pm 3$  ans) séparés en 2 groupes de 9 sujets chargés d'évaluer plusieurs paramètres psychophysiques ont participé à cette expérience complémentaire. Douze d'entre eux étaient fumeurs, 15 étaient droitiers, 2 gauchers et un ambidextre.

- Stimuli

**Tab. 10 :** Stimuli sélectionnés pour l'expérience complémentaire. Il s'agissait de 2 odeurs agréables (vanille et pomme), 2 odeurs neutres (violette et herbe) et 2 odeurs désagréables (ail et fioul).

Agréables	Neutres	Désagréables
Pomme	Violette	Ail
Vanille	Herbe	Fioul

Six étiquettes marquées d'un mot, qui se réfère à un « objet source visuel » ou à « l'odeur de l'objet source ». Les odeurs qui sont rattachées aux mots ont été sélectionnées de manière à avoir, 2 odeurs agréables, 2 odeurs neutres et 2 odeurs désagréables (en se basant sur les résultats moyens de la première expérience).

Six flacons contenant les odorants présentés dans le tab. 1, tirés de jeu d'odeurs de la condition « perception » de l'expérience principale (sans noms).

- Procédure expérimentale

1 - Pour la condition **IMAGERIE OLFACTIVE** :

Les sujets doivent évaluer l'intensité, l'hédonicité, la familiarité et la clarté de l'image

olfactive mentale en donnant une note de 1 (pas du tout intense, agréable, familier et clair) à 9 (extrêmement intense, agréable, familier et clair). Les sujets ne manipulent que des étiquettes, et doivent imaginer l'odeur à partir du mot écrit sur l'étiquette, pour cela, on appelle cette condition « Imagerie mentale olfactive ».

### 2 - Pour la condition **IMAGERIE VISUELLE** :

Les sujets doivent imaginer l'image visuelle de l'objet suscité par le mot inscrit sur l'étiquette. Ils doivent évaluer la luminosité, l'hédonicité, la familiarité et la clarté de l'image mentale créée en donnant une note de 1 (pas du tout lumineux, agréable, familier et clair) à 9 (extrêmement lumineux, agréable, familier et clair). Les sujets ne manipulent que des étiquettes, et doivent imaginer l'odeur à partir du mot écrit sur l'étiquette, pour cela, on appelle cette condition « Imagerie mentale visuelle ».

### 3 - Pour la condition **PERCEPTION** :

Les sujets doivent évaluer l'intensité, l'hédonicité, la familiarité des odeurs présentes dans les flacons en donnant une note de 1 (pas du tout intense, agréable, familier) à 9 (extrêmement intense, agréable, familier). Comme dans la condition 'perception', il n'y avait pas d'information sémantique sur les flacons odorants (codes) et les sujets doivent évaluer les paramètres en flairant les flacons les uns après les autres.

### 4 – Comparaison entre évaluation de la clarté de l'image et typicité de l'odeur perçue

A la fin de l'expérience, on donne aux sujets les étiquettes et les flacons, on leur demande d'évaluer la typicité de l'odeur par rapport au label de l'étiquette en donnant une note de 1 (pas du tout ce que j'avais imaginé) à 9 (tout fait ce que j'avais imaginé).

Le plan expérimental de l'expérience a été balancé: 18 sujets divisés en 2 groupes : Plan expérimental balancé.

**Tab. 11 :** Plan expérimental établi pour l'expérience complémentaire. La moitié des sujets (groupe 1) a d'abord évalué les odeurs lors d'une condition perception, puis devait imaginer odeurs et images visuelles. Le groupe 2 a commencé par la condition imagerie puis à terminé par la condition perception.

Groupe	Tâche 1	Tâche 2	Tâche 3
1	Perception	Imagerie (olfactive + visuelle)	Typicité
2	Imagerie (olfactive + visuelle)	Perception	

#### · Traitements des résultats

Les moyennes des évaluations psychophysiques ont été calculées pour les deux groupes de sujets et des ANOVA ont été effectuées pour déterminer les effets du groupe (G1, G2) de la dimension psychophysique (intensité, hédonicité, familiarité et clarté) et de la valence hédonique des stimuli (Agréable, Neutre et Désagréable) sur les notes attribuées lors des évaluations.

## 2.2.2 Résultats

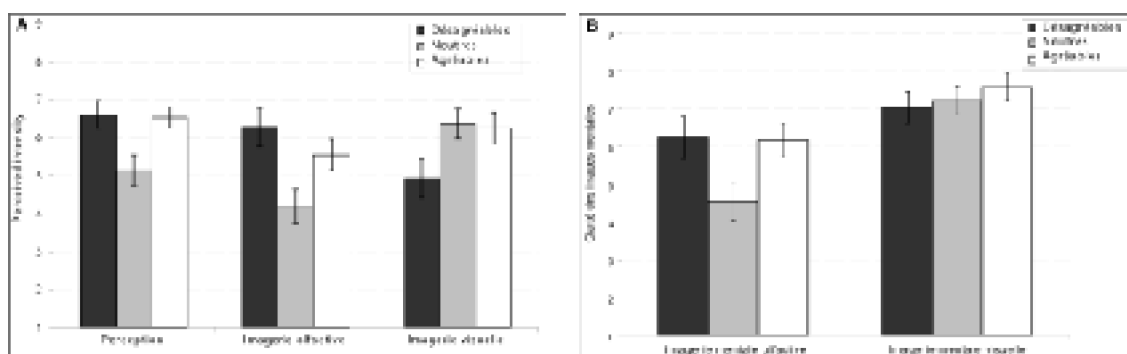
---

Les analyses des évaluations psychophysiques obtenues dans cette expérience

complémentaire ont indiqué une influence de la nature du stimulus ainsi que de la condition expérimentale sur l'évaluation de l'intensité, de l'hédonicité, de la familiarité et de la clarté de l'image (tab. 12 et Fig. 13). Aucun effet de groupe n'a été observé, c'est-à-dire qu'aucune influence dans l'ordre de passage des conditions expérimentales n'a été montrée. Les évaluations psychophysiques n'ont pas été différentes selon que les sujets devaient imaginer les odeurs avant de les percevoir, et réciproquement.

**Tab. 12 :** Récapitulatif des effets obtenus lors de l'analyse statistique de la variance relative aux évaluations psychophysiques de l'intensité, de l'hédonicité, de la familiarité et de la clarté de l'image mentale obtenue.

Dimensions psychophysiques	Effets	ddl	F	probabilités
Intensité	stimulus	2,210	11,47	<.0001
	Condition expérimentale (Perception/Imagerie)	2,210	23,6	<.0001
Hédonicité	stimulus	2,210	7,9	=.0006
	Condition expérimentale (Perception/Imagerie)	2,210	11,08	<.0001
Familiarité	stimulus	2,210	7,69	=.0008
	Condition expérimentale (Perception/Imagerie)	2,210	19,83	<.0001
Clarté	<b>Fig. 13 :</b> Valeurs moyennes de l'intensité perçue pour chaque condition expérimentale (A) et évaluations de la clarté de l'image mentale, olfactive ou visuelle (B) obtenues pour les différents type de stimuli (agréable, neutre et désagréable).			
	stimulus	2,105	5,56	=.005
	Condition expérimentale (Imagerie Olfactive / Imagerie Visuelle)	2,105	46,4	<.0001

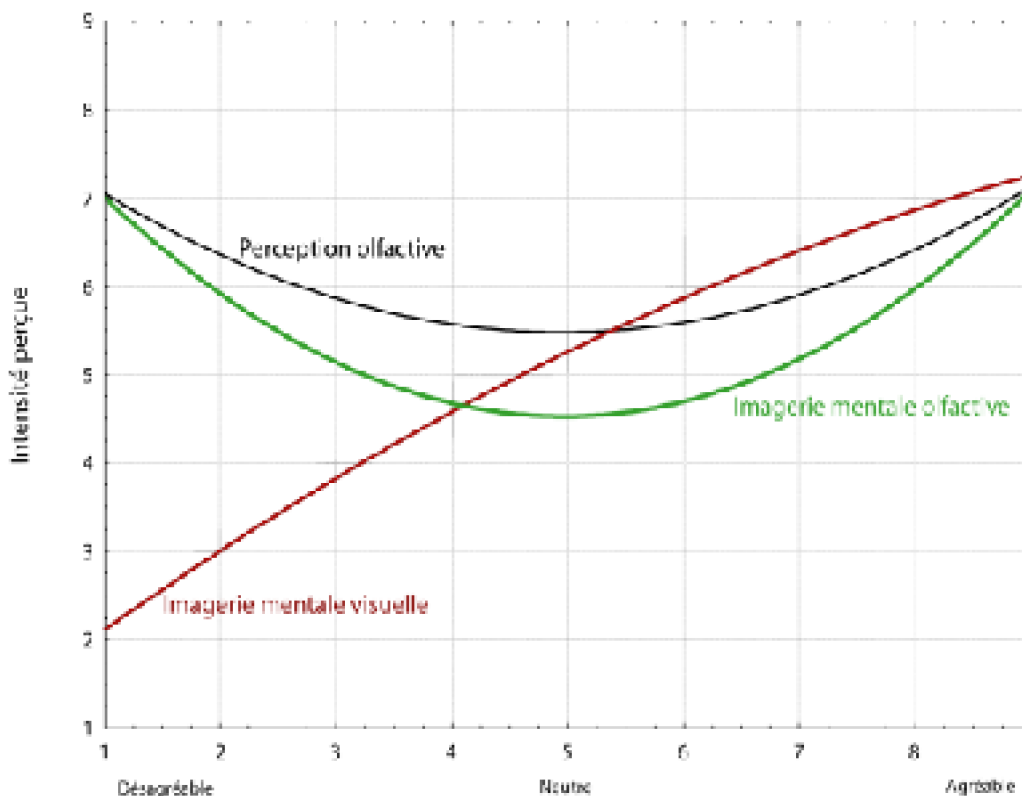


**Fig. 13 :** Valeurs moyennes de l'intensité perçue pour chaque condition expérimentale (A) et évaluations de la clarté de l'image mentale, olfactive ou visuelle (B) obtenues pour les différents type de stimuli (agréable, neutre et désagréable).

Ces résultats indiquent que l'intensité perçue ou imaginée pour des odeurs agréables et désagréables est toujours plus grande que l'intensité perçue des odeurs neutres, alors que ce pattern ne s'observe pas pour des images mentales visuelles. D'autre part, il apparaît que la clarté des images mentales est différente selon la condition (olfactives vs.

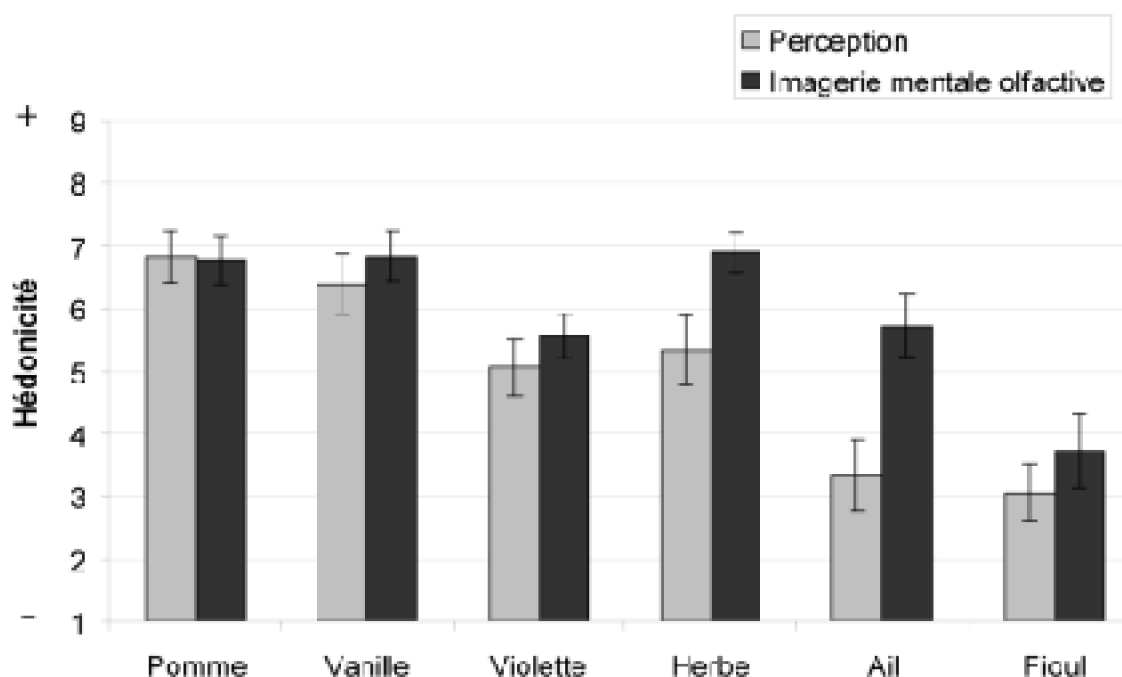
visuelles).

En corrélant les évaluations d'intensité et d'hédonicité sur le même plan (fig. 14), on remarque que les conditions 'perception' et 'imagerie mentale olfactive' suivent le même type de régression (quadratique) tandis que la corrélation pour la condition d'imagerie mentale visuelle suit une régression linéaire.

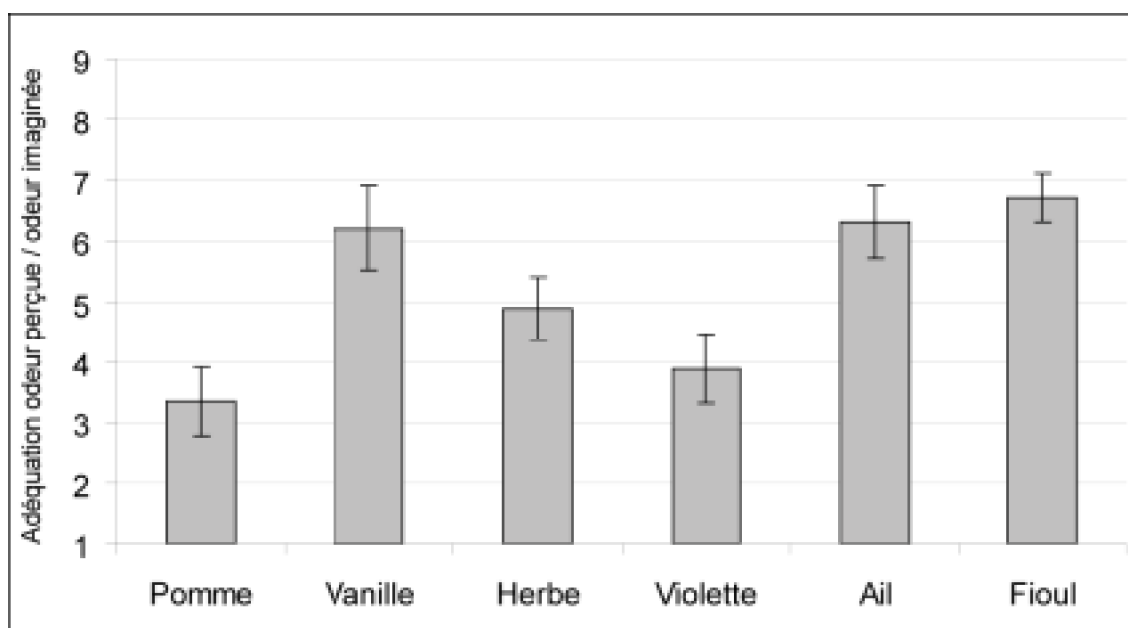


*Fig. 14 : Représentation de la corrélation entre les évaluations de l'intensité (pour les odeurs perçues ou imaginées) ou de la luminosité (pour les images visuelles) perçue et les évaluations de l'hédonicité des stimuli. Il apparaît clairement que les régressions correspondant aux conditions de 'perception olfactive' et 'd'imagerie mentale olfactive' sont du même type alors qu'elle est totalement différente pour la condition d'imagerie mentale visuelle.*

D'autre part, nous avons remarqué que certains des stimuli suscitaient une grande variabilité relative à l'évaluation de l'hédonicité. Certains des stimuli que nous avons sélectionnés ont été évalués différemment selon la condition expérimentale (perception vs. imagerie mentale olfactive). Par exemple, l'odeur d'herbe est sous évaluée en condition perception (plutôt neutre), alors qu'elle est imaginée comme étant agréable. De la même manière, les odeurs d'ail et de fioul ont été imaginées comme étant plus agréable qu'elles ne l'ont été en perception réelle (fig. 15).



*Fig. 15 : L'évaluation du caractère hédonique des stimuli sélectionnés est variable selon les odorants. Certains sont perçus et imaginés de la même façon (pomme, violette) alors que d'autres sont perçus comme étant plus désagréables que lorsqu'ils sont imaginés (ail, fioul, herbe).*



*Fig. 16 : Evaluation psychophysique de l'adéquation entre odeurs perçues et odeurs imaginées. Ces notes moyennes de typicité indiquent que certaines odeurs ne sont pas en adéquation avec ce que les sujets imaginent (pomme, violette), d'autres semblent plus correspondre à l'odeur attendue (imaginée).*

La variabilité hédonique observée ne semble pas due à l'adéquation entre odeurs

perçues et odeurs imaginées. Les odeurs que les sujets n'ont pas trouvées typiques ne sont pas celles qui ont suscité le plus de variabilité hédonique (voir figure 15 et 16).

### 2.3 Discussion générale

Chez l'humain, l'existence d'une aptitude d'imagerie olfactive est depuis quelques années une question très discutée (Lyman & McDaniel, 1986; Schab, 1991; Herz & von Clef, 2001). Nous savons peu de chose sur la gestion de ces « entités » et comment elles s'organisent en mémoire. Des travaux récents montrent qu'une partie au moins de la population est capable d'imagerie olfactive, c'est-à-dire d'évoquer mentalement une odeur à partir d'un nom (Bensafi *et al.*, 2003), et qui plus est, que cet exercice mental a un effet descendant (top-down) sur les seuils de détection de l'odeur imaginée (Djordjevic *et al.*, 2004).

Si l'expérience complémentaire que nous avons réalisée ne peut entièrement rompre le débat quant à la validité de l'imagerie mentale olfactive, elle a montré que la consigne donnée aux sujets peut inciter à effectuer la tâche demandée (i.e. imaginer mentalement une odeur, comme une image visuelle). Pour preuve, l'intense corrélation positive observée entre intensité perçue et évaluation de l'hédonicité dans les deux conditions 'olfactives' en comparaison d'une condition 'visuelle' (figure 17). Comme il a déjà été montré dans plusieurs études, il apparaît clairement que les sujets ont 'manipulé' des objets similaires dans les conditions 'perception' et 'imagerie olfactive' (Carrasco & Ridout, 1993) et nous avons par la suite considéré que dans le cadre de l'expérience principale, la condition 'étiquette' associée à la consigne stipulant un exercice d'imagerie mentale olfactive a incité les sujets à imaginer les odeurs suggérées par les noms d'objets sources inscrits sur les étiquettes.

Dans ces conditions, nous avons remarqué les catégories d'odeurs imaginées sont très différentes de celles des odeurs perçues : pour ces dernières il apparaît un groupe de mauvaises odeurs : [Ail - Fioul - Poisson] et un groupe [Citron - Orange]. Dans la condition d'imagerie, les catégories fiables sont au nombre de 3, ce qui indique un meilleur accord inter-sujets, avec un groupe floral [Violette - Lavande], et un groupe épices [Cannelle - Vanille], un groupe de 4 fruits [Mûre - Pomme - Orange - Citron].

L'imagerie permet de regrouper significativement 8 odeurs contre 5 en perception, mais surtout, le groupe des mauvaises odeurs n'apparaît plus comme tel.

En ce qui concerne les verbalisations associées, nous avons remarqué une double dissociation entre les conditions : D'une part, il y a eu d'avantage d'expressions linguistiques de type sémantique 'objet' cités dans la condition perception avec une prédilection pour des référents de type 'naturels'; d'autre part, plus d'expressions linguistiques de type sémantique 'propriétés' citées en imagerie sans référent privilégié. Tout se passe donc en condition « Perception » comme si l'absence de noms créait une sorte de besoin de se référer à une source, donc une obligation d'identifier l'odeur. En effet, lorsque l'odeur n'est plus présente (condition « Imagerie »), les expressions



linguistiques de type sémantique 'propriété' ont été dominantes, ce qui confirme cette première observation. Notons aussi que dans la condition « Imagerie », la valence hédonique n'est plus organisatrice de catégories. Cependant, cela pourrait s'expliquer par le résultat relatif à la variabilité hédonique observée entre les conditions 'perception' et 'Imagerie' lors de l'expérience préliminaire (fig. 14), puis confirmée par les résultats de l'expérience complémentaire (fig. 18). En effet, certains odorants semblent susciter plus de variabilité hédonique qui pourrait être responsable de la disparition de l'axe organisateur.

En effet, en analysant plus précisément les résultats relatifs à la dimension hédonique utilisée pour décrire les groupes d'odeurs, nous avons pu mettre en évidence l'importance maintenue de la dimension hédonique lorsque la stimulation olfactive est présente, confirmant l'idée selon laquelle l'axe hédonique reste primaire en perception olfactive. Nous pouvons même ajouter que les sujets orientent leurs jugements hédoniques relatifs aux odeurs de manière négative par rapport à leur imagination. La condition 'Avec noms' permettant dans une certaine mesure, d'équilibrer et de relativiser la différence observée (Herz & von Clef, 2001)

Par rapport à la situation de perception, l'étiquetage de l'odeur par un nom d'odeur (le plus souvent, celui de sa source logique) améliore l'accord inter-sujets, 3 groupes apparaissent au lieu de 2, concernant 7 odeurs au lieu de 5. Comme en condition « Imagerie », la présence de noms oriente les verbalisations vers des expressions linguistiques de type 'propriétés' des odeurs plutôt que vers leur source : Les sujets, affranchis du poids de l'identification, se sont concentrés sur une description plus élaborée des catégories d'odeurs formées. On a constaté également une grande similitude de groupements entre les deux conditions où l'odeur est perçue : 2 groupements sont communs, dont celui des désagréables, et on a vu apparaître un nouveau groupe (Herbe-Violette) dans la condition « Avec noms » que rien ne permettait de prévoir dans la condition « Perception ».

Ainsi, la seconde partie de l'expérience principale a permis de confirmer des résultats récents sur les effets descendants (top-down) des connaissances sémantiques sur les ressemblances perçues (Herz, 2003).

## 2.4 Conclusions

Nous avons montré que dans le domaine de la psychophysique, la consigne relative à la tâche qui est donnée aux sujets peut être décisive quant aux résultats obtenus. Dans le cadre de notre étude, un exercice d'imagerie mentale olfactive stipulé aux sujets par une consigne claire incite les sujets à manipuler des « objets » tout à fait comparables à des images mentales olfactives.

L'apport d'informations sémantiques (les noms d'odeurs) a une influence sur la catégorisation : dans les conditions « Imagerie » et « Avec noms », où elle est présente, permettent un meilleur accord inter-sujets. Cependant, comme on l'a remarqué, ces groupes sont très différents, et la seule proximité maintenue est celle entre 'Citron' et

'Orange'. On a en revanche plus de points communs entre les deux conditions dans lesquelles les odeurs sont présentes qu'entre les deux situations avec indices sémantiques : le groupe des « désagréables » se maintient, la paire [Citron – Orange], et une nouvelle catégorie d'ordre 'végétal' apparaît.

Hormis le pôle des odeurs désagréables, les sujets francophones semblent capables de distinguer au moins une catégorie « fleurs », « fruits » (et parmi ceux-ci les agrumes) et « épices ». Ceci correspondrait aux catégories utilisées par les belges francophones pour décrire les parfums les plus répandus (Beguin, 1993).

L'expression linguistique oppose la condition « Perception » aux 2 autres : que les odeurs soient présentes (Avec noms) ou non (Imagerie) les sujets expliquent leurs catégories sur la base de propriétés, et en termes d'objets dans la condition « Perception ».

En conclusion, la présence des connaissances sémantiques influence fortement l'expression en langue, mais moins nettement la catégorisation, qui diverge dans la condition où les odeurs sont imaginées.

# Chapitre 2. PERCEPTION DE LA QUALITE ODORANTE DANS LES MELANGES BINAIRES

## 2.1 Introduction et cadre théorique

Le premier chapitre de notre travail l'a clairement souligné, en interagissant avec le système olfactif, la plupart des composés chimiques purs sont capables de déclencher une sensation olfactive, la perception d'une odeur. Cette odeur peut être décrite selon trois caractéristiques principales : son « intensité », sa « valence hédonique » et sa « qualité ».

Cependant, l'étude de la « qualité » odorante est rarement abordée et lorsque des sujets non expérimentés doivent décrire leur sensation olfactive, l'utilisation de descripteurs élaborés est souvent mise de côté au profit de « tentatives » d'identification. Le plus souvent, il s'agit de se référer à « l'objet source » ou à son état, un objet émetteur des substances qui suscitent l'odeur en question. Chez des personnes non entraînées, cette activité identificatoire est le plus souvent infructueuse ou au mieux imprécise. On remarque toutefois que certaines odeurs sont communément reconnues.

Dans des conditions écologiques, c'est-à-dire naturelles et quotidiennes, les sensations olfactives sont fréquemment induites par la perception non pas d'une seule molécule, voire d'une seule source, mais d'un mélange plus ou moins complexe de multiples corps purs odorants. Cette complexité de l'« entité odorante » rend encore plus difficile la perception et la description précise de notre environnement odorant. Comme nous l'avons vu, les professionnels (aromaticiens, parfumeurs...) sont quotidiennement confrontés au problème de la description et de l'expression de leurs sensations olfactives. Si on examine les techniques et les systèmes de classifications utilisés par les professionnels, on en déduit que la description des mélanges semble exiger une certaine connaissance des composés odorants isolés, hors mélanges, et surtout sous-entend une capacité d'extraction pour les discriminer dans les stimuli courants, naturels ou artificiels.

Dans certains cas, c'est l'association de substances bien précises en quantités déterminées qui crée une odeur particulière. La formation de cette odeur ne résulte pas toujours de la simple addition des différentes odeurs des composés du mélange. D'autres phénomènes ont un rôle et semblent propres à chaque mélange. Evidemment, il est difficile de réaliser une étude spécifique de tous les mélanges odorants et pendant longtemps, la recherche s'est limitée à l'étude de mélanges odorants maîtrisables : les mélanges à deux composantes ou mélanges binaires.

Dans ce chapitre, avant la partie expérimentale, nous présenterons les aspects anatomiques relatifs à la physiologie de l'olfaction avant d'aborder plus précisément des aspects fonctionnels tels que les théories de la perception des odeurs, les effets portant sur la perception de l'intensité et sur la qualité des odeurs.

## 2.2 La physiologie de l'olfaction

### 2.2.1 Eléments d'anatomie

---

#### 2.2.1.1 Les voies aériennes

Dans la cavité nasale, le système olfactif reçoit directement les signaux chimiques de l'environnement. Les molécules odorantes peuvent accéder à la muqueuse par deux voies (Fig. 17) :

- Soit en passant par les narines lors de l'inspiration, c'est la voie de stimulation directe ou « orthonasale ».
- Soit en empruntant le carrefour rhino-pharyngé lors de l'expiration ou de l'ingestion d'aliments, on parle de voie indirecte ou « rétronasale ».

Une norme de l'association Française de Normalisation <sup>3</sup> différencie les perceptions de

<sup>3</sup> AFNOR V 00 150 (1988) : Analyse sensorielle : Vocabulaire.

ces deux voies différentes. Ainsi, l'odeur est définie comme « la propriété organoleptique perceptible par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles », ce qui correspond à la voie nasale directe, et l'arôme comme « la propriété organoleptique perceptible par l'organe olfactif par voie rétronasale lors de la dégustation ».

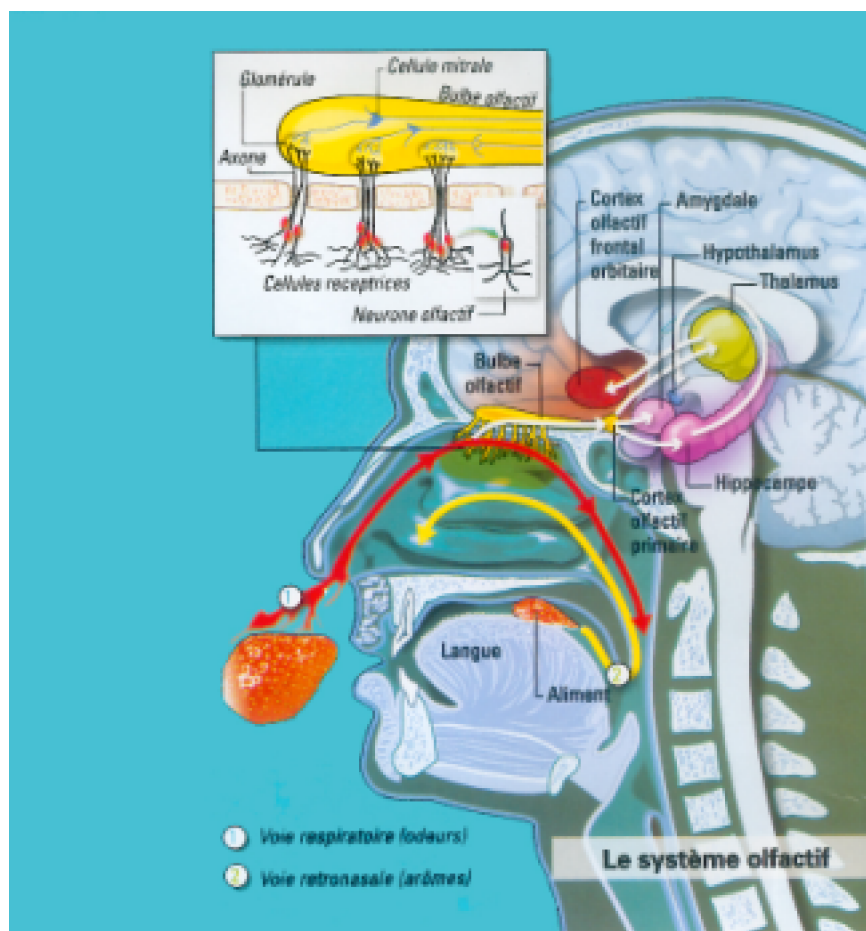


Fig. 17 : Représentation schématique de la localisation de l'organe olfactif, des voies de stimulation directe et indirecte ainsi que du chemin que le parcours de l'information olfactive dans le système nerveux central (d'après « Le journal du CNRS » N° 164 - 165, Sept-Oct 2003).

### 2.2.1.2 La muqueuse olfactive

C'est l'organe principal de la sensibilité aux molécules volatiles chez les mammifères. D'une superficie de 2 à 3 cm<sup>2</sup>, elle est située dans la partie supérieure des fosses nasales, où elle tapisse le plafond et les parois d'une fente de 2 mm de large : la fente olfactive. Elle se distingue de la muqueuse respiratoire par son aspect lisse. La muqueuse olfactive est un organe pair fonctionnant indépendamment, c'est-à-dire qu'on en trouve une correspondant à la narine gauche et une correspondant à la narine droite.

Chez les mammifères, cette muqueuse est recouverte d'un mucus aqueux sécrété par les glandes de Bowman. Ce mucus est un mélange hétérogène constitué d'une

couche supérieure principalement composée d'eau et une couche inférieure contenant des composés glyco-conjugués. Le mucus contient de nombreuses protéines dont les glycoprotéines, certaines responsables de la fixation des molécules odorantes (OBP : Olfactory Binding Protein), qui pourraient jouer un rôle dans la présentation des odorants aux neurones récepteurs (Pelosi, 1994).

Cette muqueuse est constituée de trois couches histologiques :

Un épithélium pseudostratifié qui abrite les corps cellulaires des neurones récepteurs 1. des substances odorantes.

La lamina propria, un tissu conjonctif, vascularisé, qui contient les acini des glandes 2. de Bowman dont les canaux sécréteurs traversent l'épithélium pour déboucher à la surface de la muqueuse.

Une lame basale séparant l'épithélium de ce chorion. 3.

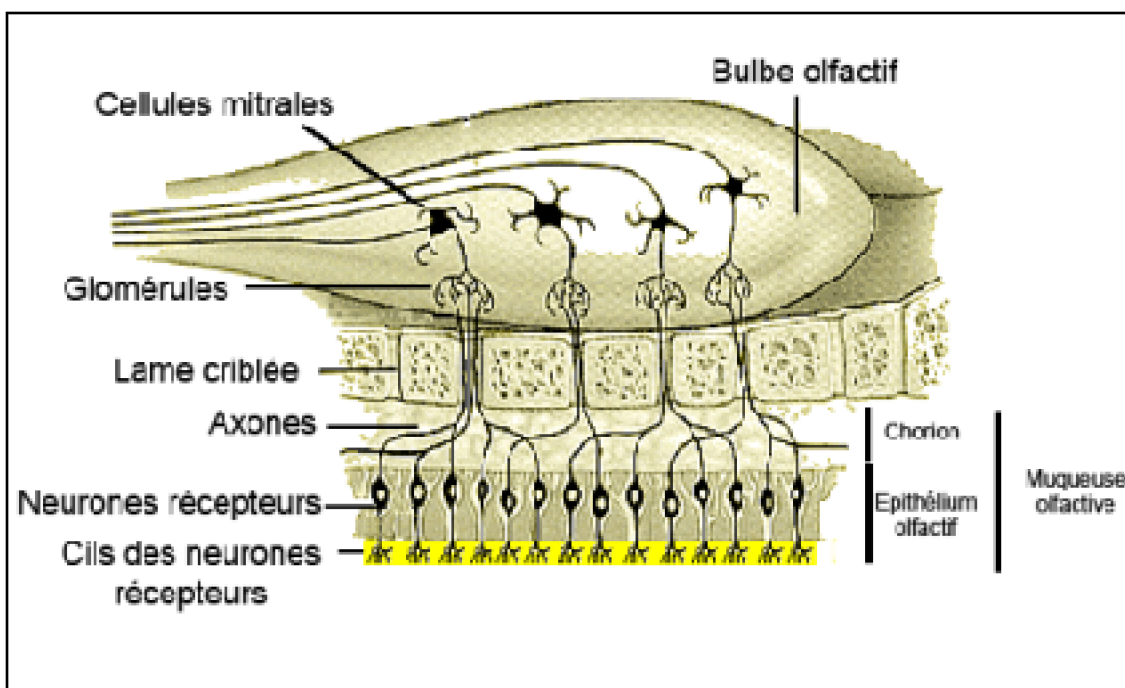
### 2.2.1.3 Organisation de l'épithélium olfactif

L'épithélium olfactif comprend différents types cellulaires :

- Les cellules de soutien, qui s'étendent de la lame à la lumière de la cavité nasale. Elles assurent la cohésion de l'épithélium par des jonctions intercellulaires et isolent les neurones olfactifs les uns des autres, particulièrement au niveau de la dendrite apicale. Ancrée sur la lame basale, leur pôle apical présente des microvillosités qui baignent dans le mucus.
- Les cellules basales horizontales aplaties, situées au dessus de la lame basale.
- Les cellules basales globulaires, cellules souches, qui peuvent se multiplier et de se différencier en neurones récepteurs (Feron *et al.*, 1995). Cette propriété remarquable permet un renouvellement fonctionnel des neurones récepteurs qui sont effectivement soumis aux agressions destructrices directes de l'environnement.

Les neurones récepteurs olfactifs, sensoriels et bipolaires, assurent directement la réception des stimulus olfactifs au niveau de leurs prolongements apicaux : les cils olfactifs portés par les dendrites. L'extrémité des dendrites affleure à la surface de l'épithélium et porte en effet de nombreux cils qui s'étendent dans le mucus et dont la membrane porte les récepteurs moléculaires aux odorants (Menco *et al.*, 1997). Les corps cellulaires des neurones récepteurs, de petit diamètre (7µm environ), sont essentiellement concentrés dans la moitié profonde de l'épithélium. A maturité chacun d'entre eux émet un prolongement axonal qui sort par la base de l'épithélium, traverse la lame basale puis le chorion, se regroupant avec d'autres pour constituer des filets et rejoindre le bulbe olfactif et y faire synapse.

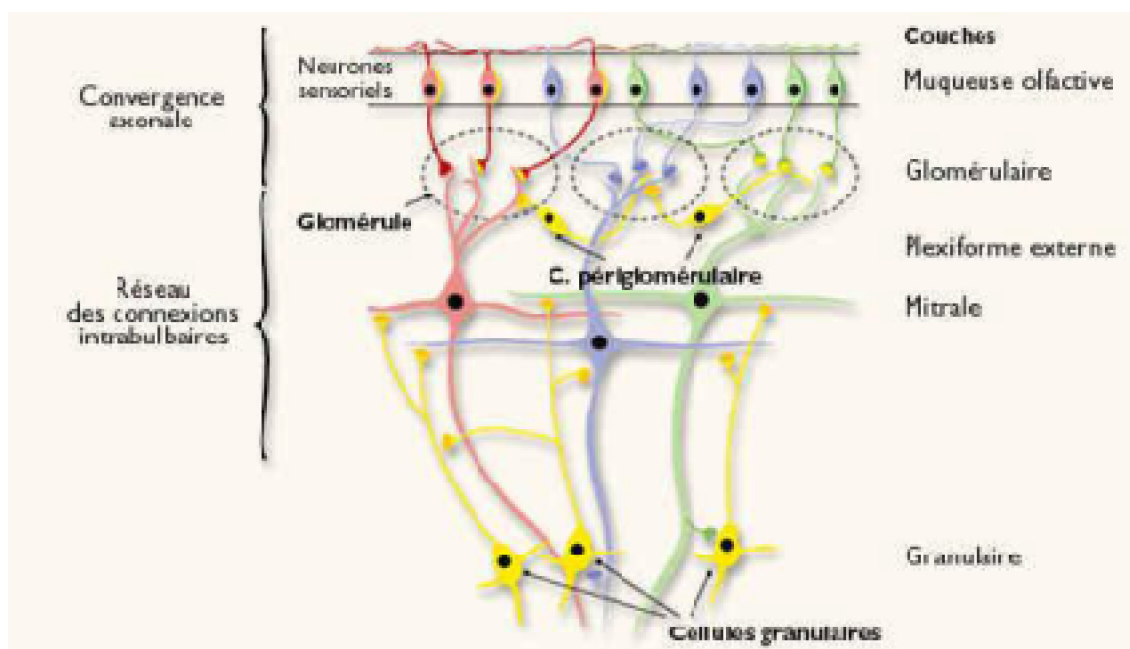
### 2.2.1.4 Les projections épithélio-bulbaires



*Fig. 18 : Représentation schématique de la région olfactive située entre le bulbe olfactif et la lumière de la cavité nasale. Sous le bulbe olfactif, on remarque une stratification en 3 grandes couches successives : la lame criblée, le choron et la muqueuse olfactive constitué d'une sur lequel se trouve le mucus sécrété par les glandes de Bowman. (Leffingwell, 2001).*

Les axones des neurones récepteurs olfactifs traversent la lame basale et se regroupent dans le choron en faisceaux constitués de 10 à 100 axones, enrobés d'une gaine de cellules de Schwann. L'ensemble de ces faisceaux constitue le nerf olfactif qui pénètre dans la boîte crânienne par les orifices de la lame criblée de l'éthmoïde (fig. 18). Chaque « nerf » (correspondant à chaque narine) rejoint le bulbe olfactif de manière ipsilatérale. Le bulbe olfactif est une bandelette de 1 cm de long chez l'humain dans laquelle les neurones récepteurs font synapse avec les dendrites des cellules de second ordre (ou neurones relais de l'information olfactive) : les cellules mitrales. Ces synapses se font dans des petites zones de neuropile sphériques, délimitées par des cellules périglomérulaires, les glomérules dont le nombre est estimé à 2000 environ.

D'un point de vue fonctionnel, ces glomérules représentent une première étape du traitement qualitatif de l'information olfactive puisqu'on peut y observer des synapses dendro-dendritiques entre cellules péri-glomérulaires et neurones relais ainsi que des synapses axo-dendritiques entre les cellules péri-glomérulaires d'un glomérule voisin et les neurones relais (Fig. 19).



*Fig. 19 : Les axones des cellules réceptrices entrent en connexion synaptique avec les neurones relais, les cellules mitrales, dont les corps cellulaires sont situés dans la profondeur de cette structure. Les relations synaptiques entre les axones des neurorécepteurs et les dendrites des cellules mitrales prennent place dans des formations individualisées sphériques les "glomérules olfactifs". Le bulbe olfactif contient également deux principales catégories de neurones locaux (les cellules périglomérulaires et les cellules granulaires) qui, excités synaptiquement par les cellules mitrales, leur adressent en retour une inhibition régulatrice de leur activité.*

Une des particularités du bulbe olfactif, tel qu'établi chez le rat ou la souris, est qu'il abrite, en quelque sorte, une cartographie des stimuli olfactifs : ainsi, un stimulus donné va activer de manière reproductible une zone donnée du bulbe. Ce phénomène a été mis en évidence au niveau des glomérules olfactifs, le lieu de convergence de quelques milliers d'axones primaires en provenance de la cavité nasale. La décharge neuronale des neurorécepteurs vient stimuler des cellules mitrales qui répondent à leur tour par des bouffées de potentiels d'action et redistribuent le message olfactif qu'elles ont reçu. Ainsi, selon la conception actuelle, le système olfactif dresserait des « cartes » spatio-temporelles des odeurs (Brand, 1999).

### 2.2.1.5 Les projections vers les centres supérieurs (cf. fig. 17)

Au-delà du bulbe, les informations olfactives sont transmises, via le tractus olfactif latéral, à différentes structures cérébrales : le paléocortex, le système limbique et le néocortex. Les neurones secondaires innervent ainsi le cortex piriforme et le cortex enthorinal, le noyau olfactif antérieur, le tubercule olfactif, le cortex péri-amygdalien et l'amygdale. Un réseau de connexions associatives relie ces différents territoires corticaux. Depuis ces aires primaires, d'autres neurones transmettent l'information olfactive vers d'autres aires cérébrales, qui ne sont pas spécifiquement olfactives comme l'hippocampe, l'hypothalamus ou le thalamus. Depuis le thalamus, certaines projections se dirigent vers



le cortex frontal. Les voies nerveuses olfactives sont pratiquement directes : la narine droite projette ses fibres sur le cerveau droit, et la gauche sur le cerveau gauche. Il semble néanmoins qu'une stimulation olfactive provoque préférentiellement une activation du cortex orbitofrontal droit (Zatorre *et al.*, 1992). Néanmoins, les circuits centraux impliqués sont encore l'objet d'une exploration. Ainsi par exemple, l'activation orbitofrontale précitée vient récemment d'être corrélée à l'action de flairage des odeurs plus qu'à la perception olfactive elle-même (Kareken *et al.*, 2004).

### 2.2.1.6 Conditions nécessaires à la perception des odeurs

Pour être odorante, une molécule doit présenter certaines propriétés physico-chimiques :

Elle doit être tout d'abord suffisamment volatile (dans le cas de la perception aérienne) pour atteindre la muqueuse olfactive. Le paramètre couramment utilisé pour mesurer la volatilité est la pression de vapeur, qui dépend principalement de la masse moléculaire des composés. Plus la pression de vapeur est grande plus la quantité susceptible d'atteindre la muqueuse olfactive est importante.

Les molécules doivent également être suffisamment solubles dans le mucus pour pouvoir y diffuser. Le mucus étant en majeure partie constitué d'eau, la solubilité des molécules dans le mucus dépend donc de leur affinité pour les molécules d'eau, donc de leur caractère hydrophile. Ce passage des molécules d'une phase gazeuse à une phase aqueuse répond aux lois de la diffusion et de la solubilité (Getchell *et al.*, 1990). La pénétration des odorants dans le mucus dépend de leur solubilité en phase aqueuse, propriété qui est représentée par un coefficient de partition air/eau qui contrôle l'accès des molécules odorantes au système récepteur olfactif. Un coefficient de partage favorable à la solubilisation des molécules dans le mucus pourrait même représenter le premier facteur d'amplification du signal sensoriel (Lancet, 1986). Hornung fait remarquer toutefois que les capacités d'adsorption du mucus pour différentes molécules diffèrent de celle de l'eau (Hornung *et al.*, 1987). Les OBP, protéines de transport présentes dans le mucus, pourraient favoriser la solubilisation et le transport de molécules odorantes dont le coefficient de partage air/eau serait trop élevé (Pevsner *et al.*, 1988; Pelosi, 1994). Les différences de solubilité des molécules dans le mucus sont à la base de la théorie chromatographique de l'olfaction développée par Mozell (Mozell, 1964, 1970), et ont été utilisées astucieusement par Laing (Laing, 1987; Laing & Willcox, 1987; Laing, 1988) dans ses travaux sur les mélanges.

## 2.3 Les effets portant sur la perception de l'intensité d'un mélange d'odeurs : Définitions

Au début du siècle, Zwaardemaker présente le principe selon lequel l'intensité perçue d'un mélange d'odorant est inférieure à la somme des intensités perçues de chacun de ces éléments pris séparément. Il appelle alors ce phénomène la « compensation » (Zwaardemaker, 1925).

Cain et Drexler ont défini plus précisément les phénomènes observés sur l'intensité perçue de mélanges d'odorants (Cain & Drexler, 1974), et distinguent les 6 cas de figures suivants :

- L'addition complète : l'intensité du mélange est aussi grande que la somme des intensités des composants pris séparément.
- L'hyper-addition : l'intensité du mélange est plus grande que la somme des intensités des composants pris séparément.
- l'hypo-addition : l'intensité du mélange est moins grande que la somme des intensités des composants pris séparément. Ils distinguent trois cas d'hypo-addition :
- l'addition partielle : l'intensité du mélange est plus grande que celles de chacun de ces composants mais plus petite que la somme des intensités des ceux-ci.
- le compromis : l'intensité du mélange est intermédiaire entre les intensités de chacun de ces composants pris séparément.
- la compensation (ou soustraction) : l'intensité du mélange est plus petite que celles de chacun de ces composants pris séparément. Le terme de « soustraction » pour qualifier ce phénomène sera proposé plus tardivement (Fritjers, 1987).

Berglund et collaborateurs proposèrent de faire une distinction dans la perception de la qualité d'un mélange d'odorants. Selon eux, la perception peut être définie comme hétérogène ou comme homogène selon que l'odeur de chacun des composants peut être perçue ou non dans le mélange (Berglund *et al.*, 1976).

Un mélange est dit « hétérogène » lorsque les odeurs propres à chacun de ses composants sont distinctes dans le mélange. En fait, la perception est considérée comme hétérogène si l'odeur d'au moins un des composants est perceptible dans le mélange.

Un mélange est dit « homogène » lorsque les odeurs propres à chacun de ses composants ne sont plus perceptibles et que l'odeur du mélange est différente de celles des composants.

En reprenant les définitions de Cain et Drexler concernant les mélanges homogènes, ils ont défini trois phénomènes pouvant apparaître avec des mélanges hétérogènes:

- Le synergisme: l'intensité d'un composant perçu en mélange est plus grande que l'intensité de ce même composant perçu hors du mélange.
- L'indépendance: les intensités des composants perçus en mélange sont identiques aux intensités de ces composants perçus hors du mélange.
- L'antagonisme: l'intensité perçue d'un des composants en mélange est plus petite que l'intensité de ce même composé perçu hors du mélange.

Composés purs mélange	Composé A	$R_A$	
	Composé B	$R_B$	
Mélange homogène	Hyper-addition	$R_M > R_A + R_B$	
	Addition complète	$R_M = R_A + R_B$	
	Hypo-addition	Addition partielle	$R_M < R_A + R_B$
		Compromis	$R_M < R_M < R_A$
		Soustraction	$R_M < R_B$
Mélange hétérogène	Synergisme pour A    Indépendance pour B	$R_{MA} > R_A$ $R_{MB} = R_B$	
	Indépendance pour A    Indépendance pour B	$R_{MA} = R_A$ $R_{MB} = R_B$	
	Antagonisme pour A    Indépendance pour B	$R_{MA} < R_A$ $R_{MB} = R_B$	

*Fig. 20 :* Effets concernant l'intensité perçue d'un mélange binaires d'odorants. A (ou B): intensité du composant A (ou du composant B) ; M: intensité du mélange homogène ; AM (ou BM): intensité du composant A (ou B) dans le mélange hétérogène. D'après Berglund et al. (1976) et Thomas-Danguin (1997).

Il est à noter que le masquage pourra être défini comme la transformation de la qualité d'une odeur en une autre, par l'ajout d'un nouveau composé dit « masquant ». La neutralisation représente une diminution de l'intensité d'une odeur consécutive à l'ajout d'un nouveau composé dit neutralisant.

Dans la pratique, ces deux termes sont souvent confondus<sup>4</sup>. Le terme de masquage est généralement appliqué à l'hypo-addition dans les mélanges hétérogènes et correspondrait ainsi du point de vue qualitatif à la définition de l'antagonisme proposé par Berglund et ses collaborateurs (1976).

## 2.4 Les théories de la perception de la qualité odorante

### 2.4.1 La théorie moléculaire ou chimique ou théorie des « odotopes »

Cette théorie propose existence d'une relation entre la structure d'une molécule et sa qualité odorante. Cette théorie a été proposée pour la première fois par Pauling en 1946 (Pauling, 1946), puis elle a été approfondie par Moncrieff (Moncrieff, 1949) et Amoore (Amoore, 1970). L'hypothèse sous-tendant cette théorie est que la qualité odorante d'une molécule est due à sa forme moléculaire, à son arrangement stérique, à ses groupes fonctionnels.

<sup>4</sup> Le masquage peut se concevoir comme la diminution d'intensité d'une composante d'une odeur, au profit ou non d'autres composantes odorantes, notamment celle du composé ajouté.

Ainsi, selon cette théorie chimique, un récepteur aux odeurs serait spécifique d'une molécule ou d'un très petit nombre de molécules fortement liées du point de vue de leur structure. La reconnaissance d'une molécule odorante par un récepteur aux odeurs se ferait selon le principe de la « serrure et de la clé ». La structure moléculaire reconnaît le récepteur aux odeurs et – selon cette théorie est responsable de la qualité odorante de la molécule est appelée « odotope ».

Lorsqu'en 1991, Buck et Axel mettent en évidence que les récepteurs aux odeurs forment une grande famille comportant environ 1000 membres (Buck & Axel, 1991), l'hypothèse selon laquelle chaque récepteur aux odeurs ne reconnaît qu'une caractéristique structurale très précise semble confirmée. La théorie selon laquelle chaque récepteur aux odeurs est spécifique d'un odorant ou d'un très petit nombre d'odorants est alors renforcée. De plus, puisque les gènes appartenant à une même sous-famille de récepteurs aux odeurs ont des séquences d'acides aminés très proches, il est proposé que les récepteurs aux odeurs d'une même sous-famille reconnaissent des molécules odorantes qui ont elles aussi des structures très proches (Buck & Axel, 1991). Un tel lien a récemment été mis en évidence en stimulant des rats à l'aide d'une série d'odorants qui différaient par la longueur de leur chaîne carbonée (une série d'aldéhydes). Les auteurs (Johnson *et al.*, 2004) ont montré une spécificité de la zone ventrale du bulbe, zone qui reçoit principalement les projections correspondant récepteur olfactif I7.

Suite à la découverte en 1993 de l'organisation de l'expression des récepteurs aux odeurs selon quatre zones dans l'épithélium olfactif (Ressler *et al.*, 1993; Vassar *et al.*, 1993), l'hypothèse suivante est avancée. Etant donné que les gènes appartenant à une même sous-famille de récepteurs aux odeurs sont exprimés au sein de la même zone, les molécules odorantes qui ont des structures stériques voisines activent une seule et même zone de l'épithélium olfactif.

Depuis 1998, diverses études ont permis de cloner et d'exprimer des gènes codant pour des récepteurs aux odeurs afin de déterminer la gamme de molécules odorantes à laquelle ils répondaient (Krautwurst *et al.*, 1998; Zhao *et al.*, 1998; Malnic *et al.*, 1999; Araneda *et al.*, 2000; Kajiya *et al.*, 2001). D'après la théorie précédente, les chercheurs pensaient trouver, pour chaque récepteur aux odeurs étudié, une molécule odorante bien particulière capable de l'activer, ou du moins un petit nombre d'odorants possédant une caractéristique chimique voisine. Or les résultats de ces différents travaux de recherche ne confirment pas ces hypothèses. On notera que les principes d'encodages, reposant sur une combinatoire d'interactions et proposés par l'équipe d'André Holley sur la base de l'étude des réponses des neurones récepteurs, porteurs des récepteurs aux odeurs, (Duchamp *et al.* 1974, Sicard *et al.*, 1984) sont remis à l'ordre du jour. En effet, les nouvelles données confirment qu'une molécule odorante est généralement reconnue par de multiples récepteurs aux odeurs et qu'un récepteur donné reconnaît de multiples odorants. De plus, des récepteurs aux odeurs d'une même sous-famille (donc de structures primaires très proches) peuvent reconnaître des molécules possédant des structures très différentes.

Actuellement, l'hypothèse selon laquelle un récepteur aux odeurs serait spécifique d'un seul odorant ou même d'un petit nombre d'odorants de structure très voisine est infirmée (Touhara, 2002). Que les récepteurs aux odeurs d'une même sous-famille

reconnaissent obligatoirement des molécules odorantes de structures proches est également nuancé par les données apportées par l'étude directe des profils de sélectivité des récepteurs.

Ainsi, la conclusion des différentes études concernant l'appariement de molécules odorantes avec des récepteurs aux odeurs est que la gamme de molécules reconnues par un récepteur aux odeurs est à la fois large et spécifique. Les caractéristiques structurales que possèdent ces odorants varient considérablement et il ne semble ainsi pas possible d'en tirer des règles générales afin d'établir une théorie stérique de la détection des odorants par les récepteurs aux odeurs. ***Mais le lien entre l'odeur et la structure moléculaire n'est pas mieux éclairé par ces nouvelles données.***

### 2.4.2 La théorie des vibrations ou théorie vibrationnelle

---

Un autre courant de recherche, initié en 1938 (Dyson, 1938), suggère que ce sont les vibrations moléculaires des substances odorantes qui sont responsables de l'odeur des molécules. Cette théorie a été approfondie et développée par Wright (Wright, 1977). Ce dernier propose que les récepteurs aux odeurs soient activés par les vibrations moléculaires des odorants, dues à l'agitation thermique. Selon cette hypothèse, il faut considérer la région des spectres d'absorption infrarouge (spectres IR) qui s'étend de 100 à 500  $\text{cm}^{-1}$ . Chaque récepteur aux odeurs ne serait sensible qu'à une partie restreinte de cette région spectrale: selon Wright, la largeur de la bande spectrale que reconnaît un récepteur aux odeurs serait de 12,8  $\text{cm}^{-1}$  (Wright, 1977). Selon un tel système, la discrimination des molécules odorantes est possible parce que les substances odorantes ont des spectres de vibrations variés et que les récepteurs reconnaissent des bandes spectrales différentes.

Cette théorie a été abandonnée pour deux raisons principalement. Premièrement, aucun mécanisme plausible n'a été proposé pour expliquer comment les récepteurs détectaient les vibrations moléculaires. Deuxièmement, et c'est surtout ce point, qui a fait rejeter la théorie des vibrations, de nombreux énantiomères ont des propriétés odorantes différentes ; les énantiomères du menthol et de la carvone sont les exemples les plus connus. Or, de manière systématique, les spectres vibrationnels de deux énantiomères sont rigoureusement identiques !

### 2.4.3 Vers une nouvelle théorie vibrationnelle

---

En 1996, Turin suggère de reprendre la théorie des vibrations mais en la modifiant un peu (Turin, 1996). Il propose en particulier un mécanisme détaillé et plausible pour rendre compte de la détection des vibrations moléculaires des odorants par des récepteurs protéiques. Ce mécanisme est basé sur le principe de la spectroscopie électronique par effet tunnel inélastique (IETS pour l'anglais Inelastic Electron Tunneling Spectroscopy).

Le mécanisme est le suivant. Un donneur de force électromotrice (source d'énergie fournissant des électrons) doit être présent, il pourrait s'agir du NADPH (b-Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate). Celui-ci fournit des électrons à un site accepteur du

récepteur aux odeurs. Ce dernier est activé lorsqu'il y a un transfert de ces électrons vers un autre site, du récepteur aux odeurs, site en interaction avec la protéine G et peut-être également avec du zinc. Ce transfert d'électrons ne peut se produire que si le récepteur aux odeurs contient dans son site de liaison une molécule odorante possédant un mode de vibration dont l'énergie correspond à l'écart d'énergie entre les deux sites en question du récepteur aux odeurs. Avec un tel mécanisme, ce sont les spectres obtenus par IETS (spectres IETS) qu'il faut considérer et la région des spectres à prendre en compte s'étend jusqu'à  $4000\text{ cm}^{-1}$  (Turin, 1996, 2002; Turin & Yoshii, 2003).

## 2.5 Effets portant sur la qualité de l'odeur d'un mélange binaire

Pour illustrer un mélange homogène, ce que les parfumeurs appellent un "accord", citons un exemple d'accord caractéristique qui nous est apporté par Chastrette: *"Un mélange convenable, c'est à dire dans la proportion de 9/2 environ, de salicylate de benzyle, décrit comme doux, floral et légèrement balsamique, et d'eugénol, décrit comme ayant l'odeur de clou de girofle, donne un accord rappelant l'œillet"* (Chastrette, 1995).

Selon cet énoncé, on remarque qu'un accord, mélange donc homogène, n'est réalisé que pour des proportions spécifiques de chacun des composants, ici 9 volumes de salicylate de benzyle pour 2 volumes d'eugénol. Si ces proportions ne sont pas respectées, l'accord ne se "forme" pas et les odeurs de ses deux composants sont susceptibles d'être perçues, mélange donc hétérogène. Ainsi différents mélanges de deux odorants peuvent être perçus comme homogènes ou hétérogènes selon les proportions respectives des odorants.

Quelques nuances à cette distinction entre mélanges à perception homogène et mélanges à perception hétérogène ont été apportées par Frijters (Frijters, 1987). Il rejette tout d'abord la nécessité de l'apparition d'une odeur différente de celles des composants du mélange dans la définition d'un mélange homogène. Ainsi, pour l'auteur, le mélange d'un composant avec lui-même est défini comme mélange homogène, l'odeur d'un tel mélange n'étant pas plus complexe que celle de ces composants. Il remarque ensuite qu'un seul et même composé odorant peut présenter plusieurs facettes, évoquant plusieurs perceptions distinctes, correspondant à des objets distincts. Mis en mélange, certaines caractéristiques d'une telle odeur peuvent subsister et d'autres disparaître. Par exemple, un mélange bien proportionné de caproate d'éthyle (fruité) et de furanéole (pyrogéné), peut conduire à une odeur d'ananas, avec une disparition de la note cuite induite par le furanéole au profit de sa facette caramélisée.

Néanmoins, il n'est pas si évident de faire la distinction entre un mélange homogène et un mélange hétérogène. Le sujet humain envisage un mélange odorant de manière holistique plutôt que comme une agrégation de notes odorantes pouvant être discernées. La difficulté commune à ségréger et à décrypter les traits individuels qui compose un mélange odorant explique cette incapacité.

Les travaux de Laing et collaborateurs sur la perception de mélanges complexes illustrent assez bien le fait qu'un mélange ne garde pas toutes les propriétés qualitatives de ses constituants : lorsque le mélange comprend plus de 4 composants, les odeurs propres de certains composants ne sont plus perceptibles alors que d'autres le sont encore. Nous remarquons que les protocoles expérimentaux utilisés par Laing et collaborateurs ne permettent toutefois pas de déterminer si des odeurs différentes de celles des composantes (donc d'accord, selon la conception que nous avons avancée) sont perçues dans les mélanges (Laing & Francis, 1989; Laing & Glemarec, 1992; Laing & Livermore, 1992; Laing, 1994; Livermore & Laing, 1996, 1998; Wise & Cain, 2000).

D'autre part, Mac Rae et al. (1992) ont étudié des mélanges binaires constitués de composés qualitativement différents (fruité épicé, fruité vert, feuillage, cire...). Les sujets devaient effectuer un tri des différents mélanges en les regroupant par ressemblance qualitative ; dans les cas étudiés, ils ont observé que la qualité de l'odeur des mélanges est toujours « intermédiaire » entre celle des deux composés, sans jamais correspondre exactement à l'odeur propre d'un des composés odorants et sans apparition d'une nouvelle odeur (absente des composés pris individuellement).

On doit noter que Moskowitz et Barbe (1977) ainsi que Laing et Wilcox (1983) n'ont jamais observé la formation d'une nouvelle note odorante dans les mélanges binaires qu'ils ont étudiés. Mais cette constatation est peut-être à critiquer puisque les sujets ne disposaient, pour caractériser les mélanges, que des termes décrivant les différentes notes des composés purs qui avaient servi à réaliser les mélanges binaires !

En fait, la modification qualitative résultant d'un mélange de substances odorantes gêne les modélisateurs ou les psychophysiciens : elle leur retire apparemment simplement le droit de présenter des additions, vectorielles ou non... on ajoute toujours mal les choux et les chèvres, et surtout si une telle addition donne des oranges ! Cette difficulté, conceptuelle, s'oppose aussi à la progression de nos avancées dans ce domaine d'étude. La conception, répandue et discutable, sinon fautive, selon laquelle la perception olfactive serait holistique, contribue aussi à obscurcir nos investigations. Par ailleurs et peut-être par dessus tout, la science, royaume du quantifiable, a toujours une certaine réticence à discuter de la qualité. Pourtant il nous paraît impensable que l'étude d'une sensorialité n'aborde pas ce qui constitue son suprême intérêt ! Avec notre maître, Gilles Sicard, nous avons secoué ces couvertures opaques.

### Problématique de nos travaux

---

#### - Les accords aromatiques

Parmi les effets utilisés empiriquement par les parfumeurs et les aromaticiens, l'accord aromatique occupe une place de choix. Cependant, la définition même de l'accord semblait poser problème. En effet, est-il possible d'obtenir une odeur nouvelle en mélangeant deux composés odorants différents dans des proportions bien précises ? Les cas « d'accords » en parfumerie sont apparemment nombreux, mais ils reposent presque exclusivement sur des combinaisons de multiples composés odorants, chacun pouvant apporter une facette à l'odeur finale (Poucher, 1975).

Dans la première expérience de ce travail, nous proposons tout d'abord de rappeler les principaux résultats d'une étude relative à un accord aromatique, l'accord « Ananas ». Dans un second temps, nous rapportons des données obtenues au cours d'une collaboration avec l'équipe de recherche « Arômes » de l'INRA (Dijon), et pour laquelle nous avons élaboré un nouveau protocole expérimental visant à mieux cerner le modèle d'accord fusion total (fusion des notes odorantes individuelles remplacée par une nouvelle note odorante, absente dans les composés flairés isolés).

Après cette acquisition, nous avons vérifié la pertinence de notre approche sur d'autres modèles de mélanges binaires conduisant à la perception d'un accord odorant. En 2002, « The Emperor's new theory » (Burr, 2002) est publié. Cet ouvrage traite, entre autres, des recherches de Luca Turin, physiologiste passionné de chimie et de physique qui a repris l'idée selon laquelle la perception des odeurs est gouvernée par un mécanisme de transduction qui transforme les vibrations intramoléculaires des substances odorantes en un message neuronal. Une telle théorie, dite vibratoire, a été élaborée en 1930 mais fut abandonnée par la communauté scientifique internationale jusqu'à ce que Turin lui donne une forme moderne, en 1990.

Dans le présent travail, nous ne voulons pas alimenter ce débat qui concerne d'avantage les physiologistes que les psychophysiciens. Néanmoins, parmi les arguments de Turin, un exemple surprenant d'accord aromatique a été évoqué et a attiré notre attention. Selon l'auteur, un mélange en proportion déterminée de guaiacol et de benzaldéhyde provoquerait la perception d'une odeur de vanille, car selon l'auteur, les molécules de ce mélange binaire produiraient une vibration résultante proche de celle que produit la vanilline, molécule dont l'odeur évoque, à elle seule, la vanille.

Ainsi, dans la seconde partie de ce chapitre, nous rappellerons dans un premier temps les grandes lignes des différentes théories relatives à la perception de la qualité des odeurs, puis nous relaterons une expérience où nous avons mis en oeuvre deux protocoles d'expérience distincts. Le premier de ces protocoles nous a permis de tester des proportions des deux composants du mélange binaire différentes, afin de vérifier la manifestation éventuelle d'un consensus quant à la perception d'une note odorante «vanille» dans ces mélanges de guaiacol et de benzaldéhyde.

Dans un second protocole, nous avons voulu confronter le mélange le plus compétitif quant à l'odeur de vanille avec un certain nombre de molécules odorantes connues pour présenter une note vanille.

### **- Le masquage olfactif**

Le masquage des odeurs peut se définir comme le résultat d'interactions qui se produisent à différents niveaux de la perception olfactive. Il s'agit d'un phénomène qui concerne des mélanges déterminés tant au niveau des molécules odorantes utilisées que dans les proportions appliquées. Dans la littérature, un certain nombre de théories tentent d'expliquer le masquage olfactif ; certaines, très spécifiques, ne concernent que ce phénomène, tandis que d'autres concernent de manière plus générale les interactions qui peuvent survenir dans les mélanges odorants.

Dans une expérience, nous rappellerons brièvement ces théories avant de nous pencher plus précisément sur deux exemples illustrant un concept déjà connu : le



masquage de l'odeur d'un acide par l'odeur de son éthyle ester.

**Expérience 1. La perception de la qualité des accords aromatiques : Cas d'un mélange binaire**

## 2.6 Etude de l'accord « Ananas »

Expérience préliminaire

### 2.6.1 Objectifs de l'étude

---

Dans une étude relative à la perception de la qualité des mélanges binaires (Barkat & Sicard, 2001), nous avons décidé d'explorer plus avant le concept d'accord aromatique grâce à un exemple concret. Nous avons alors élaboré un protocole expérimental nous permettant de caractériser l'effet d'accord grâce à un mélange binaire baptisé « accord ananas » qui nous avait été proposé par un parfumeur de renom (Joulain, 2001).

Selon le parfumeur, un mélange de furanéol et de caproate d'éthyle – à des concentrations déterminées et en proportions définies – permettait d'obtenir une odeur proche de celle de l'ananas. Nous avons décidé de vérifier l'existence et les propriétés de cet « accord » aromatique.

### 2.6.2 Matériel et procédure expérimentale

---

Les composés odorants que nous avons sélectionnés pour cette expérience étaient donc le furanéol et le caproate d'éthyle. Ces composés sont décrits par comme étant une odeur 'puissante' et 'vineuse fruitée' ou encore comme 'douce fruitée' (Boelens, 2001) pour le caproate d'éthyle et comme une odeur de caramel fruité ou de confiture pour le furanéol.

Après avoir testé les seuils de détection de ces deux composés, plusieurs dilutions logarithmiques des produits ont été réalisées dans de l'huile minérale (Sigma), 6 pour le caproate d'éthyle et 5 pour le furanéol, les concentrations choisies figurent dans le tableau 13 ci-après.

**Tab. 13 :** Rapports de dilutions effectuées à partir des produits purs issus du commerce. Les produits ont été dilués selon une règle logarithmique. Le caproate d'éthyle a été dilué 6 fois et le furanéol 5 fois de manière à rester au dessus des seuils de perception chez les sujets testés.

Caproate d'éthyle (Cap)	Cap 1	Cap 2	Cap 3	Cap 4	Cap 5	Cap 6
Furaneol (Fur)	Fur 1	Fur 2	Fur 3	Fur 4	Fur 5	
Rapports de concentration(dans de l'huile minérale)	1	1/3	1/9	1/27	1/81	1/243

Toutes les dilutions ont été croisées deux à deux de manière à obtenir la totalité des 30 mélanges binaires possibles présentée ci-dessous sous la forme d'une matrice. Le tableau 14 ci-dessous résume la procédure de fabrication de la matrice odorante.

**Tab. 14:** Matrice de mélanges odorants constituée pour l'étude de l'accord ananas pour l'étude de la fusion. Fur = furanéol, Cap = caproate d'éthyle. Chaque case correspond à un mélange physique composé de dilutions de furanéol et de caproate d'éthyle. Ainsi, par exemple, la case A11 correspond à un mélange de 1 ml de Cap 1 (produit pur) et de 1 ml de Fur 1 (produit pur) et la case A65 correspond à un mélange de 1 ml de Cap 6 (dilution au 1/243) et de 1 ml de Fur 5 (dilution au 1/81).

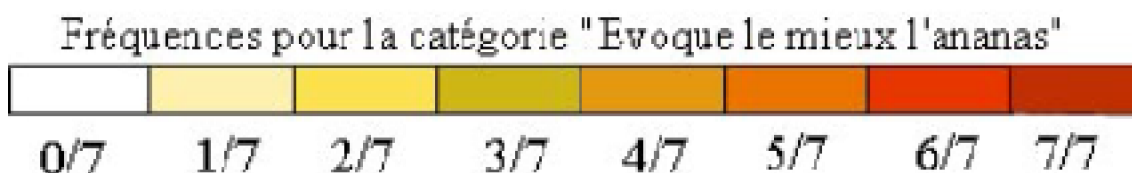
Dilutions	Cap 1	Cap 2	Cap 3	Cap 4	Cap 5	Cap 6
Fur 1	A11	A21	A31	A41	A51	A61
Fur 2	A12	A22	A32	A42	A52	A62
Fur 3	A13	A23	A33	A43	A53	A63
Fur 4	A14	A24	A34	A44	A54	A64
Fur 5	A15	A25	A35	A45	A55	A65

Vingt sujets ( $25 \pm 2$  ans) sujets avaient pour consigne de flairer un ensemble de 7 flacons odorants sélectionnés aléatoirement dans la matrice (Tab. 14), et pour chaque flacon, d'en évaluer l'intensité de l'odeur <sup>5</sup>.

Enfin, pour conclure l'expérience, nous leur avons demandé de trier les flacons en deux catégories : la catégorie des « flacons qui évoquent le mieux l'ananas » ou la catégorie des « flacons qui évoquent le moins bien l'ananas ».

### 2.6.3 Résultats & Discussion

	CAP 1	CAP 2	CAP 3	CAP 4	CAP 5	CAP 6
FUR 1	A 11	A 21	A 31	A 41	A 51	A 61
FUR 2	A 12	A 22	A 32	A 42	A 52	A 62
FUR 3	A 13	A 23	A 33	A 43	A 53	A 63
FUR 4	A 14	A 24	A 34	A 44	A 54	A 64
FUR 5	A 15	A 25	A 35	A 45	A 55	A 65

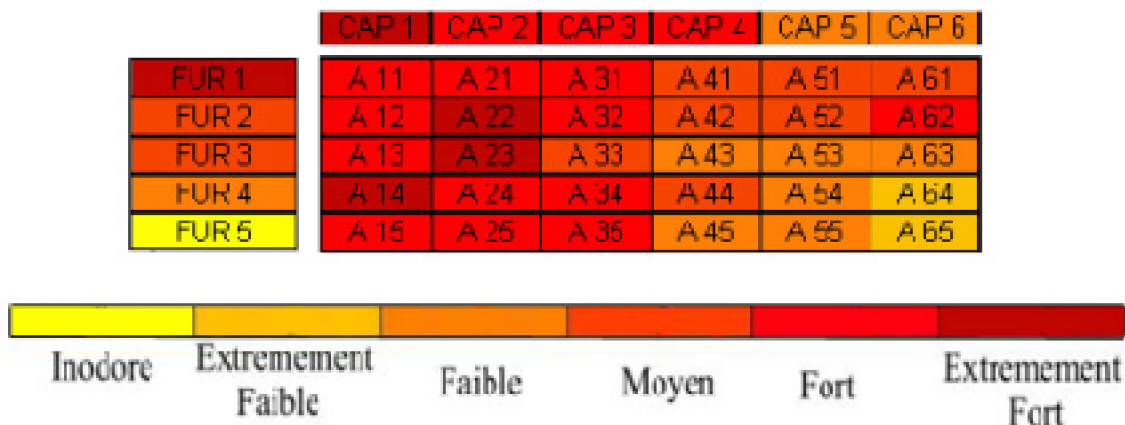


**Fig. 21 :** Résultat de la catégorisation des flacons odorants en deux classes, soit : celle des « flacons qui évoquent le mieux l'ananas » et celle des « flacons qui évoquent le moins

<sup>5</sup> L'évaluation de l'intensité se fait en utilisant la méthodologie décrite par la norme AFNOR NF X43-103, relative à la qualité de l'air et au mesurage olfactométrique.

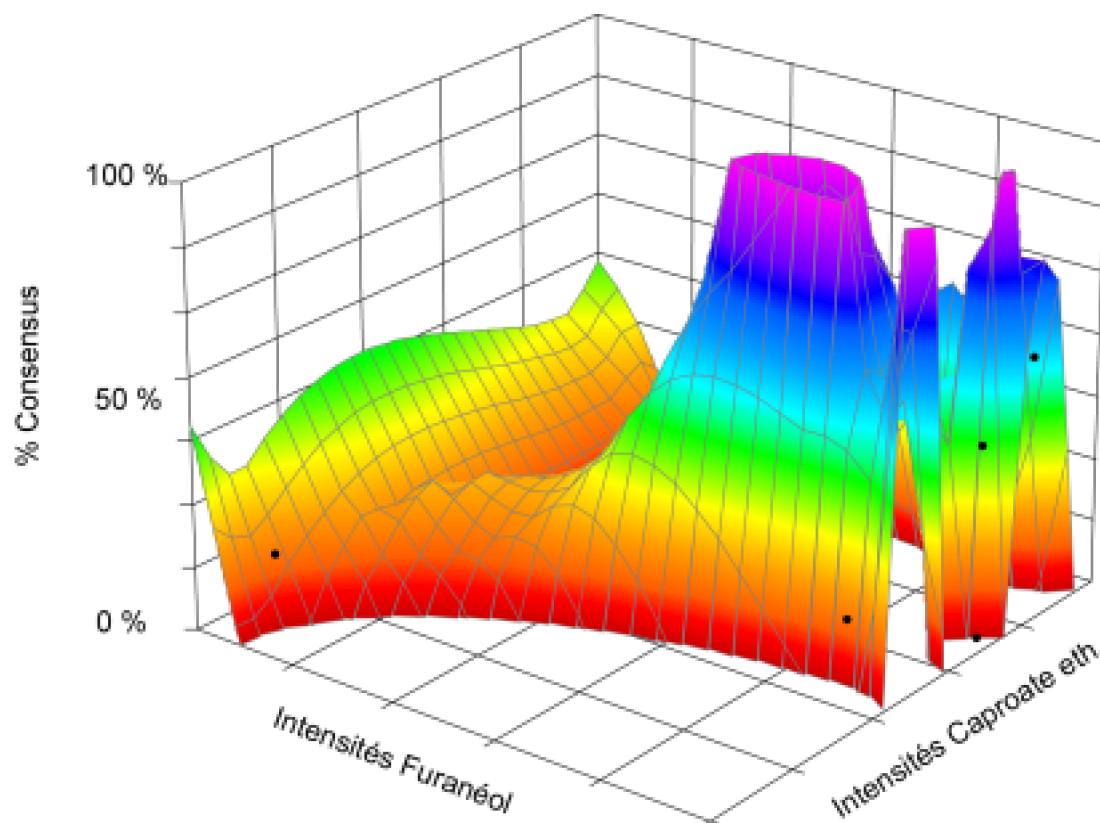
*l'ananas. Les fréquences utilisées pour construire ce tableau correspondent aux nombres de sujets qui ont classé les flacons dans la première catégorie.*

La figure 21 ci-dessus présente les fréquences d'occurrences des flacons odorants selon la ressemblance à l'odeur d'ananas. Nous remarquons qu'un seul mélange odorant a été systématiquement classé dans la catégorie des flacons qui évoquent le plus l'odeur d'ananas.



*Fig. 22 : Récapitulatif des évaluations de l'intensité des odeurs de la matrice de stimulation. Les mélanges binaires sont représentés par un « A » et sont constitués de 1 ml d'une solution de caproate d'éthyle (CAP) et de 1 ml d'une solution de furanéol (FUR). L'échelle linéaire au bas de la figure permet de rendre compte de l'intensité moyenne perçue par l'ensemble des sujets.*

La figure 22 indique que la distribution des intensités perçues des mélanges est relativement proportionnelle aux intensités perçues pour les composés odorants flairés seuls. Plus la concentration diminue, plus l'intensité perçue des composants du mélange diminue.



*Fig. 23 : Représentation (TableCurve©) de l'influence des intensités relatives des composantes du mélange sur le consensus. La figure représente le dôme obtenu selon la fréquence d'occurrence des flacons odorants dans la catégorie des flacons qui évoquent le plus l'ananas ou dans la catégorie des flacons qui évoquent le moins l'ananas. Les points d'intensité moyens ont été calculés et permettent de situer la position du consensus relatif à l'odeur d'ananas (sommet du dôme, en violet). La projection du point de consensus sur les axes d'intensités perçues des composantes montre qu'il faut mélanger, en intensités perçues, 35% de caproate et 65 % de furanéol pour obtenir le meilleur consensus quant à l'odeur d'ananas.*

Seul le mélange odorant du flacon A44 a été classé 7 fois sur 7 dans la " catégorie des flacons évoquant le mieux l'ananas " : il apparaît que cette appréciation est déterminée par un rapport particulier des concentrations des composantes du mélange, dans la série proposée.

Il apparaît que des concentrations moyennes de caproate d'éthyle évoquent dans une certaine mesure l'odeur d'ananas. Cependant, on constate que l'accord convenable est clairement optimisé par l'ajout, en bonnes proportions, du furanéol.

L'observation de la même matrice (fig. 21) indique au contraire que le furanéol seul ne peut en aucun cas évoquer l'odeur d'ananas (fréquence uniforme de 0/7 pour toutes les dilutions de Fur 1 à Fur 5).

L'analyse de la représentation de la figure 23 indique qu'il existe une gamme relativement importante de proportions de furanéol qui conduisent à un bon « consensus ananas ». Il s'agit d'un niveau de concentration moyen, la proportion d'intensité perçue de

furanéol devant être très importante dans le mélange pour obtenir l'accord (65 % de furanéol contre 35 % de caproate d'éthyle).

La comparaison des profils qualitatifs des composés odorants en mélange et isolément suggère que l'odeur d'ananas ne peut pas être considérée comme nouvelle et différente de celles des constituants du mélange mais qu'un optimum peut être obtenu en affinant ou en ajoutant une facette à l'odeur propre de caproate d'éthyle. Cette série de mesures confirme donc expérimentalement l'idée du parfumeur, selon laquelle l'ajout d'une certaine proportion de furanéol apporte au caproate d'éthyle une modification essentielle, permettant d'obtenir un accord ananas, consensuel.

Ainsi, cette expérience préliminaire nous a permis de sonder un espace d'odeurs (représenté par la matrice de stimulation) pour vérifier la présence d'un accord aromatique évoquant l'ananas et de déterminer le rapport de concentration de chacun des composants du mélanges.

Par la suite, nous avons élaboré un nouveau protocole expérimental pour tester les performances de notre « candidat » parmi une sélection d'odorants évoquant l'odeur d'ananas.

### Expérience Principale

#### 2.6.4 Matériel et méthode

---

- Sujets

Vingt sujets (10 femmes et 10 hommes) ont participé à cette expérience. Leur moyenne d'âge était de 23 ans ( $\pm 3$  ans) et 10 d'entre eux étaient fumeurs réguliers.

- Stimuli

Dix stimuli odorants ont été sélectionnés soit parce qu'ils évoquent l'odeur d'ananas soit parce qu'ils entrent dans la composition de « formulations » odorantes censées évoquer l'odeur d'ananas. L'équipe « Aromes » (INRA) qui a collaboré sur cette étude nous a fourni les formulations A1 et A7 ainsi que les matières premières pour les élaborer. Les 10 stimuli odorants ont été mis en solution dans de l'alcool éthylique (Et-OH, 90°).

Ainsi, la formulation A1 a été réalisée en mélangeant de l'isobutyrate d'éthyle et de l'éthyle maltol et la formulation A7 est un mélange d'isobutyrate d'éthyle, de l'éthyle maltol et d'allyle ionone. En ce qui concerne notre mélange odorant « consensuel », suite à l'expérience préliminaire que nous avons présentée dans la partie « objectifs », nous avons sélectionné le mélange binaire composé de caproate d'éthyle (1/27) et de furanéol (1/27) qui a donné le meilleur consensus quant à l'odeur d'ananas. Dans cette expérience, nous avons systématiquement proposé les mélanges candidats mais aussi leurs composants (présentés donc hors mélange). Le tableau 14 présente la liste du matériel odorant que nous avons utilisé dans cette expérience.

Nous avons alors préparé un ensemble de stimuli (10) sur des mouillettes de papier filtre (type parfumerie) à raison de 0,5 ml de solution sur la mouillette et avons inséré

chaque mouillette dans un tube à essai en Pyrex que nous avons laissé fermé (bouchon plastique à ailettes) pendant 24 heures avant la phase expérimentale. Les mouillettes étaient placées au fond des tubes à essais de manière à ce que les sujets ne puissent pas les atteindre.

**Tab. 14 :** Stimuli odorants utilisés dans l'expérience de classement. Trois mélanges équivolumentiques (2 binaires et 1 ternaire) ont été préparés en solution. Il s'agit d'un mélange de caproate d'éthyle (3,7%) et de furanéol (3,7%), d'un mélange d'isobutyrate d'éthyle (3%) et d'éthyle maltol (0,7%) et enfin d'un mélange composé de d'isobutyrate d'éthyle (2,05%), d'éthyle maltol (0,5%) et d'allyle ionone (0,3%). Nous avons également préparé des solutions des composés pris hors mélange et une solution d'huile essentielle d'ananas (Euracli). Les solutions ont été préparées dans de l'alcool éthylique (Et-OH) et 0,5 ml de solution ont été déposé ssur des mouillettes de parfumeurs.

Substances	Composition	Dilutions dans Et-OH (90°)
Caproate d'éthyle		3,7 %
Furanéol		3,7 %
Caproate d'éthyle + Furanéol	1 + 2	3,7 % + 3,7 %
Huile Essentielle « ananas » EURACLI		10 %
Formulation A1	7 + 8	3 % + 0,7 %
Caproate d'allyle		10 %
Isobutyrate d'éthyle		10 %
Ethyle maltol		10 %
Allyle ionone		10 %
Formulation A7	7 + 8 + 9	2,05 % + 0,5 % + 0,30 %

- Procédure expérimentale

L'expérience est constituée de deux tâches distinctes :

Dans un premier temps, les sujets doivent flirer le contenu de chaque tube odorant de manière à les classer selon leur ressemblance à l'odeur d'ananas telle qu'ils l'imaginent :

On dispose les tubes codés dans un ordre aléatoire face au sujet. Pour chaque tube il doit :

- Ouvrir le tube à essai.
- Flirer le contenu.
- Refermer le tube à essai.
- Placer le tube sur le portoir à 10 emplacements mis à disposition de manière à ce que le tube dont l'odeur évoque le plus l'ananas soit placé à l'extrémité du portoir marqué d'un « + » et que le tube dont l'odeur évoque le moins l'odeur d'ananas soit placé à son extrême opposé (marqué d'un « - »).
- Eventuellement, les sujets peuvent revenir sur leur classement jusqu'à ce qu'ils considèrent leur ordonnancement achevé.

Lorsque le classement est terminé, le sujet reporte sur la feuille de réponse les codes des flacons dans l'ordre croissant où il les a disposés, donc du « - » au « + » ressemblant.

### Jugements de typicité et comestibilité

Après la première phase, on dispose l'ensemble des tubes dans un ordre aléatoire face au sujet. Pour chaque tube il doit alors :

- Ouvrir le tube à essai.
- Flairer le contenu.
- Refermer le tube à essai.
- Sur des échelles en 9 points bornées à leur extrémités par une terminologie appropriée à la question posée, les sujets doivent évaluer, en cochant une des cases de l'échelle: soit la typicité par rapport à l'odeur d'ananas telle qu'ils l'imaginent, soit la comestibilité du fruit qui sentirait l'odeur contenue dans le flacon.

<b>Pas du tout typique</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<b>Extrêmement typique</b>
<b>Pas du tout comestible</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<b>Tout a fait comestible</b>

*Fig. 24 : Echelles en 9 points utilisées pour les évaluations psychophysiques. Les sujets doivent évaluer la typicité par rapport à l'odeur d'ananas telle qu'ils l'imaginent et la comestibilité du fruit évoqué par l'odeur du flacon en cochant la case qui correspond le plus à leurs sensations.*

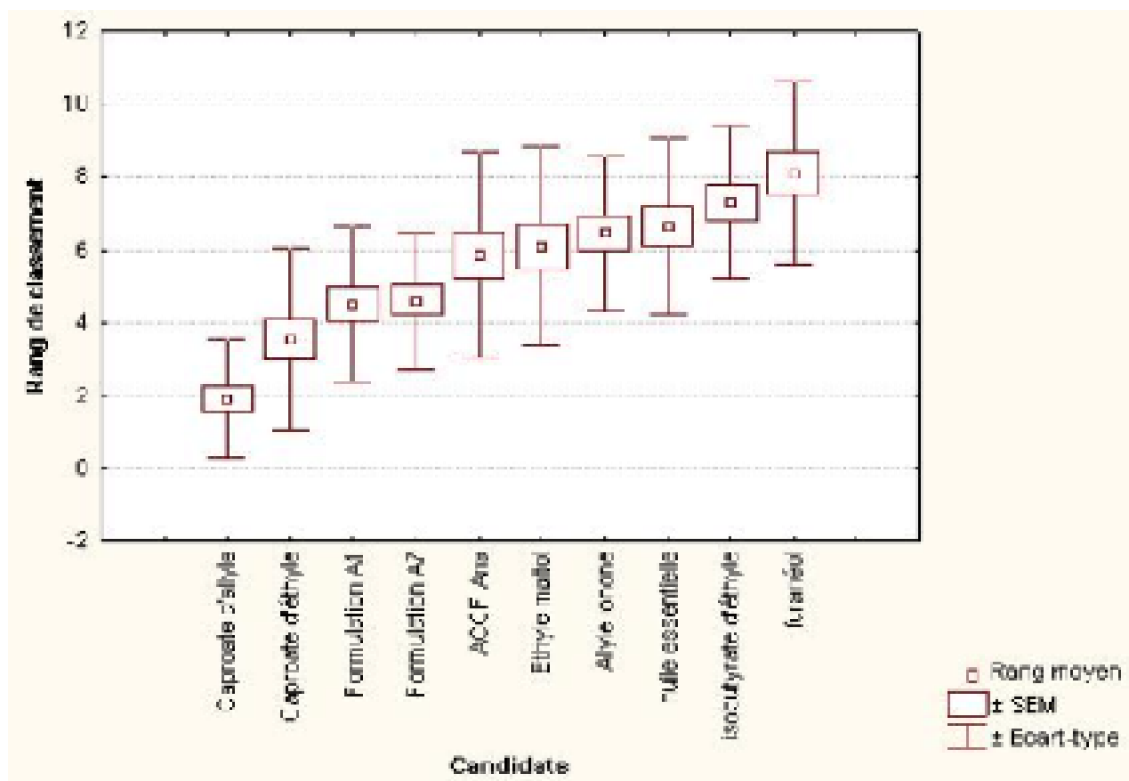
- Traitements des résultats
  - Concordance des sujets :

Les résultats issus des classements des individus ont été reportés dans un tableau afin de vérifier la cohérence des réponses des sujets. Nous avons classé les réponses concernant les positions des odorants en fonctions de leur ressemblance à l'odeur d'ananas, sur 10 rangs (un rang par tube odorant). Nous avons calculé le coefficient de concordance de Kendall) pour vérifier la concordance des sujets sur les classements effectués pour les 10 rangs de manière à tester l'accord des sujets sur le classement moyen obtenu.

- Analyses des corrélations :

Nous avons calculé le coefficient de corrélation entre jugement de typicité et de comestibilité, et les coefficients de corrélation entre jugements de typicité et rangs dans l'opération de classement ou entre jugements de comestibilité et ces mêmes rangs.

## 2.6.5 Résultats



**Fig. 25 :** Classement moyen des 10 odorants selon leur ressemblance qualitative par rapport à l'odeur d'ananas tel que les sujets se l'imaginent. Le caproate d'allyle est classé premier en moyenne car les sujets lui confèrent en moyenne la plus forte ressemblance avec l'odeur d'ananas suivi du caproate d'éthyle. La formulation A1 est un mélange binaire équi-volumique composé d'isobutyrate d'éthyle (3 %) et d'éthyle maltol (0,7 %) a été classé 3<sup>ème</sup> et la formulation A7 qui est un mélange ternaire équi-volumique composé de isobutyrate d'éthyle (2,05 %), d'éthyle maltol (0,5 %) et d'allyle ionone (0,30 %) a été classé 4<sup>ème</sup>. Notre candidat « local », l'accord fusion (ACCF) est un mélange binaire équi-volumique constitué de caproate d'éthyle (3,7 %) et de furanéol (3,7 %) et a été classé 5<sup>ème</sup>. Puis les dernières places sont occupées par l'éthyle maltol, l'allyle ionone, l'huile essentielle (Euracli), l'isobutyrate d'éthyle et le furanéol.

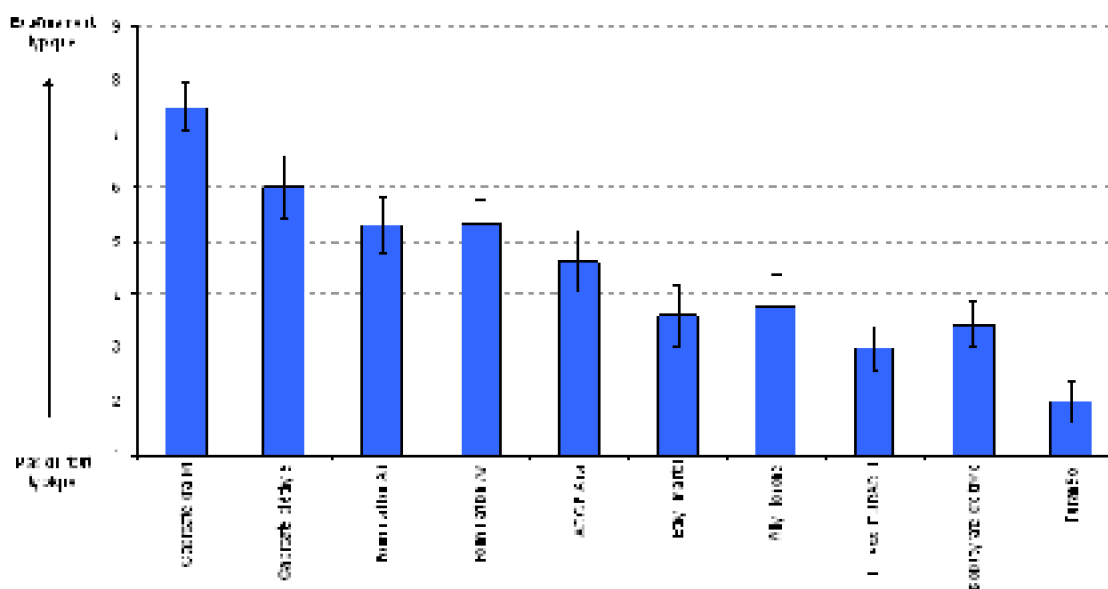
L'analyse de la figure 25 indique que le caproate d'allyle est le produit que les sujets ont placé en première position, considéré ainsi parmi les échantillons testés comme le plus évocateur de l'odeur d'ananas. Le caproate d'éthyle a en moyenne été placé en second. Puis les 2 formulations se succèdent (formulation A1, formulation A7) suivies de notre candidat (ACCF), le mélange binaire constitué de caproate d'éthyle et de furanéol, placé en 5<sup>ème</sup> position.

**Tab. 16 :** Rangs moyens pour chaque stimulus odorant et coefficient de concordance de Kendall sur les classements des 10 produits. On remarque que tous les sujets sont d'accord sur le classement global effectué sur l'ensemble des odorants.



Candidats	Rang moyen
Caproate d'allyle	1,9
Caproate d'éthyle	3,5
Formulation A1	4,5
Formulation A7	4,6
AccF Ana - Caproate d'éthyle + Furanéol -	5,8
Ethyle maltol	6,1
Allyle ionone	6,4
Huile Essentielle « ananas »	6,6
Isobutyrate d'éthyle	7,3
Furanéol	8,1
Coefficient de Kendall	0,38 p
Probabilité associée	<.000001

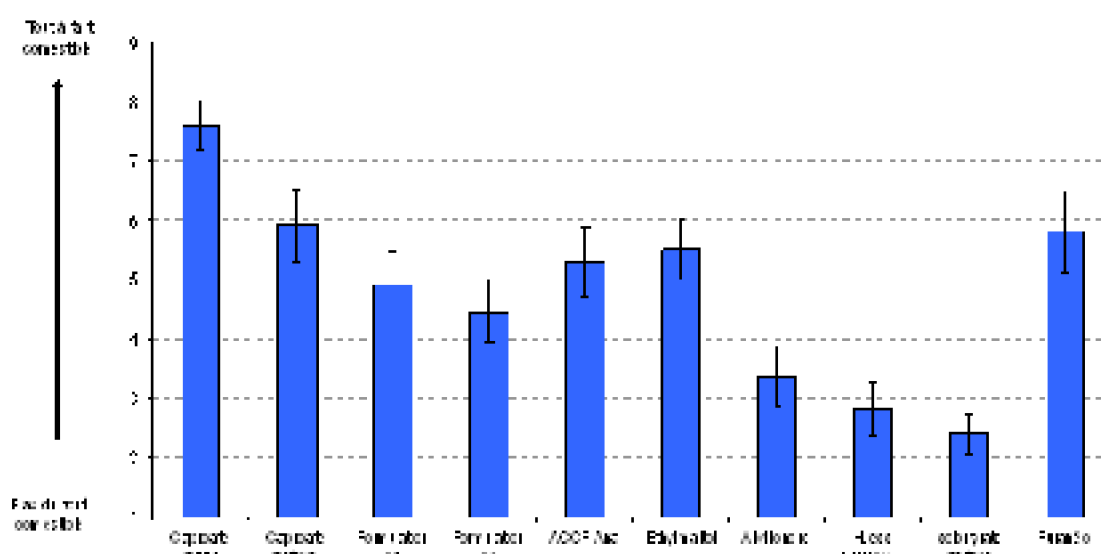
Le tableau 16 présente les informations sur la concordance entre les sujets en ce qui concerne le classement dans l'ordre de ressemblance croissante des 10 odorants. Bien que le coefficient de Kendall obtenu ne soit pas très élevé (0,38), il reste très fortement significatif ( $p < .000001$ ) et indique que tous les sujets ont réalisé un classement équivalent. Nous pouvons d'ailleurs le remarquer en observant le rang moyen attribué par les sujets chaque stimulus. Il apparaît que certains produits sont qualitativement très proches et ils sont donc plus difficiles à organiser, contrairement à d'autres, plus distincts qui se démarquent mieux de l'ensemble.



*Fig. 26 : Résultats des évaluations de la typicité par rapport à l'odeur d'ananas. Les sujets devaient évaluer la typicité de chaque odeur par rapport à l'odeur d'ananas telle qu'ils l'imaginaient en attribuant une note de 1 (pas du tout typique) à 9 (extrêmement typique). On remarque que les produits les plus typiques sont le caproate d'allyle et le caproate*

d'éthyle, suivis des mélanges (formulation A1, formulation A7 et AccF Ana). Les odorants les moins typiques sont les composés odorants ayant servi à affiner les mélanges et ne peuvent, isolément évoquer correctement la note ananas.

Les résultats des évaluations relatifs à la typicité des odeurs par rapport à l'odeur d'ananas sont présentés par la figure 26. On remarque que les produits les plus typiques sont le caproate d'allyle et le caproate d'éthyle. Les mélanges (formulation A1, formulation A7 et AccF Ana) ont obtenu des notes de typicité plus faibles, mais au dessus de la moyenne. En revanche, les odorants les moins typiques sont les composés odorants ayant servi à affiner la représentativité des mélanges et ne peuvent, isolément, évoquer correctement la note ananas.



**Fig. 27 :** Résultats des évaluations de la comestibilité du fruit évoqué par les odeurs présentées. Les sujets devaient évaluer la comestibilité du fruit suscité par les odeurs présentées en attribuant une note de 1 (pas du tout comestible) à 9 (tout à fait comestible). On remarque que les produits les plus comestibles sont évoqués par le caproate d'allyle et le caproate d'éthyle. « AccF Ana » semble évoquer un aliment relativement comestible. Certains odorants comme l'éthyle maltol et le furanéol évoquent d'avantage de comestibilité, bien qu'ils ne soient pas très représentatifs de l'odeur d'ananas.

En ce qui concerne l'évaluation de la comestibilité du fruit évoqué par les odorants (fig. 27), nous pouvons souligner que la perception du caproate d'allyle et du caproate d'éthyle, de l'odeur des mélanges binaires (AccF Ana, et formulation A1) ainsi que de l'éthyle maltol et du furanéol suscite des fruits assez comestibles alors que d'autres odeurs (formulation A7, allyle ionone, huile essentielle et isobutyrate d'éthyle) ne produisent que peu d'attraction alimentaire.

**Tab. 17 :** Coefficients de corrélation entre typicité et comestibilité, typicité et rang de classement et entre comestibilité et rang de classement. Les valeurs de ces coefficients suggèrent que plus une odeur est typique de l'ananas, plus la comestibilité du fruit évoqué est grande. D'autre part, il apparaît que la place d'un candidat dans le classement est très fortement corrélée à sa typicité, alors qu'elle l'est moins quant au

degré de comestibilité du fruit évoqué par l'odeur.

	Coefficients de corrélation (R <sup>2</sup> )	Probabilités associées
Typicité / Comestibilité	0,579	p <,0001
Typicité / Rang	0,312	p <,0001
Comestibilité / Rang	0,175	p = 0,013

Le tableau 17 concernant les calculs de coefficients de corrélation nous montre que la typicité et la comestibilité apparaissent très fortement corrélées lors de cette expérience (R<sup>2</sup> = 0,579). De plus, on voit que le rang de classement est proportionnel à la typicité de l'odeur (R<sup>2</sup> = 0,312) et à la comestibilité du fruit suscitée par l'odeur (R<sup>2</sup> = 0,175), c'est-à-dire que plus une odeur sera jugée typique et le fruit qu'elle suscite comestible, plus cet échantillon odorant sera bien classé, c'est-à-dire perçu comme un bon représentant de l'ananas.

## 2.6.6 Discussion

L'ester éthylique de l'acide caproïque (*i.e.* caproate d'éthyle), à lui seul, peut évoquer une odeur fruitée d'ananas. L'optimum de la qualité de l'évocation semble dépendant de l'intensité. Nous l'avons vu, l'ajout de furanéol améliore l'évocation de l'odeur d'ananas. Dans notre étude préliminaire, la surprise fut que 100 % des sujets interrogés considéraient un des mélanges parmi ceux proposés comme le meilleur représentant de l'odeur d'ananas : dans un mélange de leur dilution au 1/27, le furanéol (note douce caramélisée) et le caproate d'éthyle (note fruitée) semblent effectivement évoquer au mieux l'odeur d'ananas pour tous les sujets. On ne peut pas exclure que ce consensus soit aussi dépendant du choix des autres mélanges présentés.

Sa robustesse a pu être testée en confrontant ce mélange consensuel à une plus large sélection de substances odorantes, connues pour évoquer l'ananas, et nous avons pu remarquer que notre accord (AccF Ana) a obtenu une place honorable lors de l'épreuve de classement. En effet, si nous nous penchons sur les résultats, on remarque que le flacon odorant qui a obtenu l'unanimité quant à l'évocation d'ananas contenait seulement du caproate d'allyle, suivi du flacon contenant du caproate d'éthyle. Ils sont tous deux des composés odorants purs, et non des mélanges. En revanche, dans le mélange de la formulation A1, l'odeur du caproate d'allyle a été « affinée » par l'ajout d'éthyle maltol, de la même manière que nous avons affiné l'odeur du caproate d'éthyle dans l'expérience préliminaire. En continuant notre analyse, nous ne retiendrons pas le mélange de la formulation A7, qui est un mélange ternaire constitué de caproate d'allyle, d'éthyle maltol et d'allyle ionone. Ce mélange arrive bien à la quatrième position du classement mais ne peut réellement représenter un concurrent pour notre propre accord. Comme nous l'avons suggéré préalablement, en partant d'une odeur qui évoque à elle seule une note odorante particulière (dans notre cas, l'ananas) il est possible d'améliorer l'évocation en ajoutant, dans certaines limites, d'autres composants odorants. Dans certains cas, cet ajout améliore l'odeur finale du mélange, mais pour le cas de la formule A7, on remarque que l'ajout d'allyle ionone (qui ne semble pas lui-même évoquer l'odeur

d'ananas) diminue la typicité du mélange lui-même et fait chuter le mélange binaire (formule A1) d'un rang.

Le mélange binaire que nous avons voulu tester dans cette expérience était constitué de caproate d'éthyle et de furanéol en proportions volumiques égales et dilués au 1/10. Il est apparu que la population de sujets testés a considéré que cette odeur représentait un bon candidat quant à l'évocation de l'ananas. En effet, placé juste après le mélange ternaire, nous pouvons en conclure que notre mélange a permis d'évoquer une odeur d'ananas très compétitive et même plus écologique par rapport aux autres formulations, si l'on tient compte des résultats du jugement de comestibilité.

Cependant, en observant les descriptions proposées par la base de données BACIS (Boolens, 2001) pour le caproate d'allyle et le caproate d'éthyle, perçus comme étant les meilleurs représentants de l'odeur d'ananas lors de cette expérience, on remarque que les deux composés odorants ne sont pas équivalents. En effet, le caproate d'allyle est décrit comme un composé à « odeur puissante, fruitée, grasse, caractéristique de l'ananas frais, avec une note de rhum » tandis que le caproate d'éthyle a une odeur « douce, fruitée, vineuse pouvant évoquer la pomme, la banane, la framboise, le rhum ou l'ananas.

Ceci nous permet de rappeler que selon notre définition de l'accord aromatique, l'odeur de chacun des composants du mélange ne doit pas évoquer, à elle seule, la note odorante désirée, mais que l'odeur résultante serait plutôt une fusion de différentes notes odorantes. Selon cette définition et les descriptions proposées par BACIS, il semble que notre mélange corresponde d'avantage au concept d'accord fusion.

Signalons tout de même que les différents modèles de mélanges (binaires ou plus) censés évoquer l'ananas peuvent provenir de diverses sources et domaines de l'aromatique, on comprendra alors plus facilement pourquoi certains seront perçus comme plus écologiques (comestible), comme les mélanges avec une note caramel (éthyle maltol ou furanéol) alors que d'autres seront destinés à l'industrie de la parfumerie et ne nécessitent aucune connotation alimentaire. Ainsi, il convient de relativiser l'opposition que nous avons mise en jeu lors de ce protocole et de considérer les deux mélanges comme des modèles d'accords binaires satisfaisants.

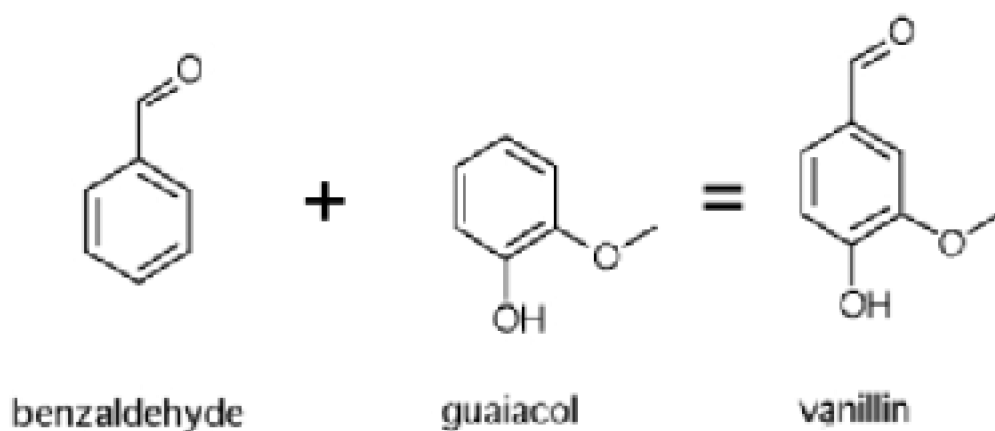
## 2.7 Etude de l'accord Vanille

### 2.7.1 Objectifs de l'étude

---

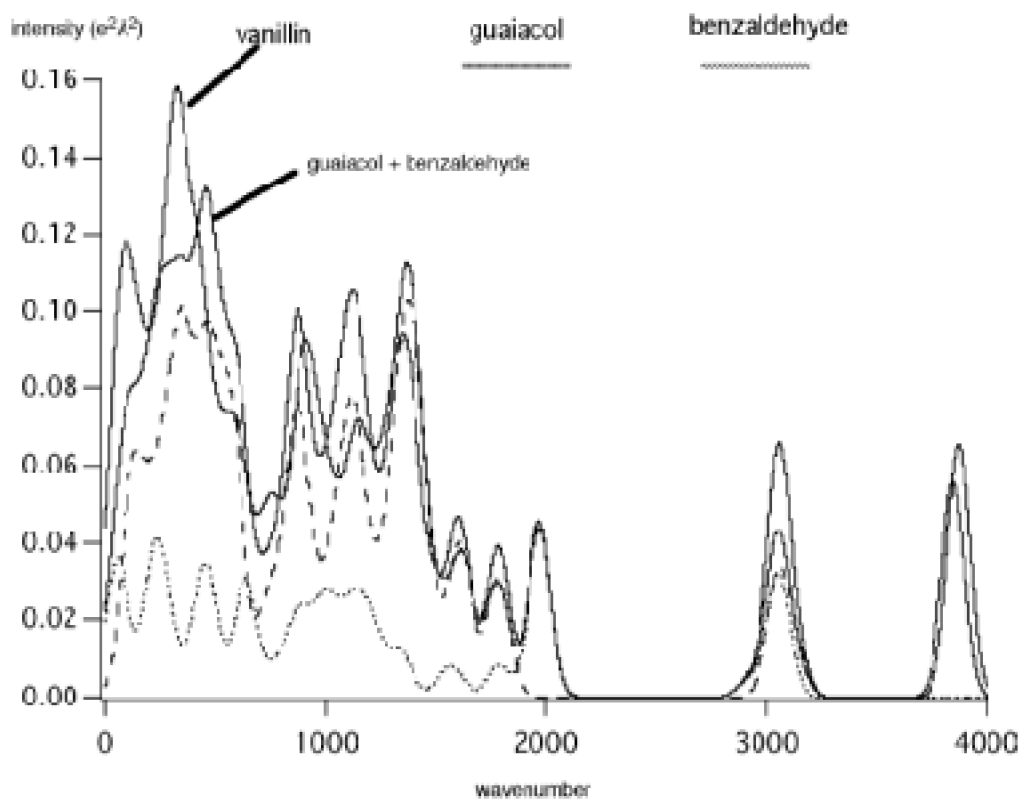
Comme nous le suggérons à la fin de la partie introductive de ce chapitre, selon Turin, il serait possible de « synthétiser » une odeur proche de celle de la vanilline (molécule évoquant la vanille) en mélangeant des volumes égaux de guaiacol (note odorante, douce, phénolée) et de benzaldéhyde (évoquant l'amande amère). Ainsi, comme l'illustre la figure 28 ci-après, dans une proportion 1:1, une note odorante « vanille » serait

perceptible par les sujets humains (Turin, 1996).



*Fig. 28 :* Les molécules de benzaldéhyde (BZA, odeur évoquant l'amande amère), de guaiacol (Gua, odeur douce phénolée) et de vanilline (VAN, odeur évoquant la vanille). Selon Turin (1996), un mélange dans les proportions 1 : 1 de BZA et de GAI provoquerait une perception olfactive proche de celle induite par VAN.

Ainsi, à titre d'exemple, la vibration résultante, calculée par Turin, du mélange benzaldéhyde et de guaiacol est proche de celle émise par la molécule de vanilline elle-même et provoque par conséquent l'illusion perceptive d'une odeur de vanille (fig. 29).



*Fig. 29 : Illustration de la théorie vibratoire dans la perception olfactive selon Turin (1996). Une odeur de vanilline pourrait être évoquée en mélangeant dans une proportion 1:1 une solution de benzaldéhyde et de guaiacol car la vibration moléculaire résultante de ce mélange serait très proche de celle de la molécule de vanilline.*

Si le concept de cette théorie est bien plus complexe que celui qui a été précédemment esquissé et reste éloigné de nos préoccupations scientifiques dans ce mémoire de thèse, l'exemple concernant le mélange binaire conduisant à la perception d'une odeur de vanille a retenu notre attention et nous avons décidé d'élaborer une procédure psychophysique nous permettant de vérifier l'existence de ce que nous définirons par la suite comme « l'accord fusion vanille » (ACCF Van).

Dans son article, Turin mentionne l'existence de l'accord vanille, en proportion volumique (1:1) de chaque composant du mélange, mais ne précise pas les concentrations molaires du benzaldéhyde et du guaiacol à utiliser.

Dans un premier temps, nous avons voulu vérifier la présence éventuelle d'une note « vanille » dans différents mélanges de benzaldéhyde et de guaiacol (en proportions 1:1), mais à différentes concentrations. Notre objectif était de sélectionner le mélange qui apporterait le meilleur consensus quant à l'odeur de vanille et, dans un second protocole, de le confronter à une sélection de produits odorants présentant potentiellement la note vanillée (protocole du même type que pour celui utilisé pour l'accord ananas).

**- Sélection du stimulus « AccF Van » :**

### 2.7.2 Matériel et méthode

---

- Sujets

L'expérience a été effectuée par un ensemble représentatif de la population comprenant 70 sujets (25 femmes et 45 hommes) âgés en moyenne de 23 ans ( $\pm 15$  ans). Tous les sujets ont déclaré percevoir une odeur dans les flacons présentés et aucun n'a déclaré de problème olfactif.

- Stimuli

Une solution mère du mélange binaire constitué de benzaldéhyde pur (Aldrich, 98%) et de guaiacol pur (Aldrich, 99%) (en proportions 1 :1) a été préparée. Puis, nous avons successivement dilué une partie de cette solution mère dans de l'huile minérale (Nujol, Aldrich) de manière à obtenir une série de flacons odorants de différentes concentrations présentées dans le tableau 18.

**Tab. 18 : Concentrations des mélanges binaires (benzaldéhyde + guaiacol) en proportion 1:1 réalisées par dilutions de la solution mère (mélange de produits purs).**

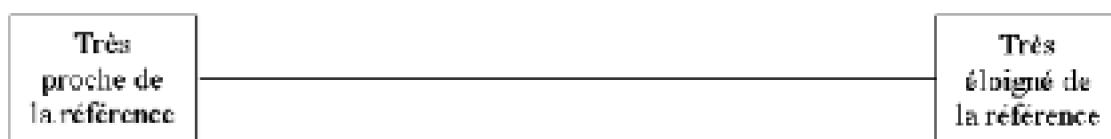
Concentration du mélange binaire (BZA + GUA) en proportion 1:1				
$10^{-1}$	$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$

Quatre millilitres de chaque mélange préparé ont été introduits dans un flacon de verre fumé de 12 ml contenant un tampon de polyéthylène hydrophobe de 20 cm<sup>2</sup>. Chaque flacon a alors été étiqueté et numéroté par un code à 3 chiffres tiré au hasard.

D'autre part, nous avons préparé une solution de référence à partir de vanilline cristallisée (Rhodia©). Cette vanilline a été solubilisée dans l'huile minérale jusqu'à saturation, à une concentration de 13 %. Nous avons dilué cette solution pure de vanilline au 1/10<sup>ème</sup> et en avons introduit 4 ml dans un flacon de verre fumé (12 ml) étiqueté « Référence vanille ».

### · Procédure expérimentale

Dans un premier temps, les sujets devaient se familiariser avec l'odeur de vanille « communément admise », c'est-à-dire telle que nous la rencontrons dans les aliments ou autres produits d'utilisation quotidienne. Nous leur avons fourni le flacon « référence vanille » qu'ils devaient flairer, puis nous avons mis à leur disposition les cinq flacons tests contenant les 5 mélanges benzaldéhyde / guaiacol (tab. 18). Les sujets avaient pour consigne de n'ouvrir qu'un seul flacon à la fois, d'en flairer le contenu et d'évaluer son degré de similitude par rapport à l'odeur de référence en marquant d'un trait vertical une échelle linéaire de 10 cm mise à leur disposition, illustrée par la figure 30.



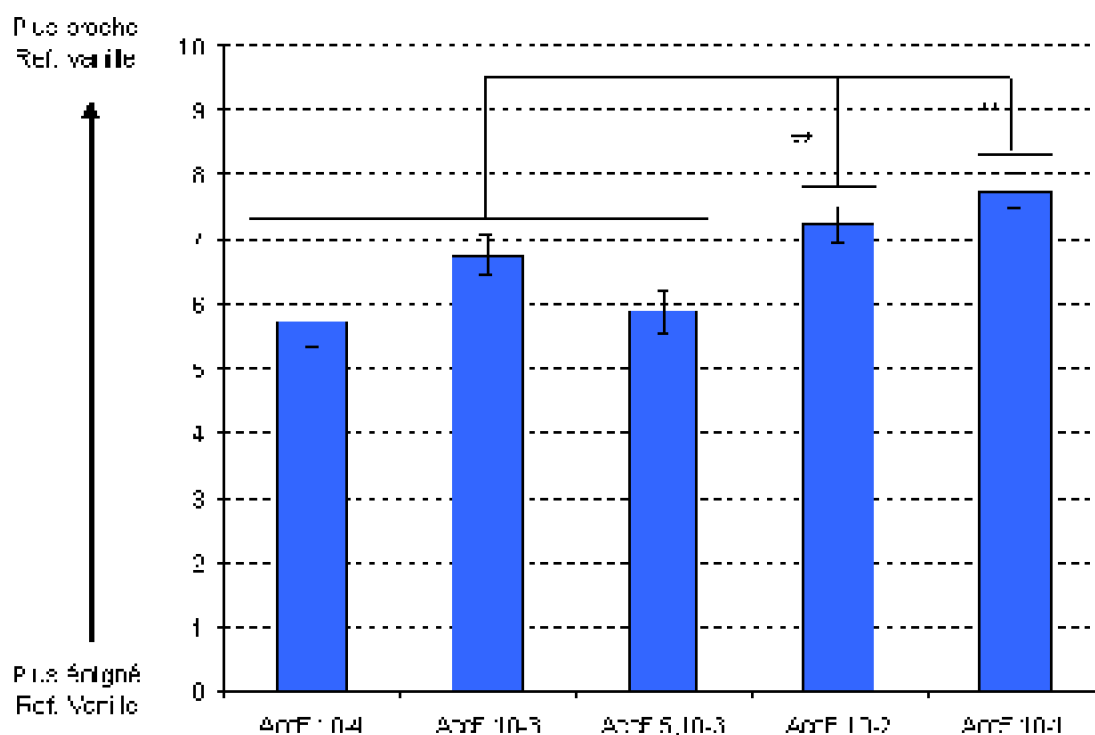
*Fig. 30 : Echelle linéaire utilisée pour évaluer le degré de similitude entre un flacon odorant et une odeur de référence qui a été préalablement présentée aux sujets. Pour reporter leur réponse, les sujets doivent poser un trait vertical à l'endroit qui décrit le mieux leur jugement.*

### · Traitements des résultats

Les moyennes des évaluations pour chaque stimulus ont été calculées et une analyse de la variance (ANOVA) à un facteur (5 modalités  $\Leftrightarrow$  5 concentrations) a été effectuée.

## 2.7.3 Résultats

---



*Fig. 31 : Moyennes des évaluations de la similitude perçue entre l'odeur de référence vanille et les mélanges binaires de benzaldéhyde et de guaiacol (en proportion 1:1) à différentes concentrations. Il apparaît que les flacons conduisant à l'émergence d'une note odorante vanille sont les mélanges AccF 10<sup>-2</sup> et AccF 10<sup>-1</sup>.*

L'analyse des résultats des évaluations concernant la similitude de l'odeur perçue des mélanges présentés en comparaison de l'odeur de référence vanille (fig. 31) indique un effet de l'intensité du mélange sur la ressemblance à l'odeur de référence [F(4,276)=9,45, p=0,0000003]. Il apparaît ainsi que les mélanges les moins dilués (10<sup>-2</sup> et 10<sup>-1</sup>) ont laissé émerger une note proche de celle de vanille que les sujets ont pu détecter.

## 2.7.4 Conclusion préliminaire

Cette étude préliminaire nous a permis de mieux cerner les concentrations du mélange binaire constitué de benzaldéhyde et de guaiacol (en proportion 1:1) conduisant à la perception d'une odeur cible, ou plus exactement présentant une note odorante proche de l'odeur de vanille (avec une note de similitude de 7 à 8 sur 10).

Ainsi, nous avons décidé d'utiliser un mélange binaire équimolaire constitué de benzaldéhyde et de guaiacol dilué au 1/10<sup>ème</sup> pour représenter notre candidat pour évoquer l'odeur de vanille dans une expérience de classement des odorants selon la qualité de leur évocation de l'odeur de vanille.

**- Confrontation de notre mélange vanillé à une sélection d'odorants évoquant la vanille.**



## 2.7.5 Matériel et méthode

---

- Sujets

Vingt sujets (10 femmes et 10 hommes) ont participé à cette expérience. Leur moyenne d'âge était de 22 ans ( $\pm 3$  ans) et 11 d'entre eux étaient fumeurs.

- Stimulations olfactives

Sept stimuli odorants ont été sélectionnés pour cette expérience. Leur mise en solution a été réalisée dans de l'alcool éthylique (Et-OH, 90°). Ces stimuli sont :

- Une solution de 4 ml de benzaldéhyde diluée  $1/10^{\text{ème}}$ .
- Une solution de 4ml de guaiacol diluée  $1/10^{\text{ème}}$ .
- Une solution de 4 ml de vanilline pure (Rhodia©) à saturation (13%) puis diluée au  $1/10^{\text{ème}}$ .
- Une solution de 4 ml d'arome vanille (Givaudan©) dilué  $1/10^{\text{ème}}$ .
- Un mélange binaire constitué de 3 ml de benzaldéhyde (1/10) et de 1 ml de guaiacol (1/10).
- Un mélange binaire constitué de 2 ml de benzaldéhyde (1/10) et de 2 ml de guaiacol (1/10).
- Un mélange binaire constitué de 1 ml de benzaldéhyde (1/10) et de 3 ml de guaiacol (1/10).

Chaque stimulus a été déposé sur une mouillette de papier filtre (type parfumerie) à raison de 0,5 ml de solution sur la mouillette et a été inséré dans un tube à essai en Pyrex que nous avons laissé fermé (bouchon de plastique à ailettes) pendant 24 heures avant la phase expérimentale de stimulation. La mouillette était placée au fond du tube de manière à ce que les sujets ne puissent pas les atteindre.

Le tableau 19 présente l'ensemble des stimulations odorantes élaborées pour cette expérience.

**Tab. 19 :** Stimuli odorants utilisés dans l'expérience de classement. Des solutions mères de benzaldéhyde, de guaiacol, de vanilline pure (Rhodia©) et d'arôme vanille (Givaudan©) en proportions différentes ont été préparées et diluées à  $10^{-1}$ . Trois mélanges binaires (guaiacol + benzaldéhyde) ont alors été préparés en solution volume à volume. Les solutions ont été préparées dans de l'alcool éthylique (Et-OH) et 0,5 ml de solution a été déposé sur des mouillettes de parfumeurs.

## La qualité perçue des mélanges Odorants : Analyses Psychophysologiques

N°	Substances	Composition (proportion de volume)	Dilutions dans Et-OH (90°)
1	Benzaldéhyde		$10^{-1}$
2	Guaiacol		$10^{-1}$
3	Vanilline pure		$10^{-1}$ (de sol. Sat 13%)
4	Vanille Givaudan©		$10^{-1}$
5	AccF Van (3:1)	Guaiacol (3/4) – Benzaldéhyde (1/4)	$10^{-1} + 10^{-1}$
6	AccF Van (1:1)	Guaiacol (1/2) – Benzaldéhyde (1/2)	$10^{-1} + 10^{-1}$
7	AccF Van (1:3)	Guaiacol (1/4) – Benzaldéhyde (3/4)	$10^{-1} + 10^{-1}$

- Procédure expérimentale

La phase expérimentale est constituée de deux tâches distinctes :

Dans un premier temps, les sujets doivent flairer le contenu de chaque tube odorant de manière à les classer selon leur ressemblance à l'odeur de vanille telle qu'ils l'imaginent :

On dispose les tubes codés dans un ordre aléatoire face au sujet. Pour chaque tube il doit :

- Ouvrir le tube à essai.
- Flairer le contenu.
- Refermer le tube à essai.
- Placer le tube sur le portoir à 10 emplacements mis à disposition de manière à ce que le tube dont l'odeur évoque le plus la vanille soit placé à l'extrémité du portoir marqué d'un « + » et que le tube dont l'odeur évoque le moins de vanille soit placé à son extrême opposé (marqué d'un « - »).
- Eventuellement, les sujets peuvent revenir sur leur classement jusqu'à ce qu'ils considèrent leur ordonnancement achevé.

Lorsque le classement est terminé, le sujet reporte sur la feuille de réponse les codes des flacons dans l'ordre croissant des rangs qu'il a fixé.

- Evaluations psychophysiques : Typicité et Comestibilité :

On re-dispose l'ensemble des tubes dans un ordre aléatoire face au sujet et pour chaque tube il doit :

- Ouvrir le tube à essai.
- Flairer le contenu.
- Refermer le tube à essai.
- Sur deux échelles en 9 points bornées à leur extrémités par une terminologie appropriée à la question posée, les sujets doivent évaluer, en cochant une des case de l'échelle: la typicité par rapport à l'odeur de vanille et la comestibilité de l'aliment évoqué par l'odeur contenue dans le flacon.

Pas du tout typique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Extrêmement typique
Pas du tout comestible	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Tout à fait comestible

*Fig. 32 : Echelles en 9 points utilisées pour les évaluations psychophysiques. Les sujets doivent évaluer la typicité par rapport à l'odeur de vanille telle qu'ils l'imaginent et la comestibilité du fruit évoqué par l'odeur du flacon en cochant la case qui correspond le plus à leur sensation.*

- Traitements des résultats

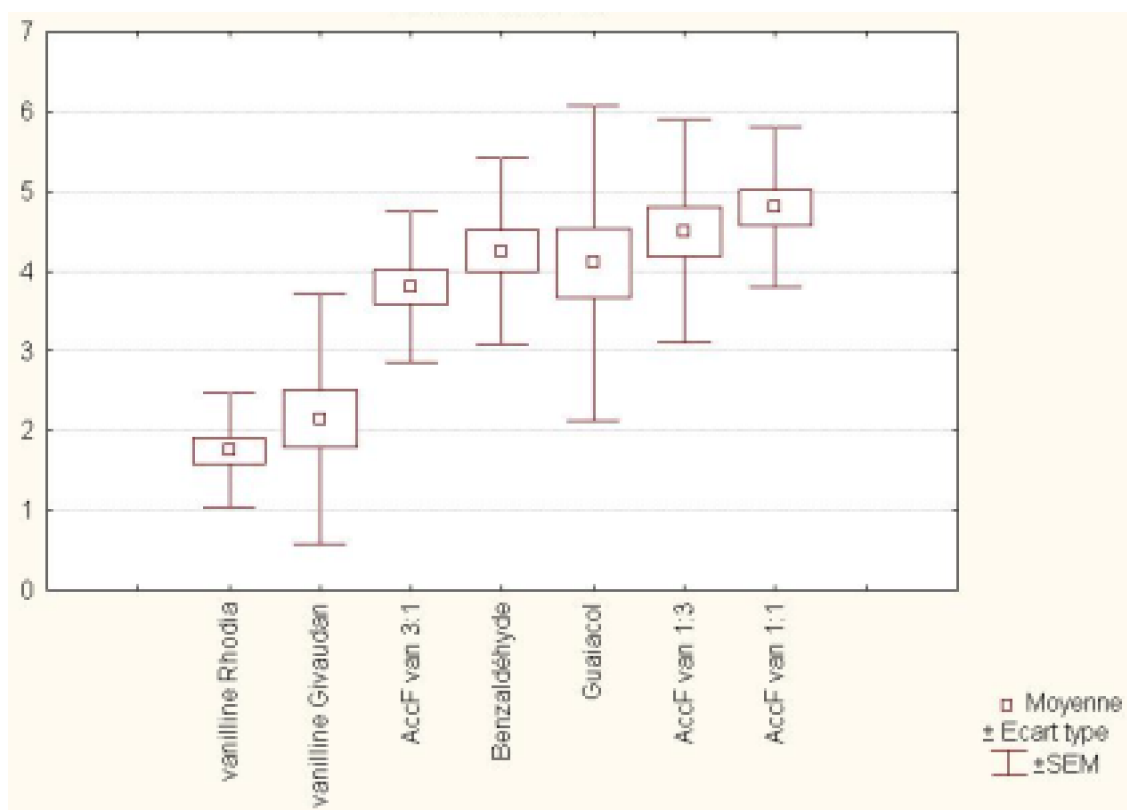
- Concordance des sujets :

Les résultats issus des classements des individus ont été reportés dans un tableau afin de vérifier la cohérence des réponses des sujets. Nous avons classé les réponses concernant les positions des odorants en fonction de leur ressemblance à l'odeur de vanille, sur 7 rangs (un rang par tube odorant). Nous avons calculé le coefficient de concordance de Kendall pour vérifier la concordance entre les sujets sur les classements effectués pour les 7 rangs de manière à vérifier si les sujets ont été d'accord sur le classement moyen obtenu.

- Analyses des corrélations :

Les coefficients de corrélations relatifs aux évaluations de typicité par rapport à l'odeur de vanille, ceux concernant les évaluations de comestibilité et les rangs attribués aux différents candidats ont été calculés.

### 2.7.6 Résultats



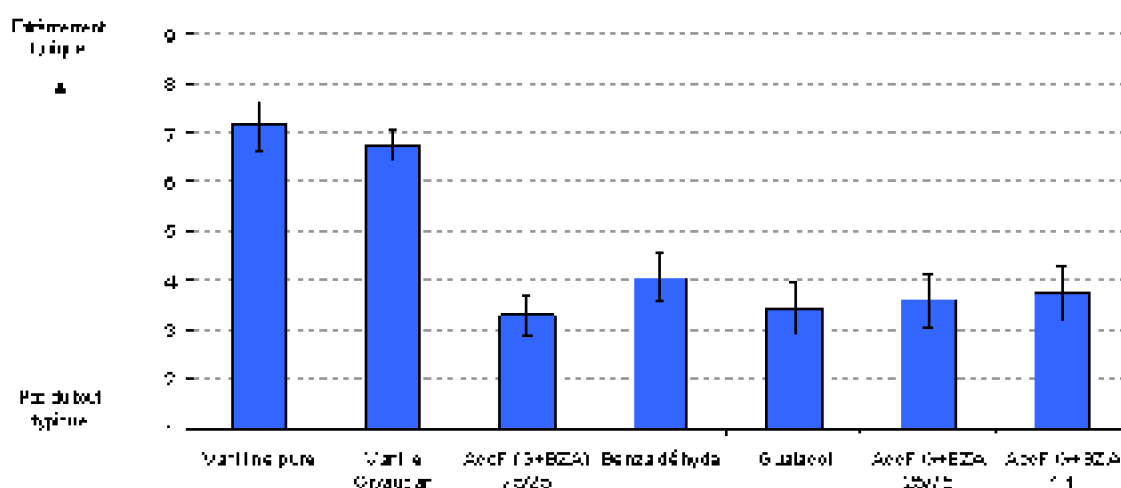
**Fig. 33 :** Rangs de classement moyens attribués par l'ensemble des sujets par rapport à la ressemblance à l'odeur de vanille. La vanilline (Rhodia©) a été placée le plus souvent première position du classement, l'arome vanille de Givaudan© a également obtenu une position qui suggère qu'elle évoque correctement la vanille. Le mélange binaire constitué de benzaldéhyde (1/4) et de guaiacol (3/4) a été placé en 3<sup>ème</sup> position suivi des composants qui ont servi à élaborer les mélanges, le benzaldéhyde et le guaiacol en 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> position, flairés hors mélange. Enfin, les mélanges binaires constitués de benzaldéhyde et de guaiacol aux proportions 1:3 et 1:1 ont obtenu les dernières positions dans le classement.

La figure 33, relative au classement effectué sur les 7 stimuli odorants selon leur ressemblance à l'odeur de vanille telle que les sujets se l'imaginent, indique que parmi notre ensemble de stimulus, 2 seulement évoquent une odeur proche de celle de vanille. Il s'agit de la vanilline Rhodia© et de l'arome vanille Givaudan©. Le mélange binaire constitué de guaiacol (3/4) et de benzaldéhyde (1/4) semble aussi avoir évoqué une odeur de vanille car les sujets l'ont placée à la troisième place du classement. Les composés, qui sont censés ne pas évoquer l'odeur de vanille ont été classés 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> suivis des mélanges binaires AccF Van 1:3 (le symétrique de AccF 3:1, 3<sup>ème</sup> position) et 1:1 (équivalent).

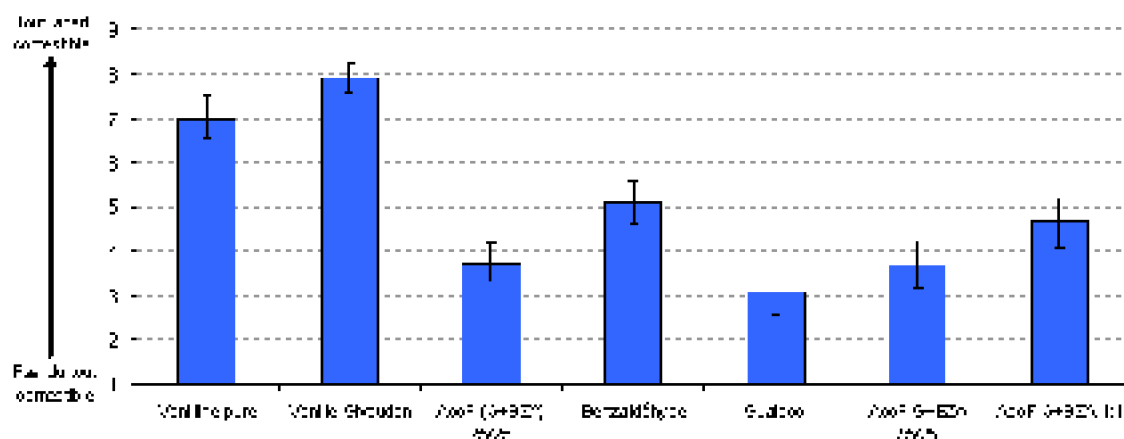
**Tab. 20 :** Rangs moyens pour chaque candidat odorant et coefficient de concordance de Kendall sur les classements des 7 produits. On remarque que tous les sujets sont d'accord sur le classement global relatif à l'évocation de l'odeur de vanille effectué sur l'ensemble des odorants.

Odorants	Rang moyen
Vanilline pure	1,8
Vanille Givaudan©	2,3
AccF Van (3:1)	4,1
Benzaldéhyde	4,6
Guaiacol	4,7
AccF Van (1:3)	5
AccF Van (1:1)	5,4
Coefficient de Kendall et Probabilité associée	0,41 p <.000001

Le tableau 20 nous donne des informations sur la concordance entre les sujets en ce qui concerne le classement dans l'ordre de ressemblance croissante des 7 candidats odorants à l'odeur de vanille. Bien que le coefficient de Kendall obtenu ne soit pas très élevé (0,41), il est fortement significatif ( $p < .000001$ ) et indique que tous les sujets ont effectué un classement équivalent. Nous pouvons d'ailleurs le remarquer en observant le rang moyen attribué pour chaque candidat. Il apparaît que certains produits sont très proches et sont donc plus difficiles à ordonner tandis que d'autres plus caractéristiques se démarquent de l'ensemble des stimuli.



*Fig. 34 : Résultats des évaluations de la typicité par rapport à l'odeur de vanille. Les sujets devaient évaluer la typicité de chaque odeur par rapport à l'odeur de vanille telle qu'ils l'imaginaient en attribuant une note de 1 (pas du tout typique) à 9 (extrêmement typique). On remarque que les produits les plus typiques sont la vanilline pure et la vanille de Givaudan©, les mélanges binaires (AccF Van 3:1, 1:3 et 1:1) ont été évalués comme n'évoquant pas une vanille typique.*



**Fig. 35 :** Résultats des évaluations de la comestibilité de l'aliment évoqué par les odeurs présentées. Les sujets devaient évaluer la comestibilité du fruit suscité par les odeurs présentées en attribuant une note de 1 (pas du tout comestible) à 9 (tout à fait comestible).

On remarque que les produits les plus comestibles sont évoqués par la vanille Givaudan®, et la vanilline Rhodia®. L'odeur résultante des mélanges binaires ainsi que du benzaldéhyde et du guaiacol hors mélange n'a pas été perçue comme pouvant provenir d'aliments comestibles.

L'observation des figures 34 et 35 concernant les évaluations de la typicité des odeurs par rapport à l'odeur de vanille et la comestibilité de l'aliment suscité par la perception des odeurs nous permet de constater que les produits odorants perçus comme les plus typiques et les plus comestibles de la vanille sont les deux odeurs de vanille de synthèse (Rhodia et Givaudan). En revanche, on constate que les mélanges « AccF Van » et le guaiacol ont été perçus comme peu typiques et peu comestibles. En revanche, le benzaldéhyde, bien que moyennement typique, a évoqué un aliment relativement comestible (évalué 5/9)

**Tab. 21 :** Coefficients de corrélation entre typicité et comestibilité, typicité et rang de classement et entre comestibilité et rang de classement. Les valeurs de ces coefficients suggèrent que plus un candidat odorant est typique de la vanille, plus la comestibilité du fruit suscité est grande. D'autre part, il apparaît que la place d'un candidat dans le classement est très fortement corrélée à sa typicité et à sa comestibilité de l'aliment suscité par l'odeur.

	Coefficients de corrélation ( $R^2$ )	Probabilités associées
Typicité / Rang	0,318	p <,0001
Comestibilité / Rang	0,341	p = ,0001
Typicité / Comestibilité	0,707	p <,0001

L'analyse des corrélations (tab. 21) nous a permis de relier la position obtenue pour un odorant dans le classement réalisé avec la typicité de l'odeur par rapport à l'odeur de vanille telle que les sujets se l'imaginent et avec la comestibilité de l'aliment suscité par l'odeur. Ainsi, on remarque qu'une odeur suscitant un aliment comestible ( $R^2=0,34$ ) et typique ( $R^2=0,32$ ) de la vanille obtient logiquement une bonne position lors du classement. On notera également que dans ce cas précis, plus un odorant sera typique

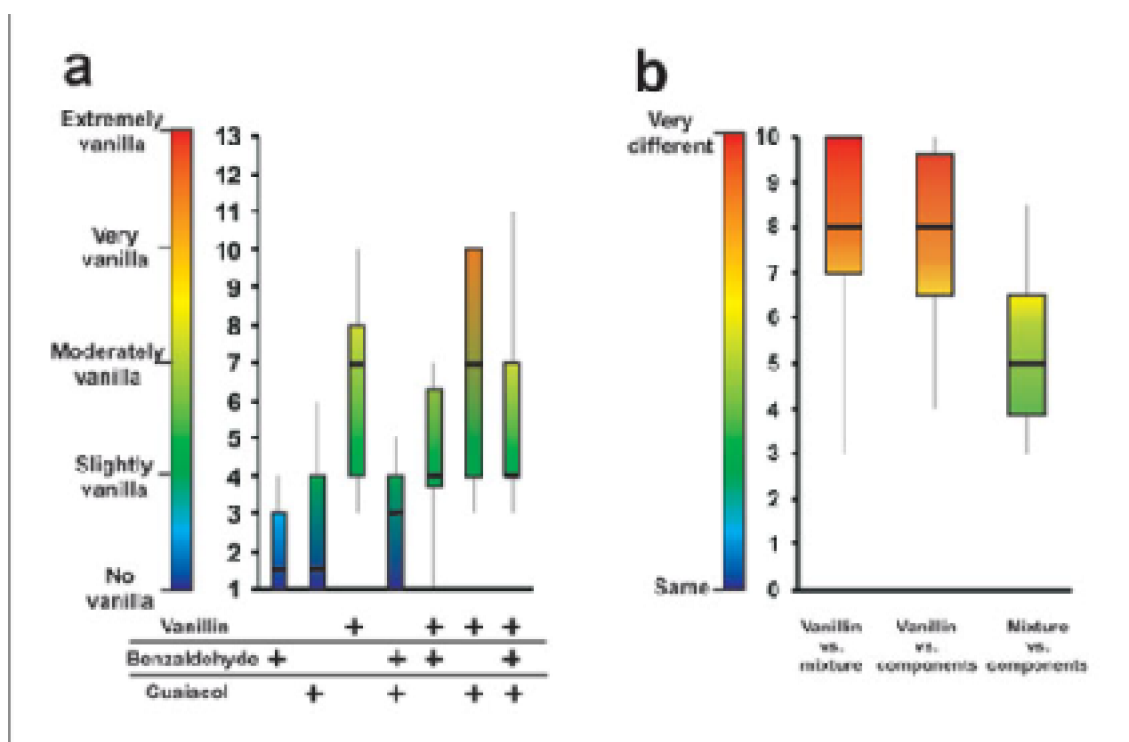
de la vanille, plus l'aliment évoqué en question sera considéré comme comestible ( $R^2=0,7$ ).

### 2.7.7 Discussion

---

Dans la base « BACIS » (Boelens, 2001) définit l'odeur du benzaldéhyde comme 'douce', 'aromatique', 'épicée' et 'caractéristique de l'huile d'amande amère' et l'odeur du guaiacol comme 'aromatique', 'phénolée' et 'brûlée'. Selon la définition de l'accord que nous avons admise, et si la prédiction de Turin se vérifiait, c'est à dire qu'un mélange équivolumique de ces deux composés odorants conduise à la perception d'une odeur de vanille, nous aurions un bel « accord fusion », un accord aromatique parfait. On assisterait en effet à l'apparition d'une nouvelle note odorante (de vanille) dans un mélange de deux substances qui flairées seules (hors mélange) ne conduisent pas à la perception d'une note odorante 'vanillée'.

Dans le premier protocole, en proposant différents mélanges de benzaldéhyde et de guaiacol à évaluer par rapport à l'odeur de vanilline (odeur de vanille communément admise), nous avons voulu vérifier la présence d'une perception d'une note odorante proche de celle de la vanille. Lors de cette expérience, nous avons pu mettre en évidence que le mélange de benzaldéhyde et de guaiacol, dans la mesure où sa concentration est relativement élevée ( $10^{-2}$  et  $10^{-1}$ ) peut éventuellement évoquer une légère note odorante vanille (note de 7/10 en similitude par rapport à une référence vanille). Ces résultats vont dans le sens de ceux trouvés dernièrement par une équipe du Laboratoire de neurogénétique et comportement de la Rockefeller University (Keller & Vosshall, 2004). Dans cette étude, des sujets ont évalué la similitude de l'odeur de mélange de benzaldéhyde et de guaiacol (à 2 concentrations différentes : 1/100 et 1/10000) par rapport à l'odeur de vanille sur deux types d'échelles psychophysiques : une échelle en 13 points bornée et labellisée (de 'pas vanille' à 'extrêmement vanille') et une échelle d'évaluation de la similarité entre mélange binaire et une référence vanilline. Leurs résultats ont montré que les deux mélanges testés ne conduisent pas à la perception 'extrêmement vanille' et que ces mélanges sont perçus comme très différents de la vanilline, au même titre que chacun des composants pris individuellement comme l'indique la figure 36.



*Fig. 36 : Résultats des évaluations psychophysiques de l'odeur du benzaldéhyde, du guaiacol ainsi que de leur mélange binaire (dilution 1/10 et 1/100). Aucun mélange n'a permis la perception d'une note vanille plus forte que dans les composés flairés séparément (a). De la même manière, l'odeur de chaque composant flairé seul et l'odeur du mélange binaire correspondant n'a jamais été perçue comme similaire à l'odeur d'une référence vanilline D'après (Keller & Vosshall, 2004).*

Malgré ce résultat peu encourageant, nous avons voulu poursuivre notre étude en faisant l'hypothèse que l'incertitude de nos sujets quant à la présence d'une note résultante 'vanille' pouvait être perturbée par la présence simultanée d'autres notes odorantes dans le mélange. Autrement dit, nous ne serions pas dans un cas d'accord fusion parfait, mais plutôt dans un cas d'accord « partiel ». Ainsi, en ajoutant un nouveau protocole à notre étude grâce auquel les sujets seraient amenés à classer une sélection d'odorants (parmi lesquels des composants du mélange binaire, mais aussi deux références vanille possible), nous avons imaginé pouvoir quantifier la présence de cette note odorante 'vanille' dans les mélange binaires présentés.

Ainsi, l'expérience dans laquelle les sujets devaient classer sept odeurs en fonction de leur ressemblance à l'odeur de vanille a positionné le mélange binaire 'AccF Van 3:1' en troisième position, juste après les deux références vanille (vanilline et arôme vanille). Les mélanges en rapport 1:1 et 1:3 ayant été relégués aux derniers rangs du classement, après les composants flairés séparément (*cf.* Fig. 33).

Pendant, certains résultats ont posé le doute sur cette observation. L'accord constitué de 75% de Gaïacol et de 25% de benzaldéhyde a obtenu un pseudo-consensus quant à sa note vanillée et a été positionné en 3<sup>ème</sup> position. Mais ces résultats indiquent que ce placement n'a pas fait l'unanimité. Cette incertitude des sujets quant à cette odeur est de plus renforcée par le fait que l'évaluation de la typicité et de la comestibilité de



l'odeur de ce mélange n'a jamais été considérée comme étant meilleure que les autres mélanges ni d'ailleurs comme les composants pris séparément.

### 2.7.8 Conclusions générales sur les accords aromatiques

---

Aux vues de nos résultats, relatifs aux deux modèles d'accords aromatiques que nous avons testés, force est de constater que bien qu'une note odorante 'ananas' soit présente, nous ne pouvons pas considérer que le mélange binaire de caproate d'éthyle et de furanéol (AccF Ana) représente un cas d'accord fusion parfait, faisant émerger une note odorante résultante qui n'était pas présente dans les composés flairés séparément. D'autre part, selon nos résultats relatifs au modèle d'accord 'vanille', corroborés par les résultats publiés par Keller et Vosshal (Keller & Vosshal, 2004), nous sommes amenés à rejeter l'hypothèse selon laquelle le mélange de benzaldéhyde et de guaiacol aux proportions 1:1 induirait une fusion de qualité odorante conduisant à la perception d'une note odorante vanille.

En revanche, comme nous le détaillerons plus en avant (dans le chapitre 3 de cette thèse), nous pouvons imaginer que comme dans le cas des mélanges complexes rencontrés dans les domaines de la parfumerie (formulations et accords complexes de parfums) et de l'agro-alimentaire (mélanges complexes d'arômes alimentaires), un mélange aromatique binaire peut faire émerger une nouvelle note odorante, perceptible par des sujets non experts, mais présente comme les autres notes des composants du mélange et non plus comme la seule note résultante. En cela, les mélanges binaires ne pourront être considérés comme des accords fusion, mais plutôt comme des accords partiels, même si le mélange occasionne l'émergence d'une nouvelle facette olfactive.

**Expérience 2. Etude de la perception qualitative dans l'effet de masquage olfactif : Le masquage d'un acide par son éthyle ester.**

## 2.8 Les théories du masquage olfactif

- Le masquage selon Cain

Des effets de masquages ont été mis en évidence à l'aide de différents composés odorants (Cain & Drexler, 1974; Cain, 1975). Dans l'étude de 1974, les auteurs soulignent la différence à faire entre masquage et contre-action. Cette idée a été précisée plus tard dans une étude d'Hoffman (Hoffman, 1986) qui indique que si l'intensité perçue augmente après l'ajout d'un produit quelconque alors que le caractère désagréable diminue, on doit parler de masquage. En revanche, si l'intensité perçue et le caractère désagréable diminuent simultanément après l'ajout du produit, il s'agit d'un phénomène de contre-action.

- Le masquage selon Schleppnik

En 1975, il proposa une théorie de l'olfaction basée sur le modèle enzymatique (Schleppnik, 1975) et attribua les effets de masquage à des mécanismes périphériques. Selon l'auteur, les vecteurs d'odeur (*i.e.* molécules odorantes) interagissent avec les sites récepteurs selon des mécanismes « clé / serrure ». Ces interactions peuvent donner lieu à des phénomènes de coopérativité qui peuvent entraîner la « sur-activation » d'un site et conduisant à observer une synergie, soit à des phénomènes de compétition entraînant le blocage d'un site et expliquant ainsi l'effet de masquage.

- Le masquage selon Laing

En publiant une étude relative aux mécanismes conduisant à la suppression des odeurs (Laing & Willcox, 1987), les auteurs ont proposé une explication spatio-temporelle. Le masquage des odeurs mettrait en jeu principalement des différences de temps de latence relatifs à l'interaction des molécules odorantes avec le système récepteur. Plus les molécules odorantes interagissent rapidement avec le système, plus ils auraient de chance d'imposer leur image olfactive et donc de masquer les autres composants d'un mélange. Cette théorie, qui implique à la fois des mécanismes périphériques et centraux, est encore d'actualité et a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années, sur l'animal (Simon & Derby, 1995) et chez l'homme (Rouby & Holley, 1995) pour tenter d'expliquer les effets de suppression et de masquage des odeurs.

- Le masquage selon Calkin et Jellinek

Une autre théorie propose que le concept de masquage des odeurs repose sur le fait d'éliminer le caractère nauséabond d'une odeur, si faible en intensité soit elle (Calkin & Jellinek, 1994). Pour atteindre cet objectif, un moyen consiste à modifier le contexte du substrat du désagrément et de transformer ainsi l'aspect désagréable du stimulus en un caractère agréable ou neutre. Il est possible par exemple de masquer la composante désagréable provenant d'acides gras grâce à des extraits d'orange, en créant une composition identique aux extraits d'orange mais privé de ses acides gras. En ajoutant cette composition masquante à un mélange contenant des acides gras, l'accord « orange sera reformé » et transformera l'odeur et atténuera sa composante nauséabonde. Il y aura donc bien un effet de masquage qui pourrait s'apparenter à un camouflage.

### 2.8.1 Cadre théorique

---

Selon le principe élaboré dans la théorie de Calkin et Jellinek (1994), une équipe de chercheurs proposa de masquer l'odeur de l'acide méthyle hétéroïque (composant de la sueur humaine, entre autre) par l'odeur de l'éthyle ester correspondant à cet acide qui possède une odeur relativement agréable (Pierce *et al.*, 1995).

Les auteurs ont postulé que le masquage peut être considéré comme une « adaptation » sensorielle olfactive provoquée par des molécules structurellement proches (Moncrieff, 1956; Engen, 1982). La similarité structurale entre les molécules n'est pas une condition *sine qua non* au phénomène de masquage olfactif (Köster, 1971) et des molécules de structures différentes mises en mélange peuvent conduire à un masquage

olfactif efficace (Pierce *et al.*, 1993). Cependant, il semblerait que l'adaptation croisée (c'est-à-dire entre deux molécules non identiques) survienne de manière plus probable dans le cas de molécules voisines, c'est à dire qui partageraient un certain nombre de caractéristiques structurales (Pierce *et al.*, 1996).

D'autre part, même dans le cas de molécules structurellement proches, l'adaptation croisée telle qu'elle a pu être observée ne semble pas être réciproque. Si une molécule « A » donnée en masque une seconde « B », il n'est pas obligatoire que la molécule « B » masque la molécule « A » de manière symétrique. Il semblerait qu'une explication de cette asymétrie repose sur les différences physiques (forme et taille) des parties hydrophobes des molécules en jeu. En effet, si le récepteur concerné est hydrophobe, ils devraient avoir plus d'affinité pour des composés encore plus hydrophobes. Selon cette conception les éthyles esters s'opposeraient aux acides : l'odeur d'un acide gras serait masquée par son éthyle ester, alors que l'odeur de l'éthyle ester, bien que réduite, ne serait pas masquée par l'odeur de l'acide correspondant : les récepteurs communs seraient en partie occupés par les esters, limitant l'accès des acides, et donc, dans le cas qui nous intéresse, à la perception de la note malodorante qui les caractérise.

Notre expérience avait pour objectif de contribuer à la compréhension du masquage olfactif selon la théorie avancée par Pierce et al. en 1995. Ainsi, nous avons sélectionné 2 couples acide/ester d'éthyle et avons élaboré un protocole psychophysique original pour tester l'existence d'un phénomène de masquage olfactif.

### 2.8.2 Matériel et méthode.

---

Dans ce travail, c'est la dimension qualitative des odeurs que nous avons étudiée, mais le masquage olfactif est un phénomène subtil, très difficile à aborder pour des sujets naïfs, et qui met en jeu des dimensions quantitative, qualitative et hédonique. Nous avons donc élaboré un protocole expérimental nous permettant d'examiner ces trois dimensions à la fois. Tous les sujets ont passé les trois épreuves de ce protocole successivement.

#### · Sujets

Vingt sujets (9 femmes et 11 hommes) ont été volontaires pour participer aux trois parties de cette expérience. Leur moyenne d'âge était de 27 ans et 7 d'entre eux étaient fumeurs. Aucun n'a déclaré souffrir de problèmes olfactifs et ils ont tous terminé l'expérience, qui durait 45 minutes environ.

#### · Stimuli

Nous avons sélectionné deux couples « acide / éthyle ester » différents nous permettant de tester le phénomène de masquage d'un acide par son ester d'éthyle. Chaque paire était constituée d'une odeur désagréable (l'acide), et d'une odeur agréable (l'ester). Il s'agissait du couple « acide butyrique / Butyrate d'éthyle » et du couple « acide caproïque / caproate d'éthyle ».

Pour chaque paire, nous avons préparé une série de dilutions pour l'acide (1/10, 5/100, 1/100 et 1/1000) ainsi que deux mélanges binaires équivolumiques, constitués de

l'acide (au 1/100) et de son ester d'éthyle (au 1/100 et au 1/1000).

Toutes ces solutions ont été préparées dans des flacons de verre fumé de 12 ml. Pour présenter les stimuli, chaque flacon odorisé par l'acide seul a été introduit dans un flacon plus grand de 250 ml, opaque. Les mélanges ont été fabriqués en introduisant 2 flacons odorisés, l'un par l'acide l'autre par l'ester, dans le même flacon opaque de 250 ml. Ainsi l'odeur qui en émanait résultait d'un mélange des vapeurs et non d'un mélange en phase liquide des deux composés.

**Tab. 22 :** Présentation des solutions utilisées pour les deux couples acide/ester dans l'expérience de masquage olfactif. Les couples sélectionnés ont été choisis de manière à ce que l'acide présente une odeur désagréable et l'ester (le masquant) une odeur agréable. Il s'agit de la paire acide caproïque/caproate d'éthyle et de la paire acide butyrique/butyrate d'éthyle. Quatre solutions de l'acide de concentrations variées ont été préparées ( $10^{-1}$ ,  $5 \cdot 10^{-2}$ ,  $10^{-2}$  et  $10^{-3}$ ) et deux solutions de l'ester d'éthyle correspondant ( $10^{-2}$  et  $10^{-3}$ ). Les stimuli ont été stockés dans des flacons de verre fumé de 12 ml eux-mêmes introduits dans un flacon de verre opaque de 250 ml pour la présentation aux sujets en aveugle. Ainsi, lors de la stimulation avec les mélanges binaires, les deux flacons (acide et ester) ont été introduits dans un flacon opaque de 250 ml et le sujet a flairé l'odeur de la vapeur résultante.

Couple 1	A1	A2	A3	A4	MASQ1_A3	MASQ2_A3
Concentration en acide butyrique	1/10	5/100	1/100	1/1000	1/100	1/100
Concentration en butyrate d'éthyle	-	-	-	-	1/100	1/1000
Couple 2	B1	B2	B3	B4	MASQ1_B3	MASQ2_B3
Concentration en acide caproïque	1/10	5/100	1/100	1/1000	1/100	1/100
Concentration en caproate d'éthyle	-	-	-	-	1/100	1/1000

- Procédure expérimentale
  - Evaluation de l'intensité de la note odorante désagréable

Les quatre flacons contenant les diverses concentrations (A1-A4 ; B1-B4) ont été présentés au sujet dans un ordre aléatoire. Il devait déboucher les flacons les uns après les autres pour flairer leur contenu et les rebouchait après chaque évaluation. Puis il devait évaluer l'intensité de **l'odeur désagréable** présente dans chacun des flacons et ranger ceux-ci dans l'ordre des intensités croissantes (1<sup>er</sup> rang pour le flacon présentant la plus faible intensité et ainsi de suite jusqu'au 4<sup>ème</sup> rang).

Le sujet n'avait pas de durée limitée pour accomplir la tâche, il pouvait sentir chaque flacon plusieurs fois et dans n'importe quel ordre en respectant une pause de 25 secondes entre chaque flairage.

Lorsque qu'il avait terminé, on lui demandait de faire une pause d'une minute, puis de vérifier son classement en commençant par le flacon présentant à son avis l'odeur

nauséabonde la moins intense. Il pouvait alors effectuer des modifications sur son classement.

- Placement des mélanges odorants

Si nécessaire, les flacons étaient alors redispesés selon l'ordre des concentrations croissantes.

Deux nouveaux flacons contenant un mélange (MASQ1 et MASQ2) était présenté au sujet : il devait évaluer l'intensité de l'odeur désagréable émanant de ces flacons et les ranger par rapport à l'échelle d'intensité représentée par les quatre flacons déjà classés.

Le sujet pouvait flairer chaque flacon plusieurs fois et dans n'importe quel ordre tant qu'il respectait les 25 secondes de pause entre les flairages, sans limite de temps pour accomplir la tâche.

- Evaluation de la qualité

Chacun des produits peut être décrit par un descripteur sémantique, nom de source ou note odorante.

Si dans un premier temps, les sujets sont renseignés sur les différentes notes odorantes mises en jeu dans l'expérience, on peut suivre l'évolution de la qualité d'un produit, lorsqu'on le met en mélange, simplement en analysant les descriptions de l'odeur données par les sujets.

Pour pouvoir rendre compte de manière objective des éventuelles interactions entre les odorants en mélanges que nous avons testés, nous avons demandé aux sujets d'identifier l'odeur des différents flacons, en utilisant les termes suivants (Arctander, 1969) :

- Acide caproïque : « Transpiration »
- Caproate d'éthyle : « Ananas »
- « Les deux notes à la fois »
- Qu :
- Acide butyrique : « Beurre rance »
- Butyrate d'éthyle : « Fruité »
- « Les deux notes à la fois »

- Evaluation de la valence hédonique de l'odeur des mélanges

Pour finir, nous avons demandé aux sujets d'évaluer le caractère hédonique des flacons contenant les mélanges binaires uniquement sur une échelle linéaire bornée d'une taille fixe égale à 11 cm et renseignée par « extrêmement agréable » à l'extrémité gauche de l'échelle et « extrêmement désagréable » à l'extrémité droite. Les sujets devaient marquer l'échelle d'un trait vertical afin de représenter leur sensation.

Traitements des résultats

Pour chaque odeur testée, nous avons calculé les moyennes des évaluations de l'intensité pour chacun des acides flairés hors mélange et pour les deux mélanges binaires susceptibles de manifester un masquage olfactif. Les coefficients de concordance de Kendall ont été calculés pour les classements afin d'évaluer la robustesse du consensus.

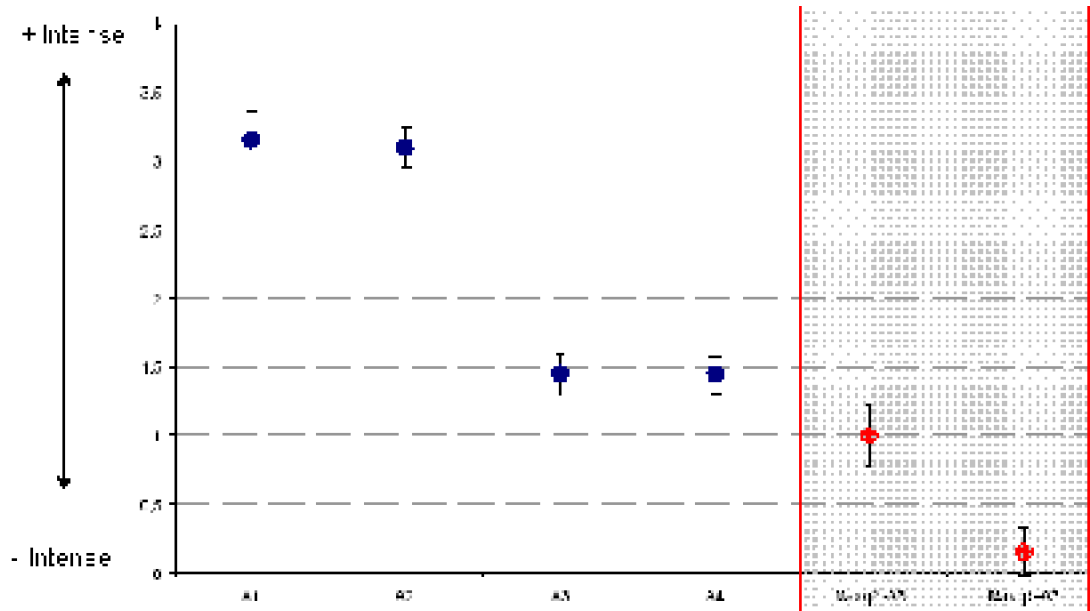
D'autre part, pour la tâche d'évaluation qualitative, les sujets ont utilisé un des termes mis à leur disposition pour décrire la note odorante perçue pour les mélanges. Nous avons systématiquement encodé la réponse verbale donnée par un « -1 » si le sujet utilisait le terme correspondant à l'acide, par un « 0 » si le sujet utilisait le terme correspondant à l'ester, et par « 1 » si le sujet répondait « les deux notes à la fois ». Au final, nous avons calculé les moyennes de ces évaluations qui représentent en quelque sorte une distance d'une note odorante à une autre.

Enfin, les évaluations du caractère hédonique de chaque mélange binaire ont été moyennées de manière à évaluer le degré de disparition de la composante nauséabonde dans l'odeur résultante.

### 2.8.3 Résultats

Cas du couple Acide butyrique / Butyrate d'éthyle

- Classement en fonction de l'intensité perçue :



**Fig. 37 :** Classement moyen réalisé en fonction de l'intensité de l'odeur désagréable perçue pour les 4 flacons contenant les solutions d'acide butyrique (A1 :  $10^{-1}$ , A2 :  $5 \cdot 10^{-2}$ , A3 :  $10^{-2}$ , A4 :  $10^{-3}$ ) et pour les deux contenant les mélanges binaires acide/ester d'éthyle (en rouge sur la figure) – Masq1\_A3 = [A3 :  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-2}$ ] et Masq2\_A3 = [A3 :  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-3}$ ]. La note désagréable de l'acide butyrique proposé seul

*semble dans tous les cas plus intense que dans les mélanges contenant du masquant (butyrate d'éthyle).*

Le classement moyen des stimuli en fonction de l'intensité perçue de la note odorante désagréable indique que la concentration d'acide a une influence sur la perception subjective de l'intensité de la note désagréable [F(5,95)=43,4, p<.0001]. D'autre part, il apparaît que l'ajout du masquant (butyrate d'éthyle) à l'acide butyrique provoque une diminution significative de l'intensité perçue de cette note désagréable.

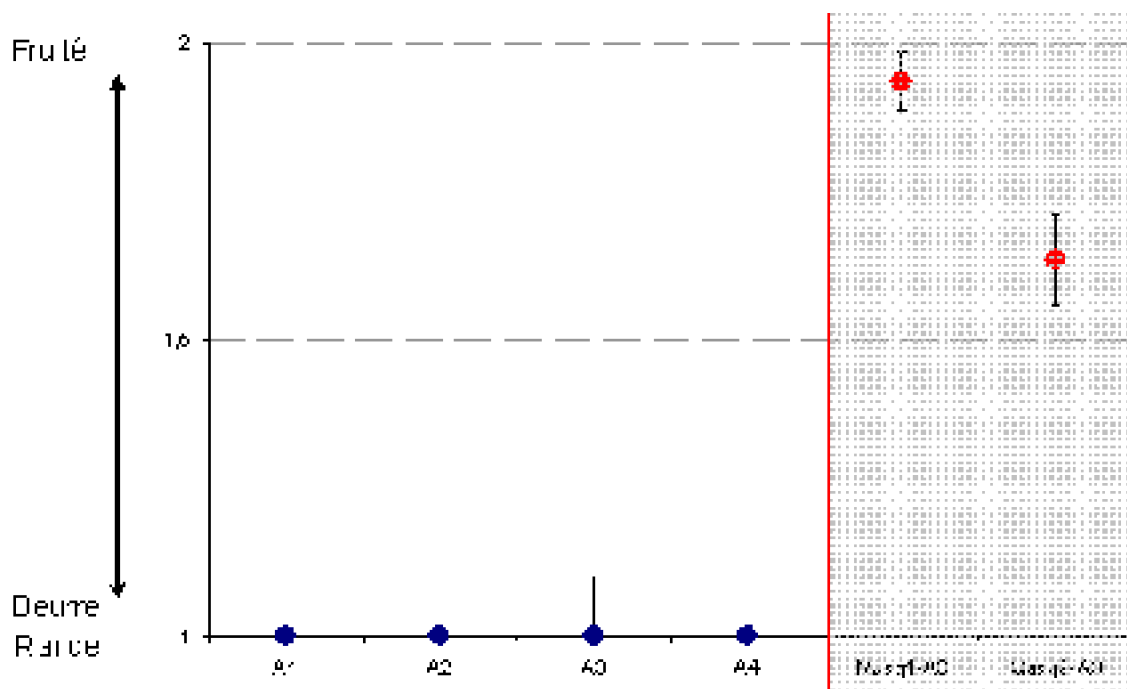
- Coefficient de concordance de Kendall :

**Tab. 22 :** Coefficient de concordance de Kendall calculé sur le classement réalisé par les 20 sujets qui ont participé à l'expérience. On remarque que près de 70% des sujets sont d'accord sur le classement des odeurs selon l'intensité perçue.

Valeur du coefficient (K)	Probabilité associée
0,697	P<.000001

Le classement des odorants en fonction de l'intensité perçue (tel qu'il est observé fig. 37) représente le classement commun proposé par 70% des sujets testés.

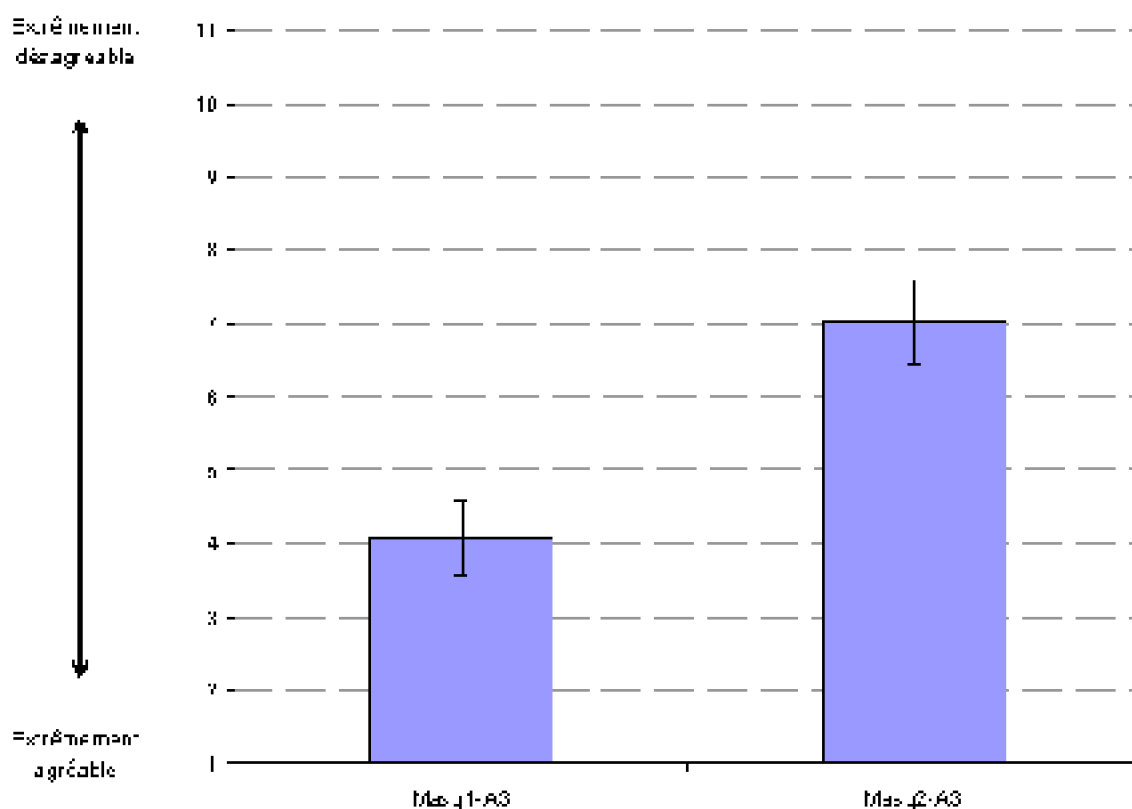
· Evaluation qualitative de la note odorante :



**Fig. 38 :** Illustration des résultats de la tâche de description verbale de la qualité des odeurs présentées. Les odeurs qui ont été le plus souvent décrites comme du beurre rance sont les 4 solutions d'acide butyrique (A1 :  $10^{-1}$ , A2 :  $5 \cdot 10^{-2}$ , A3 :  $10^{-2}$ , A4 :  $10^{-3}$ ). En revanche, les mélanges binaires odorants (Masq1\_A3 = A3 :  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-2}$  et Masq2\_A3 = A3 :  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-3}$ ) ont été perçus d'avantage comme fruité, avec une meilleure évocation « fruitée » pour Masq1\_A3.

La description verbale (à l'aide des termes désignant les notes odorantes possibles) des odorants réalisée par les sujets indique clairement que l'acide butyrique seul évoque une note « beurre rance ». En revanche, l'ajout de butyrate d'éthyle permet de qualifier l'odeur résultante de note « fruitée ». On remarque qu'à concentration égale (1/100) l'ajout d'une solution de butyrate d'éthyle à une solution d'acide butyrique permet de masquer quasi totalement la note « beurre rance » de l'odeur, et même de faire émerger une note « fruitée ». L'ajout d'une solution de butyrate d'éthyle plus dilué, au 1/1000, à la solution d'acide ne permet pas de masquer la note « beurre rance », et les sujets percevant alors ces deux notes odorantes simultanément.

- Evaluation du caractère hédonique des mélanges binaires :



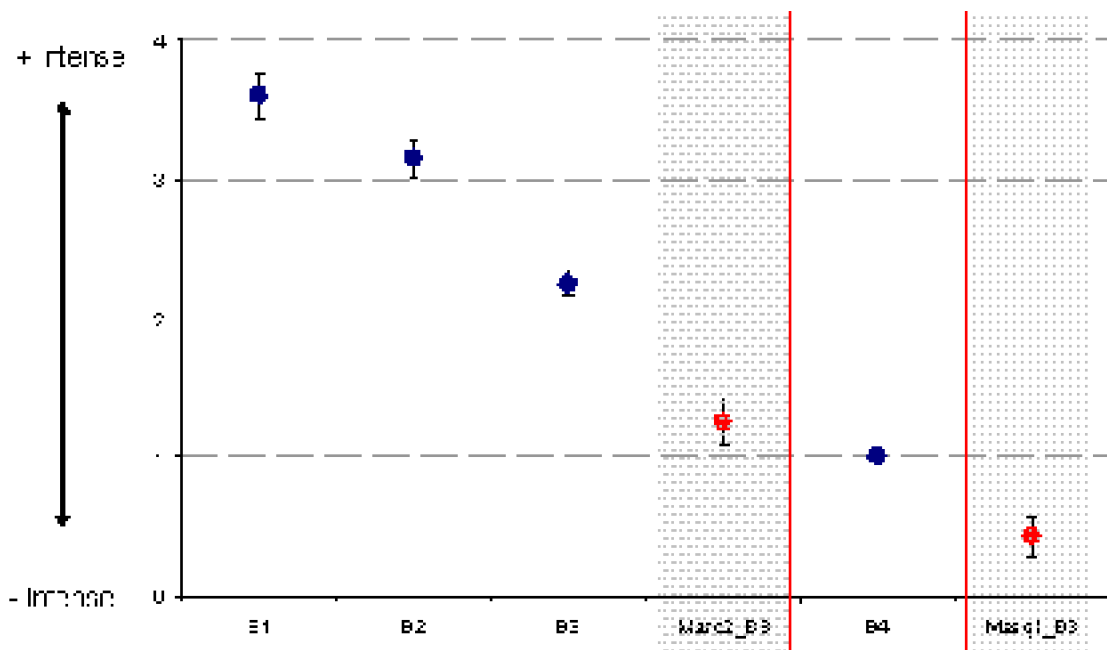
*Fig. 39 : Evaluations moyennes de la composante hédonique des deux mélanges binaires acide/ester 'Masq1\_A3 = acide butyrique  $10^{-2}$  + butyrate d'éthyle  $10^{-2}$  et Masq2\_A3 = acide butyrique  $10^{-2}$  + butyrate d'éthyle  $10^{-3}$ '. Le mélange Masq1\_A3 n'a pas été perçu comme étant très agréable alors que le mélange Masq2\_A3 a été perçu comme relativement neutre d'un point de vu hédonique.*

L'analyse des évaluations de l'agrément suscité par les mélanges binaires nous indique un effet de la concentration en butyrate d'éthyle sur la valence hédonique [F(1,19)=16,65, p=.0006]. Le mélange Masq1\_A3 a été systématiquement perçu comme plus agréable que le mélange masquant Masq2\_A3.

- Cas du couple Acide caproïque / Caproate d'éthyle



- Classement en fonction de l'intensité perçue



*Fig. 40 : Classement moyen obtenu en fonction de l'intensité perçue pour les 4 flacons contenant les solutions d'acide caproïque (B1 :  $10^{-1}$ , B2 :  $5 \cdot 10^{-2}$ , B3 :  $10^{-2}$ , B4 :  $10^{-3}$ ) et pour les deux flacons contenant les 2 mélanges binaires constitués d'acide caproïque/caproate d'éthyle – points rouges sur la figure – (Masq1\_B3 = acide caproïque  $10^{-2}$  + caproate d'éthyle  $10^{-2}$  et Masq2\_B3 = acide caproïque  $10^{-2}$  + caproate d'éthyle  $10^{-3}$ ). Les solutions d'acide caproïque contenant les plus fortes concentrations ont été perçues comme étant les plus intenses. Par contre, les mélanges binaires et la dilution au millième d'acide ont plutôt été perçus moins intenses.*

Le classement moyen des stimulations odorantes en fonction de l'intensité perçue de la note désagréable indique que la concentration a une influence sur la perception subjective de l'intensité de cette note odorante [F(5,95)=79,2, p<.00001].

D'autre part, ces résultats indiquent que l'ajout de caproate d'éthyle (1/1000) à l'acide caproïque (1/100) fait diminuer l'intensité de la note désagréable perçue pour le mélange Masq2\_B3 par rapport à l'acide flairé seul (B3). L'ajout de caproate d'éthyle au 1/100 à la solution d'acide caproïque au 1/100 (B3) provoque une diminution encore plus significative de l'intensité de la note désagréable perçue (Masq1\_B3).

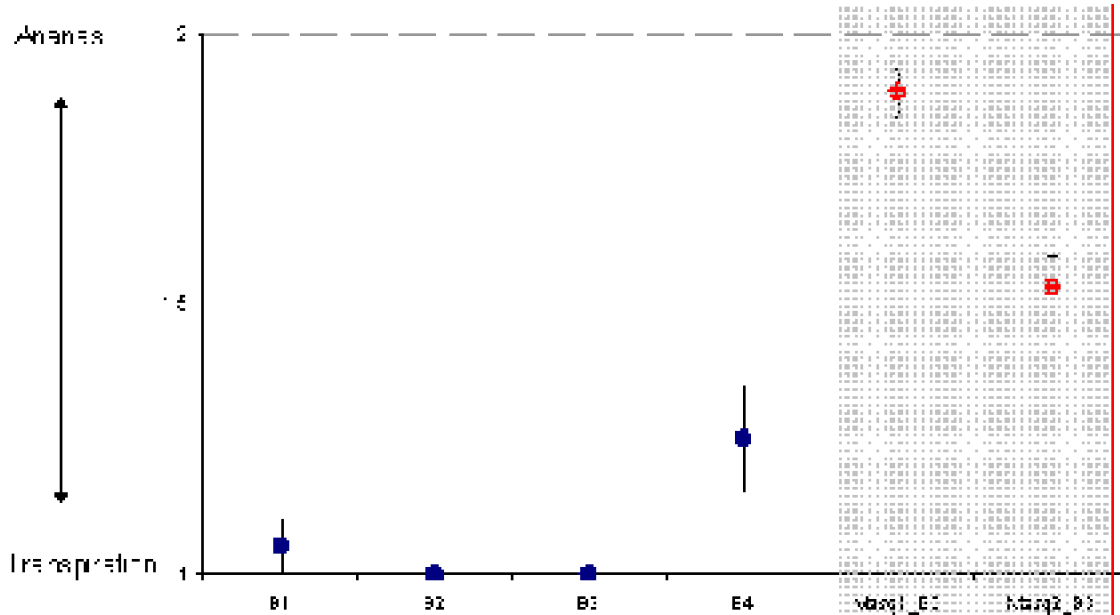
- Coefficient de concordance de Kendall :

**Tab. 23 :** Coefficient de concordance de Kendall calculé sur le classement réalisé par les 20 sujets qui ont participé à l'expérience. On remarque que 83% des sujets réalisent le même classement des stimuli selon l'intensité perçue.

Valeur du coefficient (K)	Probabilité associée
0,829	P<.000001

Selon le coefficient de concordance de Kendall, le classement réalisé par les sujets sur la base de l'intensité perçue des 6 stimuli odorants a été consensuel pour près de 83 % des sujets.

- Evaluation qualitative de la note odorante :

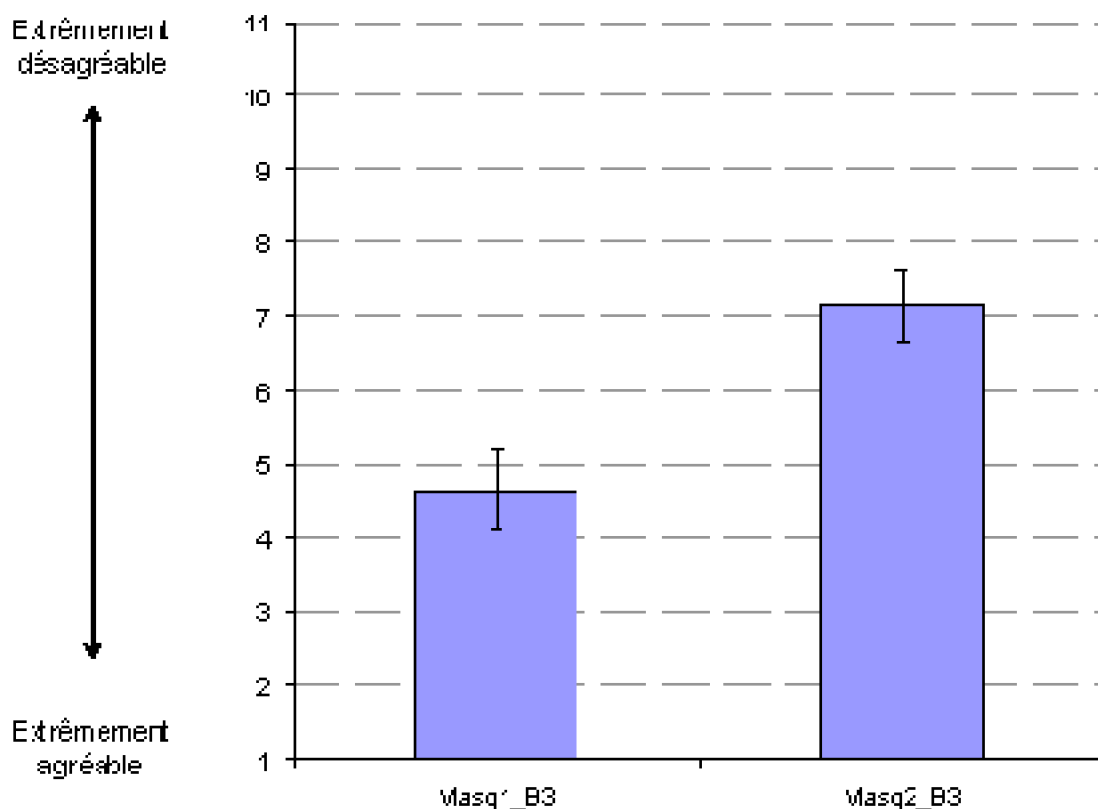


*Fig. 41 : Illustration des résultats de la tâche de description verbale qualitative des odeurs présentées. Les odeurs qui ont été le plus souvent décrites comme du beurre rance sont les 4 solutions d'acide butyrique (B1 :  $10^{-1}$ , B2 :  $5 \cdot 10^{-2}$ , B3 :  $10^{-2}$ , B4 :  $10^{-3}$ ). En revanche, le mélange binaire odorant Masq1\_B3 (B3 :  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-2}$ ) a été décrit comme exhalant une note odorante « ananas » et Masq2\_B3 (B3 :  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-3}$ ) comme présentant les deux notes odorantes à la fois.*

L'analyse des résultats relatifs à la description verbale des stimuli odorants nous a montré que l'acide seul évoque dans tous les cas la note odorante « transpiration ». L'odeur de la solution B4 (acide caproïque 1/1000) a été évaluée avec plus de difficulté (plus grande variation de l'erreur standard).

En revanche, il apparaît que le mélange Masq1\_B3 a été perçu comme évoquant « l'ananas » pratiquement sans aucune présence de la note « transpiration » alors que dans le mélange Masq2\_B3, il n'y a pas eu suffisamment de masquant pour faire disparaître l'odeur de l'acide caproïque.

- Evaluation du caractère hédonique des mélanges binaires :



*Fig. 42 : Evaluations moyennes de la composante hédonique des deux mélanges binaires acide caproïque/caproate d'éthyle (Masq1\_B3 = B3 :  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-2}$  et Masq2\_B3 = B3 :  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-3}$ ). Le mélange Masq1\_B3 a été perçu comme étant agréable alors que le mélange Masq2\_B3 l'a été un peu moins.*

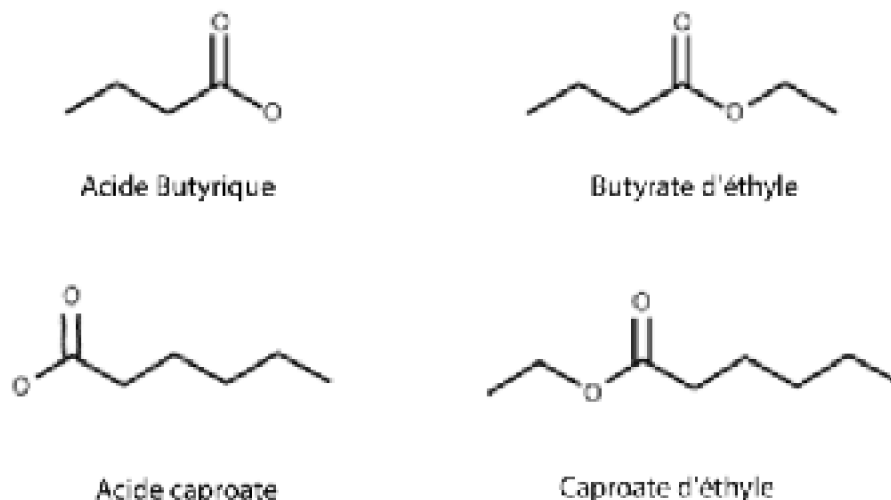
L'odeur du mélange masquant « Masq1\_B3 » (Acide caproïque  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-2}$ ) a été perçue comme plus agréable que l'odeur du mélange masquant « Masq2\_B3 » (Acide caproïque  $10^{-2}$  + Butyrate d'éthyle  $10^{-3}$ ) [F(1,19)=24, p<.0001].

## 2.8.4 Discussion

Dans cette expérience, pour réaliser les mélanges susceptibles de voir émerger le phénomène de masquage, nous n'avons jamais mélangé physiquement les solutions d'acide et d'ester mais avons mis en présence un flacon contenant une solution d'acide avec un flacon contenant une solution d'ester : de fait, les mélanges ont eu lieu en terme de vapeurs émanant des flacons et nous ne pouvons imputer les effets observés à des interactions chimiques (la vitesse des réactions en phase gazeuse étant généralement très faible) mais plutôt à des phénomènes perceptifs de bas niveau (sensoriel) et/ou de haut niveau (cognitif).

Les résultats que nous avons mis en évidence illustrent l'aptitude des sujets non experts à détecter et à discriminer des intensités différentes d'une molécule odorante (dans notre cas, désagréable) et à les ordonner selon leur intensité telle qu'elle est

perçue. En effet, pour les deux molécules odorantes testées – l'acide butyrique (évoquant le beurre rance) et l'acide caproïque (évoquant la transpiration) – les sujets ont classé correctement par ordre croissant les quatre concentrations proposées.



*Fig. 43 : Configuration de la molécule d'acide butyrique évoquant un note odorante de beurre rance et de son ester d'éthyle, son masquant, le butyrate d'éthyle) qui évoque une note odorante ananas. L'acide caproïque et son éthyle ester, le caproate d'éthyle, susceptible de masquer l'odeur de l'acide caproïque.*

En ce qui concerne les mélanges binaires d'acide et de leur ester d'éthyle, il semble bien que l'ester d'éthyle modifie l'intensité de la note malodorante correspondant à l'acide. Autrement dit, l'ajout d'un ester d'éthyle à une solution de l'acide qui lui correspond provoque une diminution significative de l'intensité perçue de la note odorante de l'acide. Il y a bien un effet masquant en terme « d'intensité perçue ».

D'autre part, l'analyse qualitative menée sur les solutions d'acide et sur les mélanges binaires (acide/ester) a permis de montrer qu'une concentration d'ester d'éthyle égale et/ou 10 fois inférieure à celle de l'acide permet de réduire considérablement la perception de la note nauséabonde de l'acide. L'effet masquant est bien dépendant de la concentration de l'ester éthylique.

L'effet a également des conséquences sur la qualité de l'odorant. Ainsi, comme nous l'avons vu apparaître dans notre étude, lorsqu'une solution de butyrate d'éthyle est couplée à une solution d'acide butyrique, les sujets perçoivent une diminution très significative de la note odorante « beurre rance », induite par l'acide, au profit de l'apparition d'une note odorante « fruitée », induite par le butyrate d'éthyle. De la même manière, pour le second couple testé, l'association de caproate d'éthyle à une solution d'acide caproïque provoquera la diminution, voire la disparition de la note « transpiration » induite par l'acide au profit d'une note odorante « ananas » induite par l'ester.

L'analyse des évaluations relatives au caractère hédonique indique que l'odeur du mélange masquant le plus efficace est perçue comme étant agréable, ce qui confirme la disparition de la note odorante nauséabonde.

Dans son mémoire de thèse, Thomas-Danguin (1997) suggérait qu'une molécule

masquante peut agir selon un mécanisme de « contre-action », entraînant une diminution de l'odeur gênante sans toutefois rajouter une nuance odorante supplémentaire ou augmenter l'intensité globale du mélange (Thomas-Danguin, 1997). C'est ce que nous avons observé dans cette expérience : dans tous les cas, l'intensité de la note odorante désagréable est perçue comme moins intense dans les mélanges que lorsqu'elle est flairée seule (hors mélange).

D'un point de vue physiologique, nous pouvons nous interroger sur les causes de ce phénomène.

Selon la littérature, il existe au moins deux types d'adaptation croisée en olfaction : le premier met en jeu des molécules proches d'un point de vue structural (analogies de formes chimiques), c'est ce que nous appelons le « masquage ». Le second intervient lorsque les molécules sont perceptivement proches (analogies des perceptions), il s'agirait ici d'avantage d'un phénomène d'adaptation sensorielle. L'amplitude et le décours temporel d'un masquage entre analogues structuraux différeraient qualitativement d'un masquage mettant en jeu des analogues perceptifs. Selon certains auteurs, les masquages observés ici seraient le fruit de la similarité structurale entre les molécules mises en jeu (Pierce *et al.*, 1993; Pierce *et al.*, 1995; Pierce *et al.*, 1996).

Il est même avancé que le masquage entre analogues structuraux soit un processus périphérique alors que l'adaptation entre analogues perceptifs est un mécanisme central. Cette hypothèse a été renforcée par l'observation d'adaptations croisées entre deux analogues perceptifs stimulant chacun une narine (Köster, 1971). Pourtant, on peut s'attendre à ce que les deux phénomènes concourent ensemble dans le phénomène de masquage olfactif (un effet simultané d'ordre périphérique et central).

A la vue de nos résultats concernant le masquage entre analogue structuraux et au-delà des considérations que nous venons d'aborder nous sommes tentés de faire l'hypothèse que l'efficacité d'un tel phénomène est dûe, en partie au moins, au degré de similarité structurale entre les molécules mises en mélange. Ceci confirme, comme il a été démontré dans de récentes études (Kajiya *et al.*, 2001; Oka *et al.*, 2004), que le système périphérique possède des récepteurs olfactifs multi spécifiques (famille de molécules chimiques) pour lesquelles des molécules de configuration proche entrent en compétition lorsqu'elles sont présentées en mélange. Dans le cadre de cette expérience, cette compétition périphérique s'est conclue par l'émergence d'un masquage perceptif d'une odeur malodorante (d'un acide) par l'odeur agréable véhiculée par l'ester d'éthyle qui lui correspond.

### 2.8.5 Conclusions

---

Cette expérience nous a permis d'approfondir la notion de masquage perceptif et plus particulièrement celle du masquage olfactif entre molécules partageant des éléments de structures conséquents, comme c'est le cas pour l'acide et son ester d'éthyle. L'utilisation de tels modèles expérimentaux a un intérêt double :

- D'une part, elle permet d'étudier un aspect particulier de la perception de la qualité dans les mélanges binaires tel que des sujets naïfs l'appréhendent, ce qui, nous l'avons

vu tout au long de ce chapitre, peut être une tâche difficile à appréhender tant pour les sujets que pour l'expérimentateur.

- D'autre part, d'un point de vue fondamental d'autre part, elle permet de sonder un champ d'investigations original et peu développé qui précise les mécanismes physiologiques centraux et périphériques dans le traitement de la qualité des odeurs. La performance de ces investigations repose sur la maîtrise de la qualité par l'usage systématique des mélanges de substances odorantes.

A ce titre, il nous paraît intéressant d'élaborer une procédure permettant de séparer le rôle joué par le système périphérique et le système central dans les mécanismes de masquage entre analogues structuraux et perceptifs. Pour cela, l'élaboration d'un stimulateur olfactif permettant de stimuler indépendamment la narine gauche de la narine droite est à envisager. Pour des raisons pratiques, cet olfactomètre devrait être à dilution dynamique pour permettre de maîtriser différentes concentrations sans pour autant disposer de plusieurs sources pour réaliser ces concentrations différentes.

### 2.8.6 Conclusions générales

---

Une grande gamme de molécules odorantes est reconnue par les récepteurs olfactifs de la famille des récepteurs couplés à une protéine G (Touhara, 2002). De nombreuses études ont suggéré qu'un type de récepteur discrimine des différences subtiles dans la structure chimique des molécules mais surtout qu'il est capable d'accepter d'autres molécules odorantes comme ligand (Zhao *et al.*, 1998). Par exemple, un récepteur olfactif particulier chez la souris, mOR-EG, reconnaît l'eugénol (clou de girofle), la vanilline (vanille) mais également toute les molécules structurellement similaires.

L'encodage de la qualité d'un odorant est déterminé par une combinaison de plusieurs récepteurs olfactifs, établie pour chaque type d'odorant (Kajiya *et al.*, 2001). Le code de réception pour les mélanges d'odeurs correspondrait à la somme des codes de ses composants. Cependant, les expériences réalisées dans ce champ d'étude ont montré que la perception d'un mélange n'était ni une simple addition, ni une moyenne des codes récepteurs individuels mais plutôt une situation intermédiaire entre les deux (Cain & Drexler, 1974).

Des expériences comportementales et psychophysiques ont démontré que les mélanges d'odeurs conduisant à l'émergence d'une nouvelle qualité odorante qui n'était pas présente dans chacun des composés odorants, suggérant que des interactions se produisent à certains niveaux du système olfactif (Jinks & Laing, 2001; Wiltrout *et al.*, 2003). Jusqu'à présent, deux types d'interactions relatives à la configuration moléculaire ont été démontrés dans différentes expériences : ceux qui mettent en jeu des molécules de configuration proche (interactions dans les mélanges conduisant à la perception d'une nouvelle odeur) et ceux qui mettent en jeu des molécules de configuration différente (l'odeur de chaque composé est perceptible dans le mélange).

Dans ce chapitre, nos expériences ont montrée que de tels effets peuvent conduire aussi bien à la perception qualitative d'accord qu'à celui de masquage olfactif. Nous avons souligné que des mélanges judicieusement sélectionnés permettent de mettre en

---

évidence de telles interactions d'ordre périphérique. Nous sommes en mesure de penser que lorsque certains critères sont respectés (molécules structurellement proches, peu exigeantes en ce qui concerne leurs récepteurs olfactifs...etc), ces interactions conduisent à différents phénomènes perceptifs tels que l'accord aromatique ou encore le masquage olfactif. Bien entendu, ces observations n'excluent en rien une composante plus centrale (cognitive) dans le traitement des mélanges odorants.





## Chapitre 3. Notes et Accords

### 3.1 Introduction

A ce stade de notre réflexion concernant la perception de la dimension qualitative de l'odeur (des mélanges binaires), il nous a semblé important d'insérer un commentaire analytique à ce mémoire.

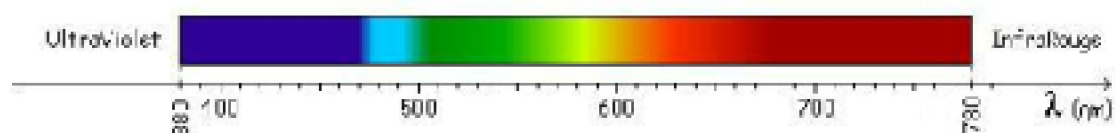
Tout d'abord, nous y présentons une synthèse rapide concernant les interactions entre stimuli dans différentes modalités perceptives. Nous résumons ici des propriétés de mélanges dans les modalités visuelles et auditives, lesquelles sont également qualifiées d'accords.

Fort de cet éclairage, nous synthétiserons les résultats principaux de plusieurs études relatives aux interactions qualitatives olfactives survenant dans certains mélanges de composés odorants. Ainsi, d'une part, nous rappellerons et analyserons les principaux résultats d'une étude menée par l'équipe « interactions moléculaires et perception de la flaveur » de l'UMR FLAVIC INRA/ENESAD de Dijon. Puis, d'autre part nous ajouterons une analyse originale, utilisant des formulations proposées par un manuel de composition aromatique (« Perfumes, cosmetic & Soaps », (Poucher, 1975). Ces travaux, nous ont amené à réévaluer le concept d'interactions qualitatives dans les mélanges. Nous présenterons donc notre définition de l'accord aromatique.

## 3.2 Interactions qualitatives dans la modalité visuelle

Prenons, dans la modalité visuelle, l'exemple des couleurs. D'un point de vue physique, la couleur de la lumière est caractérisée par sa fréquence, elle-même conditionnée par la longueur d'onde et la célérité de l'onde.

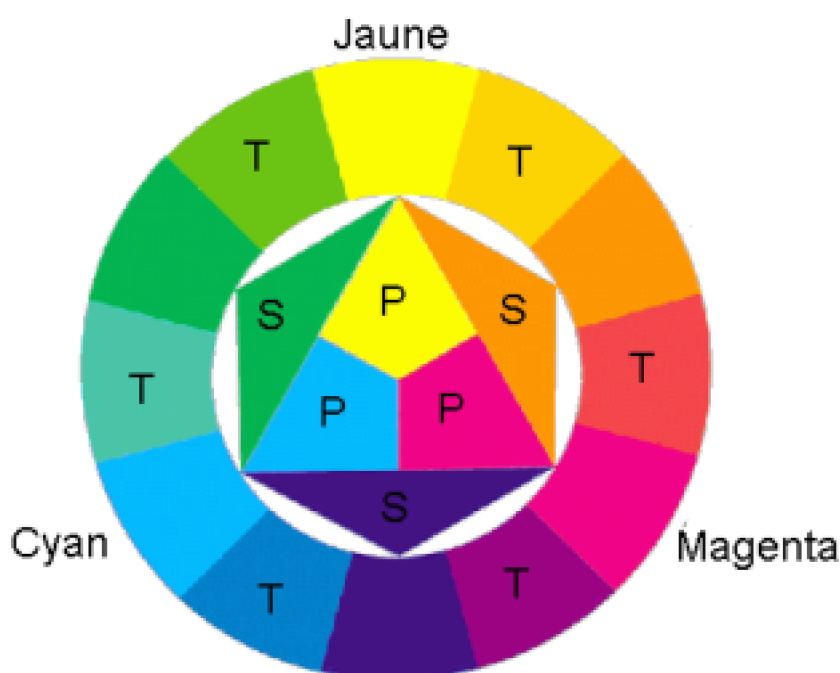
L'oeil humain est capable de percevoir des rayonnements électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 780 nanomètres. En dessous de 380 nm se trouvent des rayonnements tels que les ultraviolets, au-dessus de 780 nm se trouvent les rayons infrarouges. L'ensemble des longueurs d'ondes visibles par l'oeil humain est appelé "spectre visible" (Figure 44).



*Fig. 44 : Spectre de la lumière blanche qui permet de relier la longueur d'onde d'une radiation monochromatique à la perception visuelle colorée que nous en avons.*

La roue des couleurs (ou cercle chromatique) illustre les principales interactions provenant du mélange des couleurs du spectre visible (Figure 45).

Les couleurs primaires (P) sont celles qui ne peuvent pas être créées en mélangeant (par addition) les autres couleurs entre elles : le jaune, le bleu primaire ou cyan, le rouge primaire ou magenta. Si l'on combine ces couleurs par paires en proportions égales on obtient les couleurs secondaires (S). Les couleurs tertiaires ou intermédiaires sont obtenues en mélangeant une couleur primaire à l'une de ses couleurs secondaires.



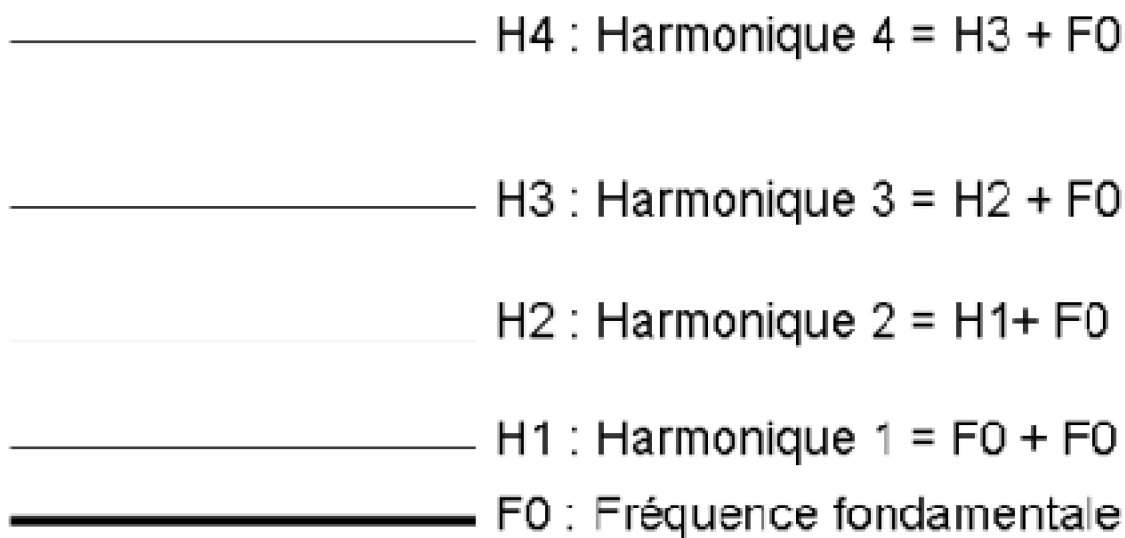
*Fig. 45 : Le cercle chromatique présente les couleurs primaires « P » (jaune, cyan et magenta) et leurs différentes combinaisons par paire qui conduisent à l'obtention des couleurs secondaires « S ». Le jaune et le magenta donne l'orange, le magenta et le bleu donne le violet et le bleu et le jaune donne le vert. Les couleurs tertiaires sont obtenues en mélangeant une couleur primaire avec une de ses couleurs secondaires.*

La définition simple du cercle chromatique permet de réaliser que des interactions qualitatives existent dans la modalité visuelle. Ainsi, un accord colorimétrique, le mélange de deux couleurs primaires, conduit bien à la perception d'une couleur résultante (secondaire) qui n'était pas présente, pour l'œil humain, dans les composés à l'origine du mélange binaire.

De plus, comme le suggérait Zwaardemaker (Zwaardemaker, 1925), le mélange de deux odorants à des concentrations détectables par un sujet humain (au dessus du seuil de détection) sont capables de « s'annuler » l'une/l'autre pour aboutir à un mélange inodore. Ce phénomène, qu'il nomme « compensation », serait l'analogue du phénomène visuel dans lequel la combinaison de toutes les couleurs chromatiques conduit à la lumière blanche.

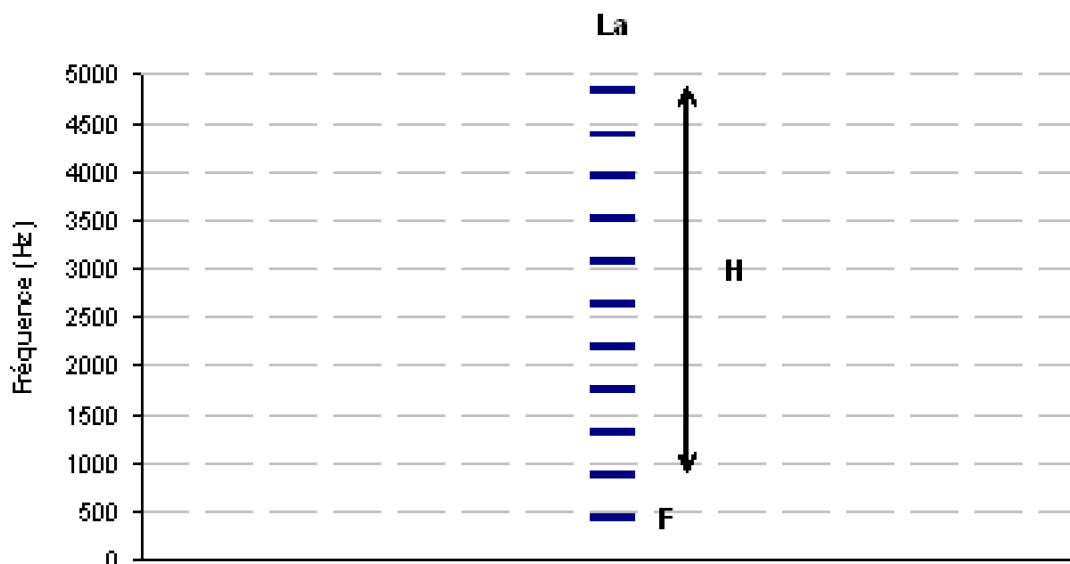
### 3.3 Interactions qualitatives dans la modalité auditive

En acoustique, un son (figure 43) est constitué d'une fréquence fondamentale (F0) et de fréquences harmoniques (dont la valeur est toujours un multiple de la fréquence fondamentale).



*Fig. 46 :* Composition d'un son complexe. Un son est constitué d'une fréquence fondamentale (F0) et de ses harmoniques qui sont toutes multiples de la fréquence fondamentale. Ainsi, la valeur de la première harmonique H1 (en Hertz) est égale à deux fois la valeur de la fréquence fondamentale, la valeur de la seconde harmonique (H2) est égale à la somme de la valeur de H1 et de F0... et ainsi de suite.

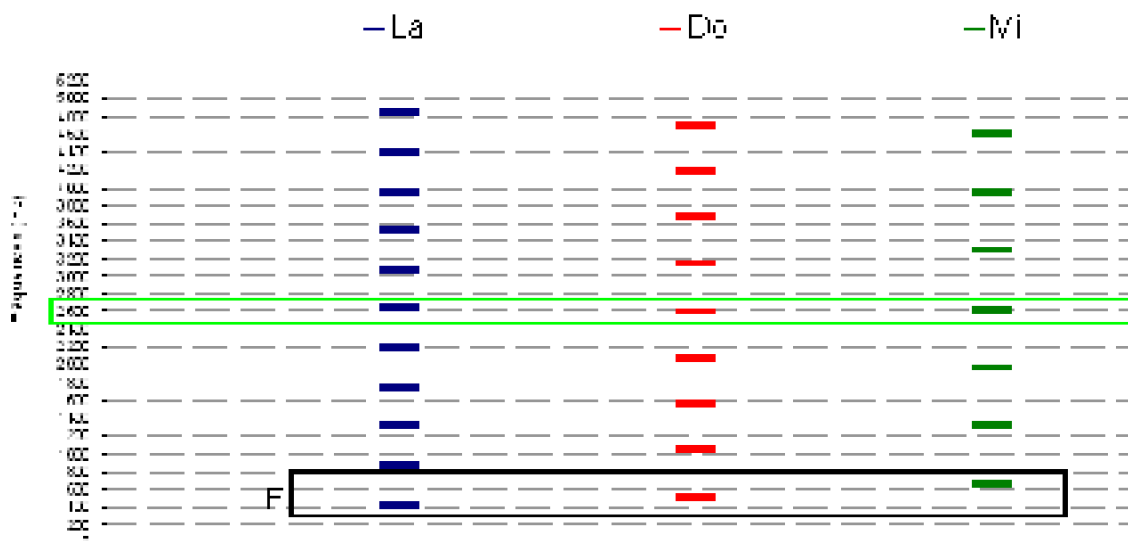
Une note de musique peut être définie selon le même principe acoustique. Par exemple, le LA de référence (Figure 47) à une fréquence fondamentale de 440 Hz, et selon la définition précédemment donnée, possède une première harmonique à 880 Hz, une seconde à 1320 Hz...etc.



*Fig. 47 :* La note « LA » de référence est composée d'une fréquence fondamentale (F) de 440 Hz, et d'harmoniques (H), dont chacune est un multiple de 440 Hz.

Un musicien vous dira qu'il faut un minimum de trois notes pour composer un « vrai » accord. Par exemple, le « La mineur », est composé de trois notes distinctes jouées

simultanément : LA – DO – MI (cf. figure 48). A l'oreille, cet accord est défini comme une unité, et les trois notes qui le constituent ne sont plus perceptibles par le néophyte qui percevra un précepte dénommé « accord en *La mineur* ». Cet accord basique est bien connu, et bon nombre de personnes sont capables de l'identifier et par le fait, de déduire les trois notes qui le constituent. Cependant, la synchronisation des phases de certaines harmoniques partagées par les trois notes de l'accord : la 5<sup>ème</sup> du LA, la 4<sup>ème</sup> du DO et la 3<sup>ème</sup> du MI, à 2600 Hz, pourrait déterminer la reconnaissance de la spécificité du « *La mineur* ».



*Fig. 48 : Spectre fréquentiel de l'accord en « La mineur » obtenu en jouant simultanément trois notes : LA, DO et MI. Respectivement, la 5<sup>ème</sup> harmonique du LA, la 4<sup>ème</sup> harmonique du DO et la 3<sup>ème</sup> harmonique du MI entrent en phase car elles ont une fréquence voisine, ce qui pourrait expliquer la perception d'un son résultant unique, non décomposable par l'oreille : l'accord auditif.*

En complexifiant la composition d'un accord musical, c'est à dire en accroissant le nombre de notes constitutives, il semblerait imaginable de faire fusionner encore plus de notes pour en faire émerger une nouvelle, absente des notes constitutives.

Nous sommes en droit de se demander si les notions d'accords ou les types d'interactions qu'on rencontre dans les modalités visuelles et auditives ont un équivalent en olfaction : l'accord serait-il un « universel perceptif » ?

### 3.4 Interactions qualitatives en olfaction : notes olfactives et accords

Existe-t-il vraiment des cas de mélanges, simples ou complexes, dont les composants, à concentrations déterminées et dans des proportions précises, peuvent conduire à la perception d'un accord-fusion comme celles qu'on décrit en vision ou en audition ? Dans

ce type de mélange particulier, une nouvelle note odorante émergerait, remplaçant les notes odorantes des constituants du mélange ?

Pour répondre à ces questions, il faut maîtriser les connaissances sémantiques permettant de décrire précisément la qualité des mélanges odorants. Un des moyens d'y parvenir consiste à interroger des experts, tels que les élèves de L'ISIPCA (Institut Supérieur International du Parfum de la Cosmétique et de l'Aromatique Alimentaire) à Versailles. C'est précisément ce qu'ont fait plusieurs équipes de recherche en collaboration (SORDAB, ISIPCA et UMFLAVIC-INRA-ENESAD) dans le cadre d'un groupe de travail du club CRIN « arômes alimentaires », en élaborant une étude intitulée « Les accords aromatiques, projet Accord-Fusion » (Thomas-Danguin, 2003).

### 3.4.1 Les accords aromatiques : l'Accord-Fusion

---

Comme nous l'avons défini dans le second chapitre, l'accord est le fruit d'une interaction perceptive très spécifique entre des composés aromatiques mis en mélange et le système olfactif. Une interaction peut se produire dès le niveau de la muqueuse olfactive, là où les odeurs se fixent aux récepteurs sensoriels qui leur sont spécifiques. Mais des interactions peuvent prendre place à bien d'autres niveaux du système olfactif. Comme dans les autres modalités sensorielles, en olfaction, l'accord, plus précisément l'accord-fusion, est un phénomène perceptif dans lequel les odeurs des composants du mélange fusionnent pour faire apparaître une nouvelle note odorante.

Mais, en pratique, un mélange odorant peut générer différents types d'accords :

Si le mélange conduit à l'émergence d'une nouvelle note odorante, distincte, mais qu'il reste possible de percevoir une ou plusieurs des notes odorantes typiques des composants du mélange, on dit qu'il s'agit d'un « accord-fusion partiel ».

Si le mélange conduit à la perception d'une note odorante distincte et unique, qui remplace les notes odorantes des constituants du mélange, on dit qu'il s'agit d'un « accord-fusion total ».

Mais, dans la pratique, comment le sujet humain perçoit-il la qualité d'un mélange odorant et d'un point de vue sensoriel, comment discrimine-t-il les différents constituants ? Les données de la littérature nous renseignent sur cette question délicate.

En effet, plusieurs études ont porté sur les capacités à discriminer et identifier les notes odorantes émanant de mélanges odorants (Laing & Jinks, 2001). D'une manière générale, ces études ont montré que la qualité d'un mélange odorant est fréquemment un intermédiaire entre la qualité de chacun des constituants du mélange (Moskowitz & Barbe, 1977; Gregson, 1984; Olsson & Cain, 2000). De plus, d'un point de vue hédonique – caractère le plus saillant en olfaction – il a été indiqué que la valence émotionnelle d'un mélange binaire, en accord avec la qualité perçue, semble toujours être un intermédiaire entre les différents constituants (Lawless, 1977).

D'autre part, des études ont fait le lien entre intensité et qualité perçues dans les mélanges binaires. Selon ces études, l'aptitude à discriminer les différents constituants d'un mélange est améliorée lorsque ces composés, présentés séparément, sont perçus

comme ayant la même intensité (Laing & Willcox, 1983; Laing *et al.*, 1984; Laing & Francis, 1989). De plus, le système olfactif accentue la différence entre l'intensité des constituants d'un mélange pour en déterminer sa qualité (Olsson & Cain, 2000).

Ainsi, s'il est entendu que l'humain possède des capacités limitées à analyser la qualité des mélanges odorants, limitations inhérentes au sens de l'olfaction (Jinks & Laing, 2001) telles que l'expérience individuelle des sujets testés (Livermore & Hummel, 2004) ou encore les caractéristiques intrinsèques aux odorants (Livermore & Laing, 1998). Il n'empêche que ces limites perceptives ne semblent pas altérer l'aptitude des humains à discriminer la qualité des odorants mis en mélange, et ce, même lorsque les constituants sont proches d'un point de vue qualitatif (Laska & Hudson, 1992). Par exemple, nous sommes tous capables de détecter à quel moment un fruit aura atteint sa maturité optimale pour être consommé, ou plus simplement de déterminer la qualité d'un produit dans une chaîne de qualité. Certains chasseurs sont même capables de déterminer avec précision la direction prise par le gibier.

### 3.4.2 Composition d'accords olfactifs et caractérisation par des experts

---

#### 3.4.2.1 Procédure expérimentale

Les expériences réalisées dans le cadre du club CRIN étaient constituées de 2 phases :

- Formulation :

Dans un premier temps, 15 sujets (étudiants du DESS-IPCA) répartis dans 7 groupes (6 groupes de 2 et un groupe de 3) ont réalisés un TP de formulation. Ils devaient pour cela, à partir des composés aromatiques mis à leur disposition, proposer une ou plusieurs formules conduisant, selon eux, à un accord partiel ou total. Puis dans un second temps, ils devaient réaliser une description qualitative des formules générées (de par leur formation, les sujets maîtrisaient le vocabulaire utilisé pour la description de la qualité des odeurs).

Les composés odorants étaient connus comme base de construction d'accord-fusion et ont été sélectionnés sur les conseils de parfumeurs professionnels<sup>6</sup>.

- Analyse sensorielle des formules :

Deux mois après le TP de formulation, les étudiants ont été convoqués pour réaliser des analyses sensorielles. Ils devaient décrire, en aveugle, chacun des composés ayant servis dans l'expérience ainsi que tous les mélanges composés (dont leur propre formulation) en réalisant une Analyse Quantitative Descriptive (AQD). Il s'agissait de décrire, le plus précisément possible, les odorants et les mélanges créés en utilisant leur vocabulaire d'experts.

<sup>6</sup> Mme M. Schlienger et Mr. R. Chataigner : communications personnelles (2003).

Cette expérience a permis d'estimer dans quelle mesure il est possible de créer des mélanges odorants simples (à deux ou trois composants) générant des accords-fusion. Si de tels accords existent, il serait intéressant d'étudier comment des experts, qui possèdent les connaissances sémantiques relatives aux odeurs, les décrivent et analysent leur perception olfactive. Parallèlement, les auteurs ont cherché à savoir si l'accord est une perception personnelle ayant un caractère hédonique particulier ou si un accord peut être consensuel et résulte principalement d'un mélange spécifique de constituants particuliers dans des proportions définies.

### 3.4.2.2 Résultats remarquables

Les éléments de formules et les composés odorants ont été fournis aux sujets (DESS à l'ISIPCA) lors d'une séance de travaux pratiques. Ceux-ci devaient proposer les proportions des différents composés à mélanger de manière à générer des accords-fusion pour chaque formulation. Le tableau 24 répertorie les principales combinaisons des composés aromatiques qui mis en mélange, ont conduit à des accords perceptifs.

**Tab. 24 :** Formulations des mélanges réalisés par les étudiants de l'ISIPCA, la formule A composée de butyrate d'éthyle, de furanéol et de trans-2-hexenol et la formule B, composée de frambinone, de vanilline et de benzaldéhyde, ont été considérées comme des mélanges « aromatiques » (alimentaires) au contraire des formules C (héliotropine, vanilline et coumarine) et D (allyl amyl glycoate, triplal et damascone) appartenant plutôt au monde de la parfumerie.

Formule A	Formule B	Formule C	Formule D
Butyrate d'éthyle	Frambinone	Héliotropine	Allyl amyl glycoate
Furanéol	Vanilline	Vanilline	Triplal
Trans 2 hexenol	Benzaldéhyde	Coumarine	Damascone alpha

Source : T. Thomas-Danguin : Projet accord-fusion – Rapport d'analyses des résultats (22/03/2004).

A la fin de la séance de description, les étudiants ont fourni six mélanges qui selon eux généraient des accords (tab.25). Parmi ces mélanges, un seul était binaire (à deux composés) et conduisait à la perception d'un accord total (mélange A) ; les autres mélanges conduisant à la perception d'accords totaux étaient des mélanges à trois composés (mélanges C1, C2, D1, D2, D3). En revanche, aucun accord n'a été trouvé avec les composés de la formule B.



Mélange A	Proportions
Butyrate d'éthyle	0,0%
Furanéol	55,0%
Trans 2 hexenol	45,0%

Mélange C1	Proportions	Mélange C2	Proportions
Héliotropine	50,0%	Héliotropine	50,0%
Vanilline	15,0%	Vanilline	25,0%
Coumarine	35,0%	Coumarine	25,0%

Mélange D1	Proportions	Mélange D2	Proportions	Mélange D3
Allyl amyl glycoate	50,0%	Allyl amyl glycoate	10,0%	Allyl amyl glycoate
Triplal	35,0%	Triplal	10,0%	Triplal
damascone alpha	15,0%	damascone alpha	80,0%	damascone alpha

**Tab. 25 :** Compositions et proportions des mélanges créés par les étudiants et qui ont été décrits comme générateurs d'accords-fusion. Sur 6 mélanges proposés, on compte un seul mélange binaire (A) et 5 mélanges ternaires (C1, C2, D1, D2, D3).

**Source :** T. Thomas-Danguin : Projet accord-fusion – Rapport d'analyses des résultats (22/03/2004).

Les résultats de la phase QDA (Analyse Descriptive Qualitative) des mélange conduisant à des accords sont présentés dans le tableau 24.

Mélange A1	(caramel, cuit, vert) ; (fruité, fruit mûr, éther, caramel, cuit, brûlé, torréfié)
Mélange C1	(vanillé, coumariné/foin, légèrement amandé)
Mélange C2	(coumariné/foin, amandé, vanillé) ; (coumariné, frais, vanillé)
Mélange D1	(jus de poire/confiserie, frais/menthé, fruité/vert, Arlequin/Tutti-Frutti, grasse, poussiéreux, cosmétique/savonneux-parfumé, fleurs blanches)
Mélange D2	(tutti-frutti, fruits exotiques, poussiéreux) ; (fruité pomme/poire, verte, peau de fruit, vineux, poussiéreux)
Mélange D3	(fruité pomme verte, floral, détergente, fraîche) ; (verte, fraîche, menthée, fruitée/pomme, floral)

**Tab. 26 :** Description des 6 mélanges ayant été décrits comme générateurs d'accords totaux. Les étudiants devaient flairer les composés seuls, puis les différents mélanges (en aveugle) et effectuer une description sémantique en utilisant leur vocabulaire d'experts.

**Source :** T. Thomas-Danguin : Projet accord-fusion – Rapport d'analyses des résultats (22/03/2004).

Les principaux résultats que les auteurs ont mis en évidence sont listés ci-après :

Il y a un effet significatif de la formulation elle-même sur l'apparition d'un accord, c'est-à-dire que le choix des molécules ainsi que leurs proportions relatives dans les mélanges, provoque ou non l'émergence d'un accord olfactif. 1.

Un individu qui évalue (en aveugle) un mélange qu'il a lui-même réalisé le considérera d'avantage comme un « accord total » alors que les formulations d'accords réalisées par d'autres seront moins fréquemment perçues comme « accord total ». 2.

Réciproquement à cette deuxième proposition, un individu flairant une de ses 3.

formules la considérera souvent comme un accord olfactif, et très peu souvent comme ne donnant « pas d'accord ».

Il existe bien des accords consensuels, pour lesquels la majorité des sujets a perçu la 4. note odorante émergente comme dominante, ce qui contraste avec d'autres mélanges dont la note relative à l'accord n'est perçue que par les concepteurs eux-mêmes.

Indépendamment des auteurs de cette étude, nous avons analysé à nouveau les résultats concernant les descriptions qualitatives des mélanges.

Du point de vue de la description sémantique des odeurs, l'observation du tableau 26 confirme que les étudiants maîtrisent un vocabulaire très spécifique et que la description qu'ils donnent des mélanges fait intervenir une terminologie assez riche. On réalise toutefois que les termes utilisés peuvent être de deux types : soit il s'agit d'un terme caractérisant l'odeur (généralement se référant à une source émettrice spécifique) d'un produit odorant en particulier (par exemple, dans le mélange A, « caramel » dont on sait qu'il caractérise bien le furanéol) ; soit il s'agit de propriété non spécifiquement olfactive. C'est par exemple, le cas de « frais » qui correspond plutôt à une sensation trigémisée (véhiculée par la stimulation du nerf trijumeau, hors système olfactif mais complémentaire de la sensation perceptive odorante). L'odeur de menthe par exemple, ne serait pas ce qu'elle est sans la sensation de fraîcheur qu'elle provoque.

Focalisons notre attention sur la perception de la note odorante « dominante » des accords générés. En toute logique, lors de la description qualitative des mélanges, le descripteur qui obtient le plus grand nombre d'occurrences correspond à la note odorante majoritaire du mélange. Les sujets réalisent en quelque sorte, un profil olfactif qui illustrerait la puissance des notes odorantes.

Par exemple, le mélange C2, l'accord ternaire constitué de coumarine, d'héliotropine et de vanilline est décrit par les termes qui permettent de décrire les constituants eux-mêmes hors mélange à savoir : 'coumariné/foin' et 'vanillé'. Une autre formule (mélange binaire A1) élaborée à partir de furanéol et de trans-2-hexenol a été décrite comme 'caramel' et 'cuit' qui sont les deux principaux descripteurs du furanéol et comme 'vert' qui est le descripteur principal du trans-2-hexenol.

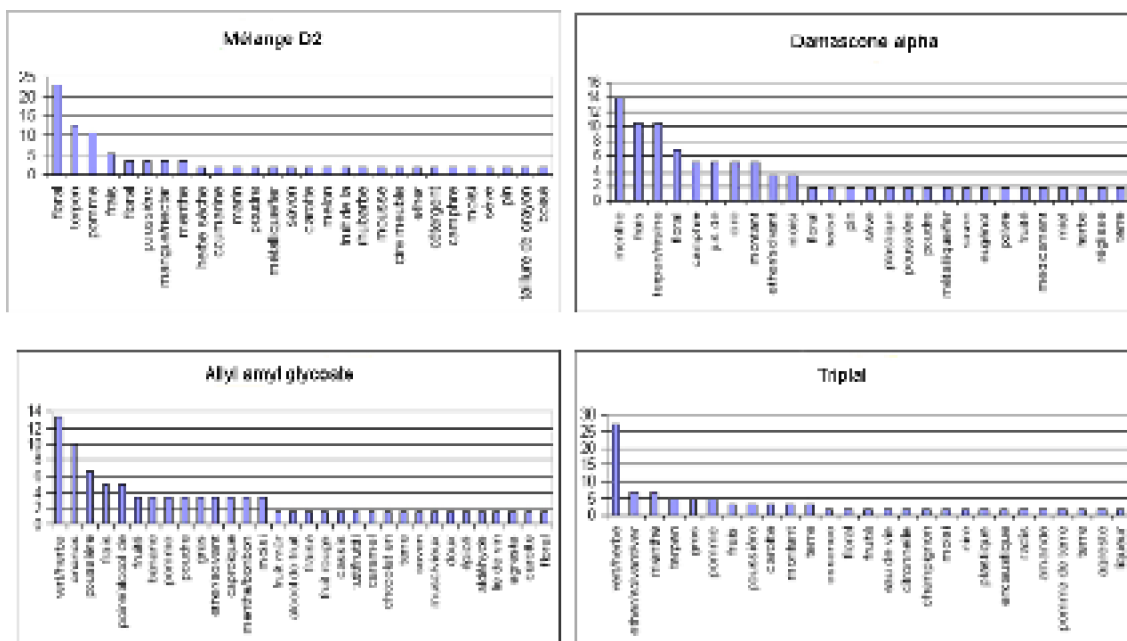
La formule D2 (*cf.* fig. 49) est celle dont la description est la plus éloignée de la description des matières premières qui composent ce mélange (allyl amyl glycoate, damascone alpha et triplal). Le terme floral qui est le descripteur le plus fréquent pour cette composition ne se retrouve pas parmi les descripteurs les plus cités pour les matières premières. On peut donc imaginer que ce mélange correspond à un « accord floral », bien que le profil obtenu pour cette formule ne décrive pas un accord total.

Ainsi, ces résultats indiquent qu'il semble possible de construire des accords sur la base de mélanges composés de deux ou trois constituants (mélanges binaires ou ternaires). Toutefois, dans la majorité des exemples explorés dans cette étude, au moins une des matières premières utilisées apporte une note odorante (qualitative) proche de l'accord final. S'agit-il d'une généralité ? En tout cas, les autres notes odorantes ajoutent des facettes supplémentaires permettant de préciser la note définitive de l'odeur

résultante, ou du moins, aident à définir la catégorie olfactive de l'accord olfactif.

De plus, en considérant que ces jugements olfactifs (et la composition des mélanges) ont été réalisés par des experts, on peut se demander si le fait de disposer de bonnes connaissances des matières premières (constituants les mélanges) et d'une certaine maîtrise des descripteurs sémantiques servant à définir les mélanges d'odeurs joue un rôle dans la perception des accords olfactifs. En effet, rappelons que les sujets de cette expérience étaient tous des étudiants en DESS à L'ISIPCA (Institut Supérieur International du Parfum de la Cosmétique et de l'Aromatique Alimentaire), formés de manière intensive à détecter et à identifier une large gamme d'odorants. Ceci implique-t-il que seuls des sujets entraînés soient en mesure de déceler les accords aromatiques ?

Dans le second chapitre de cette thèse, nous avons partiellement répondu à cette question. En effet, les résultats concernant l'accord ananas ont montré l'évidence d'un consensus quant à l'apparition de l'odeur d'ananas dans le mélange binaire constitué de caproate d'éthyle et de furanéol. Nous avons démontré qu'une telle perception consensuelle est à la portée de sujets non entraînés aux notes odorantes de chaque constituant du mélange. En rapprochant cette remarque des résultats présentés ci-dessus, nous pouvons penser que des sujets non entraînés ont plus de chance de percevoir un accord fusion total alors qu'un sujet expert aura un jugement plus sévère sur l'apparition d'une nouvelle note odorante car il maîtrise d'avantage les notes odorantes unitaires qui constituent le mélange, élaborant ainsi un 'profiling' plus précis du mélange.



*Fig. 49 : Exemple de profil olfactif correspondant à la description sémantique donnée par les sujets de l'expérience pour un des mélanges de l'expérience (D2). On remarque que la note odorante principale de ce mélange est 'floral' alors que les trois composés qui le constitue ne sont pas décrits comme principalement 'floral' mais comme 'vert/herbe', 'frais' et 'terpène/résine' pour la damascone alpha, comme 'vert/herbe', 'ether/solvant/vert' pour le triplal et enfin comme 'vert/herbe', 'ananas' et 'poussière' pour l'allyl amyl glycoate.*

Source : T. Thomas-Danguin : Projet accord-fusion – Rapport d'analyses des résultats (22/03/2004).

### 3.5 Accords, formulations et descripteurs sémantiques

En examinant un plus grand nombre de formulations d'accords aromatiques, nous espérons mieux discerner le phénomène d'accord perceptif et tirer quelques règles sur le rôle et le choix des matières utilisées pour construire un accord spécifique et esthétiquement 'rond' (c'est-à-dire que l'odeur finale du mélange ne présente pas de notes odorantes saillantes qui perturbent la perception de l'accord).

Dans le manuel de cosmétique « *Perfumes, Cosmetic and Soaps* » de (Poucher, 1975), nous avons donc sélectionné les formulations relatives à la composition de 'fleurs' et de 'fruits'. Nous avons répertorié la totalité des constituants (matières premières) entrant dans la composition synthétique d'odeurs de 14 fruits et de 14 fleurs (cf. liste ci après).

- Fruits : pomme, abricot, banane, melon, pêche, raisin, poire, prune, ananas, cerise, mûre, groseille, framboise et fraise.
- Fleurs : acacia, cyclamen, jacinthe, jasmin, lilas rose, lilas blanc, muguet, magnolia, mimosa, narcisse, fleur d'oranger, orchidée, rose, pois de senteur.

Les 54 molécules odorantes nécessaires à l'élaboration des 14 formulations de « fruits » (fig. 50) ainsi que leurs proportions dans les différents mélanges sont représentées pour les fruits (fig. 51) et pour les fleurs (fig. 52 et 53).

Nous avons calculé la fréquence moyenne d'utilisation de chaque composé pour les différentes formulations. Enfin, nous avons réuni tous les descripteurs sémantiques proposés par Arctander (Arctander, 1969) et la base BACIS (Boelens, 2001) pour chaque molécule utilisée pour représenter les odeurs des fruits (tab. 27) et des fleurs (tab. 28).

## La qualité perçue des mélanges Odorants : Analyses Psychophysologiques

	Pomme	Abricot	Banane	Melon	Pêche	Sabin	Poire	Prune	Orange	Levure	Vanille	Ylang-ylang	Stamboul	Indole
1	300													
2					40									
3			80											
4							30							
5									5					
6														10
7							10							
8							10							
9	200													
10									10					
11		50												
12														100
13													5	
14												20		
15	80													
16													300	
17		5												
18								10						
19										50				
20														10
21							5							
22										50				
23		25												
24									100					
25													5	
26							20							
27										50	40			
28				4										30
29												10		10
30													30	150
31			100	100										
32				5			5							
33														0
34				30					20					
35			20							20				
36					50					50		200		
37				30		30								50
38		200		400	50									
39						30						30	50	
40		150	10		10			20						
41	30	50				50			50					
42			20					10		10				10
43		10		1	500					5				
44			100		150		400						200	40
45		70	100			50			500	50				
46										400	200	100	10	20
47				100		50		50					50	100
48						10	5				4		5	20
49	100					20		200	60			20	70	
50	100	100				100		100				60	20	
51		30			50	200		200		150	150			50
52	200			100		400	400	200	50	300	400	300	100	200
53		500	400	100	50		20	100	200		150	200	50	200
54	5	10	5	10	100	5	20	5	10	10	10			20

*Fig. 50 : Présentation des 14 formulations d'odeur de fruits selon la base de Poucher (1975). Pour les différents composants, les proportions sont données en parties par million (ppm), volume à volume. Par exemple, 1 ppm (en microlitre), correspond à un volume de 1 µL pour 1 million de µL final. Les numéros des 54 composés correspondent à ceux de la légende de la figure 51 ci-après.*

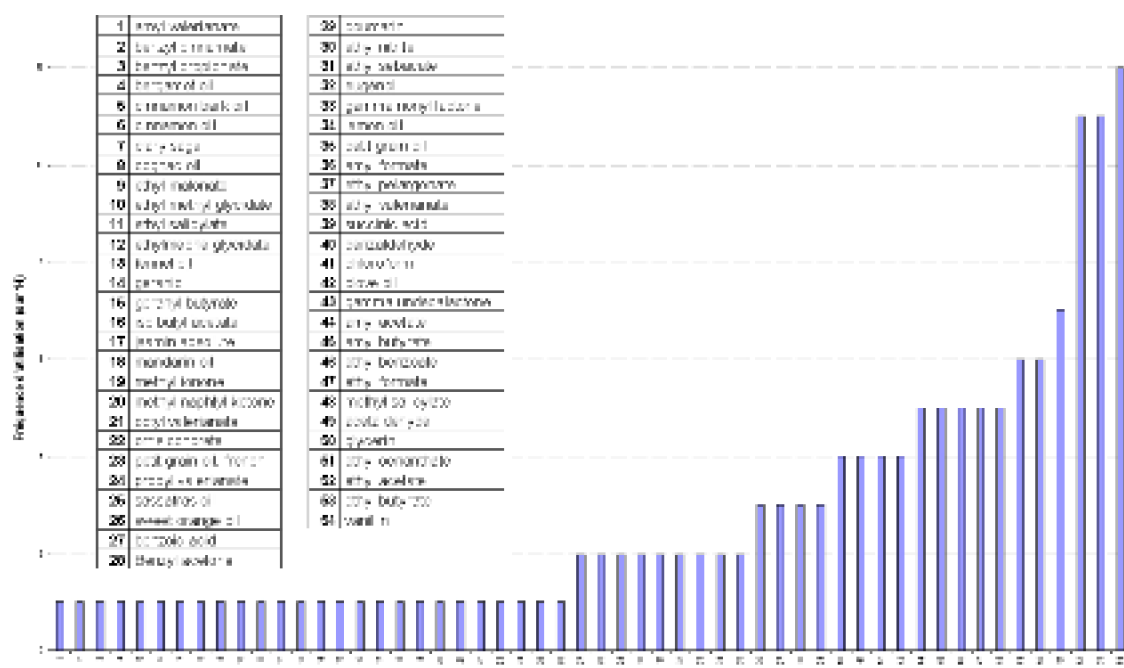


Fig. 51 : Participation des 54 molécules servant de matières premières à la composition de l'odeur des 14 fruits selon Poucher. On remarque que 4 molécules sont plus souvent utilisées : amyl valériane (5), ethyl acetate (19), ethyl valériane (30) et isobutyl acetate (39).

En ce qui concerne les fruits, les figures 50 et 51 relatives aux formulations exactes pour chaque cible, démontrent qu'un petit nombre de molécules sont nécessaires à l'évocation d'une odeur « fruitée » générique (i.e. sans identification précise du fruit). En effet, dans les formulations, nous avons pu constater que sur 54 molécules, seules 3 d'entre elles (oenanthate d'éthyle, butyrate d'éthyle et acetate d'éthyle) constitueraient déjà une « base » aromatique « fruitée ». Bien qu'un profil olfactif détaillé de ces composants (tab. 27) indique que chacun d'entre eux peut évoquer une note correspondant à un ou deux fruits précis (par exemple la banane, l'ananas, la framboise ou la poire) ou encore à une catégorie de fruits (agrume), nous notons que ces composés sont d'abord décrits comme ayant une odeur « puissante et fruitée ». Ainsi, il est suggéré que certains composés aromatiques peuvent servir de base à l'élaboration d'accord plus





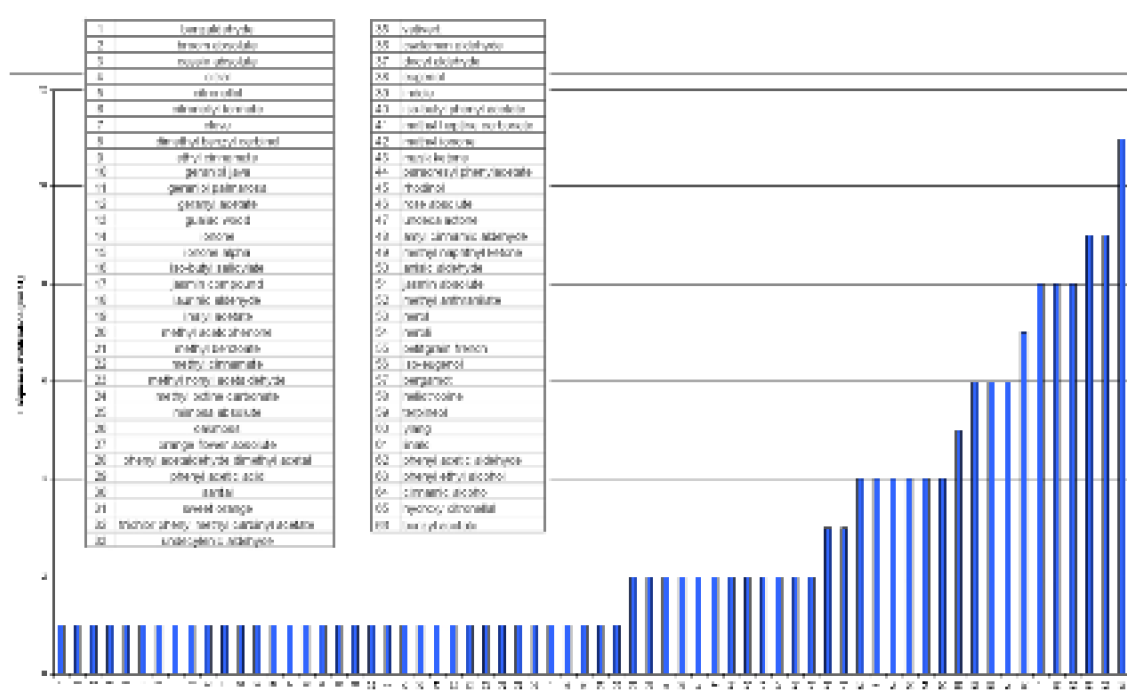


Fig. 53 : Fréquence d'utilisation des 66 molécules servant de matières premières à la composition de l'odeur des 14 fleurs selon Poucher (1975). On remarque que seul un petit nombre de molécules est employé dans la majorité des formulations.

Tab 28 : Les huit molécules les plus fréquemment utilisées dans la composition des fleurs de Poucher (1975). La plupart des molécules sont décrites comme étant « florale » même si chacune d'entre elle peut avoir une ou plusieurs autres notes odorantes supplémentaires (en fonction de sa concentration).

Composés	Fréquence d'utilisation (sur 14)	Note odorante (Arctander)	Note odorante (Boelens)
Acétate de benzyle	6	Puissant mais fin, floral doux -Note jasmin, gardénia, muguet, lilas-	Floral aromatique -Note jasmin-
Alcool cinnamique	7	Balsamique chaud, floral - Note de tête variable en fonction de la concentration-	Chaud, doux, floral aromatique -note faible cannelle-
Hydroxy citronellal	8	Floral doux -Note muguet vert-	Florale, fraîche, muguet, tilleul-like -Compositions florale cosmétiques-
Linalol	8	Florale boisée -Note légèrement agrume-	Florale, fraîche -Note bois de rose-
Aldéhyde phényle acétique	8	Puissante, verte, florale -Note jacinthe douce-	Verte florale -Note jacinthe forte-
Alcool phényle éthylique	9	Doux, chaud -Note rose et miel-	Fraîche, douce, florale aromatique -Réminiscence de rose-
terpinéol	9	Florale -Note lilas-	Pin, florale -Note lilas-
Ylang ylang	11	-	Boisée, balsamique, florale aromatique

En ce qui concerne les compositions de fleurs, l'analyse des formulations de Poucher (fig. 52 et fig. 53) ainsi que l'observation des descriptions des notes odorantes données dans « Perfume and Flavor Chemicals » (Arctander, 1969) et par la base BACIS (Boelens, 2001) nous a permis de relever huit molécules sur les 66 composés permettant d'évoquer une note odorante générique « fleurie » (tab. 28).

Pour les fleurs, l'observation des graphiques a montré que certains composés utilisés évoquent presque toujours une note odorante fleurie non identifiable précisément. Cette odeur peut rappeler une(des) cible(s) odorante(s) « fleurs », comme par exemple l'acétate de benzyle qui évoque principalement une note florale douce mais aussi le jasmin, le gardénia, le muguet, le lilas ou également l'alcool cinnamique dont la qualité de la note de tête varie en fonction de sa concentration. Mais dans la majorité des cas, cette odeur qui représente le « noyau » odorant de l'accord doit être affinée, arrondie par l'ajout d'autres constituants à l'odeur plus subtile, et qui permettent de préciser la note odorante finale du mélange.

D'une manière générale, pour les formulations des odeurs de fleurs comme celles des odeurs de fruits que nous avons étudiées, or nous avons constaté que seules une ou deux molécules principales seulement permettaient d'évoquer une odeur proche de l'odeur finale et de spécifier le mélange. Le « reste » du travail du compositeur consiste à trouver d'autres éléments, correspondant à d'autres facettes olfactives qui permettent d'apporter l'odeur jusqu'à la cible qu'on désire atteindre. Cet affinage est nécessaire et indispensable à l'émergence d'un accord olfactif acceptable.

De ce point de vue, il faut signaler que dans le cas des accords floraux, du domaine de la parfumerie plutôt que de l'aromatique présentés précédemment, la distance qualitative entre odeur cible olfactive à atteindre (pour le compositeur) et odeur finale obtenue à l'issue du mélange (finalement retenue) peut être relativement grande. Mais l'acceptation de ces accords implique qu'ils remplissent aussi des critères « esthétiques » à côté de leur pertinence organoleptique.

Comme l'a précisé Laing (Laing & Francis, 1989; Laing & Glemarec, 1992), les capacités des humains à détecter les odeurs des constituants d'un mélange d'odeurs dépendent de plusieurs critères dont :

- Le nombre de constituants (les capacités de détection diminuant significativement à partir de 3 éléments)
- La distance qualitative entre les éléments : un mélange de plusieurs composés dont les odeurs sont qualitativement proches favoriseront l'émergence d'un accord total.

### 3.6 Conclusions

En se basant sur les exemples que nous venons d'analyser, il semble qu'il est possible de créer un accord olfactif rappelant un fruit ou une fleur. Mais plusieurs détails suscitent des questionnements et suggèrent que la création d'un accord olfactif dépend surtout de la puissance de la note de tête, qui semble, dans la plupart des cas, prendre le dessus dans les mélanges. C'est cette note odorante que l'aromaticien ou le parfumeur va « travailler » petit à petit, pour en affiner la qualité jusqu'à ce qu'elle concorde avec l'odeur « cible » désirée.

Selon la définition, un accord-fusion total est constitué d'au moins deux constituants odorants mis en mélange dont l'odeur résultante est perçue comme une unité nouvelle et qualitativement différente de l'odeur de chacun des composés perçus indépendamment. Or nous avons vu que même s'il reste possible de faire émerger une note odorante nouvelle, il est souvent difficile, voire impossible de faire complètement fusionner les différentes notes odorantes correspondantes aux différents constituants et ainsi de les faire disparaître au profit d'une nouvelle (l'odeur de l'accord). Nous serions davantage en présence d'un accord partiel dans lesquels les notes odorantes des constituants restent perceptibles, même si une nouvelle note apparaît également.

Ainsi, nous pourrions mieux comprendre pourquoi le mélange ternaire (cf. fig. 46) est décrit comme étant floral alors que ses constituants ne le sont pas s'ils sont flairés seuls. Ainsi, si certains résultats ont montré que les connaissances sémantiques ne sont pas indispensables pour percevoir un accord, le nombre de termes servant à décrire les odeurs et l'ordre dans lequel ils sont perçus peut nous permettre de mieux comprendre le phénomène d'accords olfactifs.

Cela suggère que des interactions quantitatives (concentrations), qualitatives (masquage, fusion) et/ou temporelles (compétition entre molécules au niveau

périphérique) expliqueraient que certaines des notes odorantes lointaines (ou note de fond, à opposer à note de tête) viennent à remonter vers la « tête » de l'odeur de l'accord, pour des personnes capables de détecter les différentes notes odorantes d'un mélange tout du moins.

Dans la modalité visuelle, l'interaction entre les couleurs nous prouve quotidiennement que, si nous savons que le violet est constitué de cyan et de magenta, il n'en reste pas moins qu'un individu naïf ne peut pas distinguer la part de bleu de la part de rouge dans cet accord, alors qu'un peintre aura sans doute cette aptitude.

D'autre part, les musiciens sont tout aussi capables de reconnaître, dans une certaine mesure, les notes qui constituent un accord, même si la majorité des sujets ne perçoivent qu'une entité sonore quasi indécomposable à l'oreille.

Ces réflexions nous ont amené à réorganiser notre pensée relative à la notion d'accord fusion d'un point de vue intermodal et surtout à reconsidérer notre définition de l'accord olfactif :

L'accord résulte de l'interaction perceptive (en terme quantitatif) mais aussi cognitive (en terme qualitatif) entre les constituants aromatiques d'un mélange. Sa perception ne peut être considérée uniquement de façon holistique (comme un « tout indécomposable ») et nous devons admettre qu'il est possible de focaliser notre attention sur certaines facettes odorantes et donc de l'odeur résultante quelques uns de ses éléments les plus remarquables.

Cette définition nous permet d'ajouter que d'un point de vue physiologique, les interactions entre les molécules d'un mélange odorant ne peuvent pas se restreindre au niveau périphérique, et qu'il est maintenant raisonnable de penser à une collaboration étroite des niveaux de traitement de l'information : des bas niveaux (muqueuse périphérique) et des hauts niveaux (du bulbe olfactif au cortex olfactif).

# Chapitre 4. DISCRIMINATION DES ODEURS & POTENTIELS EVOQUES OLFACTIFS

## 4.1 Introduction

Nous l'avons vu jusqu'ici, pour étudier en détail la perception des mélanges odorants par le sujet humain, on peut poser des questions plus ou moins ciblées sur la nature de l'odeur perçue. Cette procédure nous a permis de mieux comprendre les effets d'interaction entre les composés odorants des mélanges. Cependant, ces investigations ne clarifient pas les mécanismes et les origines des interactions. Ceci est en particulier dû à l'importante variabilité des réponses individuelles que reçoivent les questions sur la perception olfactive.

Nous savons que l'intensité d'une odeur perçue est corrélée à la concentration de la molécule dans le solvant et que cette intensité influence les jugements psychophysiques tels que l'évaluation de la familiarité, de l'hédonicité...) que le sujet en donne (Cain & Johnson, 1978; Laing *et al.*, 1984; Gross-Isseroff & Lancet, 1988; Thomas-Danguin, 1997). D'autre part, il a été montré que pour certaines molécules, la qualité de l'odeur

peut être changée, modulée, par la concentration du stimulus: un exemple marquant, l'indole (2,3-benzopyrrole) a une odeur « fécale / animale » à forte concentration alors qu'il évoque le jasmin, donc une odeur florale lorsqu'il est dilué (Gross-Isseroff & Lancet, 1988).

D'un point de vue qualitatif, les mélanges odorants peuvent être perçus de manière totalement différente selon les sujets. Scientifiquement, ces différences nous apparaissent comme des variations nous empêchant de comprendre les processus mis en jeu. Ces contraintes prennent leur origine tant dans la dimension culturelle, dont les contours se dessinent principalement en langue, c'est-à-dire lors de la caractérisation de ce que l'on perçoit ; mais, elles peuvent aussi concerner des dimensions beaucoup plus individuelles, et peu partagées à travers une population. Il s'agit de dimensions telles que la familiarité de l'odeur, sensibles à une expérience vécue, sa valence hédonique (c'est à dire son caractère agréable, ou désagréable, également culturellement dépendant mais aussi variant selon l'état interne du sujet). Une autre appréciation, dans le cas d'odeur alimentaire, la comestibilité de la source (ou objet source) à laquelle l'odeur fait référence admet aussi les mêmes sources d'influence.

A la lumière de plusieurs études scientifiques, nous savons que les stimuli olfactifs peuvent moduler nos comportements sans que l'on prenne conscience de leur présence dans l'environnement. En se basant sur cette idée, plusieurs auteurs ont proposé que de nombreux paramètres physiologiques réagissent à la stimulation olfactive, parfois même de manière non consciente (Bensafi *et al.*, 2002; Barkat *et al.*, 2003). Ainsi, l'enregistrement de ces changements physiologiques pourrait mettre en évidence des corrélats cognitivo-comportementaux dans la perception olfactive. Certains dépendent du système neurovégétatif (réactions réflexes) et sont objectivés au niveau périphérique, comme la conductance de la peau des mains (Barkat *et al.*, 2003), d'autres sont plus centraux et administrés par le système nerveux central et peuvent être mis en évidence, par exemple, à l'aide d'enregistrements électroencéphalographiques (Wang *et al.*, 2002).

En effet, le cerveau est composé d'une quantité considérable d'éléments séparés, des milliers de cellules nerveuses dont certains groupes de neurones agissent ensemble. Un signal électrophysiologique global, résultant de ces phénomènes collectifs peut être enregistré à l'aide d'électrodes cutanées placées sur le scalp. Cet enregistrement peut donner une estimation utile de l'activité simultanée de populations de neurones.

Des changements globaux de potentiels évoqués par des stimuli discontinus, généralement des stimuli sensoriels (visuels, sonores ou olfactifs) sont logiquement appelés potentiels évoqués. Dans ce cadre, nous enregistrons des potentiels évoqués olfactifs en réponse à des stimuli odorants. Typiquement, dans l'étude expérimentale de ce phénomène, on moyenne une série de potentiels évoqués pour obtenir une estimation fiable de l'activité cérébrale provoquée par un stimulus. Ces potentiels évoqués présentent des caractéristiques particulières telles que la forme des ondes et leur latence qui reflètent le type de stimulus, l'état du sujet et le site d'enregistrement.

Dans les années 1960, les premiers enregistrements de potentiels évoqués olfactifs sont publiés (Finkenzeller, 1966; Allison & Goff, 1967). Depuis, de nombreuses équipes de recherche ont étudié les mécanismes cérébraux sous-tendant à la perception olfactive (Lorig, 2000) et on maîtrise de plus en plus les contraintes originelles de cette méthode

d'enregistrement (Kobal & Hummel, 1988; Lorig, 1989; Evans *et al.*, 1995; Thesen & Murphy, 2002). Le principal problème réside dans le choix de l'odorant et dans le flux d'air odorisé qui est transmis au sujet. En effet, en sélectionnant des stimuli appropriés à des concentrations précises et en contrôlant la vitesse de l'air vecteur, on s'affranchit d'un problème de taille, celui du « parasitage » de l'enregistrement par l'activité du nerf trijumeau. Ainsi, en respectant quelques règles simples et maintenant reconnues, nous sommes en mesure de n'enregistrer que l'activité périphérique du cerveau humain en réaction aux odeurs (Evans *et al.*, 1995) et par la même de tenter de corrélérer ces réponses à des aptitudes et des performances (perceptives et cognitives).

Dans un premier temps, nous rappellerons quelques résultats expérimentaux obtenus par différentes équipes de recherche, qui ont permis de mettre en évidence un effet des odeurs sur la cognition directement quantifiable en électroencéphalographie. Puis, par le biais d'autres résultats remarquables, nous détaillerons plus précisément les principales caractéristiques des potentiels évoqués olfactifs. Enfin, nous présenterons l'expérience que nous avons menée en collaboration avec le Pr. Tyler Lorig au cours de l'année 2003 au 'Cognitive Neuroscience Laboratory' à l'Université Washington & Lee, (Lexington, VA – USA). Il s'agissait d'utiliser une procédure mixte (psychophysique et imagerie cérébrale en potentiels évoqués olfactifs) pour étudier l'effet de la sensibilisation perceptive des odeurs sur l'aptitude des sujets humains à détecter une différence qualitative dans un mélange binaire.

## 4.2 Preuves électrophysiologiques de l'effet des odeurs sur la cognition

### 4.2.1 Les odeurs modulent les ondes $\alpha$ et $\beta$ du tracé électroencéphalographique

---

Dans l'objectif d'évaluer les effets des odeurs sur l'EEG, Lorig et Schwartz (Lorig & Schwartz, 1988) ont enregistré l'EEG de sujets humains, alors que ces derniers devaient sentir différentes odeurs (ces odeurs étaient très semblables, *i.e.* : cinq parfums ayant une note florale). Après la présentation de chacune des odeurs, les sujets avaient pour tâche de les évaluer selon différents critères. Les résultats de ces évaluations subjectives n'ont indiqué aucune différence entre les odeurs, alors que les activités  $\alpha$  et  $\beta$  étaient différentes selon l'odeur présentée. Ce résultat suggère, selon les auteurs, que des différences chimiques non détectées peuvent influencer l'EEG mais pas la perception.

Afin de tester l'hypothèse que des composés chimiques non détectés peuvent modifier l'EEG, Lorig et collaborateurs ont réalisé une expérience en utilisant plusieurs concentrations de deux odeurs différentes, la lavande et la pomme épicée (Lorig *et al.*, 1990). Les résultats vont dans le sens de l'hypothèse : lorsque les odeurs ne sont pas détectées, la lavande et la pomme épicée produisent des distributions d'activité

différentes sur le scalp, avec notamment une plus grande activité  $\alpha$  dans les parties postérieures pendant l'administration de lavande. Ces résultats qui suggèrent que les humains sont capables de traiter les odeurs à un niveau subliminal ont été confortés par les travaux de Schwartz et collaborateurs (Schwartz *et al.*, 1992; Schwartz *et al.*, 1992; Schwartz *et al.*, 1993). Dans leurs études les auteurs ont stimulé les sujets avec différents odorants, alors que l'activité EEG est enregistrée. Les résultats indiquent une faible activité  $\alpha$  (signe d'une forte activité corticale) dans les sites antérieurs, centraux et postérieurs quand des odeurs à concentrations perceptibles sont administrées. Lors de la diffusion d'odeurs à très faible concentration (non détectable), l'activité  $\alpha$  est surtout diminuée dans les sites centraux.

Même si les expériences précédemment citées suggèrent que des odorants à très faible concentration peuvent influencer l'activité corticale, elles n'apportent pas la preuve que ces changements électrophysiologiques influencent le comportement des sujets. Pour répondre à cette question, Lorig a réalisé une expérience constituée de plusieurs étapes (Lorig, 1994). Dans une première phase expérimentale, les sujets devaient sentir 3 concentrations (faible, moyenne et forte) d'un même odorant, le galaxolide. Les deux concentrations les plus fortes étaient détectées alors qu'aucun sujet n'a détecté la plus faible. Après cette évaluation psychophysique, les sujets étaient exposés à toutes les concentrations d'odeurs et à une situation non odorisée, alors que l'EEG était enregistré. A la suite de la session d'enregistrement, les sujets devaient réaliser une tâche de recherche de cible visuelle selon deux conditions : non odorisée et odorisée (galaxolide à concentration non détectable). La tâche consistait en la localisation d'une lettre convenue présente dans une matrice de lettres. Les latences des détections correctes étaient enregistrées. Les résultats montrent que l'activité  $\alpha$  était plus grande pendant la condition non odorisée que durant l'administration de galaxolide à concentration faible. Cependant, un des résultats les plus intéressants réside dans le fait que les sujets prenaient plus de temps pour isoler la cible correcte dans la condition odorisée (non détectable) par rapport à la condition non odorisée. Les résultats de cette expérience fournissent des preuves électrophysiologiques de l'effet des odeurs sur le comportement. Ainsi, des composés chimiques non détectables peuvent exercer une influence sur le comportement d'une part, et sur le système nerveux central d'autre part.

### 4.2.2 Le potentiel évoqué olfactif et ses caractéristiques

---

Quelques millisecondes (100 ms en moyenne) après une stimulation olfactive, on peut observer de légères fluctuations de l'activité électrique enregistrée par les électrodes, et ce jusqu'à deux secondes après la stimulation. Ces changements de 'voltage' provoqués par un stimulus ont donc été appelés « potentiels évoqués olfactifs ».

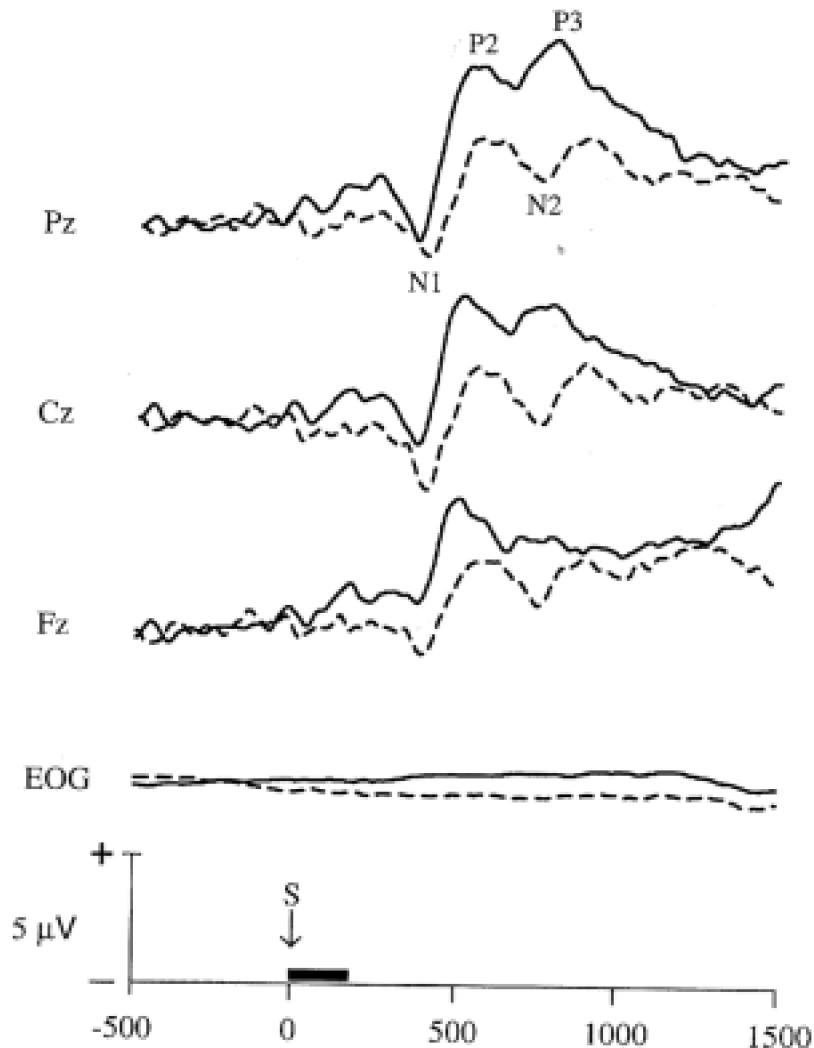
L'onde électrique enregistrée dépend exclusivement des paramètres du stimulus et apparaît indépendamment du contexte expérimental et de l'état « attentionnel » du sujet (observables même durant le sommeil, ou un état dit « inconscient »).

Utilisés depuis plus de 30 ans dans les domaines de l'audition et de la vision, les paradigmes expérimentaux ont été adaptés à la modalité olfactive de manière à enregistrer des potentiels évoqués olfactifs.



En fait, on enregistre deux types de réponses, une réponse dite « exogène » (bottom-up), provoquée par le stimulus physique et une réponse endogène (top-down) induite par les réponses subjectives (selon la tâche) générée par les sujets. Ces réponses s'articulent autour de 3 composantes : une composante réflexe « d'éveil », non spécifique de la perception sensorielle ; une composante « intégrée » qui est associée au traitement du stimulus ainsi qu'au processus de mémoire à court terme et une composante « anticipatoire », liée à l'anticipation de nouveaux événements sensoriels (Pause *et al.*, 1998). Dans la suite de cette partie, comme dans la théorie générale, on distinguera les ondes « négatives » (N1, N2) dont le potentiel d'action est plus négatif que le potentiel de repos, et les ondes « positives » (P1, P2 et P3) dont le potentiel d'action est plus positif que le potentiel de repos.

Ainsi, suite à une stimulation olfactive, le tracé d'un potentiel évoqué est décomposable en plusieurs composantes, qui peuvent être rattachées à différents niveaux de traitement (Pause *et al.*, 1996) et qui sont de plus en plus remarquables à mesure que l'on enregistre en position postérieure (Fig. 54).



*Fig. 54 : Tracés d'un potentiel évoqué olfactif moyen obtenu en différents points du scalp par enregistrements électroencéphalographiques, en position antérieure (Fz), médiale (Cz) et postérieure (Pz) après stimulation à l'isoamyl acétate chez des sujets jeunes (tracé plein) et chez des sujets âgés (tracés pointillés), (Geisler et al., 1999). L'onde provoquée par la stimulation odorante peut se décomposer en différents pics remarquables observables selon différentes fenêtres temporelles (N1 : 320-500 ms ; P2 : 450-700 ms ; N2 : 600-900 ms et P3 : 750-1100 ms).*

### 4.2.2.1 Evaluation d'une stimulation : P1, N1 et P2

Les composantes P1, N1 et P2 succèdent immédiatement à la stimulation (quelques dizaines de millisecondes après) dans des conditions de perception olfactive passive (non dirigée par une tâche précise). Cette composante précoce est en fait constituée de 3 pics distincts « P1, N1 et P2 » dont les caractéristiques varient selon les propriétés du stimulus et peuvent être considérées comme essentiellement 'exogènes', c'est-à-dire principalement dues à la stimulation en elle-même (Naatanen & Picton, 1987). Une augmentation de l'intensité de l'odeur pourra donc provoquer une augmentation de l'amplitude de ces premières réponses alors que leur latence d'apparition aura tendance à diminuer dans le temps (Tateyama *et al.*, 1998).

Cependant, bien que l'on attribue généralement les propriétés physiques d'un stimulus à cette composante précoce, on doit également signaler qu'une influence endogène comme l'état attentionnel du sujet au moment de la stimulation peut faire varier ces potentiels (Naatanen & Picton, 1987; Naatanen, 1995). Deux études distinctes, mêlant modalité auditive et olfactive, traitant de l'effet de l'attention sélective sur les potentiels évoqués olfactifs (Krauel *et al.*, 1998) ont montré que l'onde N1 et l'onde N2 apparaissaient plus rapidement après un stimulus dans le cas où les sujets s'attendent à recevoir un stimulus sans que les amplitudes de ces ondes ne soient modifiées. Ce résultat a mis en avant le rôle des lobes temporaux dans le traitement olfactif et a suggéré que l'attention facilite le traitement en accélérant les mécanismes de perception sensorielle.

D'autres paramètres permettant de moduler les composantes (en latence et en amplitude) des potentiels évoqués olfactifs ont été mis à jour par Naatanen et Picton (1987) comme les performances, la motivation, la valence émotionnelle du stimulus ou encore l'éveil émotionnel (Arousal) du sujet testé.

### 4.2.2.2 Détection /Discrimination du stimulus : N2 ou MMN

L'évaluation du stimulus prend fin lorsque celui-ci est identifié comme étant, ou non, celui que le sujet attendait. Alors, les réponses précoces précédemment décrites peuvent être suivies d'une onde de plus ou moins grande amplitude qui n'apparaît pas après des stimuli répétitifs et non pertinents pour le sujet. Il faut donc que le stimulus ait un minimum de déviance, de non congruence, par rapport aux autres stimuli pour pouvoir observer cette composante. Sa latence d'apparition est une mesure efficace du temps nécessaire à la détection d'un stimulus et son amplitude est d'autant plus grande que l'attention portée à la stimulation est importante.

Dans la modalité auditive, et cela tend à être prouvé en olfaction également, la rare présentation d'un stimulus déviant parmi une série de stimuli 'monotones' peut conduire à l'observation d'une déflexion négative fronto-temporale aux alentours de 180 ms après la présentation du stimulus : la MMN pour 'mismatch negativity' ou « négativité de discordance » (Naatanen *et al.*, 1978; Naatanen *et al.*, 1982). Ce potentiel est déclenché par la comparaison du stimulus déviant à la mémoire sensorielle (échoïque) créée par les stimuli monotones. D'après les travaux de Naatanen et ses collaborateurs, la MMN représenterait de manière spécifique le résultat de cette comparaison, et serait générée lorsque la nouvelle stimulation ne correspond pas à la trace mnésique laissée par la série de stimuli qui l'ont précédée. Cela représenterait donc une détection de déviance qui se ferait de façon purement automatique et pré-attentive car elle peut même être observée en l'absence d'attention (Lorig *et al.*, 1990; Krauel *et al.*, 1999).

### 4.2.2.3 Catégorisation d'un stimulus / clôture de la période cognitive : l'onde P3

A la suite des réponses détaillées dans les paragraphes précédents, une dernière onde, la P3 ou LPC pour 'Late Positive Complex' ou « Late Positive Component » peut apparaître. Cette composante tardive (de 300 ms à 1000 ms selon la modalité sensorielle) est exclusivement endogène et ne dépend que de la signification subjective de la tâche demandée aux sujets.

Une analyse topographique des générateurs de la P3 (Johnson, 1993) a montré que cette onde est déterminée de manière additive mais indépendante par :

- La probabilité d'occurrence du stimulus.
- Sa signification.
- La durée de stimulation.
- Les connaissances globales relatives au stimulus qui sont transmises au sujet.

En fait, on peut obtenir une P3 sans stimulation à proprement parler : si le sujet reçoit suffisamment d'informations sur la stimulation ou sur la condition expérimentale (Johnson, 1993), alors on verra apparaître une onde tardive positive. Il faut également noter que la P3 peut aussi être obtenue dans un paradigme appelé 'oddball' ou 'de stimulus discordants', c'est-à-dire en réponse à des stimuli déviants (en quantité ou en qualité), repérés dans une série de stimuli monotones (répétitifs). Dans tous les cas, en olfaction, nous attribuerons une réponse tardive à une activité reflétant un haut niveau de traitement cognitif (Pause *et al.*, 1996). Dans une seconde expérience (Krauel *et al.*, 1998), la présentation rare de linalol dans une série de stimulation à l'eugénol et inversement, a systématiquement conduit à l'observation d'une onde tardive positive, indépendamment de la qualité de l'odeur. Ce résultat a été confirmé avec des odeurs d'origine corporelle (Pause *et al.*, 1998).

En pratique, la P3, aujourd'hui assimilée au LPC, s'enregistre idéalement au niveau du néocortex pariétal et son générateur ne semble pas modalité-spécifique, c'est-à-dire propre à une modalité sensorielle déterminée (Polich & Squire, 1993). Sa latence est un

excellent indicateur de la « discriminabilité » entre les stimuli. Ainsi, en accord avec Magliero et al. (Magliero *et al.*, 1984), la latence du LPC reflète parfaitement le temps requis pour l'évaluation subjective d'un stimulus par rapport à une consigne donnée. Plusieurs auteurs s'accordent à penser que la P3 illustre la « fenêtre des processus cognitifs » chez l'humain, certains ayant même rattaché l'amplitude du LPC à la valence émotionnelle des stimuli mais aussi à « l'implication émotionnelle » du sujet (Pause & Krauel, 2000).

**Expérience : Etude électroencéphalographique de la perception de l'altération d'odeurs alimentaires : cas du « beurre / beurre rance »**

### 4.3 Cadre théorique et objectifs de l'étude

Certains auteurs ont étudié l'effet de la prise alimentaire sur la latence et l'amplitude du LPC (Geisler & Polich, 1990, 1992, 1992) et ont montré une influence de l'heure de la journée et de l'état de satiété sur l'amplitude du LPC (P3), d'autres ont directement cherché à analyser l'effet de la perception de différentes odeurs de type alimentaire sur les potentiels évoqués olfactifs en montrant une diminution significative de l'activité de type thêta (un rythme cérébral naturel associé à des fonctions cognitives, mais aussi celui qui est le plus perturbé par la stimulation olfactive). Ainsi, après stimulation à une odeur de chocolat et à une odeur de menthe, le rythme thêta diminue significativement par rapport à une condition non odorisée tandis qu'il a tendance à augmenter après une stimulation avec une odeur d'amande ou de cumin (Martin, 1998). D'autre part, les études en EEG menées avec des odeurs non alimentaires ont plutôt montré un accroissement des rythmes thêta (Klemm *et al.*, 1992). Tous ces résultats suggèrent que l'activité électroencéphalographique est modifiée par la perception olfactive, et qu'un pattern particulier survient lors de la perception d'odeurs alimentaires.

D'autre part, il n'est plus à prouver que la dimension hédonique est une propriété psychophysique dominante en olfaction (Holley, 2002) et des analyses multidimensionnelles de l'organisation des odeurs en mémoire montrent bien que la valence hédonique explique la quasi-totalité de la variance observée (Carrasco & Ridout, 1993). Il semble donc y avoir une évidence que la dimension hédonique puisse être associée aux modulations des rythmes électriques enregistrés.

Les études en potentiels évoqués utilisant des stimuli plus complexes (mélanges de molécules odorantes, arômes complexes) sont plus rares. En 1999, Pause et al. (Pause *et al.*, 1999) ont mis en place un protocole de type 'oddball' pour étudier les potentiels évoqués sous-jacents à la perception d'odeurs corporelles (odeur axillaire). Ils ont remarqué que la perception de « sa propre » odeur corporelle dans une série de stimulation avec une odeur corporelle « étrangère » provoque une diminution significative de la latence de l'onde P3 (LPC).

Dans le troisième chapitre de cette thèse, nous avons suggéré que la perception de la dimension qualitative d'un mélange odorant dépend, en partie, des capacités de

ségrégation olfactive, c'est à dire de notre aptitude à dissocier un mélange en ses différents composants (Laing & Francis, 1989; Jinks & Laing, 2001). Cette aptitude n'est pas uniquement physiologique mais peut être considérablement renforcée par un entraînement (une sorte de sensibilisation olfactive) ainsi que par une meilleure connaissance des descripteurs sémantiques relatifs aux odeurs. Evidemment, nous ne sommes pas tous experts dans le domaine des odeurs et nos connaissances sont assez réduites en ce qui concerne cette description linguistique de nos sensations.

Malgré ces limitations et pour étudier les capacités de discrimination des notes olfactives dans un mélange odorant tout en restant proche des conditions naturelles, nous avons cherché des modèles de mélange odorants que des sujets même naïfs seraient capables de décomposer. C'est précisément le cas de l'odeur des produits alimentaires, et plus précisément de l'odeur de l'altération des odeurs alimentaires, une aptitude écologiquement capitale pour détecter les substances signant l'altération des aliments... Par exemple, nous avons déjà tous expérimenté la perception olfactive que provoque une brique de lait « tourné » ou un beurre rance dans notre réfrigérateur, un agrume moisi dans une corbeille de fruit ou encore un vin « bouchonné ». Ce phénomène appelé « *off-odor* » en anglais et qui peut être traduit par « odeur d'arrière plan » est bien connu par les chercheurs qui étudient la perception de la flaveur (odeur + goût). Il semble que la sensibilité du système perceptif « humain » soit souvent plus forte dans ces conditions. En effet, nous sommes ce que nous pouvons appeler des experts des odeurs familières, tant qu'on ne nous demande pas de les dénommer.

On sait d'autre part que la sensibilité olfactive peut être accrue par l'apprentissage (Rabin, 1988; Jehl *et al.*, 1995). Dans ces études, les auteurs ont montré qu'une exposition préliminaire à un stimulus odorant augmente significativement sa discriminabilité par rapport aux autres odeurs, et ce dès la première pré-exposition. Cet accroissement peut être expliqué par des mécanismes attentionnels ou avoir des origines plus sensorielles. Par exemple, de simples présentations répétées d'un stimulus olfactif peuvent augmenter les capacités de détection de son odeur et s'accompagnent d'une augmentation de la sensibilité physiologique dès l'organe récepteur (Wysocki *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 1993).

Comme nous l'avons vu, les potentiels évoqués enregistrés sur le scalp à la suite de la présentation de stimuli chimiques sont caractéristiques. Révélée par Lorig (Lorig *et al.*, 1990; Lorig *et al.*, 1996), l'apparition d'une réponse électrophysiologique avant la détection consciente de l'odeur suggère qu'il existe un intervalle pour la modulation du seuil de détection consciente du stimulus olfactif. Les sites d'activation majeurs de cette perception « non-consciente » ont été localisés en IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) dans le gyrus frontal inférieur, au niveau de l'amygdale et dans le thalamus médian antérieur (Sobel *et al.*, 1999).

Partant de ces postulats, nous avons cherché à élaborer un modèle odorant nous permettant de « mimer » l'altération de l'odeur d'un aliment familier, le beurre, dont nous avons altéré l'odeur en ajoutant une note odorante « rance » (de l'acide butyrique). Nous avons voulu vérifier par une approche mixte, psychophysique et en imagerie cérébrale (potentiels évoqués) que l'apprentissage d'une odeur représentant une altération biologique (naturelle) d'un produit alimentaire conduit par la suite les sujets à détecter

cette altération à des concentrations inférieures, et peut être sans perception consciente.

Nos objectifs étaient multiples :

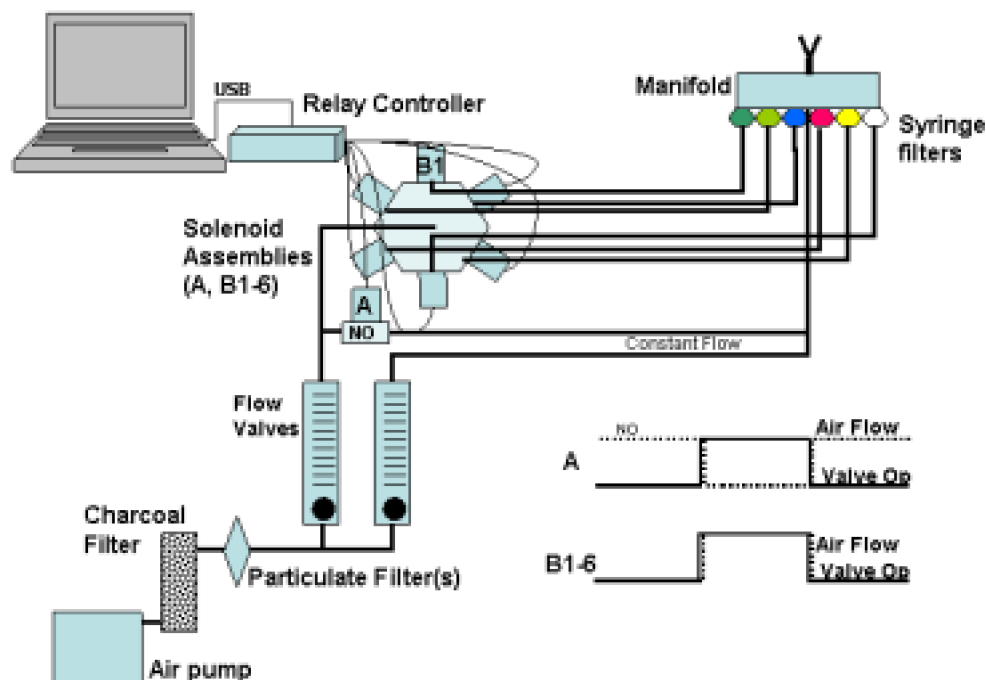
1. Observer les variations de plusieurs évaluations psychophysiques (intensité perçue, familiarité, hédonicité...) et par la même quantifier le phénomène d'apprentissage perceptif.
2. Confirmer cet effet de sensibilisation olfactive à l'aide d'enregistrements électroencéphalographiques en potentiels évoqués.
3. Vérifier que cette sensibilisation olfactive conduit à la diminution du seuil de détection de la note odorante mimant l'altération alimentaire dans le mélange.

## 4.4 Matériel et méthode

### 4.4.1 Olfactométrie

---

L'olfactomètre (fig. 55) utilisé dans cette expérience est une version modifiée (Lorig *et al.*, 2003) du dispositif créé par Lorig et al. (Lorig *et al.*, 1999). Le système de stimulation comporte un olfactomètre permettant de diffuser des odeurs, relié à un ordinateur permettant d'automatiser les paramètres de l'expérience par le biais d'une interface graphique.



*Fig. 55 : Schéma général de l'olfactomètre utilisé pour délivrer les stimulations odorantes aux sujets (Lorig et al., 2003).*

L'air source de l'olfactomètre est prélevé dans l'air ambiant, filtré au travers un filtre au charbon actif pour le débarrasser des odeurs ambiantes puis au niveau d'un second filtre pour le débarrasser des particules de charbon actif qu'il pourrait contenir puis est pressurisé par une pompe à air.

Le flux d'air est alors divisé en deux et passe au travers de deux rotomètres, permettant de réguler le débit d'air dans les différentes voies. L'air passe normalement par une voie « inodore » (valve A), au moment de la stimulation, pour délivrer un odorant au sujet, le flux d'air est stoppé dans la voie A et passe dans l'un des 6 solénoïdes contenant un odorant (valve B1 à B6). A la fin de la stimulation, le flux d'air est stoppé dans la voie B (1-6) et reprend par la voie A inodore, jusqu'au déclenchement d'une nouvelle stimulation. Le passage de l'air de la voie A à la voie B est très bref (20 ms), le débit d'air est donc constant et agit comme une sorte de « Buffer » dans les changements de flux d'air, ce qui rend impossible la détection de la stimulation odorante par le sujet. Notons que c'est l'inspiration du sujet qui déclenche le début de la stimulation, ce qui nous permet de synchroniser la stimulation et l'inspiration pour optimiser la perception olfactive (Laing, 1983). Ainsi, l'air vecteur (avec ou sans odeur) est diffusé de manière constante dans les cavités nasales du sujet à un flux de 1.5L/min.

La salle expérimentale comporte également une paire d'enceintes audio diffusant un « bruit blanc » (environ 20000 tonalités diffusées simultanément à 70 dB), et qui permet de normaliser l'environnement sonore des sujets. D'autre part, une caméra de contrôle permet de « contrôler » le sujet durant les périodes d'enregistrement.

#### 4.4.2 Matériel d'enregistrement EEG (Biosemi)

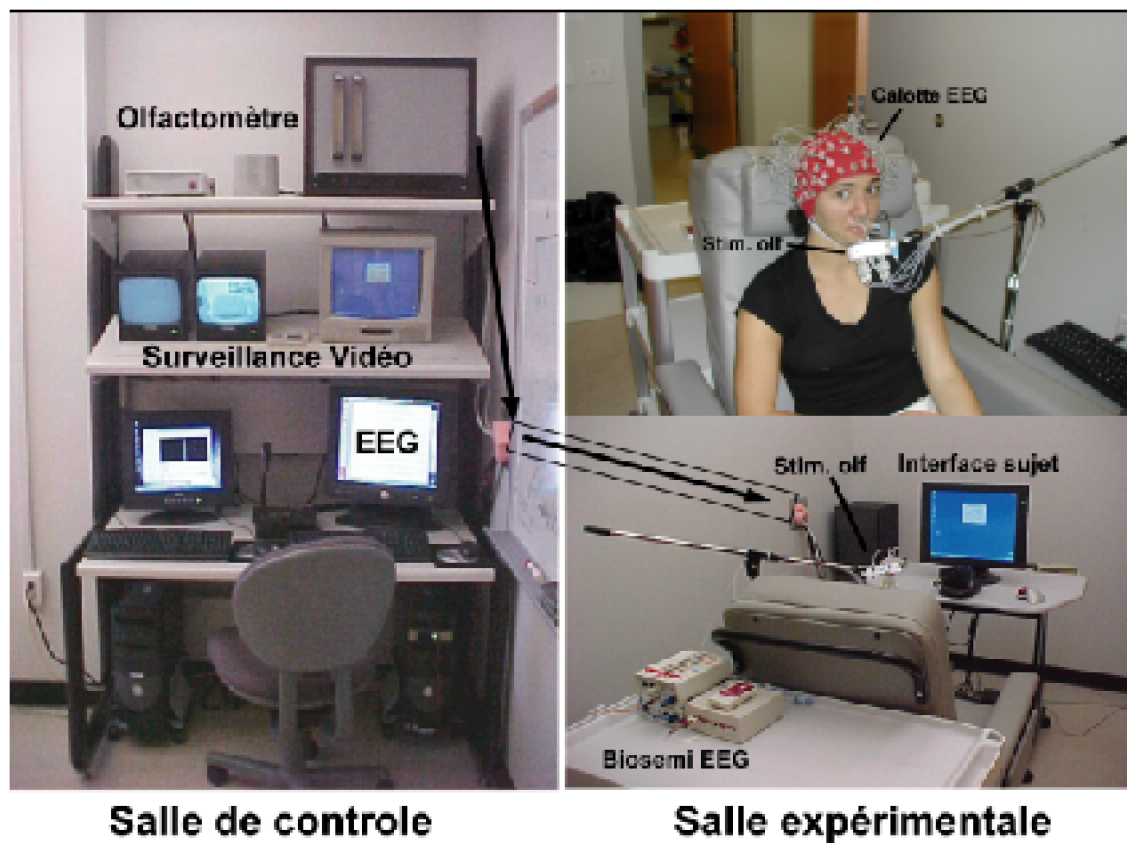
---

Le système d'enregistrement offre une solution à tous les problèmes associés à l'impédance des électrodes et aux fibres de connectique. Un micro amplificateur intégré à l'électrode (Ag-AgCl) permet des mesures très peu bruitées sans aucune préparation de la peau. Ce type de capteur à impédance très faible permet d'éliminer tous les problèmes d'interférence, d'artefacts dus à la connectique et aux mouvements éventuels du sujet. De plus elles sont spécialement conçues pour être montées sur une calotte en nylon adaptable à la tête du sujet.

La mise en place du matériel d'enregistrement est illustrée par la figure 56. Le sujet s'installe confortablement en position assise. On pose la calotte sur la tête du sujet, puis à l'aide d'une seringue dédiée à cet effet on procède à l'injection du gel conducteur (Sigma gel) dans chacun des trous qui accueillera une électrode d'enregistrement. On procède à la pose des électrodes en suivant le code couleur et les numéros inscrits sur chaque électrode et sur chaque emplacement de la calotte. On finit par la pose des électrodes de référence et de masse. Le système est relié à un ordinateur, dans une pièce expérimentale voisine, qui synchronise l'enregistrement EEG et les stimulations olfactives.

Au total, 78 électrodes EEG ont été placées sur la tête des sujets. L'impédance des électrodes a toujours été inférieure à 5K $\Omega$ . Les enregistrements EEG bruts ont été digitalisés «*on-line*» à une fréquence de 256 Hz par canaux. Le filtre du signal enregistré a été fixé à 50 Hz.





*Fig. 56 : Dispositif expérimental mis en place pour l'expérience. Le sujet est installé en position assise dans la salle expérimentale, équipé avec la calotte et les électrodes d'enregistrements EEG (reliées à un boîtier de rassemblement de signaux enregistrés (Biosemi EEG)). Durant l'expérience, les odeurs sont délivrées au sujet directement dans ses cavités nasales (stim.olf), il interagit grâce à l'interface mise à sa disposition (interface sujet). L'expérimentateur contrôle le déroulement de l'expérience depuis la salle de contrôle où se trouve l'olfactomètre, les écrans vidéo de surveillance et l'ordinateur d'enregistrement des signaux EEG.*

#### Sujets

L'expérience a été réalisée avec la participation de 8 étudiants (4 femmes et 4 hommes), de Washington & Lee University (Lexington, VA - USA) âgés en moyenne de 24,7 ans ( $\pm$  6,5 ans). Parmi ces 8 sujets, 7 étaient droitiers et aucun n'était fumeur et ils ont déclaré n'avoir aucun problème olfactif.

Les sujets ont été rémunérés 40 US\$ pour 3 jours de participation à l'expérience, soit

vertu de la loi du droit d'auteur.

10 US\$ par jour, avec une prime de 10 US\$ s'ils arrivaient au bout de l'expérience.

- Stimuli visuels

Afin de s'assurer que les sujets se trouvent dans la même condition visuelle, nous avons programmé un diaporama de photographies à l'écran entre les périodes de stimulation olfactive.

La totalité des 48 stimulations visuelles utilisées dans cette expérience étaient des photographies de l'espace prises par le télescope « Hubble ». Elles ont été collectées sur Internet<sup>7</sup> et ont déjà servies dans des expériences de recherche en olfaction et EEG (cf. travaux de Lorig). Ces images avaient une taille de 650 x 800 pixels et ont été présentées au centre de l'écran pendant 5 secondes chacune.

- Stimuli odorants

Une expérience préliminaire, dans laquelle un groupe de 10 sujets de notre laboratoire Lyonnais ont évalué la typicité odeur / nom de l'objet source de plusieurs concurrents odorants (fournis par différents fournisseurs), nous a permis de sélectionner les meilleurs représentants (prototypes olfactifs) des notes odorantes que nous voulions utiliser.

Ainsi, pour cette expérience, nous avons utilisé trois substances odorantes différentes : Un arôme complexe de beurre fourni par la société (McCormick), du 2-éthyle acide butyrique (Sigma Aldrich) utilisé pour mimer la note odorante « rance » du beurre et de la vanilline (IFF) couramment utilisée comme placebo de l'arôme de la vanille). Les différentes solutions odorantes ont été préparées en diluant les produits dans de l'huile minérale (Sigma) inodore.

- **B1** : Une solution d'arôme de beurre diluée par un rapport  $10^{-1}$

Trois solutions d'acide butyrique diluée dans de l'huile minérale, à concentrations différentes ont été également préparées, comme suit :

- **R1** : Une solution d'acide butyrique diluée par un rapport  $10^{-2}$
- **R2** : Une solution d'acide butyrique diluée par un rapport  $10^{-3}$
- **R3** : Une solution d'acide butyrique diluée par un rapport  $10^{-4}$

Trois solutions de vanilline diluée dans de l'huile minérale ont été préparées à partir d'une solution saturée de vanilline (13%) comme suit :

- **V1** : Une solution de vanilline saturée à  $10^{-1}$
- **V2** : Une solution de vanilline diluée par un rapport  $10^{-2}$
- **V3** : Une solution de vanilline diluée par un rapport  $10^{-3}$

A partir des ces solutions mères, les différents mélanges binaires odorants (beurre rance et beurre vanillé) ont été préparés (tab. 29).

<sup>7</sup> <http://www.nasa.gov>

**Tab. 29 :** Stimulations odorantes utilisées dans l'expérience. Une solution de beurre (B), 3 mélanges binaires mimant des beurres rances de concentrations différentes (B1R1, B1R2, B1R3) et 3 mélanges binaires mimant des beurres vanillés de concentrations différentes (B1V1, B1V2, B1V3).

Solutions odorantes	Notes olfactives	Composition
B1	Beurre	$10^{-1}$
B1R1	Beurre rance +++	$10^{-1} + 10^{-2}$
B1R2	Beurre rance ++	$10^{-1} + 10^{-3}$
B1R3	Beurre rance +	$10^{-1} + 10^{-4}$
B1V1	Beurre Vanillé +++	$10^{-1} + 10^{-1}$
B1V2	Beurre Vanillé ++	$10^{-1} + 10^{-2}$
B1V3	Beurre Vanillé +	$10^{-1} + 10^{-3}$

Un volume fixe de 25  $\mu$ l est injecté la veille des jours d'enregistrement dans les capsules de stimulations de l'olfactomètre.

#### Procédure expérimentale

##### – Phase 1 - Enregistrement des potentiels évoqués olfactifs de base EEG\_1

Lors d'une première journée, les sujets étaient convoqués pour remplir un formulaire de consentement relatif à l'expérience, puis ils devaient répondre à un questionnaire de santé. Les sujets étaient renseignés sur le fait que malgré la rémunération, ils pouvaient interrompre le déroulement de l'expérience sur simple demande, mais que dans ce cas, ils ne recevraient pas la totalité de la rémunération (40 US\$).

Lorsque les sujets donnaient leur accord à l'expérience, ils étaient immédiatement conduits dans la salle expérimentale et équipés pour une séance d'enregistrement des activités électriques de base.

Les sujets étaient installés dans le fauteuil et l'expérimentateur les équipait avec le matériel EEG et positionnait le stimulateur olfactif en position sous le nez du sujet, comme décrit dans la partie méthodologique de cette expérience (cf. 1.2.2.5). La consigne de la tâche affichée à l'écran était la suivante :

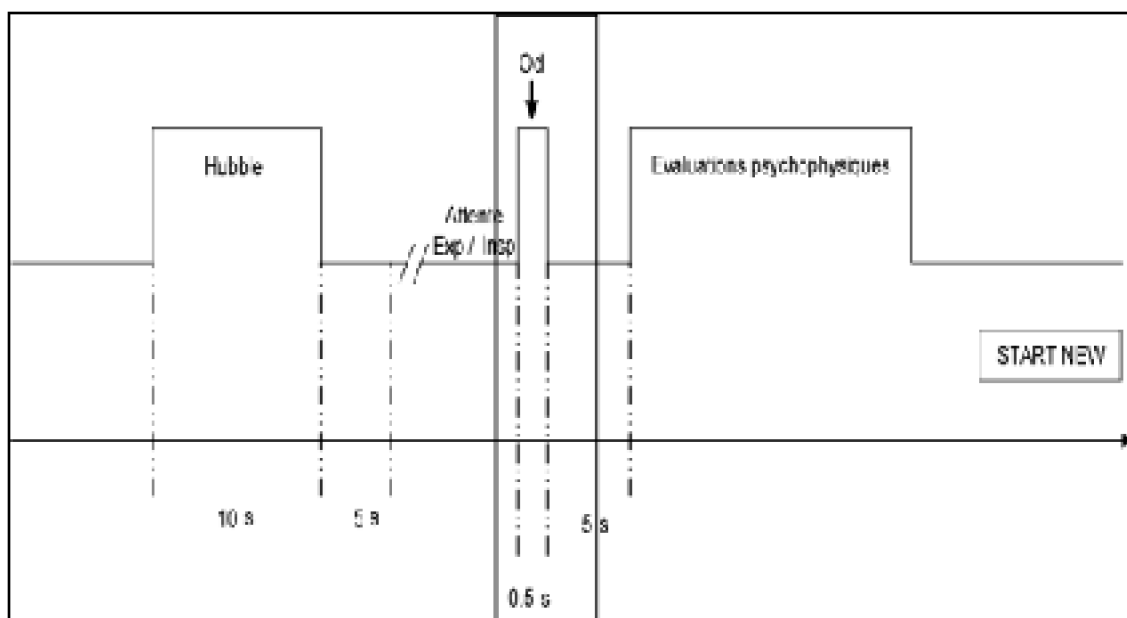
« Il s'agit d'une expérience sur la perception des odeurs. Vous allez voir plusieurs photographies de l'espace et des écrans blancs. Parfois, vous sentirez des odeurs.

Nous vous demandons de rester éveillé, de respirer normalement et régulièrement.

Après chaque odeur, nous vous demanderons d'évaluer certaines caractéristiques des odeurs senties, vous répondrez sur les échelles présentées à l'écran en cliquant dans la case qui correspond à votre réponse. »

Après chaque stimulation odorante, les sujets devaient évaluer l'intensité, l'hédonicité, la familiarité et la comestibilité de la source à laquelle l'odeur faisait référence. Les évaluations ont été réalisées à l'aide d'échelles psychophysiques en 9 points, bornées (de pas du tout 'intense', 'agréable', 'familier', 'comestible' à extrêmement 'intense', 'agréable', 'familier', 'comestible') présentées à l'écran l'une après l'autre.

Tous les sujets ont été stimulés avec l'odeur de beurre B1 et avec les solutions de beurre rance de concentrations différentes B1R1, B1R2 et B1R3. Chaque stimulation a été répétée 12 fois dans un ordre aléatoire. Ainsi, 48 stimulations au total ont été délivrées aux sujets (selon la séquence temporelle fig. 57) et la durée moyenne de cette phase était de 1h30 (pose du matériel d'enregistrement comprise).



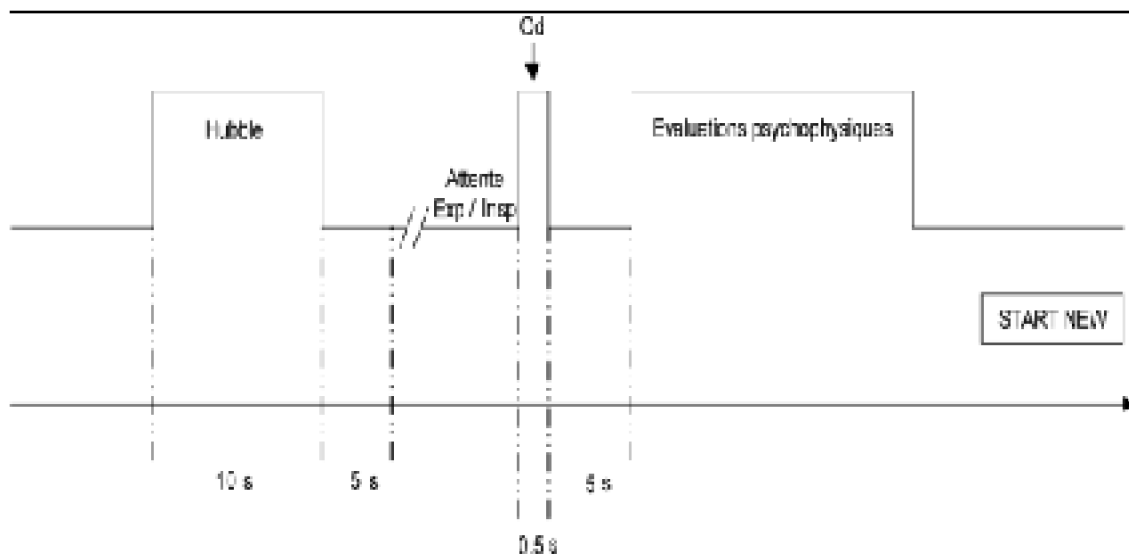
*Fig. 57 : Séquence de stimulation EEG\_1. L'affichage de photographies de l'espace (pendant 10 secondes) est suivi par un écran blanc de 5 secondes. Le système attend une phase d'expiration et une stimulation olfactive d'une durée de 0,5 secondes est délivrée au sujet. Une période de 5 secondes fait suite à la stimulation. Une boîte START NEW à cliquer permet au sujet d'enchaîner par lui-même les stimulations les unes après les autres. L'enregistrement EEG était automatiquement déclenché par un trigger et durait 5 secondes autour de la stimulation (1 seconde avant / 4 secondes après).*

### · Phase 2 – Sensibilisation perceptive aux odeurs

Le lendemain, en arrivant, les sujets étaient directement installés dans le même fauteuil que la veille mais n'étaient pas équipés des électrodes d'enregistrement. Lors de cette phase expérimentale, la consigne était identique à celle donnée en phase 1 : après chaque odeur, les sujets avaient pour consigne d'évaluer l'intensité, l'hédonicité, la familiarité et la comestibilité de la source à laquelle l'odeur faisait référence. Les évaluations ont été réalisées à l'aide d'échelles psychophysiques en 9 points, bornées (de pas du tout 'intense', 'agréable', 'familier', 'comestible' à extrêmement 'intense', 'agréable', 'familier', 'comestible') et présentées à l'écran l'une après l'autre.

Les sujets étaient convoqués pour la phase de sensibilisation. La moitié des sujets, (2 femmes, 2 hommes : groupe « TEST ») a été stimulée à l'odeur de beurre (B1) et aux trois mélanges odorants imitant le beurre rance (B1R1, B1R2 et B1R3). L'autre moitié, le groupe « Contrôle » a été stimulée à l'odeur de beurre (B1) et aux trois mélanges de beurre vanillé (B1V1, B1V2 et B1V3).

Chaque échantillon a été évalué 4 fois, dans un ordre totalement aléatoire. Au total, 48 (12 x 4) évaluations psychophysiques ont été réalisées selon la séquence temporelle présentée par la figure 58.



*Fig. 58 : Séquence de stimulation EEG\_1. L'affichage de photographies de l'espace (pendant 10 secondes) est suivi par un écran blanc de 5 secondes. Le système attend une phase d'expiration et une stimulation olfactive d'une durée de 0,5 secondes est délivrée au sujet. Une période de 5 secondes fait suite à la stimulation. Une boîte START NEW à cliquer permet au sujet d'enchaîner par lui-même les stimulations les unes après les autres.*

### Phase 3 - Enregistrement des potentiels évoqués olfactifs EEG\_2

Le troisième et dernier jour, les sujets devaient revenir au laboratoire pour terminer l'expérience. Durant cette phase, ils étaient immédiatement équipés du matériel d'enregistrement et installés dans la salle expérimentale.

Ils devaient réaliser une tâche de jugement de similarité selon la procédure de Gross-Isseroff et Lancet (Gross-Isseroff & Lancet, 1988). Immédiatement après la présentation d'une paire d'odeur, le sujet doit évaluer leur ressemblance : soit *identiques*, soit *différentes*.

La consigne était affichée à l'écran était la suivante :

“Il s'agit d'une expérience sur la perception des odeurs et la mémoire. Pour chaque essai, vous allez voir plusieurs images de l'espace et ensuite, sentirez deux odeurs successives.

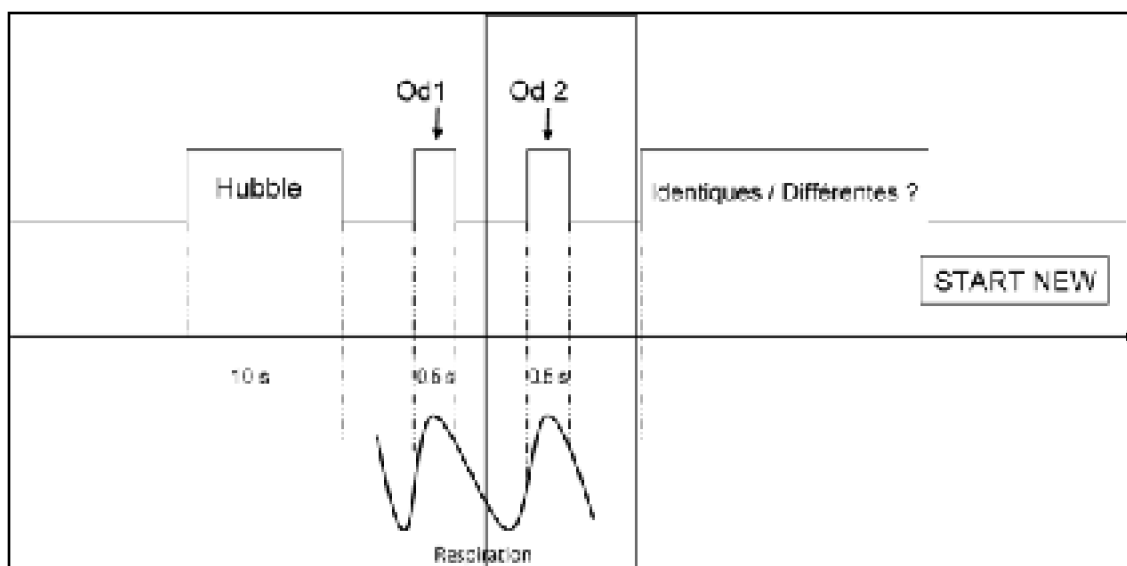
Pour chacun des essais, nous vous demandons de déterminer si les deux odeurs présentées étaient identiques ou différentes en terme de qualité uniquement en cliquant la case qui correspond à votre réponse.

N'oubliez pas la qualité : par exemple, une odeur intense de chocolat sera identique à une faible odeur de chocolat. Mais une odeur d'orange sera toujours différente de l'odeur de chocolat. »

Les paires d'odeurs ont été systématiquement construites avec l'odeur de beurre B1 et une des quatre odeurs de rance (tab. 30) ; elles ont été présentées aléatoirement selon la séquence temporelle de la figure 59. Chacune des paires d'odeurs a été présentée 12 fois. Au total 48 jugements de similarité ont été réalisés.

**Tab. 30 :** Paires d'odeurs présentées 12 fois chacune dans un ordre aléatoire durant la phase d'enregistrements EEG\_2.

Stimulations olfactives	
Odeur 1	Odeur 2
B1	B1
B1	B1R1
B1	B1R2
B1	B1R3



**Fig. 59 :** Séquence temporelle de stimulation lors de la phase EEG\_2. Une période de 10 secondes pendant laquelle des photographies de l'espace sont affichées est suivie par un écran blanc. Le système synchronise deux phases successives d'expiration / inspiration et délivre les stimulus odorants (Od1 et Od2). Immédiatement après, un écran présentant le choix de réponse à la tâche de similarité était affiché. Les sujets devaient répondre en cochant la case adéquate. Lorsqu'ils avaient coché une des deux case, une boîte START NEW apparaissait pour enchaîner un nouvel essai. L'enregistrement EEG était automatiquement déclenché par un trigger juste avant la seconde stimulation (Od. 2) et durait 5 secondes autour de la stimulation (1 seconde avant / 4 secondes après).

Dans cette phase expérimentale, nous avons uniquement enregistré le potentiel évoqué par la seconde odeur (Od. 2) de chaque paire présentée.

- Analyse des résultats
  - Evaluations psychophysiques des stimuli odorants

Les évaluations des caractéristiques psychophysiques des odorants réalisées par les sujets lors des phases expérimentales 1 et 2 ont été moyennées pour chaque groupe de sujets (Contrôle et Test) et pour chaque phase (phase 1 et phase 2).

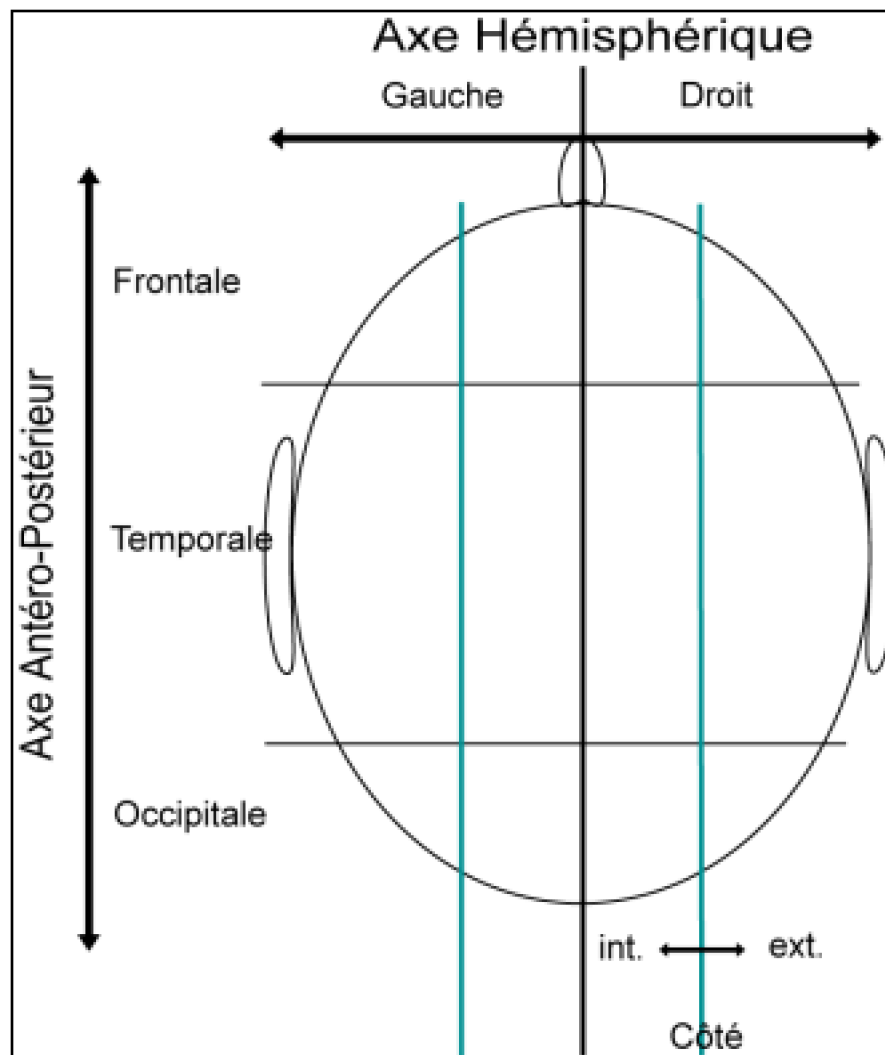
Une Analyse de la variance (ANOVA) à plusieurs facteurs contrôlés a été effectuée pour déterminer l'effet du groupe expérimental (2 : Test, Contrôle), de l'odeur (4 : B1, B1R1, B1R2, B1R3), de répétitions de la stimulation (12 répétitions par stimulus odorant) et du type d'évaluation (4 : Intensité, hédonicité, familiarité, comestibilité de la source suscitée par l'odeur).

### Traitements des signaux EEG

La segmentation et le moyennage des enregistrements EEG ont été réalisés « off line » dans une fenêtre temporelle de 5 secondes autour du stimulus olfactif (1 seconde avant la présentation de l'odeur et 4 secondes après, voir séquence temporelle des phases 1 et 3). Avant d'être traitées, les données sont filtrées avec un filtre basé sur les fréquences digitales passe-bas (10 Hz) de manière à éliminer les artefacts dus aux problèmes d'impédance, de mouvements...etc.

La boîte à outils EEGLAB (Delorme & Makeig, 2004) développée pour Matlab (The MathWorks, Inc) a été utilisée pour l'amplitude maximum des ondes électroencéphalographiques chez les sujets des 2 groupes expérimentaux en fonction du décours temporel (de 50 ms après le trigger de la stimulation jusqu'à 1200 ms après la stimulation). Ainsi, nous avons relevé le « pic maximal », c'est-à-dire l'amplitude maximale de la réponse électroencéphalographique atteinte dans les différentes fenêtres temporelles d'une durée 200 ms. Les 11 fenêtres temporelles sont chevauchantes de façon à perdre le moins d'informations.

Une analyse de la variance (ANOVA) à plusieurs facteurs a été effectuée pour déterminer l'effet du groupe (2 : Test, Contrôle), de l'odeur (4 : B1, B1R1, B1R2, B1R3) sur l'activité électrique mesurée en potentiels évoqués. Pour cela, nous avons distingué plusieurs « zones » cérébrales différentes en fonction d'axes orthogonaux déterminés comme indiqué sur la figure 60. Ainsi, on a considéré un axe hémisphérique séparant l'encéphale en 2 hémisphères (Gauche et Droit) ; un axe antéropostérieur qui scinde le cerveau en une zone avant (frontale), une zone médiane (temporale) et une zone arrière (occipitale). De plus, chaque hémisphère a été « divisé » en 2 de manière à distinguer un côté externe d'un côté interne. Ces différents axes ont également été intégrés dans nos analyses en tant que facteurs.



*Fig. 60 : L'encéphale a été divisé selon différents axes permettant de distinguer un axe hémisphérique séparant un l'hémisphère droit l'hémisphère gauche, eux-mêmes séparés en 2 côtés (interne et externe) ; et selon un axe antéropostérieur, une zone frontale (avant), temporale (médiane) et occipitale (arrière).*

- Performances des sujets lors de la tâche de similarité :

La proportion de réponses correctes issues de la tâche de jugement de similarité des paires d'odeurs (phase 3) a été calculée pour chaque sujet et pour chaque groupe ('Contrôle' vs. 'Test'). Une analyse de la variance a été effectuée pour déterminer l'effet de groupe (2 : C, T) et l'effet de l'odeur (4 : B1, B1R1, B1R2, B1R3) sur les performances de discrimination devant les mélanges binaires odorants.

## 4.5 Résultats



Analyses des évaluations psychophysiques des stimuli odorants

L'analyse globale de la variance effectuée sur les évaluations psychophysiques réalisées par les 2 sujets témoins et les sujets testgroupes de sujets lors des 2 premiers jours d'expérience a montré une forte significativité [F(25,2470)=30,96,  $p < .0001$ ] de leur différence, avec un effet du groupe ( $p < .0001$ ), un effet du type d'évaluation ( $p < .0001$ ), un effet du jour ( $p = .041$ ) et un effet du stimulus ( $p < .0001$ ) sur les notes attribuées.

Ce résultat général nous a conduit à entreprendre des analyses de la variance pour chaque type d'évaluation psychophysique (intensité, hédonicité, familiarité et comestibilité) pour quantifier l'effet du groupe (groupe 'Test' sensibilisé à l'odeur de beurre et de beurre rance vs. groupe 'Contrôle' stimulé avec l'odeur de beurre et de beurre vanillé). Les résultats significatifs de l'analyse de la variance centrée sur chaque type d'évaluation psychophysique et l'analyse de la variance centrée sur chaque stimulus sont présentés respectivement dans le tableau 31 et le tableau 32.

**Tab. 31 : Récapitulatif des effets obtenus par l'analyse de la variance effectuée pour chaque type d'évaluations psychophysiques. Les effets du groupe (Test vs. Contrôle) et de l'odeur (B1, B1R1, B1R2, B1R3) sont très impliqués dans la variance observée pour toutes les dimensions étudiées, sauf pour l'évaluation de la comestibilité de l'aliment suscité par l'odeur).**

Type d'évaluations	Effets	ddl	F	p
Intensité	- Groupe - Odeur	1 3 1	145,4	<.0001
	- Jour		2,66	0.0474
			7,5	0.0064
Hédonicité	Groupe Odeur	1 3	40.80	<.0001
			4.64	0.0032
Familiarité	Groupe	1	136.03	<.0001
Comestibilité	Groupe	1	87.58	<.0001

Ces résultats font essentiellement apparaître une différence entre groupes expérimentaux sur les notes attribuées par les sujets selon toutes les dimensions psychophysiques testées. L'objectif principal de cette phase expérimentale était de sensibiliser les sujets du groupe 'Test' à l'odeur de beurre ainsi qu'aux différentes odeurs de beurre rance tandis que les sujets du groupe 'Contrôle' étaient stimulés avec l'odeur de beurre et différentes odeurs de beurre vanillé. Hormis pour l'odeur B1 (odeur de beurre), nous ne pouvons pas tester l'influence des 2 jours d'expérience car les sujets des 2 groupes n'ont pas été stimulés avec les mêmes odeurs (B1R1, B1R2 et B1R3 pour le groupe Test ; B1V1, B1V2 et B1V3 pour le groupe Contrôle).

Ces résultats suggèrent que les groupes expérimentaux ont jugé les odeurs différemment selon le jour d'expérience. On peut ainsi considérer que le protocole a induit deux types de comportements différents entre les deux groupes expérimentaux, objectivant ainsi l'apprentissage implicite que nous voulions induire. Ceci nous permet alors de focaliser notre attention uniquement sur les résultats du groupe test, pour tenter d'objectiver le processus de sensibilisation olfactive aux odeurs de beurre rance.

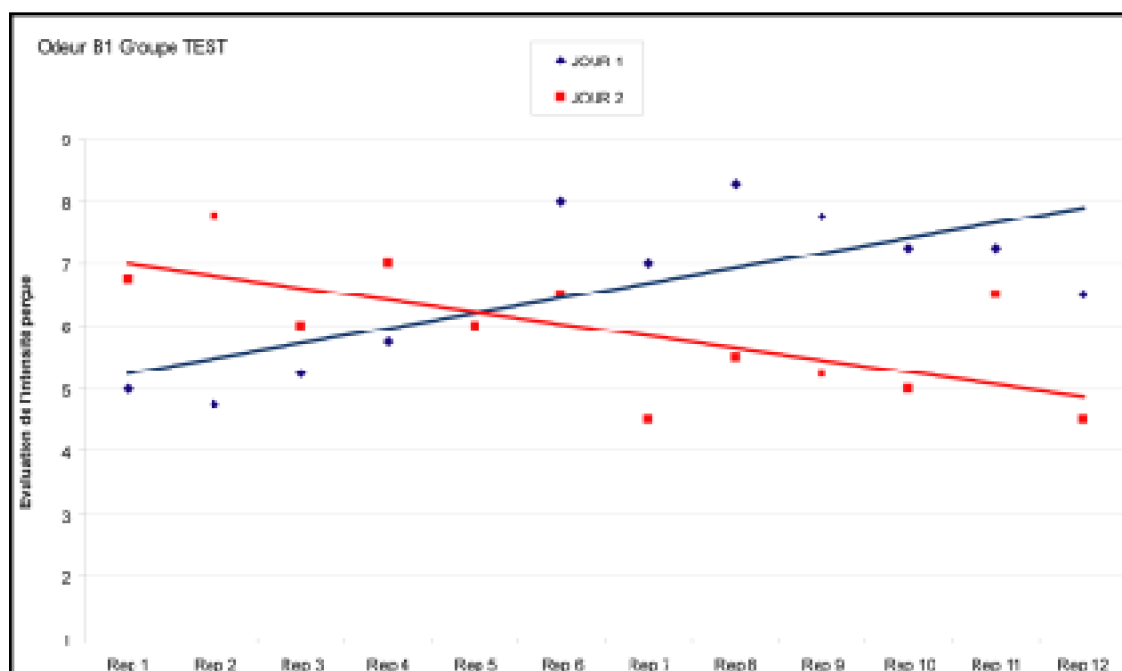
Le tableau 32 récapitule les effets obtenus pour l'odeur B1 pour les 2 groupes

expérimentaux lors des phases 1 et 2 de l'expérience.

**Tab. 32 :** Récapitulatif des effets influençant la perception de l'intensité de l'odeur de beurre sur l'ensemble des évaluations données par les sujets des 2 groupes (T : 'Test', C : 'Contrôle') durant les 2 premiers jours d'expérience (J1 et J2). Les dimensions d'intensité, d'hédonicité et de comestibilité ont été influencées par des effets de groupe, de jour.

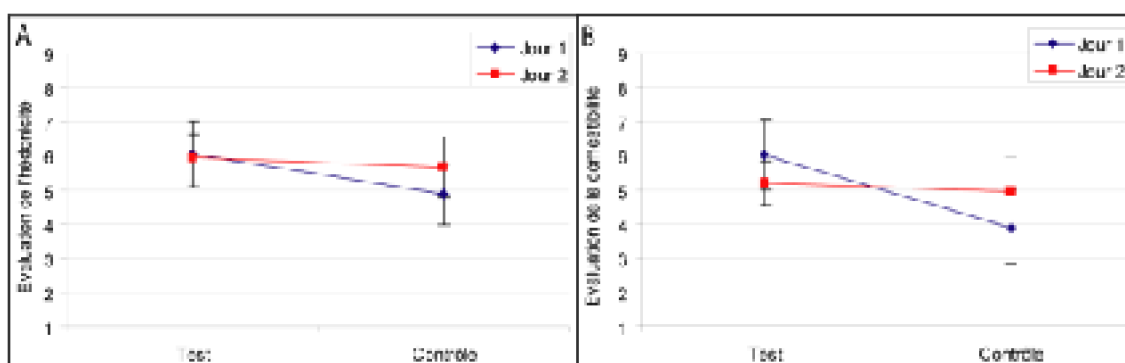
Stim.	Dimension	Effets	ddl	F	p	détail
B1	Intensité	- Jour - Jour *	1,288	18.10	<.0001	J1 > J2 J1 : I
		Répétitions - Groupe -	11,288	1.86	0.0494	▲; J2 : I ▼ T
		Groupe * Jour * Répét.	1,288	67.84	<.0001	> C TJ1 : I ▲ ;
			11,288	3.35	0.0004	TJ2 : I ▼ ; CJ1= CJ2
	Hédonicité	- Groupe - Groupe *	1,288	8.10	0.0051	T > C TJ1 =
	Jour		1,288	4.23	0.0415	TJ2 ; CJ1 < CJ2
	Familiarité	- Groupe	1,288	45.58	<.0001	T > C
	Comestibilité	- Groupe - Groupe *	1,288	19.57	<.0001	T > C TJ1 >
	Jour		1,288	12.20	0.0006	TJ2 ; CJ1 < CJ2

En ce qui concerne l'odeur de beurre (B1), nous avons remarqué que la dimension psychophysique la plus influencée dans le phénomène de sensibilisation est l'intensité. D'une manière générale, l'intensité perçue a diminué significativement entre le premier et le second jour, et ce de façon plus marquée pour le groupe 'Test', au fur et à mesure des répétitions successives (figure 61) alors que l'intensité perçue par le groupe contrôle ne varie pas d'un jour à l'autre [F(11,288)= 3.35, p=0.0004].



**Fig. 61 :** Représentation des variations de l'évaluation de l'intensité moyenne de l'odeur B1 durant les 2 premiers jours d'expérience (J1 en bleu) et J2 (en rouge). Si l'intensité perçue de B1 augmente significativement au cours des 12 répétitions du premier jour, elle subit une diminution significative lors des répétitions du second jour.

L'évaluation moyenne de la comestibilité du produit suggéré par l'odeur nous indique que les sujets du groupe 'Test' ont très rapidement fait un lien entre la note rance du beurre et l'odeur de beurre elle-même (c'est-à-dire qu'ils ont « perceptivement » associé la note odorante rance à la note odorante de beurre, ces deux odeurs ayant systématiquement été présentées en mélange durant la phase de sensibilisation), faisant par là même diminuer le caractère agréable du beurre [ $F(1,288)= 4.23, p=0.041$ ] ainsi que la comestibilité associée à ce produit [ $F(1,288)= 12.20, p=0.0006$ ] (figure 62). En revanche, les sujets du groupe contrôle ne semblent pas avoir renforcé ce lien.



**Fig. 62 :** Entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> jour d'expérience, à l'inverse des sujets du groupe contrôle, les sujets du groupe 'Test' ont fait le lien entre l'odeur de beurre et la note rance qui l'associe dans la plupart des cas, le caractère hédonique de B1 a donc été significativement revu à la baisse au cours du jour 2 (A), ainsi que le caractère comestible du beurre suggéré par l'odeur (B).

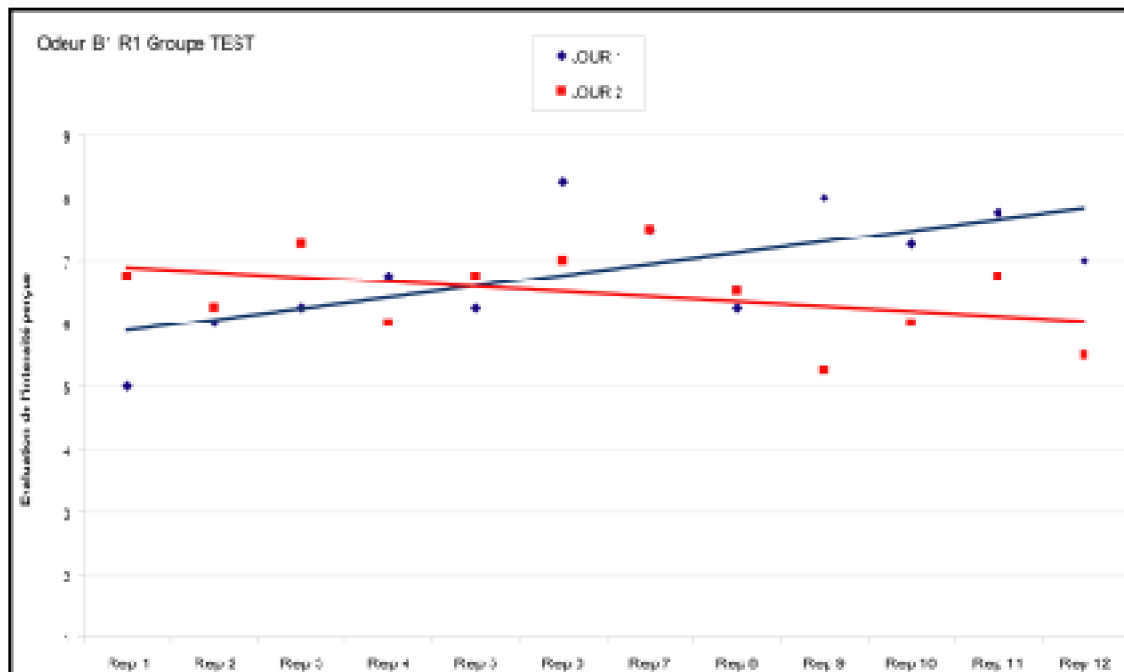
Dans le tableau 33, on a reporté les effets obtenus pour le groupe 'Test' pendant les 2 premières phases expérimentales, pour l'odeur B1R1. Aucun effet significatif n'a été mis en évidence pour les odeurs B1R2 et B1R3, aussi, elles ne seront pas représentées dans les tableaux récapitulatifs.

**Tab. 33:** Récapitulatif des effets influençant la perception de l'intensité de l'odeur B1R1 sur l'ensemble des évaluations données par les sujets du groupe Test durant les 2 premiers jours d'expérience (J1 et J2). Seul les dimensions d'intensité et de comestibilité ont été influencées durant l'expérience. Les cases grisées correspondent aux cas où aucun effet significatif n'a été observé.

Odorant	Type d'évaluation	Effets	ddl	F	p	détail
B1R1	Intensité	Jour Jour * Repet.	1,72 11,72	3,84 3.69	0.05 0.0001	J1 > J2 J1 ▲ ; J2 ▼
	Hédonicité					
	Familiarité					
	Comestibilité	Jour	1, 72	5,59	0,02	J1 > J2

A l'instar de ce que nous avons observé pour B1, odeur du beurre seul, , l'intensité

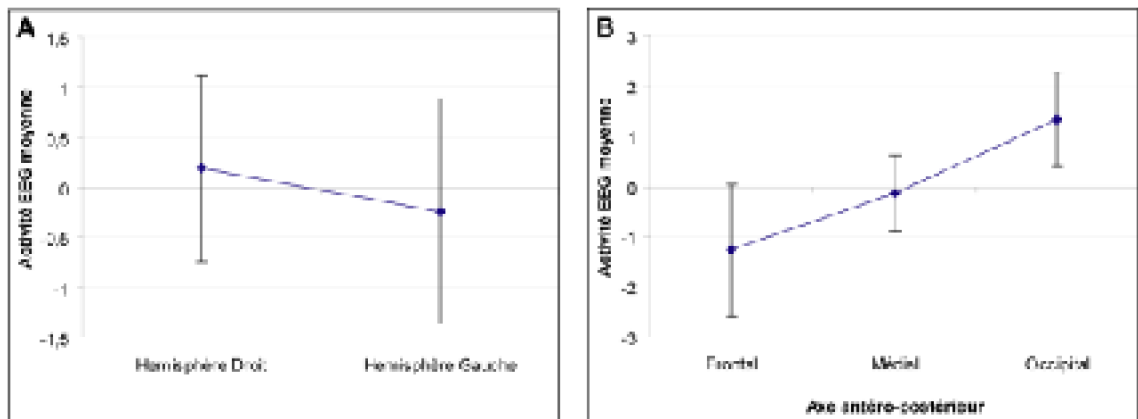
perçue de l'odeur B1R1, le beurre rance le plus fort,) est influencée par le nombre de répétitions successives (figure 63). Ainsi, l'intensité perçue de B1R1 augmente significativement au cours des 12 premières répétitions (jour 1) alors qu'elle diminue au cour des 12 dernières répétitions (jour 2) [F(11,72)= 3,69, p=.0001]. De plus, l'association de la note odorante rance la plus intense (R1) à l'odeur de beurre (B1) fait disparaître le caractère comestible de l'aliment suggéré par ce stimulus.



*Fig. 63 : Représentation des variations de l'évaluation de l'intensité moyenne de l'odeur B1R1 durant les 2 premiers jours d'expérience (J1 en bleu) et J2 (en rouge). L'intensité perçue de B1R1 augmente au cours des 12 répétitions du premier jour mais elle diminue significativement lors des répétitions du second jour.*

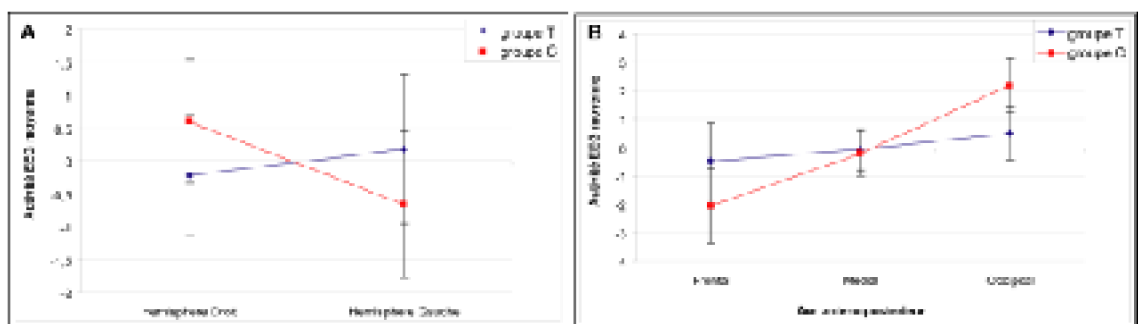
· Analyses des potentiels évoqués olfactifs

L'analyse globale de la variance effectuée sur les 11 fenêtres temporelles a montré, entre autre, une réponse caractéristique aux odeurs (fig. 64). La réponse montre plus de positivité dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche [F(1,2880)=4,615, p=.0325], et selon l'axe antéropostérieur, la réponse est de plus en plus positive à mesure que l'on se déplace du lobe frontal au lobe occipital [F(2,2880)=56,85 p<.0001].



*Fig. 64 : L'expérience en potentiels évoqués olfactifs réalisée a provoqué une réponse aux odeurs plus positive dans l'hémisphère droite que dans l'hémisphère gauche (A). D'autre part, cette réponse s'amplifie à mesure que l'on enregistre selon l'axe antéro-postérieur (du lobe frontal au lobe occipital).*

D'autre part, deux interactions ont été indiquées en considérant les groupes expérimentaux (fig. 65). L'analyse a montré un effet « sujet » du groupe expérimental (C : 'Contrôle' et T : 'Test') sur l'activité enregistrée dans les hémisphères et selon l'axe antéro-postérieur. En réponse aux odeurs, le groupe 'Contrôle' montre plus de positivité dans l'hémisphère droite que dans l'hémisphère gauche alors que le groupe 'Test' montre l'inverse, à savoir plus de négativité dans l'hémisphère droite que dans l'hémisphère gauche [F(1,2880)=17,23, p<.0001]. D'une manière générale, selon l'axe antéro-postérieur, on remarque de plus en plus de positivité à mesure que l'on enregistre la réponse d'avant en arrière du scalp [F(2,2880)=21,95, p<.0001].



*Fig. 65: Réponses EEG et apprentissage. L'appartenance à un des groupes expérimentaux induit une réponse aux stimulus différentes selon qu'on enregistre l'activité dans l'un ou l'autre des hémisphères (A) ou selon que l'on enregistre l'activité en se déplaçant selon l'axe antéro-postérieur (B). Le groupe C 'Contrôle' montre plus de positivité dans l'hémisphère droite que dans l'hémisphère gauche alors que le groupe T 'Test' montre l'inverse, à savoir plus de négativité dans l'hémisphère droite que dans l'hémisphère gauche. D'une manière générale, selon l'axe antéro-postérieur, il y a de plus en plus de positivité vers l'arrière du scalp.*

L'analyse globale a également montré des interactions plus précises. L'activité électroencéphalographique enregistrée dans l'un et l'autre des hémisphères (droit - gauche) [F(10,2880)= 1,96, p=.0 33] et le long de l'axe antéro-postérieur (frontal –

temporal – occipital) [ $F(10,2880)=3,91$  ,  $p<.0001$ ] était différente selon le groupe expérimental et selon la fenêtre temporelle analysée. Le facteur odeur n'a montré aucun effet significatif et n'a pas été pris en compte pour le reste de l'analyse.

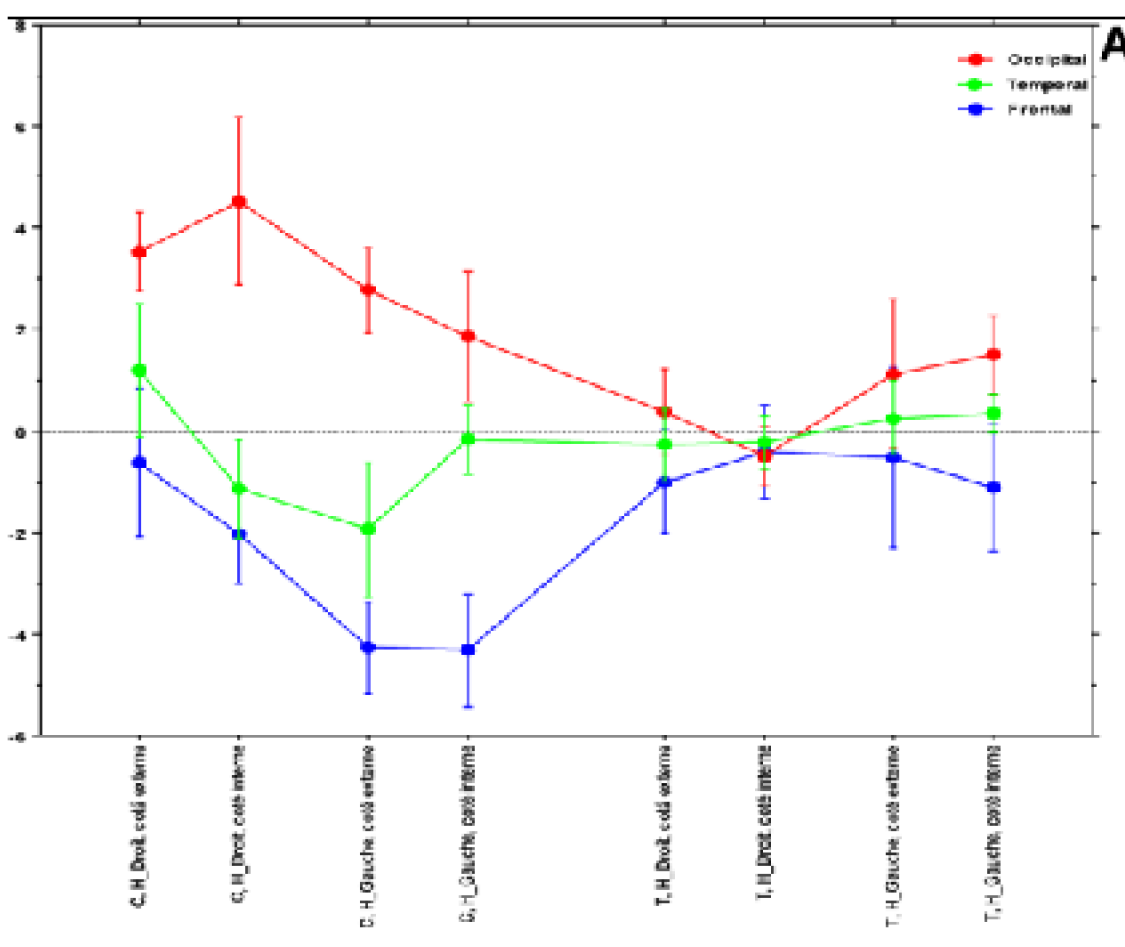
Cette analyse a indiqué que les interactions significatives entre groupes expérimentaux et réponses électroencéphalographiques impliquent toutes les fenêtres temporelles. Nous avons donc effectué des analyses *a posteriori*, axées sur les fenêtres temporelles durant lesquelles sont censées apparaître les composantes précoces correspondant à des traitements primaires des odeurs, relatifs aux caractéristiques physiques des stimuli et les composantes tardives qui correspondent à des processus de plus haut niveau en réponse aux odeurs. Les résultats les plus remarquables qui ont émergé de nos analyses *a posteriori* en se déplaçant de fenêtre temporelle en fenêtre temporelle (de 50 ms de stimulation à 1200 ms après la stimulation) sont présentés dans le tableau 34.

**Tab. 34 : Récapitulatif des effets (facteur hémisphère, facteur axe antéro-postérieur, facteur groupe expérimental, et leurs interactions) obtenus lors des analyses à posteriori de l'analyse de la variance effectuée sur l'ensemble des enregistrements en potentiels évoqués olfactifs. Ces résultats indiquent une réponse aux odeurs significativement différente dans différentes zones cérébrales selon que les sujets ont été sensibilisés ou non (Groupe Test vs. Groupe Contrôle). Les cases grisées représentent les cas dans lesquels aucune différence significative n'a été observée.**

FENETRES TEMPORELLES (en ms)									
50-200	200-300	300-400	400-500	500-600	500-700	600-800	800-900	900-1100	1000-1200
<b>Hémisphère</b> : La réponse est plus ample dans l'hémisphère droit. ( $p<.0001$ )									
Axe Antéropostérieur : La réponse est toujours de plus en plus ample à mesure qu'on enregistre de l'avant vers l'arrière (Frontal => Temporal => Occipital)									
Groupe * Hémisphère : Pour le groupe 'Contrôle', la réponse aux odeurs est toujours plus ample dans l'hémisphère droit. Pour le groupe 'Test', la réponse est plus ample dans l'hémisphère droit de 50 ms à 600 ms après la stimulation, ensuite, de 600 à 1200 ms, le pattern s'inverse et la réponse est plus ample dans l'hémisphère gauche.									
Groupe * Axe Antéropostérieur : Pour le groupe 'Contrôle', la réponse aux odeurs est toujours plus ample à mesure que l'on enregistre vers l'arrière du scalp (frontal=>occipital). Pour le groupe 'Test', la réponse précoce (jusqu'à 400 ms) est de plus en plus ample selon l'axe antéropostérieur, puis entre 400 et 700 ms, ce pattern s'inverse et finit par revenir à la 'normale' selon l'axe.									
				<i>Tendance</i> Groupe * Hémi * côté * axe antéropostérieur $F(2,288)=3,03$ , $p=.054$				Groupe * Hémi * côté * axe antéropostérieur $F(2,288)=3,19$ , $p=.042$	Groupe * Hémi * côté * axe antéropostérieur $F(2,288)=6,1$ , $p=.0025$

Hormis les effets les plus simples survenant dans les fenêtres temporelles précoces, ou bien tout au long de la réponse, nous avons remarqué l'apparition d'une interaction complexe entre le **Groupe (T/C) \* Hémisphère (D/G) \* Coté lat. (int./ext.) \* axe antéropostérieur (frontal/temporal/occipital)** [ $F(2,288)=6,1, p=.0025$ ].

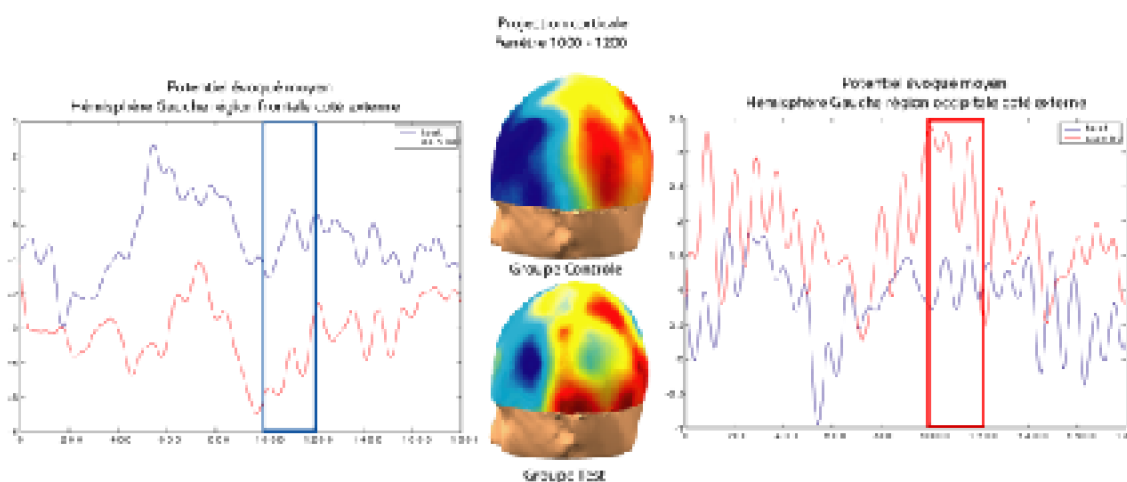
Cette interaction complexe souligne une différence significative de l'activité encéphalographique entre les deux groupes expérimentaux (sujets contrôles non sensibilisés au beurre rance vs. Sujets test sensibilisés au beurre rance). Cette différence a été précisément localisée dans une zone occipitale médiane de l'hémisphère gauche et n'apparaît que tardivement dans la réponse aux odeurs (Figure 66).



*Fig. 66 : Représentation graphique de l'interaction complexe entre le Groupe (T, C) \* Hémisphère (D, G) \* Coté lat. (int, ext.) \* axe antéropostérieur (frontal, temporal, occipital) visible dans une fenêtre temporelle tardive (1000-1200 ms après la stimulation). Pour le groupe contrôle, il y a toujours une grande différence d'amplitude, toujours plus grande que pour le groupe test droit, et précisément dans la zone occipitale médiane. Pour le groupe*

*test, la variation d'amplitude de l'activité moyenne a toujours été plus restreinte sur tout l'encéphale.*

En ciblant la représentation sur la fenêtre 1000-1200 lors de laquelle une différence d'activation très spécifique est survenue, nous avons localisé les différences d'amplitude relatives à une réponse tardive aux odeurs dans l'hémisphère gauche, en position frontale et occipitale. Les tracés ainsi que la projection corticale des réponses moyennes indiquent deux processus distincts dans le traitement des odeurs selon le groupe de sujets. Dans la région frontale, la réponse enregistrée pour les 2 groupes de sujets est très différente dès la stimulation alors que dans la région occipitale, la réponse enregistrée se différencie plus tardivement (fig. 67).

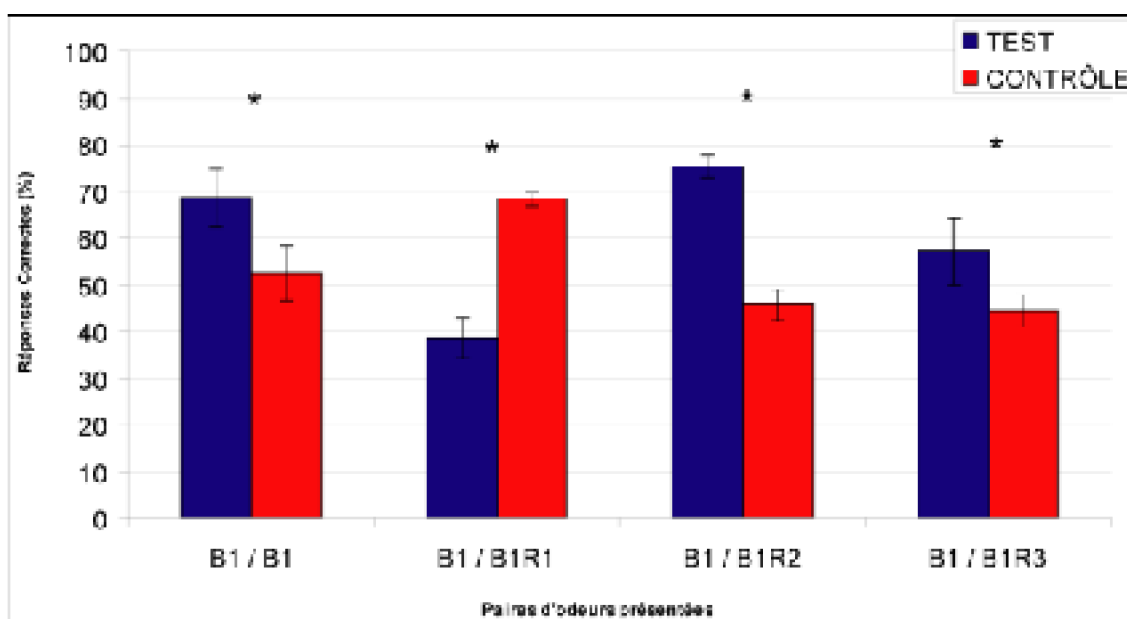


**Fig. 67 :** *Tracé des potentiels évoqués olfactifs moyens enregistrés sur le scalp des sujets des 2 groupes expérimentaux (Test vs. Contrôle) en position frontale et occipitale de l'hémisphère gauche et leurs projections corticales. Les tracés ainsi que la projection de la réponse moyenne indiquent deux processus distincts dans le traitement des odeurs. Le potentiel évoqué olfactif enregistré est négatif pour le groupe 'contrôle' en position frontale alors qu'il est positif en position occipitale.*

- Analyse des performances de la tâche de similarité par paire

Les paires d'odeurs comparant l'odorant B1 (arôme de beurre) à elle-même (paire B1/B1) ainsi qu'aux 3 différents beurres rances (paires B1/B1R1, B1/B1R2 et B1/B1R3) ont été présentées à tous les sujets (12 comparaisons pour chaque paire). Pour chaque paire, les sujets devaient déterminer si les odeurs présentées étaient similaires ou différentes. Nous avons calculé les performances moyennes des 2 groupes, c'est à dire la proportion de réponses correctes pour chaque paire d'odorants (fig. 68).





*Fig. 68 : Proportions de réponses correctes lors de la tâche de similarité par paire. Les sujets devaient déterminer si les odeurs de chaque paire étaient similaires ou différentes. La présentation de l'odeur de beurre (B1) était suivie soit de l'odeur de beurre (B1, réponse attendue : Identique), soit de l'odeur d'un des beurres rances à différentes concentrations de rance (B1R1, B1R2 ou B1R3, réponse attendue : Différente).*

L'analyse de la variance effectuée sur les performances dans la tâche de similarité a indiqué un effet de la paire présentée sur les performances de jugements de similarité [ $F(3,18)=3,8$ ,  $p=0,028$ ]. D'une manière générale, les sujets du groupe test ont obtenu de meilleures performances en discrimination des odorants que les sujets du groupe contrôle.

## 4.6 Discussion

En observant et en comparant les variations des différentes évaluations des paramètres (ou dimensions) psychophysiques durant les deux premières phases expérimentales, nous avons pu objectiver le phénomène de sensibilisation olfactive.

Dans certains cas précis, par exemple pour l'odeur B1R1, il est possible de suivre le degré d'apprentissage en observant les variations de l'intensité perçue, qui diminue graduellement le second jour de sensibilisation. D'autre part, le fait que cette odeur soit considérée comme « désagréable » (i.e. beurre rance le plus intense) a pu entraîner une aversion au fur et à mesure des stimulations successives (De Houwer *et al.*, 2001). Ainsi, en ce qui concerne le groupe 'Test', même si nous n'avons pas observé d'effet sur la valence hédonique du stimulus, nous avons remarqué que les notes de comestibilité relative à l'objet suggéré par l'odeur (du beurre) ont significativement diminué durant la seconde phase du protocole expérimental. Ainsi, le stimulus peut garder une odeur globalement acceptable alors qu'un signal de non comestibilité est présent et s'accroît.

Cette idée est renforcée par les résultats relatifs au stimulus B1 (odeur de beurre). En effet, les sujets du groupe 'Test' ont été sensibilisés pendant deux jours à cet odorant (B1) et aux stimulus évoquant des odeurs de beurres rances (B1R1, B1R2, B1R3) alors que les sujets du groupe 'Contrôle' n'ont été stimulés au beurre rance que lors de la phase 1, les stimuli odorants de la phase 2 étaient du beurre et des beurres vanillés censés être plus agréables (B1V1, B1V2 et B1V3). En analysant les résultats des tableaux 30 et 31, on réalise que le groupe 'Test' a été sensibilisé à l'odeur de beurre (B1) puisque ce stimulus est plus familier pour 'T' que pour 'C' et que les sujets ont associé la note odorante 'rance' à l'odeur de beurre (B1), provoquant : une baisse de l'agrément suscité par l'odeur de beurre et une diminution significative du caractère 'comestible' du beurre suggéré. Ces observations n'ont pas été mises en évidence pour les stimuli B1R2 et B1R3.

Malgré ces résultats, nous avons quand même considéré que la sensibilisation olfactive avait été effective pour le groupe 'Test' et que les sujets constituant le groupe Test pouvaient être assimilés à des pseudo experts de l'odeur de beurre rance, comme des consommateurs de vin réguliers sont significativement plus performants pour discriminer les vins que des sujets n'ayant pas cette habitude (Melcher & Schooler, 1996).

L'analyse des performances obtenues dans la tâche de jugement de similarité a confirmé les premières conclusions quand à l'efficacité de la sensibilisation olfactive induite chez les sujets Test. On observe bien que les sujets ayant été préalablement et suffisamment exposés à l'odeur de beurre rance ont acquis une aptitude perceptive leur permettant de détecter la présence d'une note odorante rance dans l'odeur de beurre à une concentration significativement plus faible que les sujets contrôles. Nous avons observé cette amélioration pour les comparaisons B1/B1, B1/B1R2 et B1/B1R3. En revanche, un résultat inverse a été observé pour la comparaison B1/B1R1 pour laquelle les sujets contrôles ont obtenu de meilleures performances. Ce résultat, qui nous a d'abord paru incongru, a pourtant déjà été observé à nombreuses reprises. En effet, dans plusieurs études, Stevenson et al. ont montré que des expositions répétées à un mélange odorant peut conduire à l'augmentation de la similarité perçue entre les odorants du mélange flairés séparément (Stevenson, 2001; Stevenson *et al.*, 2003; Case *et al.*, 2004). Après avoir été présenté dans un mélange binaire, un des composés du mélange acquiert certaines propriétés de l'autre. Par exemple, si on fait sentir un mélange constitué d'une substance à odeur de cerise et d'une substance à odeur de fumée (gaiacol) et qu'on demande ensuite d'évaluer la qualité de chacune des composés du mélange séparément, l'odeur de cerise aura une composante « fumée » et l'odeur de fumée aura aussi une note « cerise » (Stevenson, 2001).

Cependant, cela n'explique pas le fait que pour les mélanges avec les plus faibles concentrations de rance, cette confusion perceptive ne soit pas d'autant plus importante. Il convient donc relativiser ce paradoxe en rappelant que dans ces différentes études, les protocoles expérimentaux étaient différents les uns des autres, et différents de celui que nous avons mis en place pour cette expérience.

D'un point de vue électroencéphalographique, aucun effet significatif relatif aux différentes concentrations de rance n'est apparu. En revanche, nous avons constaté des potentiels évoqués olfactifs différents. Ces différences d'activations sont apparues avec

des temps de latence différents également. D'une manière générale, nous avons mis en évidence un effet de l'axe antéropostérieur sur l'amplitude de la réponse, ce résultat a déjà été souligné dans différentes études (Prah & Benignus, 1992), les potentiels évoqués olfactifs sont souvent plus amples en position postérieure (occipitale) qu'en position antérieure (frontale).

Au niveau frontal, nous avons observé une réponse aux odeurs différentes très précoce (dès 200 ms après la stimulation) entre les deux groupes de sujets, ce qui suggère que le système nerveux central peut, immédiatement après stimulation, détecter des différences subtiles entre des stimuli olfactifs. Le lobe frontal a un rôle dans de nombreuses fonctions en olfaction, telles que l'émotion, la reconnaissance, l'attention ou encore la planification de la réponse à la tâche...etc. Il pourrait également s'agir d'une réponse à la nouveauté. En effet, lors de la phase 2 de sensibilisation, les sujets du groupe contrôle ont été sensibilisés à des beurres vanillés alors que durant la phase 3, ils devaient comparer des odeurs de beurre et de beurre rance. Mais la complexité de la tâche demandée — ainsi les limites de la technique EEG elle-même — ne nous permettent pas de faire des inférences quant à la fonction qui a pu être atteinte dans notre expérience. Cependant, nous savons que la composante précoce d'un potentiel évoqué peut être rattachée, mais pas uniquement, aux caractéristiques physiques des stimuli odorants et les différences entre la latence et l'amplitude des réponses enregistrées peuvent peut-être s'expliquer par le fait que sujets du groupe 'Test' et les sujets du groupe 'Contrôle' ne possédaient pas la même trace des odeurs en mémoire. Ceci renforce l'idée que des changements qualitatifs de stimuli appris surviennent précocement en zone frontale (Royet *et al.*, 1999).

D'autre part, au niveau occipital gauche, nous avons mis en évidence une différence d'amplitude tardive (de 1000 à 1200 ms) en réponse aux odeurs, signifiant un traitement cognitif plus élaboré. Les sujets du groupe 'Test' ont montré une réponse tardive plus ample en réponse aux beurres rances que les sujets du groupe 'Contrôle'. Ce résultat va dans le même sens que dans une étude récente dans laquelle ont été comparées les latences et les amplitudes des réponses en potentiels évoqués olfactifs avant et après entraînement (Livermore & Hummel, 2004). De plus, soulignons que le paradigme de sensibilisation olfactive que nous avons utilisé se rapproche des paradigmes de type « oddball » que nous avons définis dans le cadre théorique de cette étude. La différence d'amplitude dans les enregistrements électroencéphalographiques entre les 2 groupes de sujets est peut être inhérent à la procédure expérimentale employée.

## 4.7 Conclusions

Ce que nous retiendrons de cette expérience, c'est d'une part que certaines caractéristiques psychophysiques de la perception olfactive sous l'influence d'un apprentissage présentent des variations qui sont compatibles avec ce qu'on pourrait attendre d'une sensibilisation. Elles s'accompagnent de modifications notables du traitement de l'information qu'illustrent des variations anatomo-fonctionnelles spécifiques

décelées par notre investigation électrophysiologique.

Il est généralement accepté que certaines caractéristiques physicochimiques d'une molécule odorante définissent la qualité de son odeur aussi bien que sa « discriminabilité » perceptive des autres molécules odorantes (Chastrette, 2002). L'éventualité d'une perception olfactive dirigée par les propriétés de la molécule pourrait conduire à occulter des mécanismes centripètes, tels que ceux mis en jeu à la suite de l'expérience où l'apprentissage olfactif. Pourtant, comme d'autres, notre étude confirme que l'entraînement peut influencer la perception de la qualité d'une substance odorante, singulièrement sa similarité par rapport à d'autres stimuli, donc dans une certaine mesure, sa « discriminabilité ».

La majorité des études sur l'apprentissage olfactif indiquent que l'expérience peut améliorer les performances en discrimination olfactive (Rabin, 1988). Il semblerait néanmoins que dans certains cas au moins, les mélanges odorants soient « traités » comme des « configurations », qu'il est parfois difficile de décomposer mentalement en éléments individuels constituant le mélange (Laing & Francis, 1989; Laska *et al.*, 1990; Laska & Hudson, 1992; Laing, 1994; Laing & Jinks, 2001) Il est probable que la segmentation d'une odeur soit possible s'il existe pour le sujet une bonne raison de la faire, voire si le sujet cherche une facette ou une note, ou a développé une aptitude à ce type d'analyse.

D'autre part, il nous a semblé plus complexe de suivre la progression d'un apprentissage associatif (d'une note odorante dans un mélange odorant) par une méthode exclusivement psychophysique, bien que plus écologique (naturelle). Malgré le fait que pour certaines odeurs, il soit difficile de quantifier la sensibilisation olfactive, nous sommes en mesure de penser que l'évaluation psychophysique de l'intensité, de la familiarité, et dans le cas d'odeurs alimentaires familières, de la comestibilité de l'aliment suggéré par l'odeur permet d'objectiver et de quantifier le phénomène d'apprentissage olfactif passif (implicite). Pour mesurer de manière plus concrète l'efficacité d'une telle sensibilisation, une simple comparaison des seuils de détection (avant / après sensibilisation) semble suffisante et permettrait de quantifier beaucoup plus facilement le degré de sensibilisation olfactive (Hummel *et al.*, 2005).

Comme nous venons de le discuter, cet apprentissage associatif (la note odorante rance a toujours été présentée avec l'odeur de beurre, et jamais seule) a induit une spécialisation perceptive chez les sujets du groupe 'Test', en leur permettant de discriminer une note odorante particulière (rance) au sein d'un mélange binaire odorant.

De plus, la tâche demandée à tous les sujets lors de la phase 3 (tâche de similarité) est une tâche de mémoire de travail, quantifiable en potentiels évoqués olfactifs (Zelano *et al.*, 2005). Pour réaliser cette tâche, les sujets doivent mémoriser la première odeur jusqu'à ce que la seconde leur soit délivrée, et ainsi réaliser une comparaison perceptive des deux stimulations odorantes. Cette dernière remarque explique également les différences tant dans les performances de discrimination des paires d'odeurs que dans les tracés électroencéphalographiques obtenus. Les sujets sensibilisés à l'odeur de beurre rance ont effectué la tâche avec plus de facilité (meilleures performances en discrimination), facilitation quantifiable grâce aux potentiels évoqués olfactifs tardifs

enregistrés.

Il nous paraît aujourd'hui évident que le nombre de sujets sélectionnés pour cette expérience est trop faible pour obtenir de meilleurs résultats psychophysiques et électrophysiologiques. Les études en potentiels évoqués olfactifs font apparaître une variabilité des réponses d'ordre intra et interindividuelle considérable (due à la nature du stimulus lui-même et également au type de tâche demandée), et par ce fait, il est entendu que plus le nombre de sujets testés est important, plus nous serons en mesure d'augmenter la qualité du signal EEG en diminuant les interférences dues au nombre de sujets.

Toujours dans le même objectif, il conviendrait d'effectuer une expérience en induisant non plus des mélanges odorants comme apport de l'apprentissage, mais chaque molécule odorante véhiculant chacune une note odorante spécifique, puis de tester les performances en discrimination dans les mélanges qui sous-tendent. D'autre part, les enregistrements des potentiels évoqués olfactifs en réponses aux odeurs seules, puis en mélanges pourraient être comparés avec moins de difficultés. De cette manière, il deviendra possible d'enregistrer des potentiels évoqués moins bruités car nous serions en mesure de quantifier la part de la réponse corticale associée à chaque composé dans la réponse corticale enregistrée pour les différents mélanges odorants.



---

# CONCLUSION GENERALE

Dans un environnement naturel, il est rare pour un humain de rencontrer un odorant isolé. Les odeurs alimentaires, les parfums, l'odeur de la pollution, celle des animaux et celles des autres êtres humains sont complexes et contiennent souvent plus d'une centaine de composants odorants différents.

Il est alors raisonnable de proposer que le système olfactif soit adapté à la perception de mélanges complexes odorants. L'intérêt principal de notre travail de thèse était l'étude approfondie de la dimension qualitative des mélanges odorants. Pour cela, il nous a paru cohérent de débiter par l'étude de la perception de la qualité de stimuli odorants présentés seuls, hors mélange, et ensuite d'identifier les processus perceptifs mis en jeu dans le traitement de la qualité des mélanges odorants (que nous avons choisis binaires par simplification). Nos objectifs étaient multiples :

Etudier l'aptitude de sujets non experts à regrouper des odorants selon des critères 1. exclusivement perceptifs afin de comprendre comment l'organisation naturelle de l'espace des odeurs.

Quantifier l'influence des connaissances sémantiques (le plus souvent, nom de l'objet 2. source de l'odeur) sur l'organisation de l'espace des odeurs, et sur les différents termes linguistiques qui les caractérisent.

Elaborer des modèles de mélanges odorants (binaires) pour mettre en évidence, d'un 3. point de vue qualitatif l'existence d'interactions perceptives entre des odorants mis en mélange et le système, olfactif.

Définir ou redéfinir la notion d'interactions perceptives relatives à la qualité des mélanges odorants. 4.

Etudier le phénomène de sensibilisation olfactive et son influence sur l'appréciation quantitative et qualitative des mélanges binaires odorants. 5.

Les résultats des expériences détaillées tout au long de ce mémoire de thèse ont permis de montrer que le sujet humain possède une aptitude naturelle à regrouper les odeurs en famille, selon des critères presque exclusivement perceptifs. Bien que cette aptitude ne soit pas comparable aux performances observées chez des experts (parfumeurs, aromaticiens...), nous avons souligné le rôle primordial des connaissances sémantiques (le nom de l'odeur) sur les capacités à organiser l'espace des odeurs de notre environnement, ainsi qu'à les décrire verbalement.

D'autre part, nous avons mis en évidence l'existence d'interactions particulières concernant la dimension qualitative de certains mélanges binaires odorants. Nous avons montré que ces interactions sont inhérentes aux composés moléculaires choisis et dépendent en majeure partie de leur intensité perçue ainsi que de leurs proportions relatives dans le mélange. Malgré cela, nous avons conclu que, jusqu'à ce jour, aucun mélange binaire d'odorants n'a été élaboré tel que la qualité de l'odeur qui en résulte soit nouvelle, et drastiquement différente de l'odeur de chacun de ses constituants pris séparément. L'accord-fusion olfactif ne peut alors pas encore être défini comme l'émergence d'une nouvelle note odorante dans un mélange binaire. Jusqu'à preuve du contraire (i.e. trouver un mélange binaire conduisant à un accord-fusion), nous partagerons le point de vue de Olsson et collaborateurs, qui, selon leur modèle, placent la qualité de l'odeur résultante d'un mélange binaire à une position intermédiaire entre les qualités de chacun des constituants (Olsson, 1994; Olsson & Cain, 2000) et non comme une nouvelle note odorante émergeant du mélange.

Enfin, dans une dernière expérience, nous avons montré que l'aptitude de sujets non experts à discriminer perceptivement des odorants en mélange est possible, et que cette capacité peut être significativement améliorée par un apprentissage olfactif passif (sensibilisation olfactive). Par le biais d'une méthodologie électroencéphalographique, nous avons indiqué que cette facilitation perceptive a une base cognitive.

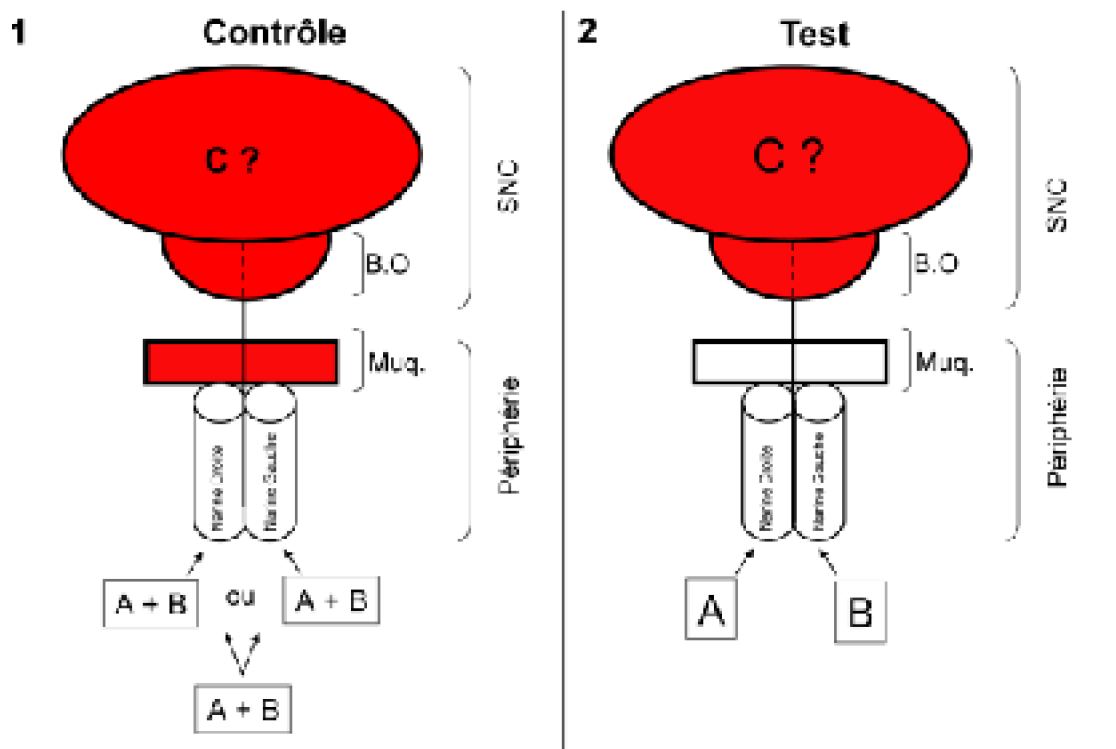
D'un point de vue fondamental, l'intégralité de ce travail permet d'appréhender un champ d'investigations peu développé, celui des mécanismes physiologiques centraux et périphériques mis en jeu dans le traitement de la qualité des odeurs. La performance de ces investigations ne tient qu'à une condition : l'identification de mélanges d'odorants pouvant conduire à la perception des phénomènes d'accord-fusion ou de masquage.

Ainsi, une fois trouvé un mélange binaire particulier (par exemple, le mélange d'un odorant 'A' et d'un odorant 'B' à des concentrations déterminées et en proportions précises, conduit à la perception d'une nouvelle note odorante 'C', qui remplace les notes odorantes 'A' et 'B'), nous prévoyons d'élaborer une procédure expérimentale originale, qui nous permettra de quantifier le rôle des systèmes périphériques et central dans le traitement des mélanges odorants.

En effet, puisque l'information olfactive contenue dans chacune des narines ne se



combine qu'au niveau du bulbe olfactif (premier niveau central d'intégration de l'information), il nous paraît intéressant d'élaborer une procédure utilisant un stimulateur olfactif permettant de stimuler indépendamment la narine gauche de la narine droite. La méthodologie employée consisterait (fig. 69) à stimuler alternativement la narine gauche, la narine droite et les deux narines avec l'odorant 'A', l'odorant 'B' ou le mélange binaire 'A+B' dont on sait qu'il conduit à la perception d'un accord-fusion.



*Fig. 70 : Suggestion d'une méthode de stimulation permettant de contrôler la part du rôle central et périphérique dans la perception de la qualité des mélanges binaires odorants. En postulant que le mélange d'un odorant 'A' et d'un odorant 'B', à des concentrations déterminées et en proportion fixée, conduit à la perception d'une odeur 'C' (différente de l'odeur de 'A' et de 'B') ; alors la méthodologie 'contrôle' présentée en 1 permettra de mettre en évidence l'implication des niveaux central et périphérique dans la perception de l'accord-fusion ; et le schéma 2 indique la méthode 'test' servant à vérifier la nécessité du système périphérique dans la perception de cet accord.*

Ainsi, à l'aide de la méthode originale suggérée par la figure 70, nous prétendons pouvoir confirmer ou infirmer les conclusions relatives à l'implication à la fois du système périphérique (muqueuse olfactive) et du système central (bulbe olfactif et au-delà) que nous avons défendues dans ce mémoire de thèse. Le schéma 1 (fig. 70-1) — qui constitue la condition 'contrôle' à notre question — suggère que si la stimulation mononarinale et/ou binarinale avec le mélange 'A+B' conduit à la perception d'une odeur 'C' (accord-fusion), alors le système périphérique et le système central sont nécessaires à l'intégration de la qualité odorante du mélange. En revanche, le schéma 2 (fig. 70-2) propose de stimuler chaque narine avec un des deux constituants du mélange : si cette méthode de stimulation conduit à la perception d'une odeur 'C', alors nous pouvons dire que la perception de la qualité des mélanges odorants dépend du système nerveux central

uniquement. Si cette méthode ne conduit pas à la perception de l'odeur 'C', alors nous concluerons à la nécessité d'une intégration périphérique pour un tel traitement. Enfin, il serait primordial de comparer les évaluations de certains paramètres psychophysiques (intensité perçue, typicité, hédonicité...) en réponse aux stimulations odorantes afin de quantifier le rôle exact du système périphérique dans la perception des mélanges odorants.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allison, T., & Goff, W. R. (1967). Human cerebral evoked responses to odorous stimuli. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 23(1), 78.
- Amoore, J. E. (1963). Stereochemical theory of olfaction. *Nature*, 198, 271-272.
- Amoore, J.E. (1970). *Molecular basis of odor*. C.C. Thomas, Springfield. 200 p.
- Araneda, R.C., Kini, A.D. & Firestein, S. (2000). The molecular receptive range of an odorant receptor. *Nat Neurosci*, 3, 1248-1255.
- Arctander, S. (1969). *Perfume and flavor chemicals* (Arctander, S. ed.). Montclair, N. J. (USA): Arctander, S.
- Arctander, S. (1969). *Perfume and flavor chemicals*. Arctander, S., Montclair, N. J. (USA)p.
- Barkat, S. & Sicard, G. (2001). Etude de la perception qualitative et intensive de mélanges odorants. Université Lumière Lyon 2, Lyon, 33.
- Barkat, S., Thomas-Danguin, T., Bensafi, M., C., R., & Sicard, G. (2003). Odor and color of cosmetic products: correlations between subjective judgment and autonomic nervous system response. *Int journal of cosm science*, 25, 273-283.
- Beets, M. G. J. (1982). Odor and stimulant structure. In A. Press (Ed.), *Fragrance Chemistry*. New York: Academic Press.
- Bensafi, M., Porter, J., Pouliot, S., Mainland, J., Johnson, B., Zelano, C., et al. (2003). Olfactomotor activity during imagery mimics that during perception. *Nat Neurosci*,

- 6(11), 1142-1144.
- Bensafi, M., Rouby, C., Farget, V., Bertrand, B., Vigouroux, M., & Holley, A. (2002). Autonomic nervous system responses to odours: the role of pleasantness and arousal. *Chem Senses*, 27(8), 703-709.
- Berglund, B., Berglund, U. & Lindvall, T. (1976). Psychological processing of odor mixtures. *Psychol Rev*, 83, 432-441.
- Berglund, B., Berglund, U., Engen, T., & Ekman, G. (1973). Multidimensional analysis of twenty-one odors. *Scand J Psychol*, 14(2), 131-137.
- Berlin, B., & Kay, P. (1969). *Basic color terms: their universality and evolution*. Berkeley & Los Angeles: University of California Press.
- Björk, E. A. (1985). The perceived quality of natural sounds. *acustica*, 57, 185-188.
- Boelens (2001). Boelens Aroma Chemical Information Service, The Netherlands.
- Boelens (2001). Boelens Aroma Chemical Information Service, The Netherlands.
- Brand, G. (1999). [Olfactory lateralization in humans: a review of the literature]. *Neurophysiol Clin*, 29, 495-506.
- Buck, L. & Axel, R. (1991). A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition. *Cell*, 65, 175-187.
- Burr, C. (2002). *The Emperor of scent*. Random House, New York. 318 p.
- Cain, W. S., & Algom, D. (1997). Perceptual and mental mixtures in odor and in taste: are there similarities and differences between experiments or between modalities? Reply to Schifferstein (1997). *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 23(5), 1588-1593.
- Cain, W. S., & Johnson, F., Jr. (1978). Lability of odor pleasantness: influence of mere exposure. *Perception*, 7(4), 459-465.
- Cain, W.S. & Drexler, M. (1974). Scope and evaluation of odor counteraction and masking. *Ann N Y Acad Sci*, 237, 427-439.
- Cain, W.S. (1975). Odor intensity: mixtures and masking. *Chem. Senses*, 1, 339-352.
- Calkin, R.R. & Jellinek, J.S. (1994). In Jellinek, S. (ed.) *Perfumery: Practice and Principles*. John Wiley & Sons, Inc, New York: 304.
- Carrasco, M., & Ridout, J. B. (1993). Olfactory perception and olfactory imagery: a multidimensional analysis. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 19(2), 287-301.
- Case, T. I., Stevenson, R. J., & Dempsey, R. A. (2004). Reduced discriminability following perceptual learning with odours. *Perception*, 33(1), 113-119.
- Chastrette, M. (1995). *L'art du parfum*. Hachette, Paris. 144 p.
- Chastrette, M. (2002). Classification of odors and structure-odor relationships. In S. Rouby C., B, Dubois, D, Gervais, R & Holley, A. (Ed.), *Olfaction, Taste and Cognition* (pp. 100-116). New York: Cambridge University Press.
- Chastrette, M., De Saint Laumer, J. Y., & Peyraud, J. F. (1993). Adapting the structure of a neural network to extract chemical information. Application to structure-odour relationships. *SAR QSAR Environ Res*, 1(2-3), 221-231.
- Chu, S., & Downes, J. J. (2000). Odour-evoked autobiographical memories: psychological investigations of proustian phenomena. *Chem Senses*, 25(1), 111-116.

- 
- Davidoff, J. (2001). Language and perceptual categorisation. *Trends Cogn Sci*, 5(9), 382-387.
- De Houwer, J., Thomas, S., & Baeyens, F. (2001). Associative learning of likes and dislikes: a review of 25 years of research on human evaluative conditioning. *Psychol Bull*, 127(6), 853-869.
- De Wijk, R. A., & Cain, W. S. (1994). Odor quality: discrimination versus free and cued identification. *Percept Psychophys*, 56(1), 12-18.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J Neurosci Methods*, 134(1), 9-21.
- Djordjevic, J., Zatorre, R. J., Petrides, M., & Jones-Gotman, M. (2004). The mind's nose: Effects of odor and visual imagery on odor detection. *Psychol Sci*, 15(3), 143-148.
- Doré, J. C., Gordon, G., & Jaubert, J. N. (1984). Approche factorielle des relations entre structure chimique et notes odorantes. Paper presented at the C.R. Acad. Sc., chimie biologique, Paris.
- Duchamp, A., Jourdan, F., & Gervais, R. (1991). Anatomophysiologie et mécanismes de l'olfaction. In G. Martin & P. Laffort (Eds.), *Odeurs et désodorisation dans l'environnement* (pp. 1-24). Paris: Tec&Doc-Lavoisier.
- Dyson, G. (1938). The scientific basis of odour. *Chem. Ind*, 57, 647-651.
- Eminet, B. P., & Chastrette, M. (1983). Discrimination of camphoraceous substances using psychochemical parameters. *Chem Senses*, 7, 293-300.
- Engen, T. (1982). *The Perception of Odors*. New York: Academic Press.
- Evans, W. J., Cui, L., & Starr, A. (1995). Olfactory event-related potentials in normal human subjects: effects of age and gender. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 95(4), 293-301.
- Feron, F., Lizard, G. & Sicard, G. (1995). Isolation of mature olfactory neurones using retrograde labelling and flow cytometry. *J Neurosci Methods*, 57, 9-14.
- Finkenzyler, P. (1966). [Average EEG potentials in olfactory stimulation]. *Pflugers Arch Gesamte Physiol Menschen Tiere*, 292(1), 76-80.
- Flaux, N., & Van de Velde, D. (2000). *Les noms en français*. Paris: L'essentiel Français.
- Fritjers, J. E. R. (1977). The effect of duration of intervals between olfactory stimuli in the triangular method. *Chem. Senses and Flavor*, 2, 301-311.
- Fritjers, J.E.R. (1987). Psychophysical models for mixtures of tastant and mixtures of odorants. *Ann. N. Y. Acad. Sci*, 510, 67-81.
- Geisler, M. W., & Polich, J. (1990). P300 and time of day: circadian rhythms, food intake, and body temperature. *Biol Psychol*, 31(2), 117-136.
- Geisler, M. W., & Polich, J. (1992). P300 and individual differences: morning/evening activity preference, food, and time-of-day. *Psychophysiology*, 29(1), 86-94.
- Geisler, M. W., & Polich, J. (1992). P300, food consumption, and memory performance. *Psychophysiology*, 29(1), 76-85.
- Geisler, M. W., Morgan, C. D., Covington, J. W., & Murphy, C. (1999).

- Neuropsychological performance and cognitive olfactory event-related brain potentials in young and elderly adults. *J Clin Exp Neuropsychol*, 21(1), 108-126.
- Getchell, T.V., Grillo, M., Tate, S.S., Urade, R., Teeter, J. & Margolis, F.L. (1990). Expression of catfish amino acid taste receptors in *Xenopus* oocytes. *Neurochem Res*, 15, 449-456.
- Godard, D., & Jayez, J. (1993). Le traitement lexical de la coercion. *Cahiers de linguistique française*, 14, 123-149.
- Godard, D., & Jayez, J. (1996). Types nominaux et anaphores: le cas des objets et des événements. *Chronos*, 1, 41-58.
- Godard, D., & Jayez, J. (1999). Quels sont les faits? In M. Plénat (Ed.), *L'emprise du sens: mélanges de syntaxe et de sémantique offerts à Andrée Borillo* (pp. 117-136). Amsterdam: Rodopi.
- Godinot, N. (1999). Contribution à l'étude de la perception olfactive: Qualité des odeurs et mélanges de composés odorants. Unpublished Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon.
- Gregson, R.A. (1984). Similarities between odor mixtures with known components. *Percept Psychophys*, 35, 33-40.
- Gross-Isseroff, R., & Lancet, D. (1988). Concentration-dependent changes of perceived odor quality. *Chem. Senses*, 13(2), 191-204.
- Guénoche, A., & Garreta, H. (2001). Can we have confidence in a tree representation? *Incs*, 2066, 45-56.
- Guski, R. (1997). Psychophysical methods for evaluating sound quality and assessing acoustic information. *Acustica, Acta acustica*, 83, 765-774.
- Herz, R. S. (2003). The effect of verbal context on olfactory perception. *J Exp Psychol Gen*, 132(4), 595-606.
- Herz, R. S., & von Clef, J. (2001). The influence of verbal labeling on the perception of odors: evidence for olfactory illusions? *Perception*, 30(3), 381-391.
- Hoffman, H. (1986). Malodor control - A review. *Perfumer & Flavorist*, 11, 2-8.
- Holley, A. (2002). Cognitive aspects of Olfaction in Perfumery Practice. In S. Rouby C., B, Dubois, D, Gervais, R & Holley, A. (Ed.), *Olfaction, Taste and Cognition* (pp. 16-26). New York: Cambridge University Press.
- Holley, A., Duchamp, A., Revial, M. F., & Juge, A. (1974). Qualitative and quantitative discrimination in the frog olfactory receptors: analysis from electrophysiological data. *Ann N Y Acad Sci*, 237(0), 102-114.
- Hornung, D.E., Youngentob, S.L. & Mozell, M.M. (1987). Olfactory mucosa/air partitioning of odorants. *Brain Res*, 413, 147-154.
- Hummel, T., Rissom, K., Müller, A., & Reden, J. (2005). Olfactory training in patients with olfactory loss, *Achems* (pp. 45). Sarasota, FL - USA.
- Jaubert, J. N., Gordon, G., & Doré, J.-C. (1987). Une organisation du champ des odeurs. *Parfums, cosm. et arômes*, 77, 53-56.
- Jehl, C., Royet, J. P., & Holley, A. (1995). Odor discrimination and recognition memory as a function of familiarization. *Percept Psychophys*, 57(7), 1002-1011.

- Jinks, A. & Laing, D.G. (2001). The analysis of odor mixtures by humans: evidence for a configurational process. *Physiol Behav*, 72, 51-63.
- Johnson, B.A., Farahbod, H., Xu, Z., Saber, S. & Leon, M. (2004). Local and global chemotopic organization: general features of the glomerular representations of aliphatic odorants differing in carbon number. *J Comp Neurol*, 480, 234-249.
- Johnson, R., Jr. (1993). On the neural generators of the P300 component of the event-related potential. *Psychophysiology*, 30(1), 90-97.
- Jönsson, F. U., & Olsson, M. J. (2003). Olfactory metacognition. *Chem Senses*, 28(7), 651-658.
- Jönsson, F. U., Olsson, H., & Olsson, M. J. (2005). Odor emotionality affects the confidence in odor naming. *Chem Senses*, 30(1), 29-35.
- Jönsson, F. U., Tchekhova, A., Lonner, P., & Olsson, M. J. (2005). A Metamemory Perspective on Odor Naming and Identification. *Chem Senses*.
- Kajiya, K., Inaki, K., Tanaka, M., Haga, T., Kataoka, H. & Touhara, K. (2001). Molecular bases of odor discrimination: Reconstitution of olfactory receptors that recognize overlapping sets of odorants. *J Neurosci*, 21, 6018-6025.
- Kareken, D.A., Sabri, M., Radnovich, A.J., Claus, E., Foresman, B., Hector, D. & Hutchins, G.D. (2004). Olfactory system activation from sniffing: effects in piriform and orbitofrontal cortex. *Neuroimage*, 22, 456-465.
- Keller, A. & Vosshall, L.B. (2004). A psychophysical test of the vibration theory of olfaction. *Nat Neurosci*, 7, 337-338.
- Klemm, W. R., Lutes, S. D., Hendrix, D. V., & Warrenberg, S. (1992). Topographical EEG maps of human responses to odors. *Chem Senses*, 17, 347-361.
- Kobal, G., & Hummel, C. (1988). Cerebral chemosensory evoked potentials elicited by chemical stimulation of the human olfactory and respiratory nasal mucosa. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 71(4), 241-250.
- Köster, E. P. (1971). Adaptation and cross-adaptation in olfaction. university of Utrecht, Rotterdam.
- Köster, E. P. (1991). Méthode d'évaluation psychophysique dans l'étude de l'environnement. In M. e. L. (coord.) (Ed.), *Odeurs et désodorisation dans l'environnement* (pp. 26-60). Paris: Tec & Doc Lavoisier.
- Köster, E.P. (1971). Adaptation and cross-adaptation in olfaction. Thèse de university of Utrecht. Rotterdam. 212 p.
- Krauel, K., B.M., P., B., S., & R., F. (1999). Is there a mismatch negativity analogue in the chemosensory event-related potential? *Journal of psychophysiology*, 13, 49-55.
- Krauel, K., Pause, B. M., Sojka, B., Schott, P., & Ferstl, R. (1998). Attentional modulation of central odor processing. *Chem Senses*, 23(4), 423-432.
- Krautwurst, D., Yau, K.W. & Reed, R.R. (1998). Identification of ligands for olfactory receptors by functional expression of a receptor library. *Cell*, 95, 917-926.
- Kruskal, J. B. (1964). Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika*, 29, 1-27.
- Laing, D. G. (1983). Natural sniffing gives optimum odour perception for humans.

- Perception, 12(2), 99-117.
- Laing, D. G. (1994). Perceptual odour interactions and objective mixture analysis. *Food quality and preference*, 5, 75-80.
- Laing, D. G., & Francis, G. W. (1989). The capacity of humans to identify odors in mixtures. *Physiol Behav*, 46(5), 809-814.
- Laing, D. G., & Jinks, A. L. (2001). Psychophysical Analysis of Complex Odor Mixtures. *Chimia*, 55, 413-420.
- Laing, D. G., & Livermore, B. A. (1992). Perceptual analysis of complex chemical signals by humans (R.L. Doty and D. Muller-Schwarze ed. Vol. 6). New York: Plenum press.
- Laing, D. G., Panhuber, H., Willcox, M. E., & Pittman, E. A. (1984). Quality and intensity of binary odor mixtures. *Physiol Behav*, 33(2), 309-319.
- Laing, D.G. & Francis, G.W. (1989). The capacity of humans to identify odors in mixtures. *Physiol Behav*, 46, 809-814.
- Laing, D.G. & Glemarec, A. (1992). Selective attention and the perceptual analysis of odor mixtures. *Physiol Behav*, 52, 1047-1053.
- Laing, D.G. & Jinks, A.L. (2001). Psychophysical Analysis of Complex Odor Mixtures. *Chimia*, 55, 413-420.
- Laing, D.G. & Livermore, B.A. (1992). Perceptual analysis of complex chemical signals by humans. Plenum press, New Yorkp.
- Laing, D.G. & Willcox, M.E. (1983). Perception of components in binary odour mixtures. *Chemical Senses*, 7, 249-264.
- Laing, D.G. & Willcox, M.E. (1987). An investigation of the mechanisms of odor suppression using physical and dichorhnic mixtures. *Behav Brain Res*, 26, 79-87.
- Laing, D.G. (1987). Coding of chemosensory stimulus mixtures. *Ann N Y Acad Sci*, 510, 61-66.
- Laing, D.G. (1988). Relationship between the differential adsorption of odorants by the olfactory mucus and their perception in mixtures. *Chemical Senses*, 13, 463-471.
- Laing, D.G. (1994). Perceptual odour interactions and objective mixture analysis. *Food quality and preference*, 5, 75-80.
- Laing, D.G., Panhuber, H., Willcox, M.E. & Pittman, E.A. (1984). Quality and intensity of binary odor mixtures. *Physiol Behav*, 33, 309-319.
- Lancet, D. (1986). Vertebrate olfactory reception. *Annu Rev Neurosci*, 9, 329-355.
- Larsson, M. (1997). Semantic factors in episodic recognition of common odors in early and late adulthood: a review. *Chem Senses*, 22(6), 623-633.
- Laska, M. & Hudson, R. (1992). Ability to discriminate between related odor mixtures. *Chem Senses*, 17, 403-415.
- Laska, M., Hudson, R., & Distel, H. (1990). Sensitivity to biologically relevant odours may exceed the sum of components tresholds. *Chemoecology*, 1, 139-141.
- Lawless, H.T. (1977). The pleasantness of mixtures in taste and olfaction. *Sens Processes*, 1, 227-237.



- 
- Li, Z., & Hertz, J. A. (1999). Odor recognition and segmentation by coupled olfactory bulb and cortical networks. *Neurocomputing*, 26-27, 789-794.
- Livermore, A. & Hummel, T. (2004). The influence of training on chemosensory event-related potentials and interactions between the olfactory and trigeminal systems. *Chem Senses*, 29, 41-51.
- Livermore, A. & Laing, D.G. (1996). Influence of training and experience on the perception of multicomponent odor mixtures. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 22, 267-277.
- Livermore, A. & Laing, D.G. (1998). The influence of odor type on the discrimination and identification of odorants in multicomponent odor mixtures. *Physiol Behav*, 65, 311-320.
- Livermore, A., & Hummel, T. (2004). The influence of training on chemosensory event-related potentials and interactions between the olfactory and trigeminal systems. *Chem Senses*, 29(1), 41-51.
- Livermore, A., & Laing, D. G. (1996). Influence of training and experience on the perception of multicomponent odor mixtures. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 22(2), 267-277.
- Lorig, T. S. (1989). Human EEG and odor response. *Prog Neurobiol*, 33(5-6), 387-398.
- Lorig, T. S. (1994). EEG and ERP studies of low-level odor exposure in normal subjects. *Toxicol Ind Health*, 10(4-5), 579-586.
- Lorig, T. S. (2000). The application of electroencephalographic techniques to the study of human olfaction: a review and tutorial. *Int J Psychophysiol*, 36(2), 91-104.
- Lorig, T. S., & Schwartz, G. E. (1988). Brain and Odor: Alteration of human EEG by odor administration. *Psychobiology*, 16, 281-284.
- Lorig, T. S., Elmes, D. G., Zald, D. H., & Pardo, J. V. (1999). A computer-controlled olfactometer for fMRI and electrophysiological studies of olfaction. *Behav Res Methods Instrum Comput*, 31(2), 370-375.
- Lorig, T. S., Gould, M., & Dalton, P. (2003). Improvement to an olfactometer for psychophysiological and fMRI studies of olfactory processes. Paper presented at the Achems, Sarasota, FL - USA.
- Lorig, T. S., Herman, K. B., Schwartz, G. E., & Cain, W. S. (1990). EEG activity during administration of low concentration odors. *Bulletin of the Psychonomic Society*(28), 405-408.
- Lorig, T. S., Matia, D. C., Peszka, J., & Bryant, D. N. (1996). The effects of active and passive stimulation on chemosensory event-related potentials. *Int J Psychophysiol*, 23(3), 199-205.
- Lyman, B. J., & McDaniel, M. A. (1986). Effect of encoding strategy on long term memory for odors. *Quarterly journal of experimental psychology*, 38(A), 753-765.
- Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G., & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, 21(2), 171-186.
- Malnic, B., Hirono, J., Sato, T. & Buck, L.B. (1999). Combinatorial receptor codes for odors. *Cell*, 96, 713-723.

- Marandin, J. M. (1984). Distribution et contexte dans une description lexicale. *Cahiers de lexicologie*, 44(1), 137-149.
- Marandin, J. M. (1984). Miniatures sentimentales. Syntaxe et discours dans une description lexicale. *Linx*, 10, 75-95.
- Marandin, J. M. (1992). Il y a de la synonymie. *Cahiers de lexicologie*, 61(2), 39-57.
- Martin, G. N. (1998). Human electroencephalographic (EEG) response to olfactory stimulation: two experiments using the aroma of food. *Int J Psychophysiol*, 30(3), 287-302.
- McAdams, S. (1994). La reconnaissance de source et d'évènements sonores. In *Penser les sons* (pp. 157-213). Paris: Presse Universitaire de France.
- Melcher, J. M., & Schooler, J. W. (1996). The misrememberance of wines past: verbal and perceptual expertise differentially mediate verbal overshadowing of taste memory. *J. Mem. Lang*, 35, 231-245.
- Menco, B.P., Cunningham, A.M., Qasba, P., Levy, N. & Reed, R.R. (1997). Putative odour receptors localize in cilia of olfactory receptor cells in rat and mouse: a freeze-substitution ultrastructural study. *J Neurocytol*, 26, 297-312.
- Moncrieff, R.W. (1949). What is Odor - A New Theory. *Am. Perfumer*, 54, 453.
- Moncrieff, R.W. (1956). Olfactory adaptation and odour likeness. *J Physiol*, 133, 301-316.
- Moskowitz, H. R., & Barbe, C. D. (1977). Profiling of odor components and their mixtures. *Sens Processes*, 1(3), 212-226.
- Mozell, M.M. (1964). Evidence For Sorption As A Mechanism Of The Olfactory Analysis Of Vapours. *Nature*, 203, 1181-1182.
- Mozell, M.M. (1970). Evidence for a chromatographic model of olfaction. *J Gen Physiol*, 56, 46-63.
- Naatanen, R. (1995). Event-related potentials in human selective attention research. In R. Johnson & J. C. Baron (Eds.), *Handbook of Neurophysiology* (10 ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Naatanen, R., & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24(4), 375-425.
- Naatanen, R., Gaillard, A. W., & Mantysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychol (Amst)*, 42(4), 313-329.
- Naatanen, R., Simpson, M., & Loveless, N. E. (1982). Stimulus deviance and evoked potentials. *Biol Psychol*, 14(1-2), 53-98.
- Oka, Y., Omura, M., Kataoka, H. & Touhara, K. (2004). Olfactory receptor antagonism between odorants. *Embo J*, 23, 120-126.
- Olsson, M. J. (1994). An interaction model for odor quality and intensity. *Percept Psychophys*, 55(4), 363-372.
- Olsson, M. J., & Cain, W. S. (2000). Psychometrics of odor quality discrimination: method for threshold determination. *Chem Senses*, 25(5), 493-499.
- Patterson, M. Q., Stevens, J. C., & Cain, W. S. (1993). Detection thresholds for an

- olfactory mixture and its three constituent compounds. *Chem. Senses*, 18(6), 723-734.
- Pauling, L. (1946). Molecular architecture and biological reactions. *Chem. Eng. News*, 24, 1375-1377.
- Pause, B. M., & Krauel, K. (2000). Chemosensory event-related potentials (CSERP) as a key to the psychology of odors. *Int J Psychophysiol*, 36(2), 105-122.
- Pause, B. M., Krauel, K., Sojka, B., & Ferstl, R. (1998). Body odor evoked potentials: a new method to study the chemosensory perception of self and non-self in humans. *Genetica*, 104(3), 285-294.
- Pause, B. M., Krauel, K., Sojka, B., & Ferstl, R. (1999). Body odor evoked potentials: a new method to study the chemosensory perception of self and non-self in humans. *Genetica*, 104(3), 285-294.
- Pause, B. M., Sojka, B., Krauel, K., & Ferstl, R. (1996). The nature of the late positive complex within the olfactory event-related potential (OERP). *Psychophysiology*, 33(4), 376-384.
- Pelosi, P. (1994). Odorant-binding proteins. *Crit Rev Biochem Mol Biol*, 29, 199-228.
- Pevsner, J., Hwang, P.M., Sklar, P.B., Venable, J.C. & Snyder, S.H. (1988). Odorant-binding protein and its mRNA are localized to lateral nasal gland implying a carrier function. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 85, 2383-2387.
- Pierce, J. D., Jr., Wysocki, C. J., Aronov, E. V., Webb, J. B., & Boden, R. M. (1996). The role of perceptual and structural similarity in cross-adaptation. *Chem Senses*, 21(2), 223-237.
- Pierce, J.D., Jr., Wysocki, C.J., Aronov, E.V., Webb, J.B. & Boden, R.M. (1996). The role of perceptual and structural similarity in cross-adaptation. *Chem Senses*, 21, 223-237.
- Pierce, J.D., Jr., Zeng, X.N., Aronov, E.V., Preti, G. & Wysocki, C.J. (1995). Cross-adaptation of sweaty-smelling 3-methyl-2-hexenoic acid by a structurally-similar, pleasant-smelling odorant. *Chem Senses*, 20, 401-411.
- Pierce, J.D.J., Wysocki, C.J. & Aronov, E.V. (1993). Mutual Cross-adaptation of the volatile steroid Androsterole and a non-steroid perceptual analog. *Chem Senses*, 18, 245-256.
- Polich, J., & Squire, L. R. (1993). P300 from amnesic patients with bilateral hippocampal lesions. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 86(6), 408-417.
- Poucher, W.A. (1975). *Perfumes, Cosmetic and Soaps*. Chapman & Hall, London 782 p.
- Prah, J. D., & Benignus, V. A. (1992). Olfactory evoked responses to odorous stimuli of different intensities. *Chem Senses*, 17(4), 417-425.
- Rabin, M. D. (1988). Experience facilitates olfactory quality discrimination. *Percept Psychophys*, 44(6), 532-540.
- Ressler, K.J., Sullivan, S.L. & Buck, L.B. (1993). A zonal organization of odorant receptor gene expression in the olfactory epithelium. *Cell*, 73, 597-609.
- Richardson, J. T., & Zucco, G. M. (1989). Cognition and olfaction: a review. *Psychol*

- Bull, 105(3), 352-360.
- Rosch, E. (1978). Principle of categorization. In *Readings in cognitive science, a perspective from psychology and artificial intelligence* (pp. 312-322). San Mateo: Collins, A., Smith, E. E. & Kaufmann, M.
- Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W. D., Johnson, D. M., & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognition*, 8, 382-439.
- Rouby, C., & Bensafi, M. (2002). Is there a hedonic dimension to odors? In C. Rouby, Schaal, B., Dubois, D., Gervais, R., Holley, A. (Ed.), *Olfaction, Taste and Cognition* (pp. 140-159). Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Rouby, C., & Holley, A. (1995). Temporal competition between odorants: effect of different time intervals on the perception of monorhnic and dichorhnic binary mixtures. *Perception*, 24(9), 1083-1097.
- Rouby, C., & Sicard, G. (1997). Des catégories d'odeurs? In D. Dubois (Ed.), *Catégorisation et Cognition, de la perception au discours*. Paris: Kimé.
- Royet, J. P., Koenig, O., Gregoire, M. C., Cinotti, L., Lavenne, F., Le Bars, D., et al. (1999). Functional anatomy of perceptual and semantic processing for odors. *J Cogn Neurosci*, 11(1), 94-109.
- Sattah, S., & Tversky, A. (1977). Additive similarity trees. *Psychometrika*, 42, 319-345.
- Saunders, B. A. C., & Van Brakel, J. (1997). Are there non trivial constraints on colour categorization? *Behav Brain Science*, 20, 167-228.
- Schab, F. R. (1991). Odor memory: taking stock. *Psychol Bull*, 109(2), 242-251.
- Schifferstein, H. N. (1997). Perceptual and imaginary mixtures in chemosensation. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 23(1), 278-288.
- Schiffman, S. (1977). Food recognition by the elderly. *J Gerontol*, 32(5), 586-592.
- Schiffman, S. S. (1974). Physicochemical correlates of olfactory quality. *Science*, 185(146), 112-117.
- Schleppnik, A.A. (1975). Enzyme model of olfaction and dual nature of odorivectors. *Cosm. Perfum.*, 90, 60-66.
- Schwartz, G. E., Kline, J. P., Dikman, Z. V., & Polak, E. H. (1993). EEG registration of conscious and unconscious concentrations of isoamyl acetate and androstenone. *Chemical Senses*, 18, 625.
- Schwartz, G. E., Wright, K. P., Polak, E. H., & Schwartz, J. I. (1992). Conscious and unconscious odor registration in the elderly. *Chemical Senses*, 17, 695.
- Schwartz, G. E., Wright, K. P., Polak, E. H., Kline, J. P., & Dikman, Z. V. (1992). Topographical EEG mapping of conscious and unconscious odors. *Chemical Senses*, 17, 695.
- Shepard, R. N. (1962). The analysis of proximities: Multidimensional scaling with an unknown distance function. *Psychometrika*, 27, 125-140; 219-246.
- Sicard, G. (1985). Olfactory discrimination of structurally related molecules: receptor cell responses to camphoraceous odorants. *Brain Res*, 326(2), 203-212.
- Sicard, G., & Holley, A. (1984). Receptor cell responses to odorants: similarities and differences among odorants. *Brain Res*, 292(2), 283-296.

- 
- Simon, T.W. & Derby, C.D. (1995). Mixture suppression without inhibition for binary mixtures from whole cell patch clamp studies of in situ olfactory receptor neurons of the spiny lobster. *Brain Res*, 678, 213-224.
- Sobel, N., Prabhakaran, V., Hartley, C. A., Desmond, J. E., Glover, G. H., Sullivan, E. V., et al. (1999). Blind smell: brain activation induced by an undetected air-borne chemical. *Brain*, 122 (Pt 2), 209-217.
- Stevenson, R. J. (2001). Perceptual learning with odors: implications for psychological accounts of odor quality perception. *Psychon Bull Rev*, 8(4), 708-712.
- Stevenson, R. J. (2001). The acquisition of odour qualities. *Q J Exp Psychol A*, 54(2), 561-577.
- Stevenson, R. J., Case, T. I., & Boakes, R. A. (2003). Smelling what was there: Acquired olfactory percepts are resistant to further modification. *Learning and Motivation*, 34(2), 185-202.
- Tateyama, T., Hummel, T., Roscher, S., Post, H., & Kobal, G. (1998). Relation of olfactory event-related potentials to changes in stimulus concentration. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 108(5), 449-455.
- Thesen, T., & Murphy, C. (2002). Reliability analysis of event-related brain potentials to olfactory stimuli. *Psychophysiology*, 39(6), 733-738.
- Thomas-Danguin, T. (1997). Intensité olfactive de composés purs et de mélanges: Application au masquage des odeurs. Université Claude Bernard, Lyon.
- Thomas-Danguin, T. (1997). Intensité olfactive de composés purs et de mélanges: Application au masquage des odeurs. Thèse de Chimie Organique. Université Claude Bernard. Lyon. 220 p.
- Thomas-Danguin, T. (2003). Les accords aromatiques: Projet Accord-fusion. SORDAB-ISIPCA-UMRA-INRA-ENESSAD, Club Crin Paris.
- Touhara, K. (2002). Odor discrimination by G protein-coupled olfactory receptors. *Microsc Res Tech*, 58, 135-141.
- Turin, L. & Yoshii, F. (2003). Structure-odor relations: a modern perspective. In Doty, R. (ed.) *Handbook of olfaction and gustation*, Philadelphia, USA: 1136.
- Turin, L. (1996). A spectroscopic mechanism for primary olfactory reception. *Chem Senses*, 21, 773-791.
- Turin, L. (2002). A method for the calculation of odor character from molecular structure. *J Theor Biol*, 216, 367-385.
- Van Straten, S. (1977). Volatile compounds in food. *Qualitative Data* (4th ed.). The Netherlands: T. N. O.
- Vassar, R., Ngai, J. & Axel, R. (1993). Spatial segregation of odorant receptor expression in the mammalian olfactory epithelium. *Cell*, 74, 309-318.
- Vendler, Z. (1967). *Linguistics in philosophy*. Ithaca: Cornell University Press.
- Wang, H. W., Wysocki, C. J., & Gold, G. H. (1993). Induction of olfactory receptor sensitivity in mice. *Science*, 260(5110), 998-1000.
- Wang, L., Walker, V. E., Sardi, H., Fraser, C., & Jacob, T. J. (2002). The correlation between physiological and psychological responses to odour stimulation in human

- subjects. *Clin Neurophysiol*, 113(4), 542-551.
- Wiltrout, C., Dogra, S. & Linster, C. (2003). Configurational and nonconfigurational interactions between odorants in binary mixtures. *Behav Neurosci*, 117, 236-245.
- Wise, P.M. & Cain, W.S. (2000). Latency and accuracy of discriminations of odor quality between binary mixtures and their components. *Chem Senses*, 25, 247-265.
- Wittgenstein, L. (1953). *Philosophical investigations* (G. E. M. Anscombe, Trans.). New York: The MacMillan Company.
- Wright, R.H. (1977). Odor and molecular vibration: neural coding of olfactory information. *J Theor Biol*, 64, 473-502.
- Wysocki, C. J., Dorries, K. M., & Beauchamp, G. K. (1989). Ability to perceive androstenone can be acquired by ostensibly anosmic people. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 86(20), 7976-7978.
- Zatorre, R.J., Jones-Gotman, M., Evans, A.C. & Meyer, E. (1992). Functional localization and lateralization of human olfactory cortex. *Nature*, 360, 339-340.
- Zelano, C., Mainland, J., Johnson, B., Bensafi, M., Porter, J., Telles, C., et al. (2005). Olfactory working-memory in primary olfactory cortex, *Achems 2005*. Sarasota, FL.
- Zhao, H., Ivic, L., Otaki, J.M., Hashimoto, M., Mikoshiba, K. & Firestein, S. (1998). Functional expression of a mammalian odorant receptor. *Science*, 279, 237-242.
- Zwaardemaker, H. (1925). *L'odorat*. Librairie Octave. 305 p.