



HAL
open science

Contribution à l'intégration et à l'évaluation du retour olfactif en environnement virtuel

Angèle Tijou

► **To cite this version:**

Angèle Tijou. Contribution à l'intégration et à l'évaluation du retour olfactif en environnement virtuel. Informatique [cs]. Université d'Angers, 2007. Français. NNT : . tel-00345854

HAL Id: tel-00345854

<https://theses.hal.science/tel-00345854v1>

Submitted on 17 Dec 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONTRIBUTION A L'INTEGRATION ET A L'EVALUATION DU RETOUR OLFACTIF EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Automatique et informatique appliquée

ECOLE DOCTORALE D'ANGERS

Présentée et soutenue publiquement

Le : 28 Juin

à : Angers

par : Angèle TIJOU

Devant le jury ci-dessous :

Jean-Charles CADIOU, rapporteur, Professeur, Université de Nantes
Sabine COQUILLART, rapporteur, Directeur de recherches, INRIA
Philippe ALLAIN, examinateur, Maître de conférences, Université d'Angers
Guillaume MOREAU, examinateur, Maître de conférences, Ecole Centrale de Nantes

Directeur de thèse : Jean-Louis FERRIER, Professeur, Université d'Angers
Co-encadrant : Paul RICHARD, Maître de conférences, Université d'Angers

LABORATOIRE D'INGÉNIERIE DES SYSTÈMES AUTOMATISÉS - EA 4014.
62, avenue Notre Dame du Lac, F-49000 ANGERS

Remerciements

Le travail présenté dans ce document a été réalisé au Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés (LISA) de l'université d'Angers. J'adresse mes remerciements à Jean-Louis Ferrier, responsable de ce Laboratoire et Professeur à l'Université d'Angers, pour avoir bien voulu m'accueillir. Je le remercie également d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse.

Je remercie Paul Richard, Maître de Conférences à l'Université d'Angers pour avoir encadré mon travail de thèse pendant ces trois années.

Je tiens à remercier Sabine Coquillart et Jean-Charles Cadiou pour avoir accepté d'examiner mon travail en qualité de rapporteurs, ainsi que Philippe Allain et Guillaume Moreau pour avoir accepté de participer au jury.

Je remercie tous mes collègues du laboratoire notamment Mickaël, Solenna, Céline, Damien et Ludovic pour leur amitié pendant ces trois années de thèse ainsi que Franck pour son soutien technique et moral lors des expérimentations.

Je remercie tout particulièrement Emmanuelle Richard pour toute l'aide qu'elle m'a apportée lors des diverses rédactions.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à François-Xavier pour m'avoir fait profiter de son expérience et à Majid pour son amitié et son appui indéfectible pendant toute la durée de ma thèse.

Je voudrais par ailleurs remercier tous les sujets qui ont accepté de se prêter au jeu de l'expérimentation olfactive.

Enfin je voudrais remercier tous mes amis, spécialement Matthieu et Sarah qui ont gentiment participé à une expérience, toute ma famille et spécialement Jérôme pour m'avoir soutenue pendant ce long travail.

Qui maîtrisait les odeurs, maîtrisait le cœur de l'humanité.

Patrick Süskind "Le parfum"

Table des matières

Table des matières	1
Table des figures	5
Liste des tableaux	9
Introduction générale	11
1 Généralités sur l'olfaction	15
1.1 Histoire, influence et pouvoir des odeurs au cours du temps	15
1.2 Applications contemporaines	19
1.3 Le système olfactif humain	21
1.3.1 Anatomie et physiologie	21
1.3.2 Caractéristiques physicochimiques des molécules odorantes	23
1.4 Perception olfactive	24
1.4.1 Dimensions des odeurs	25
1.4.2 Seuils olfactifs	26
1.4.3 Autres grandeurs relatives à la caractérisation des odeurs	28
1.4.4 Classification des odeurs	29
1.5 Techniques et appareils de mesures	30
1.5.1 Olfactomètres	30
1.5.2 Nez électroniques	32
1.6 Facteurs influençant la perception olfactive	33
1.6.1 Facteurs physiologiques	34
1.6.2 Facteurs génétiques	35
1.6.3 Facteurs cognitifs, affectifs et émotionnels	35
1.6.4 Influence de l'apprentissage	36
1.6.5 Facteurs environnementaux	36
1.7 Influence des odeurs sur les aspects physiologiques, cognitifs et émotionnels . .	37
1.7.1 Aspects physiologiques	37
1.7.2 Aspects cognitifs	37
1.7.3 Aspects émotionnels	38
1.7.4 Mémoire	39

Conclusion	41
2 Réalité virtuelle et olfaction	43
2.1 Historique et fondements de la réalité virtuelle	44
2.1.1 Historique de la RV	44
2.1.2 Structure et classification des systèmes de RV	47
2.1.3 Les notions de "présence" et "d'immersion" en RV	54
2.2 L'olfaction en réalité virtuelle	59
2.2.1 Apports du retour olfactif dans les environnements virtuels	59
2.2.2 État de l'art des applications de RV intégrant le retour olfactif	61
2.2.3 Les interfaces olfactives	64
Conclusion	71
3 Méthodologie d'intégration de la composante olfactive dans les EVs	75
3.1 Taxonomie d'intégration des diffuseurs olfactifs	76
3.1.1 Classification ergonomique des diffuseurs olfactifs	76
3.1.2 Taxonomie des techniques d'interaction	79
3.1.3 Choix du diffuseur olfactif en fonction du nombre d'utilisateurs	86
3.1.4 Compatibilité des diffuseurs olfactifs en fonction du dispositif de visualisation	87
3.2 Caractérisation d'un diffuseur olfactif	89
3.2.1 Problèmes et enjeux liés à l'intégration du retour olfactif	89
3.2.2 Expérimentations de caractérisation	90
3.3 Utilisation de la méthodologie d'intégration pour le m@d sur la plate-forme PREWISE	119
3.3.1 Choix du diffuseur	119
3.3.2 Caractérisation du diffuseur	121
Conclusion	122
4 Evaluation de la composante olfactive	125
4.1 Justification des expérimentations	125
4.2 Expérimentation 1 : ville virtuelle	126
4.2.1 Objectif	126
4.2.2 Matériel	127
4.2.3 Environnement virtuel	127
4.2.4 Fonctionnement de l'application	129
4.2.5 Protocole	131

4.2.6	Questionnaire	132
4.2.7	Résultats	134
4.2.8	Discussion	139
4.3	Expérimentation 2 : cuisine virtuelle	140
4.3.1	Objectif	140
4.3.2	Matériel	140
4.3.3	Environnement virtuel	141
4.3.4	Fonctionnement de l'application	141
4.3.5	Résultats	145
4.4	Expérimentation 3 : Supermarché virtuel	151
4.4.1	Objectif	152
4.4.2	Matériel	152
4.4.3	Environnement virtuel	153
4.4.4	Protocole	153
4.4.5	Questionnaires	155
4.4.6	Résultats	156
	Conclusion	163
	Conclusion et perspectives	167
	Bibliographie	171
	ANNEXES	181
A	Questionnaires	185
A.1	Questionnaire pour l'expérience de localisation	185
A.1.1	Identité	185
A.1.2	Prédispositions	185
A.1.3	Expérience	185
A.2	Questionnaire pour l'expérience de cartographie	186
A.2.1	Identité	186
A.2.2	Prédispositions	186
A.2.3	Expérience	186
A.3	Questionnaire pour l'expérience de saturation	187
A.3.1	Identité	187
A.3.2	Prédispositions	187

A.3.3	Expérience	187
A.4	Questionnaire pour l'expérience de persistance	188
A.4.1	Identité	188
A.4.2	Prédispositions	188
A.4.3	Expérience	188
A.5	Questionnaire pour l'expérience sur la ville virtuelle	189
A.5.1	Prédispositions	189
A.5.2	Mémoire - partie 1	189
A.5.3	Présence	189
A.5.4	Mémoire - partie 2	189
A.6	Questionnaire pour l'expérience sur la cuisine virtuelle	191
A.6.1	Prédispositions	191
A.6.2	Mémoire	191
A.6.3	Présence	192
A.7	Questionnaire pour l'expérience du supermarché virtuel	193
A.7.1	Prédispositions	193
A.7.2	Expérience	193
A.7.3	Mémoire	193
A.7.4	Présence	194
B	Méthodes statistiques	195
B.1	ANOVA	195
B.1.1	Description de la méthode	195
B.1.2	Les effets croisés	197
B.2	Scheffé	197

Table des figures

1.1	Voies olfactives [23]	22
1.2	Épithélium olfactif	23
1.3	Organisation du système olfactif [23]	24
1.4	Résultats possibles pour des mélanges de deux composés lx et ly [109]	25
1.5	Loi de puissance de Stevens des odeurs : $\text{Log } I = f [C]$	27
1.6	Exemples de composés possédant des structures proches et des propriétés olfactives différentes d'après F. Davide et <i>al.</i> [40]	30
1.7	Exemples d'énantiomères ayant des odeurs différentes d'après F. Davide et <i>al.</i> [40]	31
2.1	Sensorama	45
2.2	Le BOOM (Binocular Omni-Orientation Monitor)[16]	46
2.3	Structure d'un système de RV	48
2.4	Le cube AIP ("Autonomie"- "Interaction"- "Presence") [158]	49
2.5	Diverses interfaces de locomotion	51
3.1	Classification ergonomique des diffuseurs olfactifs	77
3.2	Taxonomie des techniques de sélection proposée par D.A. Bowman [22] ; intégration de la composante olfactive dans la partie "retour sensoriel"	81
3.3	Compatibilité des diffuseurs selon la technique de manipulation (isométrique ou isotonique)	82
3.4	Taxonomie pour la locomotion proposée par L. Arns et <i>al.</i> [7]	84
3.5	Compatibilité des diffuseurs avec la technique de locomotion mise en oeuvre (réelle ou virtuelle)	84
3.6	Classification des techniques utilisées pour le contrôle d'application selon D.A. Bowman et <i>al.</i> [22]	85
3.7	Compatibilité des diffuseurs olfactifs en fonction du nombre d'utilisateurs	86
3.8	Interfaces visuelles	87
3.9	Compatibilité des diffuseur olfactifs en fonction du dispositif de visualisation	88
3.10	Analogie avec le traitement du signal: Émetteur - Canal de transmission - Récepteur	91
3.11	Exemple d'un lobe d'antenne	92

3.12	Schématisation de l'emplacement des sujets	94
3.13	Evolution des <i>temps de détection</i> par catégorie d'emplacements pour la vitesse V1	96
3.14	Evolution des <i>temps de détection</i> par catégorie d'emplacements pour la vitesse V2	96
3.15	Moyennes et écarts-types des <i>temps de détection</i> en fonction de la vitesse de rotation des ventilateurs	98
3.16	Emplacement des diffuseurs autour du sujet (D1: Diffuseur droit ; D2: Diffuseur avant; D3: Diffuseur gauche et D4: Diffuseur arrière	100
3.17	Moyennes et écarts-types des <i>temps de détection</i> en fonction de l'emplacement des diffuseurs	102
3.18	Points cumulés en fonction de l'emplacement des diffuseurs	103
3.19	Moyennes et écarts-types des <i>temps de persistance</i> en fonction de l'emplacement des diffuseurs	104
3.20	Représentation schématique d'une session du protocole d'expérimentation . . .	107
3.21	Moyennes et écarts-types des <i>temps de détection</i> en fonction de la vitesse de ventilation (V1 = 500 tr.min ⁻¹ ; V2 = 1000 tr.min ⁻¹ ; V3 = 1500 tr.min ⁻¹) . . .	108
3.22	Moyennes et écarts-types des <i>temps de détection</i> en fonction de la nature de l'odeur (O1 caramel ; O2 parfum floral ; O3 prune ; O4 terre mouillée)	109
3.23	Moyennes et écarts-types des <i>temps de saturation</i> en fonction de la vitesse de ventilation (V1 = 500 tr.min ⁻¹ ; V2 = 1000 tr.min ⁻¹ ; V3 = 1500 tr.min ⁻¹) . . .	109
3.24	Moyennes et écarts-types des <i>temps de saturation</i> en fonction de la nature de l'odeur (O1 caramel ; O2 parfum floral ; O3 prune ; O4 terre mouillée)	110
3.25	Représentation schématique de la configuration expérimentale	112
3.26	Représentation schématique du protocole	113
3.27	Choix du diffuseur selon la locomotion dans les applications	120
3.28	Choix du diffuseur selon le nombre d'utilisateurs	120
3.29	Choix du diffuseur selon le dispositif de visualisation	120
4.1	Image de la ville virtuelle	128
4.2	Vue de dessus de la ville virtuelle	128
4.3	Schéma de pilotage du point de vue basé sur l'utilisation d'une souris	129
4.4	Algorithme d'indication et d'enregistrement du parcours	130
4.5	Intersection : une flèche rouge indique la direction à prendre.	131
4.6	Configuration expérimentale	132
4.7	Emplacements du parcours associés aux différentes odeurs	133

4.8	Réponses aux questions en image	138
4.9	Capture d'écran de la cuisine virtuelle	141
4.10	Configuration expérimentale pour l'expérience de la cuisine virtuelle	142
4.11	Objets virtuels associés aux différentes odeurs	143
4.12	Objet en rotation devant le sujet	144
4.13	Interface de locomotion : mini-stepper	152
4.14	Vue d'ensemble du supermarché	153
4.15	Vues des rayons olfactorisés du supermarché	154
4.16	Vues du supermarché	154
4.17	Configuration expérimentale	155
A.1	Schéma de la cuisine	191

Liste des tableaux

2.1	Quelques exemples d'interfaces visuelles immersives	53
2.2	Quelques exemples d'interfaces haptiques ou pseudo-haptiques	55
2.3	Deux applications de RV dédiées au domaine des jeux/divertissements: "DIODE" [61] et "FRAGRA" [146]	62
2.4	Quelques dispositifs odorants commerciaux et prototypes académiques	72
3.1	Diffuseurs olfactifs classés selon les catégories de la fig. 3.1 (R: référentiel fixe du monde réel et R' référentiel lié à l'utilisateur)	78
3.2	Correspondance entre les classifications des interfaces haptiques et des inter- faces olfactives	80
3.3	Répartition des deux vitesses de ventilation selon les sessions d'expérimenta- tion (V1: vitesse de rotation 1; V2: vitesse de rotation 2	95
3.4	Ordre d'utilisation des diffuseurs pour chaque groupe de sujet	101
3.5	Tableau regroupant les huit conditions relatives à une session d'expérimentation	113
3.6	Ordre des diffusions selon les groupes	113
3.7	Moyennes et écarts-types des <i>temps de détection</i> en fonction de la nature de l'odeur et des vitesses de ventilation (V1 = 500 tr.min ⁻¹ et V2 = 1500 tr.min ⁻¹)	115
3.8	Moyennes et écarts-types des <i>temps de persistance</i> en fonction de la nature de l'odeur et des vitesses de ventilation (V1 = 500 tr.min ⁻¹ et V2 = 1500 tr.min ⁻¹)	116
3.9	Moyennes et écarts-types des <i>temps de persistance</i> en fonction de la nature de l'odeur et des durées de ventilation	116
3.10	Répartition des sujets selon le nombre d'odeurs senties	117
3.11	Répartition des sujets selon les odeurs senties	117
3.12	Répartition des sujets selon les odeurs senties autre que vanille	117
4.1	Tableau récapitulatif des moyennes concernant la présence	134
4.2	Temps moyen de réalisation de la tâche	135
4.3	Informations restituées par les sujets concernant la question 1	136
4.4	Informations restituées par les sujets concernant la question 2	137
4.5	Questions sur la mémoire	138
4.6	Moyennes des points obtenus par les sujets aux questions 8 à 15	139
4.7	Noms des objets placés dans la cuisine avec leur éventuelle odeur associée. . .	143
4.8	Moyennes et écarts-types des résultats relatifs aux questions sur la présence . .	145

4.9	Moyennes et écarts-types pour les quatre configurations	146
4.10	Tableaux de résultats relatif à la mémoire	146
4.11	Nombre de sujets ayant mémorisé l'emplacement des objets listés	147
4.12	Nombre de sujets par groupe ayant mémorisé l'emplacement des objets listés. .	147
4.13	Résultats statistiques pour les huit objets	148
4.14	Réponses des sujets à la question III, triées par groupe	149
4.15	Pourcentages de bonnes réponses aux questions 4,5 6 et 7	149
4.16	Pourcentage des objets qui ont le plus marqué	150
4.17	Résultats de la question subsidiaire par configuration	150
4.18	Moyennes des résultats aux questions de présence par rapport aux groupes . . .	156
4.19	Moyennes des résultats aux questions de présence par rapport à l'expérience du sujet en RV	157
4.20	Répartition des sujets par estimation de temps	157
4.21	Répartition des sujets par écart d'estimation de temps	158
4.22	Récapitulatif des objets et du nombre de sujets avec réponse juste	158
4.23	Nombre de sujets ayant donné les bonnes réponses aux questions 2, 3, 4 et 5 . .	159
4.24	Réponses compilées aux question 2, 3, 4 et 5	160
4.25	Moyennes par objet et par groupe pour la question VI avec la quantification des détails	161
4.26	Moyennes par objet et par groupe pour la question VII	162
4.27	Moyennes par objet et par groupe pour la question VII avec la quantification des détails	163

Introduction générale

Le sens olfactif a commencé à évoluer plus tôt que les autres sens, il y a 500 millions d'années [43]. Il n'est donc pas étonnant que toutes les organisations animales, des procaryotes aux mammifères, en passant par les nématodes et les insectes, possèdent un système olfactif.

Les recherches sur l'olfaction se sont développées plus tardivement que les recherches sur la vision et l'audition, modalités sensorielles plus cruciales pour l'interaction entre l'homme et son environnement naturel. La première raison est que l'odorat a souvent été considéré comme un sens mineur, ramenant l'Homme à son animalité. La deuxième raison relève de l'anatomie. Les organes récepteurs de la vue et de l'ouïe sont beaucoup plus facilement identifiables et accessibles à l'investigation anatomique que ne l'est la muqueuse olfactive. La troisième raison, et peut-être la plus importante, tient à la nature chimique des stimuli. Ainsi, la lumière et le son, en tant que phénomènes vibratoires, se laissent facilement décrire et caractériser par des grandeurs physiques simples (fréquence, intensité et polarisation). Il n'en est pas de même d'un effluve odorant qui peut être constitué d'un grand nombre de substances chimiques à des concentrations parfois extrêmement faibles [97].

Depuis une quinzaine d'années, l'étude de l'olfaction a connu un regain d'intérêt considérable. En effet, la publication en 1991 par Buck et Axel [25] concernant la découverte d'une famille des gènes qui codent pour les récepteurs olfactifs a ouvert la voie à de nombreux travaux abordant l'olfaction par des approches très diversifiées (biochimie, génétique, neurophysiologie, neurosciences cognitives, etc.) [72], [74], [41], [152].

L'olfaction a été exploitée en réalité virtuelle beaucoup plus tardivement que les autres modalités sensorielles [47]. Ainsi, l'intégration de la composante olfactive et son intérêt ont été analysés pour la première fois en 1996 par Barfield et Danas [10]. Par la suite, différentes études ont montré que l'utilisation d'indices olfactifs permettait d'augmenter la sensation de présence [44], d'engendrer des états émotionnels forts, et d'influencer la perception spatiale [14].

Depuis une dizaine d'années, la composante olfactive a été utilisée, principalement au Japon, aux États-Unis et au Royaume-Uni, dans divers domaines d'applications de réalité virtuelle comme la formation professionnelle [28], la télé-chirurgie ou encore l'éducation [116], [51].

Parallèlement, un certain nombre d'entreprises impliquées dans la conception et la production de dispositifs odorants sont arrivées sur le marché [105], [148], [113]. En outre, quelques prototypes ont été développés dans le contexte de la recherche en réalité virtuelle [108], [155], [84].

Cependant, en ce qui concerne l'utilisation des interfaces olfactives en réalité virtuelle, encore peu de retour d'expériences sont disponibles et aucune taxonomie ou méthodologie d'intégration de la composante olfactive dans les environnements virtuels n'a été proposée jusqu'ici.

L'objectif de ce travail est de contribuer à l'intégration et à l'évaluation de la composante olfactive dans des environnements virtuels.

Nous proposons donc d'une part de déterminer des critères de classification des différents dispositifs odorants disponibles sur le marché ou à l'état de prototypes dans des laboratoires de recherche. Puis à partir d'une analyse des différentes taxonomies existantes, relatives aux techniques d'interaction, aux interfaces visuelles et de navigation, proposées par D. A. Bowman *et al.* [22] et par L. Arns et C. Cruz-Neira [7] de proposer une taxonomie relative à l'intégration efficace du retour olfactif dans des environnements virtuels, en termes de sensation de présence et d'immersion, caractéristiques qualitatives essentielles d'un système de réalité virtuelle.

L'intégration du retour olfactif dans les environnements virtuels pose un certain nombre de problématiques : conception, intégration et pilotage des systèmes de diffusion, stockage des odeurs, détermination des seuils olfactifs, influence des paramètres extérieurs, etc. Ces considérations ne sont pas obsolètes et la conception de chaque nouvel environnement virtuel olfactif ainsi que l'intégration des diffuseurs doivent tenir compte d'un certain nombre de paramètres tels que la concentration de l'odeur dans la phase de stockage, la durée de diffusion ou de ventilation, la fréquence et le débit de libération des molécules, etc.

Le choix des dispositifs odorants de la plate-forme PREWISE (Plate-forme de Réalité Virtuelle pour la Simulation et l'Expérimentation) du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés (LISA) permet des expérimentations visant l'évaluation de la performance, du comportement humain et l'influence du retour olfactif sur la présence, l'immersion et la mémorisation d'objets.

Nous proposons de concevoir des environnements virtuels originaux dédiés à ces évaluations expérimentales et utilisant le diffuseur choisi par la méthode précédemment définie.

La première partie de ce mémoire est consacrée à l'olfaction. Après une succincte présentation de l'évolution de l'utilisation des odeurs au cours du temps, l'anatomie et la physiologie humaine de la perception olfactive sont décrites et permettent d'aborder les aspects relatifs aux deux principales fonctions : la discrimination et l'identification des signaux olfactifs. Les appareils pouvant mesurer ces deux valeurs sont présentés. Puis les divers facteurs influençant la perception olfactive sont énoncés. Enfin, un état de l'art mettant en lumière l'influence des odeurs sur les aspects physiologiques, cognitifs et émotionnels est présenté.

Nous consacrons le deuxième chapitre de ce mémoire à l'utilisation des odeurs en réalité virtuelle. A l'intersection du monde de l'olfaction et de celui de la réalité virtuelle, il existe deux grandes voies de recherche et de développement concernant d'une part le développement de dispositifs odorants et leur intégration dans les applications multi-sensorielles et d'autre part, l'utilisation du retour olfactif pour l'évaluation de la performance humaine lors de tâches de mémorisation, d'apprentissage, etc. Un état de l'art relatif à ces aspects d'intégration et d'évaluation de l'influence du retour olfactif est proposé. En particulier, nous nous intéressons aux différents dispositifs de diffusion d'odeur commercialisés ou à l'état de prototypes de laboratoires ainsi qu'aux différentes technologies de diffusion et de dispersion des odeurs.

Nous proposons, dans la troisième partie de ce document, une classification des différents systèmes de diffusion d'odeurs en relation avec d'autres types d'interfaces et techniques d'interaction. A partir d'une analyse des différentes taxonomies, relatives aux techniques d'interaction, aux interfaces visuelles et de navigation, proposées par D. A. Bowman et *al.* [22] et par L. Arns et C. Cruz-Neira [7], une méthodologie conduisant à une intégration efficace de la composante olfactive en réalité virtuelle est proposée.

Nous proposons également un ensemble d'expériences visant à déterminer les paramètres influençables et ainsi, de caractériser un diffuseur avant son intégration dans une application de réalité virtuelle. Ce chapitre présente une application de ces méthodes pour l'intégration d'un diffuseur sur la plate-forme PREWISE du LISA [81].

Enfin, le dernier chapitre présente trois expérimentations qui ont pour objectif d'évaluer l'influence du retour olfactif sur la performance et le comportement de sujets sains. Les deux effets étudiés portent sur la mémorisation d'objets ou d'événements et la sensation de présence. Les environnements virtuels utilisés sont : un environnement urbain dans lequel les sujets se déplacent à l'aide d'une souris classique ou d'un volant à retour d'effort, une cuisine dans laquelle les sujets doivent identifier des objets disposés dans et en dehors des placards et un supermarché dans lequel les sujets se déplacent à l'aide d'une technique d'interaction basée sur le schème de la marche à pied.

CHAPITRE 1

Généralités sur l'olfaction

Introduction

Ce chapitre est consacré à un état de l'art succinct sur l'olfaction.

Le sens olfactif est encore très peu considéré dans notre culture actuelle. Il est souvent assimilé à un sens rustique, qui ramène l'homme à un statut animal. Jadis, l'environnement olfactif naturel était beaucoup plus dense. Actuellement, beaucoup de produits sont utilisés pour détruire ou camoufler les mauvaises odeurs, d'autres constituent une valeur ajoutée dans le cadre du marketing sensoriel (odorisation artificielle de rayons ou d'articles commerciaux).

Dans une première partie de ce chapitre, nous présentons un aperçu de l'histoire, de l'influence et du pouvoir des odeurs au cours du temps ainsi que les applications d'aujourd'hui.

L'odeur n'est pas un stimulus mais une réponse perceptive. Comme pour la profondeur ou la couleur, l'odeur et le goût sont une construction du cerveau, une "réalité tout à fait virtuelle". L'odorat est influencé par des facteurs cognitifs et affectifs complexes, comme c'est le cas pour l'appréciation esthétique, visuelle et auditive, ainsi, dans une seconde partie, le système olfactif humain est décrit d'un point de vue anatomique et physiologique ainsi que les principales caractéristiques olfactives propres à l'homme.

La troisième partie de ce chapitre est consacrée à la perception olfactive et en particulier aux dimensions des odeurs, aux appareils de mesure des odeurs ainsi qu'aux divers facteurs influençant la perception des odeurs.

La quatrième partie est dédiée à l'influence des odeurs sur la performance humaine, les émotions et la mémoire.

1.1 Histoire, influence et pouvoir des odeurs au cours du temps

Depuis l'Antiquité, les parfumeurs, comme les cuisiniers, ont développé leur art sans attendre l'avènement de la chimie moderne, de la physiologie, de la psychologie et autres sciences

cognitives et sociales, toutes sciences qui concourent aujourd'hui à l'étude des sens chimiques. La longue histoire des odeurs de l'Antiquité à nos jours illustre leur puissance symbolique dans les mythes et religions, les immenses pouvoirs de vie et de mort qui leur furent attribués par la médecine, ainsi que leur rapport étroit avec la séduction et la sexualité.

Chasse et pêche

Dès la préhistoire, l'odorat est utilisé pour la chasse et la pêche. L'odeur de l'animal guidait le chasseur, puis le chien a été utilisé car son odorat est plus développé que celui de l'homme. Par la suite, la création de pièges a entraîné la recherche d'appâts : le fumet d'une nourriture appétissante pour l'animal l'attirait vers le piège. Le camouflage de l'odeur du chasseur par une odeur animale est également un moyen d'utilisation de l'olfaction pour la chasse. Cette technique est encore utilisée par certaines tribus d'Afrique pour approcher les animaux.

Pour la pêche, à Nauru, en Polynésie, les pêcheurs utilisent des odeurs pour apprêts [68]. Selon l'odeur utilisée, ce ne sera pas le même poisson qui sera pêché. Ils utilisent, de la même façon, certains produits pour odoriser leurs nasses définitivement.

Magie et sorcellerie

Les odeurs ont longtemps été considérées comme mystérieuses et étaient associées aux rites magiques et de sorcellerie. Dans l'Antiquité, les sorcières étaient toujours décrites avec de l'encens ou des fumets odorants, des odeurs nauséabondes émanaient toujours de leurs potions. Au temps de l'Inquisition, ces odeurs désagréables avaient un caractère satanique. Le souffle des sorcières était fétide, un prêtre fût exécuté car une odeur de rose muscade émanait de lui, ce qui aurait entraîné la possession par le diable des religieuses qui le côtoyaient [68].

Religions et civilisations

Dans de nombreuses civilisations, les odeurs étaient associées à la notion divine : elles constituaient une offrande aux dieux et un moyen de dialoguer avec eux [55]. Le côté mystérieux des odeurs fût fortement exploité par les religions. Ainsi, la connaissance et la maîtrise des odeurs donnaient beaucoup de pouvoir aux prêtres.

Il y a 3500 ans, les Égyptiens furent les premiers à utiliser les parfums [99]. Ceux-ci provenaient de lieux secrets. Aujourd'hui, il existe toujours un mystère sur la provenance des gommes utilisées lors des fêtes religieuses par les Égyptiens. Ils utilisaient des fumigations odorantes pour accéder à la parole divine. Chez les Indiens, l'utilisation de fumées parfumées était également très courante lors des cérémonies religieuses.

Aujourd'hui encore, les odeurs sont très prisées par les religions. Dans les messes catholiques ainsi que dans les temples bouddhistes, l'encens est toujours utilisé. Dans la religion musulmane les odeurs ont aussi une place importante, cela est dû en particulier à Mahomet, originaire de la Mecque, pôle important en matière d'aromates.

De même, dans de nombreuses civilisations, les odeurs sont associées aux événements majeurs de la vie : lors des naissances, en Chine, il est courant de déposer des sachets parfumés près de l'enfant. En Afrique, pour concilier les esprits pour la future union, les mariées se parfument la chevelure et portent des colliers odorants.

Séduction et sexualité

Depuis l'Antiquité, la séduction passe par le sens olfactif. Circé, pour attirer Ulysse, avait créé un philtre d'amour. De même, le parfum d'Hélène de Troie était célèbre et rendait tous les hommes fous.

Au Moyen-Âge, l'utilisation de philtres odorants pour séduire était très répandue. Aujourd'hui, les chercheurs ont démontré que les phéromones, qui sont des substances émises par la plupart des animaux, agissent comme des messagers sur des individus de la même espèce et sont responsables de l'attirance sexuelle. Ces nouvelles connaissances ont permis de créer les filtres d'amour modernes : des parfums réservés aux hommes ou aux femmes pour attirer l'autre sexe [115].

Reconnaissance et discrimination

Chez les animaux, l'olfaction est utilisée pour se reconnaître. Chez les insectes, les phéromones (sexuelles, grégaires, etc.) jouent un rôle dans le comportement sexuel et la vie sociale. Des études ont montré que les nouveaux nés des mammifères reconnaissent l'odeur de leur mère, y compris chez les humains.

Certains groupes humains (les Esquimaux, les Samoans) privilégient l'odorat : par exemple pour se dire bonjour, ils se frottent le nez ou se reniflent le visage [68].

Si les odeurs permettent une reconnaissance de l'autre, elles permettent aussi la discrimination. Cette discrimination peut être sociale : les artisans effectuant un travail odorant comme les tanneurs ou les corroyeurs ne sont pas fréquentés par les autres artisans. De même, sous l'ancien régime, les ouvriers et les nobles ne se mélangent pas, les uns sentent la sueur, les autres, les parfums coûteux. La discrimination peut également être raciale : au temps de la première guerre mondiale, le juif sentait l'ail, l'allemand puait, le nazi sentait le sang [68]. Au Moyen-Âge, on considérait les non-chrétiens malodorants, jusqu'à ce qu'ils se convertissent.

De nos jours, des expressions comme "ne pas pouvoir sentir quelqu'un" ou "avoir quelqu'un dans le nez" sont toujours utilisées pour désigner quelqu'un que l'on n'aime pas.

Médecine, santé et bien-être

Les odeurs ont d'abord été utilisées dans l'intention de cacher les effluves malodorantes. Dans les théâtres romains, des fontaines diffusaient des odeurs afin de masquer les odeurs désagréables de l'entraînement des gladiateurs (sang des animaux, chairs brûlées...) [86]. Dans l'Égypte ancienne, des parfums à base d'huiles, d'aromates et d'encens étaient utilisés pour l'embaumement des morts.

D'un point de vue de la santé, Hippocrate déjà assainissait l'air avec des plantes odorantes. A l'époque de la peste, les médecins pensaient que les mauvaises odeurs étaient responsables de l'épidémie. Dans un premier temps, ils ont organisé une vaste opération de nettoyage, puis voyant que l'épidémie continuait, ils ont tenté de remplacer les odeurs de la peste par des odeurs encore plus mauvaises [68].

De nos jours, les odeurs sont toujours utilisées pour soigner ou pour contribuer au bien-être. L'aromathérapie utilise, par application cutanée, inhalation ou ingestion, les vertus des huiles essentielles dans un but curatif ; l'aromachologie met en avant l'influence de ces mêmes odeurs mais pour le bien être. Des diffuseurs olfactifs sont commercialisés avec des odeurs qui influent sur l'environnement comme purifier une pièce, éliminer une odeur de tabac ou encore permettre une nuit tranquille.

J. Tillotson a fait des recherches sur l'intégration des odeurs dans des vêtements dans un but médical [87]. Les odeurs sont utilisées pour soigner les personnes qui portent ces vêtements par aromathérapie.

Littérature

L'olfaction n'a pas été un sens oublié dans la littérature : Victor Hugo, Honoré de Balzac et Emile Zola décrivaient des paysages olfactifs. Marcel Proust dans son roman "Du côté de chez Swann" évoquait des souvenirs d'enfance à partir de l'odeur d'une madeleine. Ceci a donné son nom au syndrome Proustien (voir paragraphe 1.7.4). Dans "Brave new world" (Le meilleur des mondes, 1932) d'Aldous Huxley, l'auteur nous parle de cinéma odorant. Nous pouvons également trouver un livre entièrement consacré à l'odeur, "Das Parfum, Die Geschichte eines Mörders" (Le parfum, 1997) de Patrick Süskind où le héros est un exceptionnel parfumeur qui peut faire ce qu'il veut des gens grâce aux odeurs. Il existe également plusieurs romans policiers qui font état d'un parfum : parfum souvenir dans "Le parfum de la dame en noir" de

Gaston Leroux ou parfum dangereux dans "Le parfum qui endort" de Marcelle-Renée Noll.

Philosophie

Si l'odeur a souvent été un sens oublié, cela est dû en partie aux philosophes. L'Homme communique d'abord par la parole et par le signe. L'odorat a été considéré comme un sens mineur, ramenant l'Homme à son animalité. L'olfaction étant un sens nettement moins développé chez l'humain que chez les animaux, Aristote et Platon l'ont qualifié de médiocre et ne s'y sont pas intéressés. De plus, dans le langage grec, le vocabulaire manquait pour parler des odeurs et le verbe puer n'existait pas [55]. Pourtant, le premier traité concernant les odeurs fut écrit par Théophraste [151], philosophe grec et élève de Platon et d'Aristote.

Par le lien entre l'olfaction et l'affectivité, l'odorat fût défini comme un sens impur, qui entraînait la luxure et la gourmandise. La partie du cerveau consacrée à l'olfaction par rapport à celles des autres fonctions sensorielles est beaucoup plus petite. De plus, elle a diminué au cours de l'évolution de l'homme. Freud en a conclu que l'homme est devenu un être social en refoulant son odorat.

La faible mobilisation scientifique entourant le domaine de l'olfaction au cours du XX^{ème} siècle était sans doute en partie due à la vision négative des philosophes sur le sens de l'odorat.

1.2 Applications contemporaines

Arts, culture et multi-média

Au cours du XX^{ème} siècle, de nombreuses expériences odorantes ont été réalisées dans le domaine des arts et de la culture : musée, théâtre, cinéma, etc. Pour favoriser l'attention et l'immersion du public, des odeurs sont diffusées et dispersées dans le lieu du spectacle.

Certains musées proposent des expositions odorantes, tels que le Jorvik Viking Museum à York (Angleterre) et le Wine and Spirits Museum à Stockholm (Suède) [86].

En 1985, pendant l'exécution du ballet "Baseball", des odeurs d'oignons frits et de marijuana furent diffusées. De même, en 1988, l'opéra "Love for three oranges" utilisait des cartes "scratch n'sniff"¹ pour transmettre des odeurs. La BBC a réutilisé ces cartes pour en faire une retransmission télévisuelle.

Plusieurs expériences odorantes ont été réalisées dans différentes salles de cinéma. En 1906, pour le film "Rose Bowl Football Game", un cinéma de Pennsylvanie a rajouté une odeur de

¹voir paragraphe 2.2.3.1 p.64

rose à une scène du film. En 1960 est apparu le système smell-O-Vision qui diffusait des odeurs directement à partir de chaque siège. Pendant la projection du film "Scent of Mystery" des odeurs étaient diffusées en utilisant ce système. Ces odeurs prodiguaient des indices quant à l'identité du meurtrier.

En 1981, le film "Polyester" était odorant et les spectateurs utilisaient le système de cartes "scratch n'sniff". Cette technique a été reprise en 1999 pour une édition spéciale de la série "Cow and chicken".

Plus récemment, en 2005, plusieurs cinémas au Japon ont diffusé des odeurs de chocolat dans les salles de cinéma, lors de la projection du film "Charlie et la chocolaterie" de Tim Burton. En 2006, les spectateurs japonais ont pu assister au film "The New World" avec une diffusion olfactive synchronisée. Le système a été créé par NTT Communications et permet de reconstituer six parfums, diffusés en fonction des scènes du film par des appareils situés dans certains sièges [104].

Des chercheurs de l'université de Huelva, en Espagne, travaillent depuis deux ans à la mise au point d'un langage informatique qui permet de transmettre les odeurs par Internet. Ils ont créé le langage XML Smell qui permettra aux utilisateurs de recevoir des odeurs par l'intermédiaire d'un réseau (pages web, courrier électronique et autres outils d'Internet). La difficulté du projet réside dans la codification des odeurs. Une base de données étant en cours d'élaboration, les chercheurs développent actuellement un éventail d'une trentaine d'odeurs [94].

Défense et armée

L'armée américaine travaille depuis longtemps sur des projets militaires incluant les odeurs. Ainsi en 2003, le Natick Soldier Center cherchait à rendre les rations militaires plus agréables en y introduisant une odeur attirante [126]. Le centre espère également que l'introduction d'odeurs adaptées, dans la nourriture du soldat, permettra d'augmenter son sens d'alerte et son agressivité.

Un autre projet consiste à développer une nouvelle génération de bombes : il s'agirait de bombes puantes qui permettraient de ne pas tuer mais seulement d'immobiliser [85]. Jusqu'à présent le projet n'a pas abouti car il s'oppose au phénomène humain d'adaptation à une odeur.

Plus récemment, en 2005, l'University of Southern California à Los Angeles travaille sur un projet visant à générer des codes odorants. Les liens entre odeur et émotion seraient utilisés pour former les soldats à une action programmée en réponse à une odeur spécifique [57].

Marketing sensoriel

Le marketing sensoriel fait partie intégrante du marketing depuis longtemps. Le principe est basé sur la valorisation d'un ou plusieurs des cinq sens qui permettrait aux entreprises de favoriser l'achat d'un produit tout en respectant les attentes du consommateur.

L'objectif est de renforcer l'identité du produit, augmenter sa notoriété et finalement sa perception en magasin. De nombreux secteurs d'activité comme le textile, l'automobile, les cosmétiques, cherchent à satisfaire leurs cibles par des mises en situation offrant des parfums subtils et des touchers agréables.

Depuis plusieurs années Peugeot essaye de reproduire "l'odeur du neuf" dans ses voitures. Le sens olfactif constitue l'un des premiers contacts avec une voiture. Actuellement, la SNCF consacre une partie de sa recherche sur le confort olfactif du passager [66].

Sur Internet, un blog archive de nombreux articles sur des produits olfactifs : timbres odorants en Australie, diffuseurs d'odeurs USB ou encore lecteurs mp3 avec odeur de citron ou de fraise [39].

1.3 Le système olfactif humain

1.3.1 Anatomie et physiologie

Chez les vertébrés, deux régions sensorielles distinctes assurent la perception olfactive : la muqueuse olfactive et l'organe voméronasal. Cependant, les signaux chimiques qu'ils perçoivent et les protéines impliquées dans la réception et la transduction du signal sont différents. En premier lieu, le nez assure la canalisation de l'air et donc l'entrée des molécules odorantes. Le flux d'air est dirigé vers le fond de la cavité nasale grâce aux courbes du nez. Un faible pourcentage de l'air passe à l'étape suivante. Lors d'une inspiration normale, 7% des molécules vont sur la muqueuse, tandis qu'avec des inspirations brèves et rapides (flairage) il y en a 30% [59].

La muqueuse olfactive, siège de la perception des molécules odorantes, est localisée sur la région dorsale postérieure des fosses nasales. Sa surface se restreint à quelques unités de cm^2 mais, du fait de sa position et de l'architecture de la cavité nasale, qui canalise l'air vers cette zone, l'accès des molécules odorantes sur la muqueuse olfactive est optimal. La muqueuse olfactive comporte un mucus et deux couches de tissus, l'épithélium olfactif et la sous-muqueuse, séparés par une lame basale (lamina propria) (fig.1.1).

L'épithélium olfactif est composé de trois groupes de cellules : les neurones olfactifs (cel-

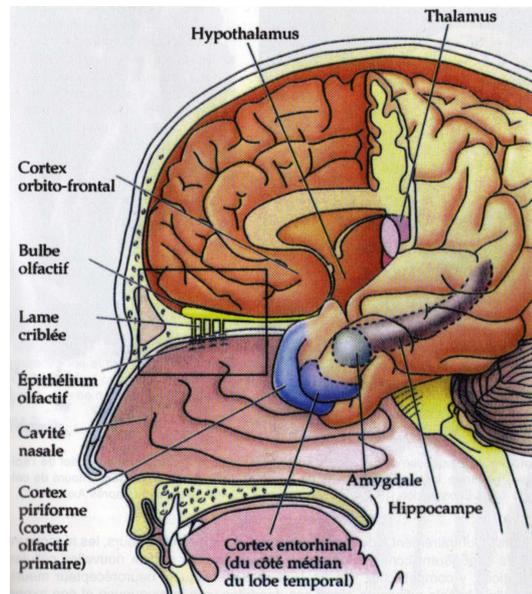


Figure 1.1 – Voies olfactives [23]

lules réceptrices), les cellules de soutien et les cellules souches qui régénèrent les neurones olfactifs. En effet ceux-ci dégèrent continuellement (durée de vie d'environ 30 jours) et sont donc remplacés perpétuellement par de nouvelles cellules réceptrices.

Les neurones sensoriels sont équipés de cils qui baignent dans une abondante couche de mucus. Celui-ci tapisse le plafond de la cavité nasale. Il est composé d'une base d'eau, de protéines et de sels. Des anticorps sont présents dans le mucus car certains virus utilisent la voie olfactive (fig.1.2).

Lorsque les molécules odorantes se lient aux chémorécepteurs (protéines réceptrices) situés sur les cils des neurones olfactifs, le signal chimique (molécule odorante) est transformé en signal électrique (potentiel d'action).

La membrane des cils olfactifs contient l'ensemble des éléments protéiques et canaux ioniques nécessaires pour déclencher le potentiel de récepteur. Si l'amplitude du potentiel de récepteur est suffisante, un potentiel d'action est généré. Les impulsions électriques, générées et amplifiées par les canaux ioniques, sont ensuite envoyées au cerveau par l'intermédiaire des axones. A chaque cellule olfactive correspond un seul axone qui émerge de l'épithélium olfactif. Les axones se regroupent en filets nerveux et, traversant de petits orifices à la base du crâne (toit des fosses nasales), se terminent immédiatement après dans les glomérules où ils rentrent en contact avec le bulbe olfactif (petit renflement situé à la face inférieure du lobe frontal de l'hémisphère cérébral). C'est la première partie du nerf olfactif qui apporte les informations au cerveau au niveau du rhinencéphale.

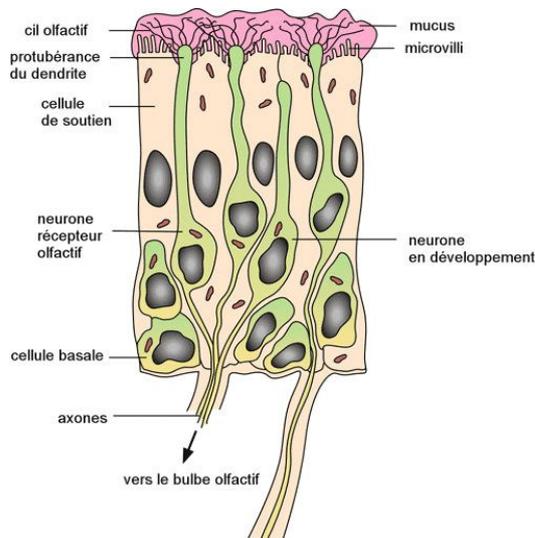


Figure 1.2 – Épithélium olfactif

Les messages nerveux transmis par les nerfs olfactifs envahissent d'abord le bulbe olfactif et gagnent ensuite plusieurs régions du cerveau où ils subissent de nombreuses transformations pour donner naissance finalement à la sensation olfactive. Parmi ces régions destinataires des messages olfactifs se trouvent des aires cérébrales impliquées dans les fonctions d'apprentissage et de mémoire, des aires qui contrôlent la charge émotionnelle des odeurs et des structures nerveuses organisatrices des comportements fondamentaux comme la prise d'aliments et le comportement sexuel. La figure 1.3 représente l'organisation du système olfactif selon G. Brand [23].

Il existe un ensemble de protéines réceptrices activées pour une même molécule odorante. Un neurone olfactif donné n'exprime qu'une seule protéine réceptrice et tous les neurones exprimant la même protéine convergent vers le même centre intégrateur du bulbe olfactif. Les millions de neurones olfactifs convergent vers un millier environ de centres intégrateurs.

1.3.2 Caractéristiques physicochimiques des molécules odorantes

Une odeur naturelle est un composé pouvant combiner un grand nombre de molécules odorantes variées (jusqu'à une centaine). Les molécules odorantes possèdent des caractéristiques particulières pour parvenir jusqu'au bulbe olfactif et nous faire ressentir la sensation de l'odeur transportée. Une molécule odorante possède :

- un poids moléculaire modéré,
- une polarité faible,
- une pression de vapeur (volatilité) élevée,

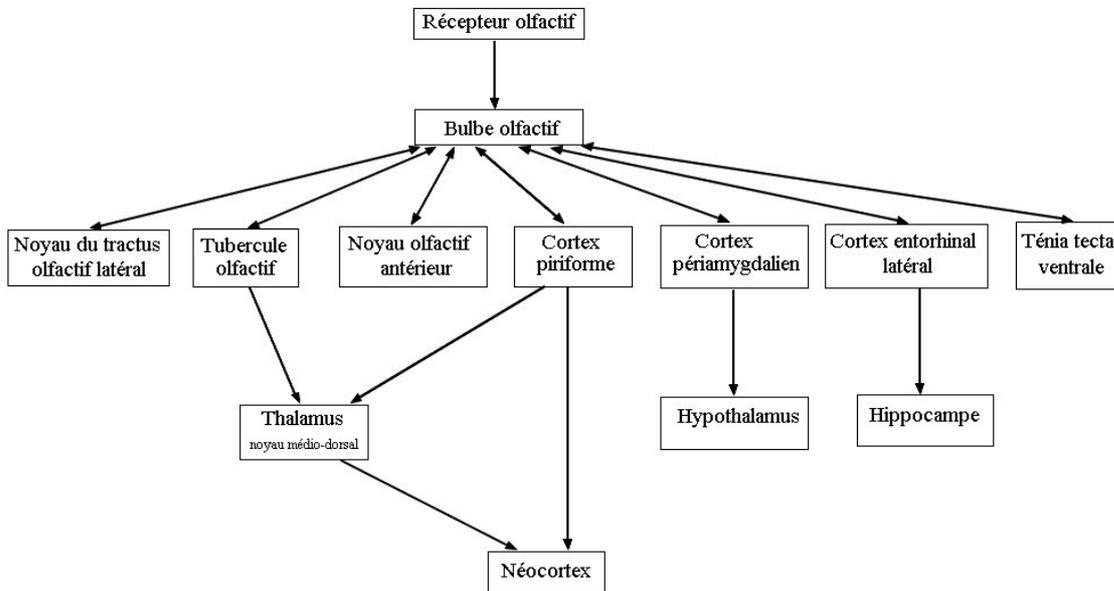


Figure 1.3 – Organisation du système olfactif [23]

- une certaine solubilité dans l'eau,
- un caractère lipophile élevé.

Il est nécessaire que la molécule soit **volatile** afin qu'elle accède aux fosses nasales par le canal de transmission qu'est l'air. La température ou la pression peuvent influencer sur la volatilité de la molécule.

La **solubilité** dans l'eau est également une propriété très importante car les molécules doivent se dissoudre dans le mucus pour accéder aux protéines réceptrices situées sur les cils (fig. 1.2). Parmi les protéines sécrétées dans ce mucus, certaines possèdent la propriété de se lier aux molécules odorantes pour en augmenter la solubilité [23].

Le caractère **lipophile** intervient pour la dissolution des molécules dans les membranes des cils, celles-ci étant constituées en grande partie de lipides.

1.4 Perception olfactive

Le message électrique envoyé au cerveau est traité pour permettre d'obtenir une information sur l'intensité de l'odeur perçue, ainsi qu'une information permettant la reconnaissance de cette odeur. La perception olfactive repose donc sur deux principales fonctions : la discrimination et l'identification des signaux olfactifs. La discrimination peut être définie comme la capacité à distinguer, dans un environnement chimique complexe, les signaux entre eux. L'identification est la faculté à reconnaître ces signaux tout en les comparant aux informations mémorisées.

Le génome humain est estimé à cinq-cents gènes de récepteurs codants pour les chémorécepteurs. L'homme peut discerner entre cinq-mille et dix-mille odeurs différentes. Chaque récepteur peut donc interagir avec plusieurs odeurs différentes [23].

1.4.1 Dimensions des odeurs

On considère généralement que la perception olfactive implique trois caractéristiques principales ou dimensions des odeurs : l'**intensité**, la **qualité** et l'**hédonisme**.

1.4.1.1 L'intensité

L'intensité correspond à la force du stimulus olfactif. Elle est codée par la fréquence des impulsions électriques transmises au cerveau. En d'autres termes, plus le nombre de molécules odorantes liées aux protéines réceptrices est grand, plus la fréquence des impulsions sera élevée et plus la perception de l'odeur sera forte.

Dans le cas d'un mélange composé de plusieurs molécules odorantes, l'odeur résulte de l'ensemble des centres intégrateurs que ce composé peut activer par l'intermédiaire des différentes conformations possibles des molécules odorantes. Les odeurs ne sont pas additives, deux odeurs introduites en même temps ne seront pas nécessairement interprétées comme distinctes mais plutôt comme une mixture [86]. La figure 1.4 représente les résultats obtenus du point de vue intensité perçue pour des mélanges variés de deux composés odorants selon T. Pagé [109].

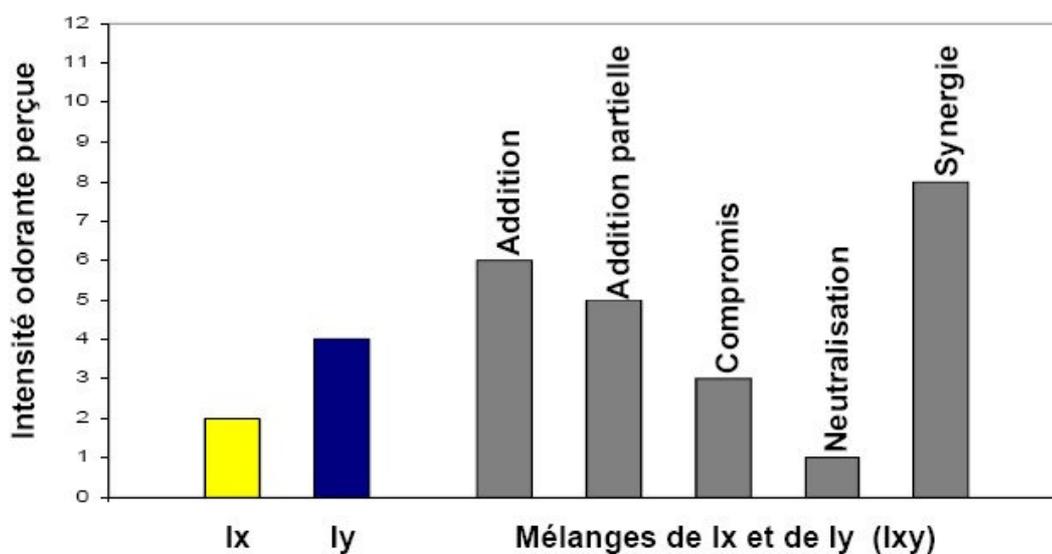


Figure 1.4 – Résultats possibles pour des mélanges de deux composés lx et ly [109]

1.4.1.2 La qualité

L'odeur dont l'intensité dépasse le seuil de reconnaissance est perçue avec une certaine qualité qui lui confère son identité. La discrimination et l'identification d'une odeur ou d'un composé dans un mélange sont associés à la qualité.

Il a été montré que les humains sont meilleurs pour percevoir un changement d'odeur qu'une intensité d'odeur, c'est pourquoi il vaut mieux envoyer des odeurs de qualité, que l'on distingue aisément, plutôt qu'en quantité [1].

1.4.1.3 L'hédonisme

L'hédonisme est le caractère plaisant ou déplaisant d'une sensation olfactive. Il dépend de nombreux paramètres tels que l'intensité du stimulus mais également des paramètres subjectifs comme les expériences du sujet face à cette odeur ou sa culture.

1.4.2 Seuils olfactifs

A très faible concentration, l'"image" d'activation des centres intégrateurs du bulbe olfactif n'est pas suffisamment différente du bruit de fond et l'information olfactive n'est pas détectable. A une concentration supérieure, l'"image" est détectée mais l'odeur est indéfinissable (seuil de détection). A plus forte concentration, l'"image" devient nette et peut être comparée à une information déjà mémorisée (seuil de reconnaissance ou d'identification).

1.4.2.1 Loi de puissance de Stevens

L'intensité odorante est définie grâce à la loi de puissance des odeurs de Stevens. Dans cette approche, le sujet est considéré comme un instrument de mesure dont la sensibilité dépend de l'attribut physique et du système sensoriel concerné. La loi empirique de Stevens qui relie l'intensité d'un stimulus (C) à sa grandeur perçue (R) est une loi de puissance : $R = \gamma C^\alpha$. Pour une transformation logarithmique, la fonction devient linéaire : $\log(R) = \alpha \log(C) + \log \gamma$.

Cette loi laisse apparaître une zone de persistance encadrée par deux seuils, le seuil de détection et le seuil de saturation, où l'intensité de l'odeur croît linéairement avec la concentration de l'odorant (fig.1.5).

1.4.2.2 Détection

La détection olfactive est approximativement dix fois plus lente que la détection visuelle. Le seuil de détection correspond à la concentration chimique pour laquelle le sujet commence

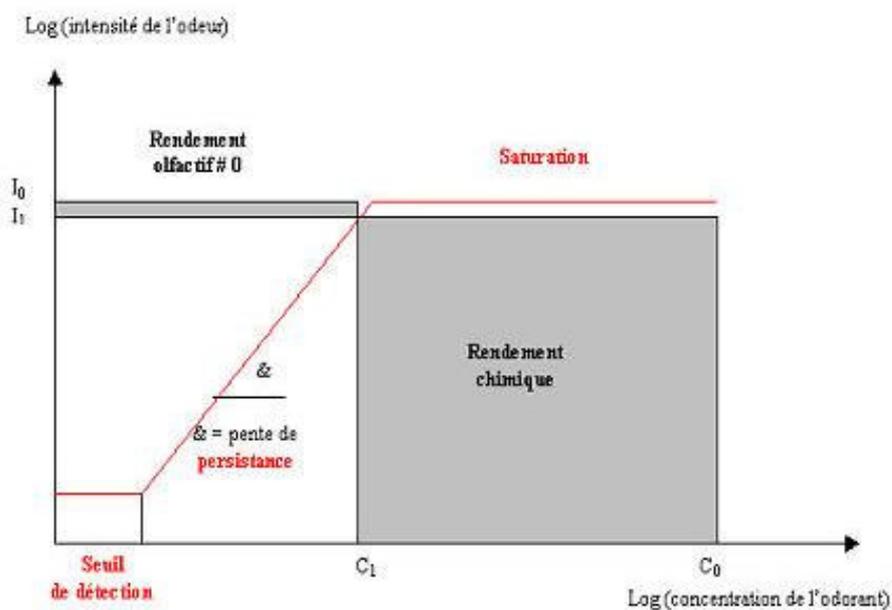


Figure 1.5 – Loi de puissance de Stevens des odeurs : $\text{Log } I = f [C]$

à percevoir une odeur dans un milieu spécifique, sans pour autant pouvoir la déterminer.

Plus les odorants sont hydrophobes, plus le seuil de détection sera bas. Des odeurs différentes ont donc des seuils de détection différents [23].

Le seuil de détection diffère selon les sujets, selon leur sexe ou leur âge et peut varier également pour le même sujet [87].

1.4.2.3 Saturation

Le seuil de saturation correspond à une concentration chimique au delà de laquelle l'intensité de l'odeur paraît identique au sujet quelle que soit la concentration.

La saturation engendre un phénomène d'adaptation à l'odeur qui se caractérise par le fait de ne plus sentir l'odeur alors que celle-ci est toujours présente. L'adaptation est une réaction naturelle de notre système olfactif pour se protéger des mauvaises odeurs notamment : il s'agit d'une réduction de sensibilité à une odeur. Il existe deux adaptations différentes : l'auto-adaptation durant laquelle l'odeur diminue la sensibilité du système à sa propre répétition ou l'adaptation croisée, durant laquelle un stimulus réduit la sensibilité à un second stimulus [145]. E.P. Köster conseille de laisser un temps de 30 s entre deux flairages si on désire en étudier l'intensité. Mais dans le cas de comparaison de stimuli olfactifs, J. Fritjers conseille de se soucier plus des effets de la perte du souvenir des odeurs précédentes que de l'adaptation [64].

1.4.2.4 Reconnaissance et identification

Le seuil de reconnaissance, supérieur au seuil de détection, correspond à l'intensité olfactive minimale permettant l'accessibilité de la qualité de l'odeur par le sujet.

L'identification est la capacité de nommer l'odeur que l'on sent. Les difficultés d'identification des odeurs dépendent du lien entre le traitement de l'information olfactive et le langage parlé. L'identification est faite par les différences de structure de couplage entre les protéines réceptrices et les molécules odorantes. Les molécules odorantes ont la propriété de présenter un grand nombre de conformations différentes qui agissent comme autant de stimuli distincts. Le vocabulaire en terme d'identification d'odeur est très restreint. Généralement, les sujets identifient une catégorie d'odeur (florale, alimentaire...) plutôt qu'une odeur spécifique. Une alternative est de nommer l'odeur par le nom de sa source (odeur de rose).

Les unités de mesure des seuils sont généralement en nombre de moles (de molécules odorantes) par millilitre d'air (mol/ml d'air).

1.4.3 Autres grandeurs relatives à la caractérisation des odeurs

1.4.3.1 Persistance

La persistance ou ténacité est le temps pendant lequel le composé est perçu après l'arrêt de la diffusion de l'odeur. De nombreux facteurs influent sur la persistance d'une odeur, comme la distance à la source ou l'environnement (vent, hygrométrie, etc.)

1.4.3.2 Localisation de la source

La localisation est la capacité d'identifier la provenance d'une odeur et d'intégrer les informations concernant sa direction et sa distance.

L'information sur la direction de la source n'est pas présente directement dans le stimulus mais doit plutôt être déterminée par le cerveau en utilisant, par exemple, les arrivées de temps différentes ou les différences de concentration entre les narines [14].

Von Bekesy a effectué une expérience pour connaître l'habileté d'un humain à localiser une odeur [14]. Ses résultats montrent que le champ d'odeur pour l'être humain est d'environ 130°. Une narine en moins altère la localisation [10]. Selon G. Brand [23], les droitiers sont plus sensibles de la narine gauche et inversement (latéralité du cerveau).

1.4.4 Classification des odeurs

La première classification des odeurs fût réalisée en 1764 par Linné [23] et comportait sept classes d'odeurs :

- les odeurs aromatiques, comme celle du laurier
- les odeurs fragrances, comme celles du tilleul, du lys, du jasmin
- les odeurs ambrosiacées, comme celle du musc
- les odeurs alliacées, comme celles de l'ail, du soufre ou du chlore
- les odeurs hircinées ou capryliques, comme l'odeur que répand le bouc
- les odeurs repoussantes, comme l'odeur de plusieurs plantes de la famille des solanées
- et les odeurs qui provoquent la nausée (odores nausei).

Par la suite, différentes classifications se basant sur des critères variés (caractère hédonique, caractéristiques structurales des odorants, etc.) ont été réalisées.

Une classification simple mais non universelle est la *classification hédonique* [78], [23] qui ne contient que trois catégories subjectives : *mauvais*, *neutre* ou *agréable* selon N. Godinot [64]. En général, la description des odeurs est limitée en adjectifs, contrairement au riche vocabulaire utilisé pour les stimuli visuels [10].

H.E. Nursten a proposé une classification des odeurs de nourriture, selon le nombre de composants nécessaires pour les reproduire (présenté dans [122]).

- un seul composant est nécessaire (ex : banane, citron...)
- un petit nombre de composants est nécessaire (pomme, tomate...)
- un nombre important mais raisonnable de composants est nécessaire (abricot, pêche...)
- les odeurs qui ne peuvent être reproduites raisonnablement (fraise).

Les odeurs sont des composants chimiques, donc une classification possible est selon leurs *propriétés physicochimiques*. D'après F. Davide et *al.* [40], l'étude qualitative des relations structure/odeur montre que, dans de nombreuses séries, les molécules de structure similaire ont des odeurs voisines, bien que distinguables. Cependant, cette observation n'est pas générale et on connaît de nombreux cas pour lesquels de petites modifications structurales peuvent entraîner des perceptions olfactives totalement différentes (fig. 1.6). Inversement, des structures très différentes peuvent présenter des odeurs similaires. Ensuite, une même molécule odorante, à deux concentrations différentes, peut parfois correspondre à deux odeurs distinctes. C'est le cas pour l'indole qui, à forte concentration, émet une odeur très désagréable et, diluée, diffuse une odeur proche du jasmin.

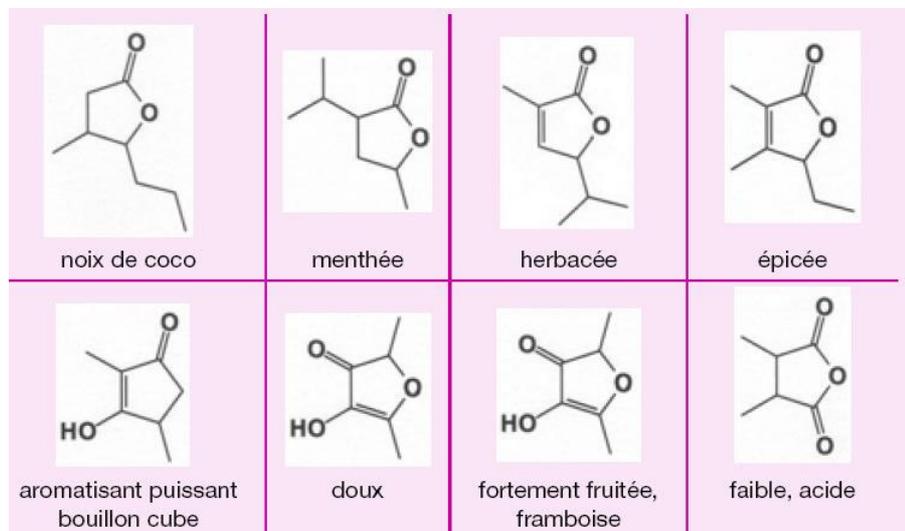


Figure 1.6 – Exemples de composés possédant des structures proches et des propriétés olfactives différentes d'après F. Davide et *al.* [40]

De même, un grand nombre de couples d'énantiomères (molécules chirales) possèdent des odeurs différentes mettant ainsi en évidence l'importance de la structure tridimensionnelle des odorants (fig. 1.7).

La Société Française de Parfumeurs possède sa propre classification. Cette dernière permet de regrouper par famille olfactive tous les parfums créés. Elle est composée de sept grandes classes, chacune composée de trois à neuf catégories. Elle est régulièrement mise à jour et est disponible sur le site de l'association [42].

1.5 Techniques et appareils de mesures

Compte-tenu du côté subjectif lié à une odeur, on peut se poser la question d'une mesure "objective" de certaines caractéristiques. Il existe pour cela deux types d'appareils : les olfactomètres et les nez électroniques. Les olfactomètres mesurent les *intensités* d'odeur alors que les nez électroniques sont capables de *détecter* et de *reconnaître* les odeurs.

1.5.1 Olfactomètres

Le terme olfactométrie désigne la mesure des odeurs et la mesure des capacités olfactives d'un sujet [145].

L'olfactomètre permet d'objectiver une odeur. Il est capable de la détecter et d'en donner

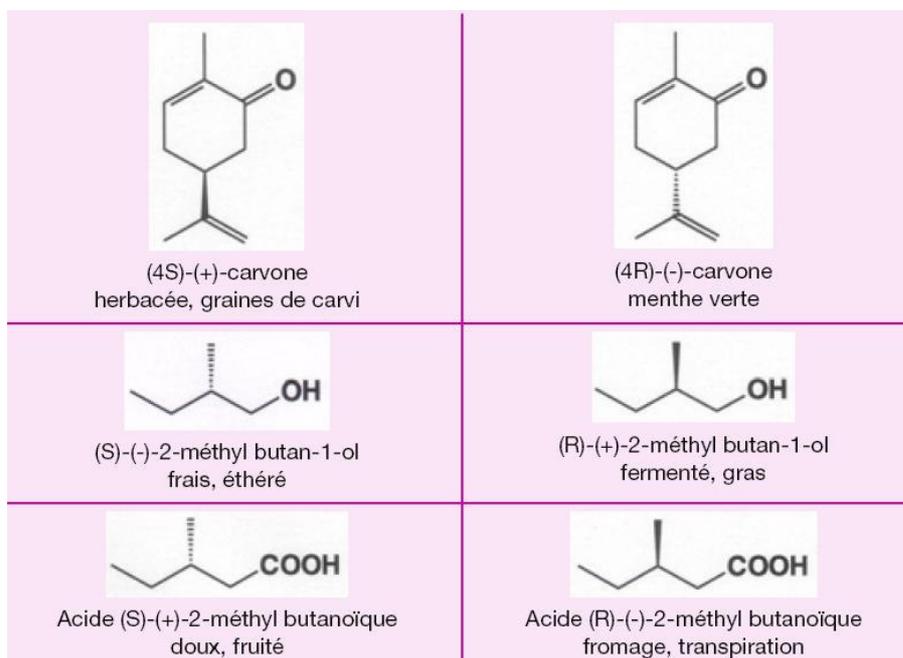


Figure 1.7 – Exemples d'énantiomères ayant des odeurs différentes d'après F. Davide et *al.* [40]

l'intensité. Il doit préalablement être calibré par un jury de nez. Il existe pour cela plusieurs méthodes dont la plus courante est décrite sur le site de l'université de Lyon [145]. Il s'agit de placer le jury de nez et l'olfactomètre dans un local désodorisé et de présenter dans cette salle un mélange odorant dilué par un gaz inodore. Ensuite grâce à des essais successifs, il est possible de déterminer la dilution maximum pour laquelle l'odeur est détectée. L'intensité d'une odeur est fonction de sa concentration.

L'olfactomètre est beaucoup utilisé par des médecins pour vérifier la capacité olfactive d'un patient comme on peut le voir à la clinique St Luc en Belgique [93] ou à l'université de Genève [36]. Il est également utilisé dans la pollution odorante, pour déterminer la concentration de l'odeur lors de l'épandage de lisier ou encore la concentration d'un produit odorant dans une pièce.

Plusieurs sociétés commercialisent des olfactomètres. Au Canada on trouve la société Technodor^{MD} par exemple [138]. Leur olfactomètre est prévu pour effectuer des mesures d'odeurs causant une nuisance olfactive. Il peut également déterminer la persistance et le seuil de perception d'une odeur. Il est utilisé dans beaucoup de domaines comme l'agriculture, le traitement des eaux usées...

1.5.2 Nez électroniques

Un nez électronique est un appareil capable de différencier les odeurs qu'il détecte et de les classer. Le terme nez électronique a été utilisé pour la première fois dans les années 80 [133].

Au départ, le nez électronique a été inventé surtout pour remplacer le nez humain. Pour le moment, les systèmes sont beaucoup plus simples que les systèmes biologiques, ils détectent seulement une petite palette d'odeurs.

Les nez électroniques sont composés de deux parties distinctes :

- un système de capteurs chimiques
- un système de reconnaissance de modèles.

Le système de capteurs est souvent une rangée de plusieurs éléments de mesure où chacun d'eux évalue une propriété différente du composé chimique. Chaque odeur présentée aux capteurs produit une signature ou un modèle caractéristique de cette odeur. Après présentation de plusieurs odeurs aux capteurs, une base de signatures est construite par apprentissage. Cette base de données est utilisée pour former le système de reconnaissance par modèle. Un processus d'apprentissage est lancé avec la base de signatures étiquetées. Le but de ce processus d'entraînement est de configurer le système d'identification pour produire des classifications uniques de chaque produit chimique de sorte qu'une identification automatisée puisse être mise en application. Le nez électronique utilise souvent les réseaux de neurones afin de reconnaître les modèles. Cela permet de rendre le nombre d'odeurs détectables plus grand que le nombre de capteurs [88], [89].

Le nez électronique est utilisé surtout dans les situations où la subjectivité du nez humain est un handicap, lorsque la situation exige un trop grand nombre de mesures ou encore lorsque cela peut être dangereux pour l'homme. Il possède de nombreux avantages :

- **rapide** : les résultats sont fournis en moins de 2s pour certains appareils d'aujourd'hui. Cela va beaucoup plus vite qu'une analyse en laboratoire.
- **portable** : beaucoup d'appareils sont maintenant transportables en tout lieu.
- **réutilisable** : un nez humain ne peut sentir à l'infini et a besoin de se reposer. Au contraire, un nez électronique est juste nettoyé et peut être tout de suite réutilisé.

Plusieurs exemples d'utilisations sont présentés dans l'article de Steller [133] comme la détection de produits chimiques, la fraîcheur du poisson, l'identification et la qualité d'un café, etc. Les principales utilisations sont dans l'industrie alimentaire, le médical et le contrôle de l'environnement.

L'industrie de la nourriture est le plus gros marché pour les nez électroniques. Ils peuvent analyser la qualité du produit, vérifier les processus de cuisson, vérifier la fraîcheur du poisson, la pureté d'un jus d'orange, le degré d'un whisky... [89]

Les nez électroniques peuvent sentir des produits dangereux, contrairement aux humains. Leur utilisation est donc très intéressante dans le domaine de l'environnement. Ils permettent l'analyse et le contrôle de produits chimiques pouvant être dans l'air ou la détection de fuites de produits chimiques ou de gaz. En 2005, des scientifiques de l'université de Manchester ont inventé un nez électronique pour mesurer en temps réel les mauvaises odeurs et le méthane aux alentours des décharges à ciel ouvert et des stations d'épuration de l'eau. Ces informations permettent d'intervenir rapidement, avant que le niveau d'un élément dans l'air devienne critique. Ce système a été développé avec le Silsoe Research Institute et est testé depuis mai 2005 [141].

Le nez électronique est très présent dans le domaine médical car il peut examiner les odeurs du corps (souffle, blessures, etc...) et identifier les éventuels problèmes. A l'université de l'Illinois, en 2001, les chercheurs ont fabriqué un nez électronique qui pouvait détecter une bactérie en "sentant" le sang. Cela a permis un gain de temps par rapport à une analyse sanguine pour détecter la présence de cette bactérie ou non [90]. En 2002, l'université de Tor Vergata à Rome montrait que l'utilisation d'un nez électronique permettait la détection de cancer du poumon. Il suffit que l'appareil "sente" le souffle du patient pour détecter les tumeurs [103].

De nos jours, les nez électroniques sont des produits qui commencent à être très performants. Il en existe de nombreux modèles commercialisés. L'entreprise AlphaMos, par exemple, est spécialisée dans la vente de nez électroniques.

Même s'ils commencent à être très bien développés, des chercheurs continuent à les faire évoluer. Au centre d'EADS à Munich, un nez électronique a été mis au point afin de flairer les bombes ou autre produit explosif [46]. Ce nez est destiné notamment aux aéroports pour faciliter le travail des chiens. Un procédé à base de rayonnement laser permet de faire un premier tri et de ne pas considérer les substances inoffensives comme le parfum par exemple.

1.6 Facteurs influençant la perception olfactive

Comme pour l'appréciation esthétique, visuelle et auditive, il existe plusieurs types de facteurs pouvant influencer la perception olfactive humaine et expliquer les différences de sensibilité et de reconnaissance d'un individu à l'autre vis-à-vis des odeurs :

- les facteurs physiologiques (état général, maladie, âge, etc.),
- les facteurs génétiques influant sur l'équipement en protéines réceptrices de l'individu,
- les facteurs cognitifs, affectifs et émotionnels modulant l'interprétation de l'information sensorielle par le sujet ; ces facteurs dépendent de l'expérience du sujet dans le monde des odeurs,
- l'apprentissage, c.-à-d. l'expérience des sujets en particulier pour la reconnaissance des odeurs,

- les facteurs environnementaux (présence d'autres odeurs, conditions météorologiques, etc.). Dans une expérience olfactive regroupant plusieurs individus, les facteurs environnementaux sont cependant considérés comme négligeables par rapport aux différences physiologiques entre les sujets [112].

1.6.1 Facteurs physiologiques

Une étude très importante a été effectuée en 1986 par le National Geographic ². Un questionnaire fut présenté aux lecteurs dans le monde sous forme de six odorants micro-encapsulés. Les résultats se basent sur 1,2 million de réponses d'américains entre 10 et 90 ans. La grande taille de l'échantillon et la large gamme de participants ont permis de démontrer des tendances continues selon l'âge, mesurées en décennies de la vie. La perception pour les six odeurs présentées déclinait en fonction de l'âge. Par contre, le déclin n'était pas identique pour les 6 odeurs proposées.

Le pic de la perception olfactive humaine se situe entre 30 et 40 ans. Il y a ensuite une détérioration avec l'âge. L'âge affecte toutes les capacités olfactives (détection, estimation d'intensité, identification, qualités mnésiques) [23]. Cette étude a également montré que les femmes détectent et identifient mieux les odeurs que les hommes [63]. Elles sont également plus sensibles que les hommes aux tons hédoniques (bons ou mauvais) des odeurs [11].

Une autre expérience intéressante fut réalisée en 1995, avec cinq-cent-dix sujets chinois principalement illettrés. Les résultats ont montré, comme l'étude précédente, que les femmes sentaient mieux que les hommes, que les non fumeurs sentaient mieux que les anciens fumeurs ou les fumeurs.

Cette expérience a également permis de découvrir que l'éducation améliorait les qualités olfactives : les personnes les plus éduquées avaient de meilleurs résultats [92].

L'état de santé du sujet (fatigue, maladie, etc.) est un facteur important de la perception olfactive car celle-ci est tributaire de la concentration du sujet [59]. Certaines maladies ou accidents peuvent toucher notre sens olfactif, temporairement ou définitivement : cela peut être suite à un traumatisme crânien, à un acte chirurgical ou à la prise de médicaments. L'alcoolisme crée une anosmie partielle tandis que 1,2% de la population est totalement anosmique [87].

De plus, des particularités olfactives peuvent apparaître [23] :

- hyposmie : un seuil de détection supérieur à la normale
- hyperosmie : un seuil de détection inférieur à la normale
- parosmie : une sensation d'odeur qualitativement fautive
- kakosmie : une sensation désagréable ou mauvaise

²<http://www.nationalgeographic.com/>

– fantosmies : des hallucinations olfactives

Des anosmies spécifiques à une seule odeur peuvent exister. Ainsi, un sujet de l'expérience de N. Godinot ne sentait pas l'acide isovalérique mais sentait correctement toutes les autres odeurs et ses résultats étaient comparables à ceux des autres sujets [64].

1.6.2 Facteurs génétiques

Les capacités olfactives des individus et des peuples peuvent dépendre du facteur génétique. A l'institut Weizmann en Israël, les chercheurs ont découvert des mutations qui inactivent certains récepteurs olfactifs. Ces mutations affectent particulièrement les populations d'origine non africaine. A l'inverse les pygmées, un des peuples au monde les moins métissés, ont gardé le plus grand nombre de récepteurs olfactifs fonctionnels [2].

1.6.3 Facteurs cognitifs, affectifs et émotionnels

L'existence d'une sensation olfactive consciente est tributaire de l'attention. Dans beaucoup de circonstances de la vie quotidienne, lorsque l'attention est investie dans une tâche absorbante ou dirigée vers un autre sens, des stimulations olfactives ne sont pas détectées, bien qu'elles soient d'intensités nettement supérieures au seuil de perception. Le sujet interrogé ultérieurement sur la présence d'une odeur déclare de bonne foi qu'il n'a rien perçu. Cependant, des observations laissent penser qu'il a bien enregistré l'information et qu'il peut l'utiliser si on le place dans une situation appropriée.

Les odeurs possèdent une forte dimension affective. Quand on demande à des sujets de classer des odeurs, le critère de sélection utilisé en priorité, s'ils ne sont pas des professionnels, est le caractère hédonique de l'odeur. La bonne odeur invite à se rapprocher de sa source alors que la mauvaise induit le mouvement inverse. Ces réactions sont particulièrement importantes dans le choix des aliments dont la valeur de plaisir, de déplaisir ou de dégoût repose sur un apprentissage. Si un arôme est agréable, c'est parce que la consommation de l'aliment qui dégage cet arôme a eu des conséquences digestives heureuses dans le passé. Au contraire, une odeur désagréable indique une expérience alimentaire malheureuse. Le plaisir sensoriel a donc une signification physiologique

Il existe une relation entre la valence affective d'une odeur et son intensité. La valeur hédonique, fortement subjective a un impact sur la perception de l'intensité. Cette relation est différente selon qu'il s'agit d'odeurs agréables ou d'odeurs désagréables. Ainsi, une odeur désagréable est d'autant plus déplaisante qu'elle est plus intense. En revanche, pour une odeur agréable, la relation est plus complexe. L'optimum est atteint bien avant l'intensité maximum

possible. Le plaisir décroît ensuite si l'intensité augmente encore. En fonction de l'état affectif ou émotionnel de l'individu, des odeurs qui lui sont insupportables dans certaines circonstances peuvent l'être beaucoup moins dans d'autres et même être attirantes.

La connaissance de la source de l'odeur peut influencer sur la perception de l'intensité [45].

La présence d'indices visuels influe également sur la perception olfactive (détection plus rapide) [65].

1.6.4 Influence de l'apprentissage

L'expérience personnelle du sujet constitue également un facteur d'influence important sur la discrimination et la reconnaissance des odeurs. Ainsi pour un sujet ayant antérieurement expérimenté l'odeur diffusée, le seuil de détection sera inférieur à celui d'un autre sujet qui n'a jamais senti cette odeur. D'autre part, la reconnaissance d'une odeur est très difficile. W. Barfield et E. Danas [10] insistent sur l'importance d'avoir un apprentissage pour les odeurs à reconnaître. Ils citent différents résultats d'expériences concernant la reconnaissance et l'identification d'odeurs : Desor et Beauchamp, en 1974, ont conclu que les sujets non entraînés reconnaissaient entre quinze et trente-deux odeurs communes (banane, café, etc.) alors qu'avec un apprentissage, ils en reconnaissaient soixante sans erreur. Selon Jones, en 1938, les parfumeurs sont capables de reconnaître entre cent-cinquante et cent-soixante-quatre odeurs sur cent quatre-vingt-douze présentées [10].

Généralement les sujets ont tendance à surestimer leurs résultats. Le nombre d'odeurs que l'on peut identifier dépend du type et de l'entraînement. L'identification dans le cas de mélanges odorants est très difficile : 12 % des sujets non entraînés reconnaissaient les deux odeurs mélangées [23] (avec un entraînement le taux n'est pas beaucoup supérieur).

1.6.5 Facteurs environnementaux

La température, la pression, l'humidité ont des influences sur les valeurs des seuils olfactifs. Une baisse de la température ralentit le mouvement des molécules, une hausse de la température augmente leur volatilité. Certains composés chimiques, par les valeurs de leurs pressions de vapeur, sont inodores à la pression atmosphérique et dégagent une odeur lorsque la pression augmente (par exemple l'hélium).

L'influence de l'environnement est déterminée par la différence des mesures des seuils olfactifs (seuils de détection et de reconnaissance essentiellement) dans les deux conditions environnementales différentes.

1.7 Influence des odeurs sur les aspects physiologiques, cognitifs et émotionnels

1.7.1 Aspects physiologiques

Les odeurs peuvent induire des effets positifs ou négatifs sur la physiologie, l'état émotionnel ou la performance humaine [11]. Les effets positifs peuvent être utilisés à des fins curatives : le parfum de la rose calme, celui du citron dynamise, l'odeur de la lavande ou de l'orange favorise le sommeil, la menthe calme les maux de tête. Certaines odeurs peuvent également augmenter la vigilance, diminuer le stress ou encore augmenter les capacités mnésiques [157].

Mais à l'inverse, les odeurs peuvent entraîner des désordres dans l'organisme, ce qui peut se traduire par des maux de tête, une irritation des yeux, du nez ou de la gorge mais également par des changements d'humeur ou de comportement, une perte d'appétit ou des états psychologiques comme la dépression et l'ennui [10]. A long terme cela peut même entraîner une diminution de la fréquence cardiaque et une vasoconstriction des vaisseaux sanguins de la peau et des muscles. Plus couramment, les personnes allergiques au pollen ou souffrant d'asthme peuvent être indisposées lors de la présentation d'une odeur.

1.7.2 Aspects cognitifs

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'influence des odeurs sur les aspects cognitifs en mesurant la performance humaine lors de tâches réalisées en présence ou non d'odeurs.

R. Herz a proposé un état de l'art concernant les aspects cognitifs de la perception olfactive [73]. R.A. Baron, en 1992, a montré que des gens qui travaillent avec une odeur agréable sont plus efficaces que ceux qui travaillent sans odeur. La même année, J.S. Warm et *al.* montraient que la vigilance augmentait lors d'une tâche pénible lorsque les sujets étaient exposés à une odeur agréable. H. Ehrlichman et *al.* utilisaient une odeur pour aider les sujets lors de la résolution de problèmes créatifs.

En 1995, une expérience de Krueger a montré qu'une odeur de menthe donnait des performances supérieures à une odeur de lavande ou pas d'odeur dans une visualisation spatiale et des tâches de perception [157].

Dans une expérience effectuée en 1999, en présence d'une odeur de lavande, les sujets ont fait moins d'erreur qu'en présence de l'odeur de jasmin ou sans odeur [41]. La perception de l'odeur était inconsciente (les sujets n'étaient pas prévenus de la présence d'une odeur).

En 2004, une expérience a été effectuée par J.M. Hemery pour tester la performance des sujets dans une simulation de tir de missiles avec ou sans odeur [76]. Les résultats ont montré

que les performances des sujets ayant fait l'expérience avec les odeurs étaient meilleures, mais pour l'apprentissage il n'y avait pas de meilleurs résultats.

En 2005, C. Ho et C. Spence ont effectué une expérimentation portant sur la performance des sujets lors d'une double tâche. Les résultats ont montré que la performance était meilleure en présence de l'odeur de menthe poivrée (comparée à aucune odeur) dans une tâche difficile, mais pas dans une tâche facile [77].

Ces expériences portent beaucoup sur les performances cognitives mais les odeurs peuvent également améliorer les performances physiques : selon une étude menée par les hôpitaux de Strasbourg, le placement d'une odeur de vanille dans la couveuse de prématurés améliore sensiblement leurs performances respiratoires [29].

1.7.3 Aspects émotionnels

Nombre de stimuli visuels, auditifs, gustatifs et somesthésiques ont également des composantes à la fois cognitives et émotionnelles. Néanmoins, la dimension affective des odeurs est particulièrement saillante. La principale dimension peut être rattachée à la valeur hédonique des odeurs [64]. Les structures cérébrales corticales et sous-corticales impliquées dans la perception des émotions sont intimement liées aux structures olfactives. En effet, la zone responsable du sens olfactif envoie la majeure partie de ses projections vers deux structures clés étroitement liées anatomiquement et fonctionnellement : la formation hippocampale (mémoire) et un groupe de cellules situé en avant de l'hippocampe, l'amygdale (impliquée dans les émotions).

Plusieurs techniques existent pour mesurer la dimension émotionnelle, par exemple par la mesure du temps de réaction ou encore par l'imagerie cérébrale [145].

Au laboratoire « Microcapteurs microsystèmes biomédicaux » de l'université de Lyon, des réponses émotionnelles à des odeurs ou à des saveurs ont été étudiées [12]. Des capteurs sont fixés sur la poitrine et la main d'un sujet. Lors de la présentation d'une odeur extrêmement désagréable, les capteurs enregistrent des modifications physiologiques telles qu'une tachycardie et une vasodilatation des capillaires sanguins (responsables du rougissement).

La valeur hédonique des odeurs semblerait être la principale source des réponses émotionnelles : les odeurs agréables influent positivement sur les sujets, les odeurs désagréables négativement. Certains médecins placent un diffuseur dans la salle d'attente pour augmenter le confort des patients et calmer leur anxiété [121]. En 1997, R.A. Baron fit une expérience sur l'altruisme des passants dans une galerie commerciale. Une personne présentait un billet de 1\$ et demandait s'il était possible de lui faire de la monnaie ; 53% des passants ont accepté lorsqu'il y avait une odeur agréable qui était diffusée et seulement 19% lorsqu'il n'y avait pas d'odeurs.

En aromathérapie, on utilise les propriétés émotionnelles des odeurs : une odeur de jasmin

stimule, la lavande est un sédatif. La lavande permet également de calmer le stress [121]. Au Centre Suisse en Sciences Affectives, des scientifiques cherchent à déterminer par des mesures objectives (hormonales, électro-cérébrales, cardiaques, température, irrigation sanguine) l'influence de différentes odeurs sur les émotions conscientes ou non [15]. Les résultats ne sont pas attendus avant quelques années.

La valeur hédonique n'est pas la seule caractéristique pouvant influencer sur les humains. Une expérience a montré que le sentiment dépressif de certains sujets adolescents était diminué lorsqu'ils sentaient l'odeur de femmes et d'hommes âgés alors que ce sentiment ne changeait pas avec l'odeur de jeunes femmes et de jeunes hommes [30]. L'odeur d'une personne peut donc influencer sur son entourage.

Il existe une relation émotionnelle également en lien avec le vécu du sujet. Une odeur rappelant une expérience traumatisante créera une émotion forte pour le sujet. Cela est dû au lien entre l'amygdale (l'émotion) et la formation hippocampale (mémoire). Ce lien permet l'utilisation d'odeurs pour soigner des troubles comme ceux affectant les vétérans de la guerre du golfe [121].

1.7.4 Mémoire

1.7.4.1 Mémoire autobiographique ou "effet proustien"

Le terme "effet proustien" provient d'une anecdote littéraire : Marcel Proust dans son roman "Du côté de chez Swann" évoquait des souvenirs d'enfance à partir de l'odeur d'une madeleine. L'effet proustien est le fait de se remémorer des souvenirs en sentant une odeur particulière qui joue le rôle de catalyseur dans la phase de rappel. Cette caractéristique des odeurs est due au lien entre l'émotion et la mémoire (cf. paragraphe 1.7.3). Plus le souvenir est fort, plus le souvenir restera longtemps dans la mémoire sauf si l'émotion est insoutenable comme, par exemple, dans le cas d'un viol, il y a alors perte ou refoulement de souvenirs [142]. C'est le phénomène de résilience.

De nombreuses expériences ont été faites sur l'effet proustien. Les études de F. R. Schab ont mis en évidence que les odeurs avaient un fort pouvoir de remémoration. Les expérimentations doivent pour cela compter deux étapes distinctes : une phase d'**apprentissage** et une phase de **rappel** [124]. Pour que le pouvoir de rappel soit maximal, les mêmes odeurs doivent être diffusées dans les deux phases [73]. R. Herz a montré que si les odeurs diffusées étaient bien distinctes entre elles ou appropriées à la situation, l'effet était plus important [31].

L'effet proustien exige trois caractéristiques : un souvenir vif, un souvenir émotionnel et surtout un vieux souvenir. Or pour les expérimentations de l'effet proustien, il s'agit souvent d'expériences en laboratoire où, entre la phase d'apprentissage et la phase de rappel de souve-

nirs, le temps est relativement court (pas plus d'une demi-heure). Quelques expériences ont pris en compte le véritable effet proustien dont celle de J.P. Aggleton et L. Waskett [5]. Cette expérimentation concerne le rappel de souvenirs d'un musée odorant : le centre de Jorvik Viking à York. Trois groupes de participants ont rempli des questionnaires au sujet du contenu du musée dans différentes conditions. Tous les participants avaient déjà visité le musée quelques années auparavant. L'expérience a montré que la remémoration des souvenirs du musée était favorisée lorsque les odeurs du musée étaient diffusées en fond odorant lors de la phase de rappel.

Une autre expérience s'intéressant à l'effet proustien est celle de Chu et Downes de 2002 [32] qui ont étudié la distribution de la mémoire autobiographique en fonction de l'âge selon une odeur ou selon une étiquette verbale. Le pic pour les étiquettes verbales est entre 11 et 25 ans et entre 6 et 10 pour les odeurs. Cela peut être dû au manque de vocabulaire avant 6 ans.

Dans nos expériences, nous ne nous intéresserons pas à l'effet proustien. Comme dit précédemment, il est difficile de le réaliser dans un laboratoire car c'est une mémoire autobiographique qui dépend donc de chaque personne et qui s'effectue sur des temps très longs, parfois des années.

1.7.4.2 Mémoire des odeurs

Il est plus difficile d'identifier les odeurs en laboratoire et de les mémoriser car elles ne sont pas reliées à des contextes et à des émotions comme dans la vie. Il a été prouvé que les mémoires d'odeurs ne sont pas plus claires et précises que celles évoquées par d'autres sens mais sont plus tenaces. Elles durent plus longtemps que les autres mémoires : cela est notamment dû aux neurones sensoriels qui se régénèrent tous les soixante jours [142]. Les travaux de Cowart et Rawson, en 2001, ont montré que si une odeur est apprise, elle n'est plus jamais oubliée, mais les odeurs sont généralement difficiles à apprendre [147]. La perception olfactive est reliée à la mémoire des odeurs : une odeur déjà sentie sera détectée plus vite et reconnue plus facilement lors d'une exposition ultérieure [152], le taux de reconnaissance d'une odeur est identique immédiatement ou après une tâche d'interférence³ [23].

La mémoire olfactive comme toutes les autres mémoires est très fragile et risque de dégénérer en vieillissant. Des études récentes montrent les liens entre les déficits de la mémoire olfactive et le développement de la maladie d'Alzheimer [142].

La mémoire des odeurs peut être une mémoire implicite, c.-à-d. que le sujet retient l'odeur sans en avoir pleinement conscience. L'expérience de Degel et *al.* le montre [41]. Il s'agissait, pour les sujets, de réaliser dans un premier temps une série de tests dans des pièces odorisées, sans être conscients de ces odeurs. Après trente minutes, des photos de différents environne-

³tâche différente effectuée entre la phase d'apprentissage et la phase de restitution

ments étaient présentées, dont la salle où ils étaient. Les sujets devaient donner des valeurs pour douze odeurs, incluant celle précédemment sentie, avec chaque photo. Les résultats ont montré que les sujets qui ont travaillé dans une salle avec une odeur donnée, ont fourni une estimation supérieure pour l'odeur associée à la photo de la pièce contrairement à ceux qui ont travaillé dans la pièce avec d'autres odeurs. Un résultat particulier de cette expérience est qu'il apparaît que cette mémoire implicite fonctionne seulement pour les sujets qui ne connaissent pas l'odeur au point de l'identifier par son propre nom [41].

Une expérience effectuée auprès de nourrissons peut également confirmer l'hypothèse de la mémoire implicite : une odeur était présentée à des bébés peu après leur naissance. Quinze jours après, l'odeur est à nouveau présentée d'un côté de la tête du bébé, pendant qu'une autre odeur est placée de l'autre côté ; 75% du temps, les bébés tournaient la tête vers l'odeur déjà connue [67].

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter un aperçu des connaissances actuelles dans le domaine de l'olfaction tant sur le plan physiologie de la perception que sur ses aspects fonctionnels liés à la discrimination et l'identification des signaux olfactifs. Nous nous sommes intéressés aux divers facteurs influençant la perception olfactive et à un état de l'art succinct mettant en lumière l'influence des odeurs sur la physiologie, la cognition et l'état émotionnel.

Cette première partie a révélé le caractère très subjectif de la perception olfactive chez l'homme. Un aspect important du problème tient au fait que la "réponse" n'est pas une propriété physique ou une activité biologique mesurable, mais une perception qui ne peut être que décrite qualitativement par le sujet humain. La question pourrait également être abordée de deux autres points de vue : d'une part, les effets physiologiques induits par les odorants et, d'autre part, les aspects cognitifs et linguistiques liés à la dénomination des odeurs. Les premiers sont susceptibles d'être observés et mesurés en situation expérimentale par de nombreuses techniques, les seconds relèvent des sciences humaines [97].

Le chapitre suivant présentera un domaine où l'olfaction n'est pas encore très prisée mais où l'intérêt est grandissant, il s'agit de la réalité virtuelle. L'engouement pour le retour olfactif en réalité virtuelle a progressé parallèlement à l'augmentation des études et recherches sur l'olfaction. Actuellement l'intégration du sens de l'odeur dans les environnements virtuels relève exclusivement de la recherche. Les différentes applications et l'analyse des apports de la composante olfactive dans les environnements virtuels y sont développés ainsi que les technologies intégratives de diffusion.

Réalité virtuelle et olfaction

Introduction

La réalité virtuelle regroupe un ensemble de techniques et d'outils dont un des objectifs est l'immersion d'un sujet humain dans un environnement virtuel avec lequel il pourra interagir et communiquer via des techniques basées sur ses facultés naturelles d'action, de perception et d'expression [60]. L'immersion et la sensation de présence dans l'EV nécessitent l'utilisation de techniques d'interaction et d'interfaces spécifiques permettant de mesurer les mouvements de l'utilisateur et de stimuler ses organes sensoriels à travers la vision, l'audition, l'olfaction, le toucher, etc.

Ce deuxième chapitre est consacré au retour olfactif en réalité virtuelle. A l'intersection des domaines de l'olfaction et de la réalité virtuelle, deux grandes voies de recherche et de développement concernent d'une part le développement de dispositifs odorants et leur intégration dans les applications multi-sensorielles et d'autre part, l'utilisation de la composante olfactive pour l'évaluation du comportement et de la performance humaine lors de tâches de mémorisation, d'apprentissage, etc.

La première partie retrace et rappelle l'historique et les fondements de la RV ainsi que les techniques d'interaction permettant l'achèvement de la multi-sensorialité dans les mondes virtuels. La seconde partie est consacrée à un état de l'art sur les applications et études en RV intégrant la composante olfactive. Des analogies sont faites avec les applications réelles (de la vie courante, à but thérapeutique, par exemple) qui intègrent l'utilisation contrôlée des odeurs (olfactorisation) dans divers domaines.

Enfin, les différentes technologies de diffusion et de dispersion des odeurs dans un environnement virtuel sont décrites et analysées. En particulier, nous nous intéressons aux différents dispositifs de diffusion d'odeur commercialisés ou à l'état de prototypes de laboratoire.

2.1 Historique et fondements de la réalité virtuelle

Le terme "réalité virtuelle" (RV) vient de l'expression "virtual reality", introduite aux États-Unis dans les années 80 par Jaron Lanier. Il existe de nombreuses définitions de la RV mais certaines caractéristiques sont incontournables : monde synthétique tridimensionnel, interaction temps-réel, immersion sensorielle et interfaces comportementales [60].

En fait, la RV peut être définie comme un ensemble de techniques et de technologies dont un des objectifs est l'immersion de l'humain dans un environnement tridimensionnel intégrant ou non certains aspects du monde réel et avec lequel il peut interagir en temps réel. Les interactions sont basées sur des techniques et des métaphores reposant sur l'utilisation d'interfaces comportementales et sur ses capacités (naturelles ou acquises) d'action, de perception, de communication et de cognition.

Fuchs définit la RV comme un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en **interaction en temps réel** entre elles et avec un ou des utilisateurs en **immersion pseudo-naturelle** par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs [58].

2.1.1 Historique de la RV

Dans les années 50, plusieurs personnes commencèrent à s'intéresser à la notion d'**immersion**. En 1959, AromaRama a été le premier système combinant l'odeur et le cinéma pour une meilleure immersion. En 1960 apparaît le système smell-O-Vision basé sur l'immersion par les odeurs également.

Dès 1956, Morton Heilig s'est intéressé au premier **environnement virtuel multi-sensoriel** [71]. Son Sensorama est un simulateur qui permettait à un utilisateur de se promener virtuellement à moto dans les rues de New York, participer à une course virtuelle à vélo ou encore une course d'hélicoptère virtuelle (fig. 2.1). Il intégrait un écran, des haut-parleurs, un siège vibrant, des ventilateurs pour simuler le vent, des odeurs pour la pizzeria devant laquelle le sujet passait ou encore des odeurs de fleurs. Le Sensorama a été breveté en 1962. Il est considéré comme l'ancêtre de la réalité virtuelle car il intégrait la multi-sensorialité.

Comeau et Bryan, des employés de la Philco Corporation, ont construit le premier affichage en casque en 1961. Leur système, appelé Headsight comportait un écran attaché à un casque et un système de tracking magnétique pour déterminer la direction de la tête. Ce modèle a été conçu pour un emploi en circuit fermé télécommandé, afin de regarder à distance des situations dangereuses.



Figure 2.1 – Sensorama

En 1965, Sutherland publiait "The Ultimate Display" qui approfondissait l'idée d'immersion dans l'image au moyen d'un casque de visualisation [134]. Son casque possédait deux mini-écrans qui permettent une vision stéréoscopique ainsi qu'un mécanisme de suivi de localisation de la tête.

Dans les années 70, débute également la recherche sur les simulateurs : T.A. Furness commence à travailler sur de nouvelles technologies pour les pilotes de l'Air-Force dans l'Ohio et conçoit un cockpit virtuel avec un très large champ de vision [62].

Au début des années 80, la réalité virtuelle se développe dans différents laboratoires. Le MIT a mis au point une application où, dans un environnement virtuel assez sommaire, un utilisateur pouvait manipuler un objet graphique avec la main (et non pas avec un dispositif de pointage classique). En 1984, McGreevy a créé le premier poste de travail virtuel de la NASA également connu sous le nom de simulateur personnel et système de RV pour l'usage dans la recherche d'interface homme-machine. Le VIVED fût le premier système de visualisation d'EV avec un large champ visuel, à bas-prix, en stéréo, et incluant un capteur de position sur la tête [56].

Les premiers systèmes de RV ont été commercialisés par Autodesk et VPL, en 1989. Simultanément, les périphériques de RV font leur entrée dans le domaine des jeux video, par l'intermédiaire du PowerGloveTM, fabriqué par Mattel jusqu'en 1991 pour la console Nintendo Entertainment System (NES).

Au début des années 1990, l'engouement du grand public pour la RV s'accroît, mais le prix relativement prohibitif des interfaces performantes et leurs difficultés de mise en oeuvre

concentre le domaine aux laboratoires académiques et aux grandes entreprises. Aux États-Unis, les recherches sont principalement effectuées en coopération avec l'armée américaine qui s'intéresse de près à cette technologie : elle trouve son intérêt dans les simulateurs de vol, les entraînements virtuels pour ses soldats, et pour la recherche scientifique. Le projet GROPE dirigé par F. Brooks, utilise un bras manipulateur et un casque stéréoscopique pour la visualisation et la manipulation de molécules chimiques [53]. Il sera complété par un retour d'effort et une meilleure précision dans la manipulation [135].

Un autre projet majeur du début des années 90 est le projet virtual WIND TUNNEL de S. Bryson. En utilisant le BOOM (Binocular Omni-Orientation Monitor) qui est un système d'affichage stéréoscopique porté par un bras articulé (fig. 2.2) [16] et un gant virtuel comme outil d'interaction, les scientifiques interagissent avec des images stéréoscopiques d'un champ de flux d'air autour d'un avion virtuel [24].



Figure 2.2 – Le BOOM (Binocular Omni-Orientation Monitor)[16]

Depuis, de nombreux travaux ont été réalisés dans des domaines d'application tels que la robotique, la télé-chirurgie, la formation, l'aéronautique et l'aérospatial, etc.

En France, les premiers développements impliquant un système de RV immersif (le HoloBenchTM) ont été réalisés dans l'équipe de S. Coquillart à l'INRIA Rocquencourt [35].

En 1999, un Reality CenterTM et par la suite en 2001, le SASCUBETM [33], visiocube bas-coût et transportable, sont installés à l'Ingénierium de Laval.

De nos jours, plusieurs plate-formes de RV plus ou moins immersives avec ou sans dispositif à retour d'effort sont implantées dans les laboratoires académiques et entreprises françaises [60].

La plate-forme PREWISE (Plate-forme de REalité Virtuelle pour l'Immersion et l'Expérimentation [81]) du LISA est la seule à intégrer simultanément un retour haptique grande échelle grâce à l'intégration de l'interface bimanuelle SPIDAR (SPace Interface Device for Artificial Reality) que nous avons mis en place dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut de Technologie de Tokyo [123], [80] avec un retour olfactif par l'intermédiaire de diffuseurs ONYXTM d'Osmooze [107].

2.1.2 Structure et classification des systèmes de RV

2.1.2.1 Structure d'un système de RV

Les quatre caractéristiques fondamentales d'un système de RV sont :

- **L'environnement virtuel (EV)** : il constitue un environnement multi-sensoriel perceptible par l'homme, avec lequel il est possible d'interagir en temps réel.
- **L'immersion pseudo-naturelle** : il existe de nombreuses définitions de l'immersion, Slater la définit comme la capacité du système à isoler l'utilisateur du monde réel, à délivrer une information riche, multi-sensorielle et cohérente [128].
- **L'interfaçage comportemental** : il s'agit de l'utilisation d'interfaces et de techniques d'interaction qui permettent à l'utilisateur d'influer sur l'EV [22].
- **L'interaction temps réel** : il s'agit pour le sujet de pouvoir influer sur le monde virtuel par l'intermédiaire d'actions. La notion de temps-réel est le fait que l'utilisateur ne perçoit pas de décalage temporel entre son action sur l'EV et la réponse sensorielle de celui-ci.

D'une façon générale, un système de RV se compose d'un moteur de RV et de périphériques d'entrée (interfaces motrices) et de sortie (interfaces sensorielles) (voir fig. 2.3). Le moteur de RV comprend une description de la scène virtuelle. Son rôle principal est d'adapter correctement la restitution du monde virtuel à travers les périphériques de sortie en fonction des informations provenant des périphériques d'entrée. L'Homme est divisé arbitrairement en :

- un homme décisionnel qui active
- un homme physique qui commande le système
- un homme sensoriel qui reçoit les informations à convertir en une décision [118].

2.1.2.2 Classifications des systèmes de RV

La complexité et le caractère multiple des systèmes de RV rendent difficile toute tentative de classification. Cependant, le cube "AIP" proposé en 1991 par Zeltzer fournit un outil qualitatif utile pour décrire, classifier et comparer les EVs [158]. Ce modèle se base sur l'hypothèse que

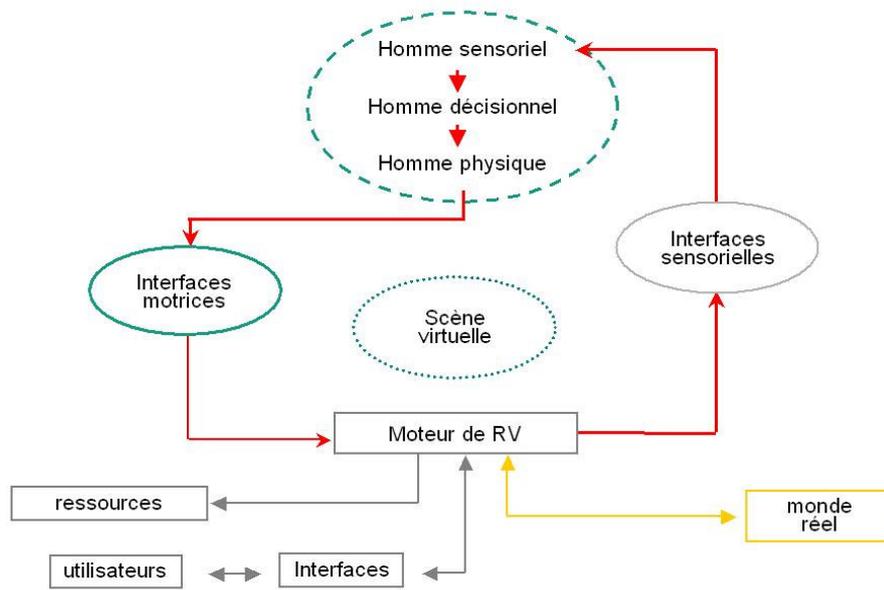


Figure 2.3 – Structure d'un système de RV

tout EV a trois composantes distinctes qui sont :

- un ensemble de modèles et de processus
- des moyens d'action sur ceux-ci
- un ensemble de modalités sensorielles qui permettent à l'opérateur d'avoir un retour d'information provenant de l'EV

Les composantes de l'EV sont représentées sur un cube unité selon les vecteurs : "autonomie", "interaction" et "présence" (fig. 2.4).

La composante "autonomie" représente une mesure qualitative de la capacité d'un objet virtuel à agir et à réagir à des événements.

La composante "interaction" représente le degré d'accessibilité aux paramètres d'un objet en temps réel.

La composante "présence" fournit une mesure approximative du nombre et de la fidélité des canaux sensoriels d'entrée et de sortie disponibles. Cette dernière notion a fait l'objet de nombreuses recherches dans le domaine de la RV au cours des 15 dernières années et continue de susciter un grand intérêt, elle sera donc l'objet d'un paragraphe ultérieur (cf. paragraphe 2.1.3).

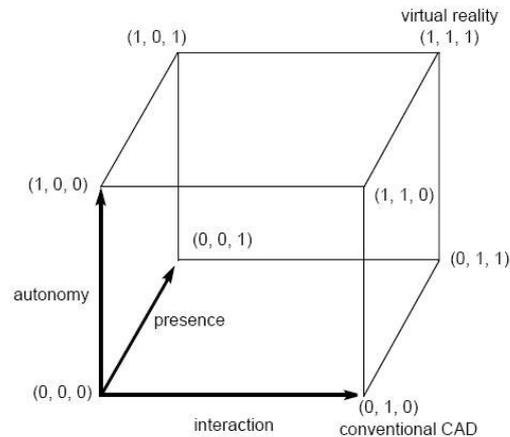


Figure 2.4 – Le cube AIP ("Autonomie"- "Interaction"- "Présence") [158]

2.1.2.3 Les périphériques d'entrée

Le pilotage d'un système de RV exige l'utilisation d'un certain nombre de périphériques de commande, afin que le système réagisse aux actions du sujet. Les périphériques d'entrée envoient les données nécessaires au système pour répondre aux actions du sujet. Il existe différents périphériques d'entrée, nous en retiendrons trois groupes : les capteurs, les gants de données et les interfaces de navigation.

Les capteurs Les capteurs servent à connaître la position et l'orientation des objets mobiles (mouvements de la tête, des pointeurs ou de la main de l'utilisateur) par rapport à leur situation d'origine. Les données qu'ils envoient permettent la restitution en temps réel des images, la sélection et la manipulation des objets et la navigation dans le monde virtuel. La technique la plus courante est sans aucun doute l'électromagnétisme, utilisé par Polhemus par exemple [114]. Les systèmes mettant en jeu le tracking optique par camera sont de plus en plus utilisés.

Les gants de données La mesure des mouvements de la main et en particulier de ceux des doigts est essentielle et exige l'utilisation de gants de données ou d'exosquelettes qui permettent l'acquisition en temps réel des valeurs des angles articulaires des doigts et de la main. La plupart d'entre-eux ne fournissent aucun retour sensoriel, ce qui restreint leur utilisation à des interfaces de commande gestuelle avec pour seul contrôle, la vision. Le 5DT GloveTM, commercialisé par la compagnie Fifth Dimension Technology, utilise les fibres optiques pour la détermination des angles de flexion des doigts [3].

Les interfaces de navigation Plusieurs classifications des techniques de navigation dans les EVs ont été proposées [20].

La classification qui distingue les techniques de **navigation virtuelles** (pour lesquelles l'utilisateur reste statique même si le point de vue est modifié) et les techniques de **navigation physiques** (pour lesquelles l'utilisateur opère physiquement une translation ou une rotation pour faire changer le point de vue) est intéressante.

La navigation virtuelle consiste en une situation statique du sujet dans le monde réel et en une interface classique qui permet de se déplacer dans le monde virtuel (souris, space mouse...). La navigation physique utilise l'activité physique de l'utilisateur pour le déplacement dans le monde virtuel. Elle mime les méthodes naturelles de déplacement (marche, course ou déplacement à vélo) en nécessitant plus ou moins d'espace.

Le concept du "Walking-pad" a été initialement développé par Bouguila, chercheur au Pervasive and Artificial Intelligence (PAI) Group de l'Université de Fribourg. Cette interface de type "step-in-place" consiste en une plate-forme de petite taille (0,4 x 0,4 m²) comportant soixante interrupteurs et elle autorise le déplacement multi-directionnel, le contrôle de la vitesse de déplacement et la possibilité de sauter [18]. Cette interface à bas-coût et transportable facilement a été améliorée et intégrée à la plate-forme PREWISE du LISA (fig. 2.5a).

D'autres prototypes basés sur le schème naturel de la marche, mais plus complexes à mettre en oeuvre ont été développés, principalement aux États-Unis et au Japon. On peut citer le Torus (fig. 2.5b) ou le GaitMaster (fig. 2.5c) d'Iwata [82], [83].

2.1.2.4 Les périphériques de sortie

Les périphériques de sortie d'un système de RV ont pour fonction de transformer, en temps réel, l'information en provenance du moteur de RV en une information directement et naturellement utilisable par l'opérateur, ceci généralement dans le but d'augmenter l'immersion de l'utilisateur. On peut trouver trois grands groupes : les interfaces visuelles, auditives et haptiques.

En ce qui concerne les interfaces olfactives, le développement et la recherche plus récents ont permis leur utilisation dans diverses applications de RV. Ces interfaces font l'objet d'une attention particulière et seront donc développées dans un paragraphe ultérieur.

Quelques ouvrages offrent un état de l'art assez complet concernant la description de ces interfaces, leur intégration et leur évaluation par des études empiriques [22], [60].

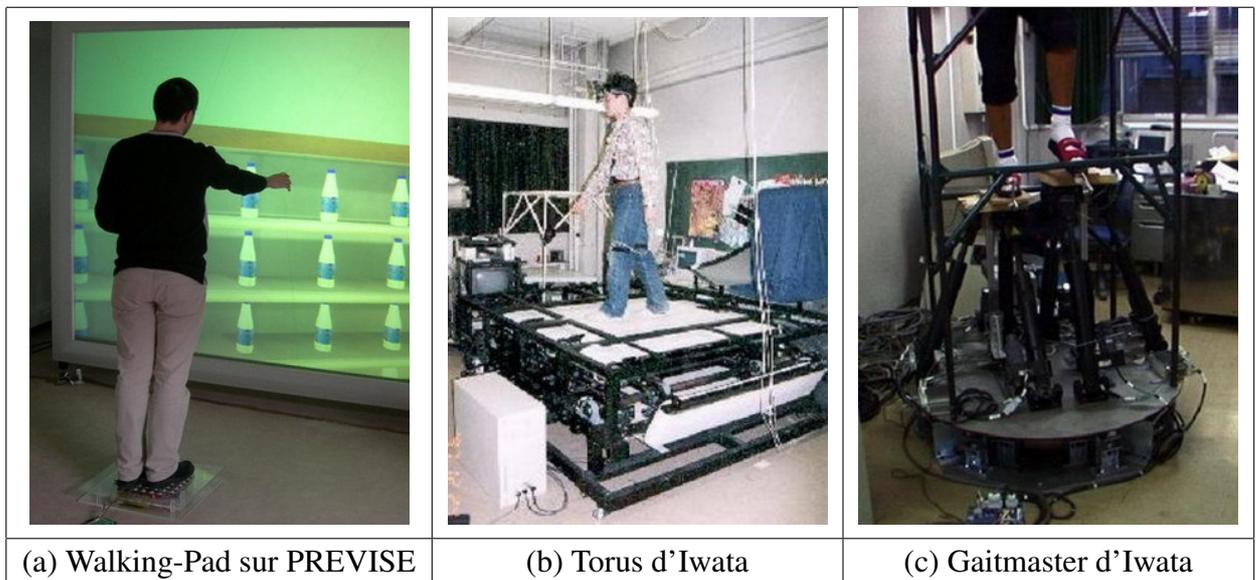


Figure 2.5 – Diverses interfaces de locomotion

Les interfaces visuelles Il existe plusieurs approches technologiques pour permettre la visualisation 3D des EVs allant des images stéréo simples sur grand écran jusqu'aux environnements entièrement immersifs. Les caractéristiques essentielles des interfaces visuelles sont [21]:

- Le **champ du regard** qui se réfère à l'espace physique entourant l'utilisateur sur lequel les images sont affichées et le **champ de vision** qui se réfère au nombre maximal de degrés de l'angle sous lequel l'utilisateur peut voir.
- La **résolution spatiale** qui est relative à la taille en pixels (dpi). La résolution dépend à la fois de la taille de l'écran et du nombre de pixels. La distance de l'utilisateur à l'écran affecte la perception de la résolution.
- La **géométrie de l'écran** joue un rôle important en terme de qualité visuelle. Il existe une grande variété de géométries, incluant des écrans rectangulaires, hémisphériques, ou à plusieurs écrans rectangulaires (murs de projection). Les écrans non rectangulaires peuvent engendrer des problèmes de distorsion de l'image sur les bords.
- Le **taux de rafraîchissement** qui se réfère à la vitesse à laquelle le dispositif d'affichage rafraîchit l'image (en Hz). Ce taux a un effet significatif sur la qualité visuelle. Des taux trop faibles peuvent engendrer des clignotements et sauts d'images.
- L'**ergonomie** est importante pour permettre à l'utilisateur d'interagir le plus naturellement et le plus confortablement possible avec l'EV. Des dispositifs visuels trop intrusifs peuvent engendrer des problèmes, en particulier pour des personnes plus sensibles telles que les enfants ou personnes souffrant de troubles neuropsychologiques.

Dans le cas de la RV immersive, les interfaces visuelles peuvent se regrouper en deux grandes familles : les systèmes portés par l'utilisateur et les systèmes de projection sur grand écran (Table 2.1).

Les **visiocasques** ou HMDs (Head Mounted Displays) sont des dispositifs d'affichage liés à l'utilisateur. Les images virtuelles sont affichées directement devant les yeux de l'utilisateur selon le mode mono- (un écran) ou stéréoscopique (deux écrans). Ces dispositifs sont généralement couplés à un capteur de position permettant un affichage de la scène en fonction des mouvements de tête de l'utilisateur. Ils sont généralement lourds et encombrants et souffrent de la faible résolution des écrans qu'ils emploient, ainsi que de l'étroitesse du champ de vision.

Parmi les systèmes de projection sur grand écran, on distingue entre-autres:

- Le "**mur de projection**" (Wall Display) est un simple écran, pour affichage mono- ou stéréoscopique. Il est généralement rectangulaire, mais il existe des versions cylindriques destinées à de larges audiences. La plate-forme PREWISE du LISA est constituée d'un système de visualisation permettant la visualisation stéréoscopique passive d'environnements virtuels de grande dimension (Table 2.1).
- Le "**workbench**" ("plan de travail virtuel" ou "bureau immersif") s'apparente à une table avec un dispositif de projection caché à l'intérieur et un écran de projection en surface. Les images 3D sont générées par une technique classique d'obturateur. Pour certaines applications, un affichage de taille intermédiaire est suffisant, les workbenches offrent la possibilité de réunir plusieurs personnes autour du dispositif avec une meilleure qualité d'image par rapport aux dispositifs complètement immersifs entourant l'utilisateur ("surround visual displays"). Ces dispositifs sont principalement utilisés pour le travail de maquettes virtuelles et pour la visualisation de données (Table 2.1).
- Le **visiocube** est un dispositif d'affichage immersif dans lequel l'utilisateur est entouré par trois écrans au plus. Le plus connu est sans conteste le CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) développé par Cruz-Neira à l'Université d'Illinois à Chicago en 1993 [37]. Il s'agit d'un environnement cubique à 4 écrans de 3x3 m (trois murs et un sol) sur lesquels sont projetées les images de la scène virtuelle par des rétro-projecteurs (Table 2.1). D'autres dispositifs de configuration similaire ont ensuite été développés, ils peuvent présenter de 3 à 6 écrans de configuration variables. Ces dispositifs sont chers et demandent un espace important. Ce système est mieux adapté à une configuration mono-utilisateur étant donné que les images stéréoscopiques sont couplées au système de tracking.

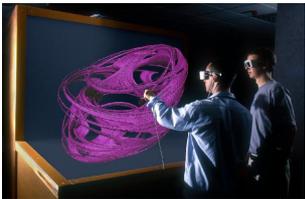
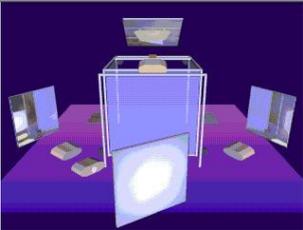
	
Le visiocasque du projet FRAGRA [100]	Le grand écran de la plate-forme PREWISE du LISA
	
Le Responsive Workbench TM [91]	Le CAVE TM [37]

Table 2.1 – Quelques exemples d’interfaces visuelles immersives

Les interfaces auditives Un objectif essentiel des interfaces auditives est la génération et la restitution d’un son spatialisé permettant à l’utilisateur de tirer profit de ses capacités de localisation de la source sonore (en termes de direction et situation). La génération de son 3D exige la prise en compte de la position de la tête de l’utilisateur par rapport à la source sonore. L’ajout de son spatialisé dans les applications de réalité virtuelle renforce la sensation d’immersion dans l’environnement. Le modèle le plus utilisé est la stéréophonie qui utilise deux haut-parleurs situés devant le sujet. En contrôlant le retard ou le gain relatif des signaux envoyés à chaque haut-parleur, il est possible de recréer une version simplifiée d’une localisation sonore avec la différence d’arrivée du son et la différence de niveau entre les deux oreilles [144].

Les deux principales approches pour la restitution du son, sont:

- Les casques audio, mais l’inconvénient majeur de ce type d’interface est l’absence d’externalité de la source. Le son semble émaner de l’intérieur de la tête de l’utilisateur.
- Les enceintes externes qui doivent être positionnées dans des emplacements stratégiques de l’environnement. Aujourd’hui, la technologie des sons multicanaux est très utilisée. Plusieurs pistes audio enregistrées permettent une restitution sur plusieurs enceintes, situées en différents endroits de la pièce.

Les interfaces haptiques La recherche et le développement de nouvelles interfaces à retour d’effort pour la RV est un domaine toujours très actif [21]. Des études expérimentales ont mon-

tré que la sensation haptique prodiguait une information essentielle pendant des tâches de manipulation, en améliorant la perception des objets (taille, forme, masse).

Les interfaces haptiques ont été largement étudiées dans la dernière décennie et plusieurs d'entre-elles restituent un retour d'effort à 6 degrés de liberté (6 DDL) (Table 2.2). Une partie de ces développements est commercialisée par Sensable Technologies, Immersion Corporation et la société française Haption [125], [79], [70].

Dans le cadre académique, G. Burdea et son équipe ont développé des gants fournissant un retour d'effort basé sur une force pneumatique qui agit sur des zones discrètes à l'intérieur de la main de l'utilisateur (Table 2.2) [19].

D'autres types d'interfaces haptiques suscitent un grand intérêt actuellement, ce sont les interfaces à fils. Elles sont composées d'actuateurs fournissant une force par l'intermédiaire d'un ensemble de fils reliés ensemble ou à un outil de manipulation. Ces interfaces possèdent des caractéristiques intéressantes telles qu'une base fixe, un espace de travail pouvant être à échelle humaine et adapté à la configuration visuelle "grand-écran", et une faible intrusion auxquelles on peut ajouter, la légèreté, la sécurité, et un prix accessible. Le SPIDAR a été développé et breveté par l'équipe de M. SATO au Tokyo Institute of Technology [123].

En collaboration avec l'Institut de Technologie de Tokyo, le LISA a développé sur sa plateforme PREWISE, un SPIDAR de grande dimension [81]. L'espace de travail est beaucoup plus important que celui de la plupart des interfaces haptiques standard et il permet de restituer des informations relatives au poids et à l'inertie des objets ou de contraindre les mouvements de l'utilisateur (guide haptique) pour l'aider dans la réalisation d'une tâche sensori-motrice.

Dans les EVs multimodaux, le retour haptique est généralement couplé à la vision et à l'audition. Actuellement, encore peu de travaux ont rapporté le couplage de cette modalité avec le retour olfactif dans les EVs.

2.1.3 Les notions de "présence" et "d'immersion" en RV

L'un des objectifs de la RV est de procurer à l'utilisateur la sensation qu'il fait partie de l'environnement virtuel avec lequel il interagit. Il est admis traditionnellement que c'est le caractère immersif d'un dispositif de RV qui conduit à la "sensation de présence". L'immersion est définie comme le fait d'être physiquement immergé dans le monde virtuel. La présence est définie comme la perception psychologique "d'être dans" ou "d'exister dans" l'EV dans lequel l'utilisateur est immergé. Les deux notions de présence et d'immersion sont donc étroitement liées et on peut considérer la présence comme une conséquence de l'immersion.

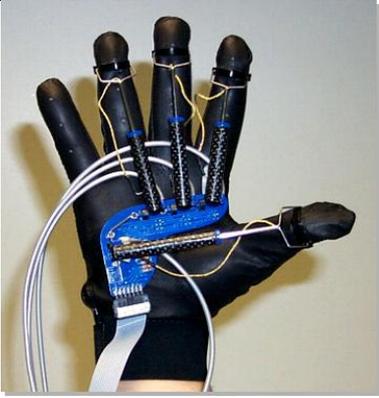
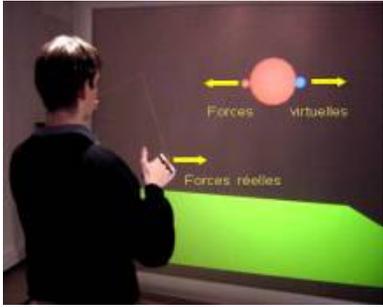
	
<p>Le PHANTOM OmniTM ([125])</p>	<p>Space Mouse de 3D Connexion [34]</p>
	
<p>Le Rutgers Master IITM [19]</p>	<p>Le SPIDAR bimanuel de la plate-forme PREWISE</p>

Table 2.2 – Quelques exemples d’interfaces haptiques ou pseudo-haptiques

Les études antérieures portant sur ces concepts ont mis en lumière des nuances concernant la définition de la sensation de présence.

D'après Slater et *al.*, la notion d'immersion se rapporte à la description quantifiable de la technologie [127]. L'immersion est alors une description objective de ce que n'importe quel système particulier fournit tandis que la présence est un état de conscience du sens (psychologique) d'être dans l'EV, et des modes correspondants du comportement. Ils définissent la présence selon trois critères :

- la sensation d'être dans un environnement représenté par un monde virtuel
- le degré avec lequel l'EV devient le dominant, c'est-à-dire que les participants tendent à répondre aux événements dans l'EV mieux que dans le monde réel
- le degré avec lequel, après l'expérience virtuelle, les participants se rappellent avoir visité un endroit plutôt qu'avoir vu des images générées par ordinateur.

Witmer et Singer définissent la présence comme l'expérience subjective d'être dans une place ou dans un environnement, même lorsqu'on est physiquement situé ailleurs [50]. Appliqué à un EV, la présence se rapporte alors à remarquer l'environnement généré par ordinateur plutôt que le local physique réel. Selon cette définition, deux concepts psychologiques sont importants, il s'agit de la participation et de l'immersion. L'immersion dépend du niveau auquel le flux continu des stimuli et les expériences dans l'EV génèrent la sensation d'être inclus dans l'EV et la capacité d'interagir avec lui. Lorsque les utilisateurs concentrent plus d'attention sur les stimuli de l'EV, ils deviennent plus impliqués dans l'expérience virtuelle de réalité, qui mène à un sens accru de la présence. Selon eux, les facteurs qui influent sur l'immersion sont donc l'isolement de l'environnement physique, la perception de soi dans l'EV, les modes naturels d'interaction et de contrôle, et la perception du mouvement propre.

Les variables influant sur la sensation de présence sont entre autres [132] :

1. la **facilité d'interaction**. Les techniques d'interaction et de navigation dans l'EV doivent être les plus intuitives et naturelles possibles pour augmenter la sensation de présence
2. le **niveau de contrôle** de l'utilisateur (temps de latence du système, capacité de modifier les paramètres physiques de l'EV...)
3. le **réalisme des images**
4. le **temps d'exposition**. La sensation de présence n'est pas accrue par un temps d'immersion trop long
5. les **facteurs sociaux**, résultent de la communication avec l'EV ou d'autres personnes (par exemple des avatars)

6. les **facteurs internes**, c.-à-d. les différents retours sensoriels auxquels seront plus facilement sensibles certains types de sujets.
7. les **facteurs inhérents du système**. La présence est influencée par la haute qualité des retours sensoriels de l'utilisateur comme le suivi de la tête, le large champ de vision, les sons, l'interaction multimodale...

D. R. Mestre de l'UMR Mouvement et Perception (CNRS, Marseille) a soulevé quelques questions relatives aux notions de présence et d'immersion en RV :

- Dans quel sens le fait que l'acteur se sente "à l'intérieur d'un monde virtuel" modifie-t-il le traitement de l'information sensorielle ?
- A l'inverse comment les caractéristiques de l'information sensorielle contribuent-elles à cette sensation de présence ?
- Dans quelle mesure les modalités d'action et d'interaction du sujet contribuent-elles aussi à la sensation de présence ?
- Peut-on démontrer que l'immersion conduit à une transformation des cadres de références dans lesquels s'opère la transformation sensori-motrice ?

Selon Mestre, il est fondamental de prendre en compte l'influence de traitements cognitifs dits de "haut-niveau" (attention, mémoire, expérience passée, etc.) qui conditionnent le traitement d'informations sensorielles et donc le comportement. La source de la sensation de présence se situerait au niveau de l'interaction entre les mécanismes cognitifs et les mécanismes sensori-moteurs [98].

Bien que la notion de présence soit subjective et qu'il soit difficile de mesurer le degré de présence d'un sujet dans un EV, une évaluation fiable, valide et objective de la notion de présence doit être recherchée, selon M. Meehan. Pour mesurer la sensation de présence des sujets, il existe plusieurs méthodes subjectives (questionnaires) ou objectives (mesures physiologiques) [96].

2.1.3.1 Questionnaires

Les questionnaires de post-test sont le plus souvent utilisés pour mesurer le degré de présence. Il en existe un grand nombre. Pour certaines expérimentations, le questionnaire de présence concerne seulement une donnée alors que pour d'autres, les chercheurs ont essayé de développer des questionnaires reflétant la structure multi-dimensionnelle de la présence.

Il y a plusieurs avantages à les utiliser : ils sont faciles à administrer, à analyser et à interpréter et n'ont pas de coût financier. Puisqu'ils sont donnés après l'expérience, ils n'interrompent pas celle-ci.

Plusieurs questionnaires ont montré dans des études qu'ils étaient sensibles à plusieurs niveaux de présence.

J. Van Baren et W. Ijsselsteijn ont recensé vingt-neuf questionnaires sur la présence, de 1976 à 2004 [9]. Un des premiers fût celui de Short, Williams et Christie qui date de 1976. Les questionnaires peuvent être divisés en deux groupes : ceux qui concernent la présence sociale et ceux qui concernent la présence physique.

Slater et *al.* [129], ont proposé un questionnaire pour la présence physique. Ils ont identifié des facteurs externes basés sur la recherche existante : qualité et résolution, uniformité d'environnement, interactivité, représentation d'individus réaliste, et connexion simple entre les acteurs et les effets. Un modèle empirique qui relie la sensation de présence à ces facteurs a été construit.

En partie basés sur les travaux de Barfield et Weghorst, Slater et *al.* ont identifié trois indicateurs de présence :

- Le sens d'"être là"
- Le point auquel l'EV devient plus réel que la réalité
- La localité : l'EV est considéré comme un endroit à visiter.

Le questionnaire original était composé de 3 items sur une échelle de 1 à 7. La dernière version contient 6 items.

Il est difficile de trouver le questionnaire le plus adapté pour une expérimentation. Plusieurs chercheurs ont utilisé ce questionnaire comme base puis ont rajouté ou retiré des items. **Ce questionnaire sera notre base pour les questionnaires de présence des expériences développées au chapitre IV.**

2.1.3.2 Mesures physiologiques

La meilleure technique pour mesurer objectivement le degré de présence d'un sujet est la technique des mesures physiologiques. Des capteurs sont placés sur le sujet pour enregistrer ses réactions face au monde virtuel présenté. Le plus souvent, les données enregistrées sont la fréquence cardiaque, la conductivité de la peau et la température de la peau [96]. D'autres données peuvent être également enregistrées comme par exemple :

- la **température du corps** pour Eberhart et Kizakevich qui ont fait les premières expériences sur les réactions physiologiques face à un environnement virtuel en 1993 (cités dans [9])
- la **respiration** pour Weiderhold et *al.* pour fournir l'évidence objective de la désensibilisation de phobies en 1998 [96]
- les mesures associées aux yeux comme le **suivi des yeux** et le **temps de réponse des**

pupilles pour J. Laarni et *al.* en 2003 [9]

- les **électroencéphalogrammes** pour A. Schlögel et *al.* en 2002 (cités dans [9]).

Des mesures de comportement sont également utilisées, comme l'observation des expressions faciales, les mesures des mouvements du corps en réponse à un stimulus, les observations des réponses réflexes en réaction à un stimulus... [9]. Une équipe de chercheurs français a utilisé la comparaison entre le comportement d'un joueur de hand-ball dans le monde réel et son comportement dans le monde virtuel [13].

2.2 L'olfaction en réalité virtuelle

A la frontière de l'olfaction et de la RV se situent, d'une part des études et recherches diverses essentiellement menées dans les domaines neuro-psychologiques et médicaux (présence, mémorisation, apprentissage, etc) et d'autre part des recherches et développements académiques de dispositifs odorants pilotés par ordinateur. Cependant, dans les EVs, le sens de l'odorat est encore peu présent, les difficultés provenant de la nature chimique des stimuli étant difficilement contrôlables en termes de diffusion et de dispersion dans le temps et l'espace. Un certain nombre de questions essentielles se posent pour l'intégration de la composante olfactive dans un EV [10].

Cette section sera divisée en trois parties, la première consistera en des considérations relatives aux apports de la composante olfactive en RV, la deuxième en un état de l'art des applications de RV existantes ou en cours de développement incluant la modalité sensorielle olfactive et la troisième sera relative à la description d'interfaces commercialisées ou de prototypes académiques qui sont ou peuvent être utilisés et intégrés à différents systèmes de RV.

2.2.1 Apports du retour olfactif dans les environnements virtuels

L'état actuel de la connaissance relative à l'apport du retour olfactif dans les EVs est basé sur un certain nombre d'études expérimentales encore peu nombreuses, portant sur les notions de présence, d'immersion et parfois de mémorisation et de remémoration (d'événements ou d'objets).

D'une façon générale, il est admis que le retour olfactif contribue à augmenter la sensation de présence [10], à générer des états émotionnels et à produire des indices de localisation pertinents dans les EVs [14].

Les influences bénéfiques des odeurs sur les aspects cognitifs et émotionnels (cf. chapitre I, paragraphe 1.7, p. 1.7) sont a priori transposables dans le cadre d'expériences virtuelles.

Quelques études réalisées en EVs ont en effet mis en évidence que les odeurs pouvaient, comme en situation réelle, permettre ou favoriser [54]:

- **l’augmentation de la vigilance et de l’attention.** En effet, la modalité olfactive peut être utilisée quand les canaux visuels et auditifs sont surchargés, permettant ainsi un élargissement de la bande sensorielle [54]. Ainsi une étude réalisée, lors de l’exploration d’environnements réels par télé-operation à distance d’un robot, a permis de mettre en évidence que la modalité olfactive peut promouvoir l’information liée à l’environnement quand les modalités visuelle et auditive sont saturées.
De nombreuses applications en situation réelle utilisent cette propriété. Par exemple des odeurs peuvent être ajoutées au gaz naturel pour permettre aux personnes d’identifier une fuite ou peuvent être libérées par le ventilateur dans une mine pour donner l’alarme [87].
- **l’augmentation des performances d’apprentissage.** Dans le domaine de l’apprentissage pour des tâches complexes dans les EVs collaboratifs, des études ont montré que l’information olfactive couplée avec le retour visuel permet de mieux assimiler les connaissances et d’identifier plus précisément les objets, même si les objets réels correspondants sont inodores. En effet, l’odeur peut être liée à une caractéristique invisible mais appropriée de objet, telle que la température.
- **la remémoration d’événements** ("recall"). En 1999, une étude importante portant sur l’influence des retours sensoriels (tactile, auditif et olfactif) sur la sensation de présence et la mémorisation des objets incorporés dans les EVs a été réalisée par H. Q. Dinh et *al.* [44]. Trois cent vingt-deux sujets ont participé à la visite virtuelle d’un espace de travail composé de sept pièces : une réception, un vestibule, une salle de bain, un petit et un grand bureau, une pièce contenant des photocopieurs et un balcon. Les sujets évoluaient dans cet espace en passant par chaque pièce. Le trajet était prédéterminé et les utilisateurs pouvaient seulement tourner la tête pour observer la pièce où ils se trouvaient. La sensation olfactive résidait dans l’intégration d’une odeur de café près d’une cafetière dans la réception. Cette étude a permis de montrer une tendance en ce qui concerne l’augmentation de la sensation de présence avec le signal olfactif. De plus, en ce qui concerne la mémorisation d’objets, le souvenir était beaucoup plus intense pour les sujets ayant eu un retour olfactif pendant l’exploration de l’EV.
- **l’augmentation de la productivité.** Le lecteur peut se rapporter au paragraphe du chapitre précédent traitant de l’influence des odeurs (cf. 2.2.1, p.)
D’autres apports englobent l’utilisation des odeurs comme indices permettant la localisation

d'objets (trajets ou détections) ou la reconnaissance d'un événement, d'une personne ou d'un objet faisant appel à des informations connues déjà mémorisées [1], [87].

2.2.2 État de l'art des applications de RV intégrant le retour olfactif

La première expérience de RV incluant la composante olfactive fut le Sensorama [71] (cf. paragraphe 2.1.1, p. 44). Néanmoins, depuis la fin des années 90, le retour olfactif a été intégré dans des applications de RV relatives à des domaines très variés allant du ludique jusqu'aux recherches dans des disciplines relatives aux sciences comportementales et neuropsychologiques.

2.2.2.1 Le domaine des jeux et des divertissements

J. Kaye a, en particulier, réalisé une synthèse très complète des applications ludiques et de divertissement développées antérieurement à 2001, dans le domaine de la RV qui intègrent le retour olfactif [87].

Le LISA a développé, en 2003, l'application "DIODE" (Diffusion d'odeurs dans les environnements virtuels et réels) [110] qui permet d'expérimenter un retour olfactif dans un EV immersif. L'utilisateur muni d'un HMD se promène sur la place Vendôme à Paris et peut sentir l'odeur agréable de deux plantes et un fruit (un oranger, une fraise ou une rose) localisées au centre de sphères olfactives, dans l'EV. Lorsque le promeneur pénètre dans l'une de ces sphères virtuelles, des particules virtuelles odorantes sont visualisées et une odeur correspondant à l'image est diffusée (Table 2.3).

Dans le même contexte, une application récente appelée "FRAGRA" utilise des dispositifs de diffusion d'odeurs portables (à fixer sur le bras "arm-mounted interactive OD" ou à fixer sur la tête "head wearable OD") développés au Nara Institute of Advanced Science and Technology. L'utilisateur doit atteindre, prendre et amener un fruit virtuel près de son visage pour en sentir l'odeur et déterminer si celle-ci correspond bien au fruit attrapé (Table 2.3) [100].

2.2.2.2 Le domaine de la formation et de l'apprentissage

Dans le domaine de la formation, plusieurs applications ont été développées au DIVE (Deep Immersion Virtual Environment Laboratory), J.P. Cater et son équipe ont fabriqué un dispositif d'entraînement pour les sapeurs-pompiers. Des parfums sont délivrés par le masque à oxygène, appareil de l'équipement standard d'un sapeur-pompier, à partir d'un système porté dans le sac à dos [28]. Le système utilise la méthode "scratch n'sniff" (cf. paragraphe 2.2.3.1). Le sys-

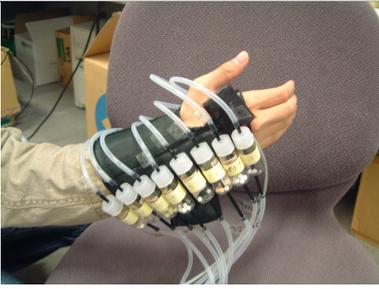
	
L'application "DIODE"	Sphère olfactive de la place Vendôme
	
Dispositif de l'application "FRAGRA"	Illustration de l'application "FRAGRA"

Table 2.3 – Deux applications de RV dédiées au domaine des jeux/divertissements: "DIODE" [61] et "FRAGRA" [146]

tème est maintenant amélioré et intègre jusqu'à sept odeurs simultanément (bois brûlé, graisse, caoutchouc au soufre, huile, etc.) [160].

DARPA et Artificial Reality Corporation ont développé une application de RV pour la formation d'infirmiers. Le but est d'incorporer des stimuli olfactifs pour augmenter le réalisme de la formation. Un dispositif émet des odeurs spécifiques (sang, ordures, essence et fumée) lorsque l'utilisateur approche différentes zones de la scène de l'accident [54].

Plus récemment, l'ICT (Institute for Creative Technologies) de l'Université de Californie du Sud s'est investi dans différents projets exploratoires concernant l'utilité de la modalité sensorielle olfactive dans des applications virtuelles d'entraînement de l'armée américaine. Dans ce contexte, Washburn et Jones recommandent d'utiliser une odeur pour compléter les autres modalités sensorielles [150], [149]. Un autre projet appelé "AnthroTronix" réalisé dans le cadre d'une collaboration avec l'armée américaine explore la faisabilité et l'utilité d'un EV immersif intégrant la diffusion d'odeurs par l'intermédiaire d'un collier ("Scent CollarTM") [6].

2.2.2.3 Le domaine de l'éducation et de la pédagogie

Jusqu'ici les applications de RV intégrant la modalité olfactive pour des applications pédagogiques sont peu nombreuses. Nous pouvons citer le projet ludo-pédagogique appelé "Nice-smelling Interactive Multimedia Alphabet" développé en France par l'entreprise Souris Grise selon les spécifications de France Telecom R&D. Son originalité consiste en l'apprentissage de l'alphabet et de lecture en associant chaque lettre aux trois modalités sensorielles : vision, son et olfaction [51].

Nous nous sommes récemment intéressés aux EVs pédagogiques pour l'apprentissage des sciences, incluant entre-autres modalités, le retour olfactif. Les investigations actuelles concernent, par exemple, l'apprentissage et la mémorisation de molécules organiques complexes [139] et de concepts physiques abstraits qui peuvent être expérimentés virtuellement à travers différentes configurations expérimentales ("desktop" et immersive multi-modale sur la plate-forme expérimentale PREWISE) [117]. Les EVs qui ont été développés comportent des caractéristiques essentielles selon Winn pour la réalisation d'applications pédagogiques :

- l'interaction avec l'EV et les objets,
- la taille qui consiste à modifier les échelles relatives de l'utilisateur et des objets étudiés, et
- la réification qui consiste à rendre perceptibles des représentations abstraites [153].

2.2.2.4 Le domaine de la médecine et de la télé-chirurgie

Nous pouvons citer entre-autres, les travaux de Keller et *al.* sur la transmission d'informations olfactives pour la télé-médecine [89].

2.2.2.5 Le domaine de la réhabilitation et de la thérapie

Dans le domaine de la réhabilitation, A. Rizzo a développé les thérapies virtuelles pour aider les vétérans des guerres d'Irak ou d'Afghanistan à faire face aux effets psychologiques traumatisants de la guerre [120]. L'idée est de ré-introduire graduellement, par l'intermédiaire d'EVs multi-sensoriels, les patients dans les expériences à l'origine des traumatismes psychologiques jusqu'à ce que leurs troubles ne soient plus invalidants. L'application intègre des odeurs de caoutchouc brûlé, de gasoil, de corps en décomposition, de déchets et même d'épices locales.

L'utilisation des techniques de RV pour l'évaluation et la réhabilitation des fonctions cognitives offre de nombreux avantages qui reposent sur le caractère immersif, dynamique, interactif et hautement expressif des EVs, dont le contenu peut être plus rigoureusement contrôlé par le thérapeute. Ils peuvent en particulier offrir des avantages non-négligeables relatifs par exemple

à la capacité de diagnostique, la qualité métrique des épreuves, la validité écologique des tests [119].

2.2.3 Les interfaces olfactives

Le retour olfactif dans les EVs nécessite des interfaces olfactives capables d'émettre des odeurs liées à des cibles virtuelles (lieux, objets ou événements de l'EV), de façon contrôlée : un dispositif olfactif est constitué d'un ensemble matériel, logiciel et de produits chimiques (molécules odorantes) capable de présenter l'information olfactive à l'utilisateur de l'EV. Il peut être décrit comme un système générant de l'information chimique à partir d'information électrique. Selon les scénarios virtuels, il doit recevoir des informations concernant, le type d'odeur, sa localisation spatiale, sa concentration et sa dynamique temporelle. Le pilotage de ces informations par l'ordinateur pose le problème de codage de l'information olfactive. Dans la mesure où aucun phénomène physique simple n'est à l'origine de la perception du signal olfactif, aucun système simple de codage, transfert puis décodage du signal olfactif n'est applicable [40].

Dans cette partie, nous décrivons et analysons les différentes interfaces olfactives (ou dispositifs odorants ou plus communément "diffuseurs d'odeurs") commercialisées ou à l'état de prototypes de laboratoire, utilisées dans les EVs. Dans les paragraphes suivants, l'acronyme "DO" sera utilisé pour nommer les dispositifs odorants. En particulier, les différentes technologies de stockage et de libération des molécules odorantes, ou encore de dispersion, sont décrites.

Cette section constitue une étape essentielle permettant d'aborder quelques-uns de ces aspects techniques et technologiques des DOs nécessaires à l'établissement d'une méthodologie d'intégration de ces interfaces dans les EVs.

2.2.3.1 Les technologies des diffuseurs olfactifs

Le diffuseur est l'appareil ou périphérique connecté au PC et piloté à distance qui permet de diffuser les parfums en synchronisation avec les images. En général il se compose d'une partie fixe (boîtier) et d'une partie amovible contenant les consommables (fragrances). Sous la forme la plus générale, un dispositif olfactif ou diffuseur d'odeurs (DO) est constitué :

- d'un **moyen de stockage** des molécules odorantes
- d'une **technique physico-chimique de libération et d'évaporation** des molécules
- éventuellement d'un **système de dispersion** des vapeurs odorantes
- et d'un **algorithme de contrôle de la diffusion** (et/ou de la dispersion) dépendant de la simulation virtuelle et qui détermine les quantités, et les aspects temporels des stimuli.

La connexion entre l'OD et l'ordinateur est généralement réalisée par un port USB. Il est

à noter que les nouveaux dispositifs utilisent de plus en plus de connexions sans fil (type Bluetooth ou Wi-Fi).

Certains dispositifs proposent des techniques permettant le pilotage en temps réel des mélanges d'ingrédients de base, offrant ainsi à l'utilisateur une large gamme d'odeurs disponible.

Les technologies de stockage des molécules odorantes La plupart des dispositifs odorants commercialisés ou développés dans le cadre académique sont capables de proposer une palette de plusieurs odeurs (jusqu'à 8). Les molécules odorantes, constituants primaires de l'odeur diffusée, peuvent être stockées soit [69]:

- *en phase liquide* contenant les molécules, provenant d'huiles essentielles naturelles, ou molécules de synthèse dissoutes dans des solvants (eau, alcools et esters). Certains dispositifs proposent le stockage des liquides odorants dans des réservoirs hermétiques permettant de libérer les odeurs, en quantités bien contrôlées. La conservation des produits est optimale ce qui augmente l'autonomie. Ces réservoirs intégrés sont remplis par des liquides plus ou moins concentrés en molécules odorantes. Ce procédé de stockage est utilisé dans le diffuseur ONYXTM d'Osmooze [107].
D'autres dispositifs n'intègrent pas ces réservoirs : le liquide stocké dans un flacon de conservation est introduit lors de l'utilisation dans la partie du dispositif destinée à le recevoir. C'est le cas des diffuseurs MDS-systems [108] et du prototype du LISA [110] (Table. 2.4). Ce procédé nécessite de gérer les concentrations et quantités de liquide à introduire avant l'utilisation de l'interface.
- *dans une phase solide*, constituée par un gel (phase solide amorphe), englobant des molécules dissoutes dans un solvant. Les gels les plus visqueux (cire) peuvent être mis sous la forme de granulés, par exemple. Le stockage sous forme d'un emballage encapsulé (cartouche) amovible est le plus courant. Ce stockage permet une bonne conservation des produits chimiques grâce à un conditionnement parfaitement hermétique avant utilisation. C'est le cas des diffuseurs P@DTM d'Osmooze [107] (Table. 2.4). Après ouverture des cartouches, la durée de conservation des gels est généralement limitée. Des recommandations de stockage sont données par les fabricants.
- par une *technique d'imprégnation d'un substrat* (papier, fibres, etc.) dans des microcapsules, enfermant le liquide odorant. Il s'agit d'un moyen de stockage dit de "Scratch'n sniff".

Les technologies de libération et vaporisation des molécules odorantes Les molécules odorantes stockées en phase liquide ou solide sont libérées et vaporisées par différents procédés physico-chimiques (thermiques ou mécaniques).

Dans le cas du stockage en phase liquide, les procédés s'inspirent de la technologie des imprimantes jet-d'encre qui permettent par impulsions électriques, l'éjection à fréquence élevée et contrôlée, des minuscules gouttelettes de liquide odorant dans le gaz vecteur (air), pour créer une brumisation ou une nébulisation. Les fines gouttelettes obtenues s'évaporent ensuite très facilement dans l'air. Nous pouvons citer:

- La technique pneumatique qui permet grâce à de l'air comprimé (mini-compresseur commandé par impulsion électrique) d'éjecter de faibles quantités de liquide odorant sous forme de brouillard sec (micronisation).
- La technique thermique qui permet d'éjecter par échauffement local et surpression des gouttelettes fines dans le gaz vecteur. L'échauffement local est créé par impulsions électriques commandées, leur fréquence élevée permet de créer une brumisation du liquide.
- La nébulisation piézo-électrique basée sur un résonateur piézoélectrique à fréquence élevée (200 kHz). Dans le cas du diffuseur ONYXTM d'Osmooze [107] un capillaire métallique et un résonateur mis en vibration par les signaux provenant de la carte électronique de commande permettent de nébuliser la phase liquide contenant les molécules olfactives, sous forme de fines gouttelettes bien calibrées (15-50 μm), dans le gaz vecteur (air) ou encore de le déposer sur un substrat d'évaporation. Ce procédé permet de diffuser à froid plusieurs senteurs simultanément ou alternativement.
- La diffusion gazeuse par sublimation qui consiste à évaporer les molécules odorantes englobées dans une phase solide (gel, cire) par passage d'air à sa surface par l'intermédiaire d'un mini-ventilateur (Diffuseurs P@DTM d'Osmooze [107] ou Olfacom[®] d'AC2i [106](Table. 2.4). L'intérêt de cette technologie est que seules les molécules odorantes sont transportées par le gaz vecteur sans aucune autre particule ou impureté (solvant, etc.).
- La technologie par chauffage qui permet d'évaporer sur une plaque chauffante de petites quantités de liquide odorant. C'est le procédé utilisé par le diffuseur SniffmanTM de Ruetz Technologies : le liquide odorant contenu dans de minuscules alvéoles est libéré par signal-radio, sur une minuscule plaque chauffante [136] (Table. 2.4).

La dispersion des molécules odorantes Les molécules odorantes étant évaporées dans le gaz vecteur (air), la dispersion des molécules odorantes est due à deux types de phénomènes de transport. Les transports qui accompagnent un déplacement d'ensemble, par exemple les mouvements de convection du gaz vecteur soumis à un système de ventilation (advection) et ceux qui relèvent d'une diffusion.

Pour la plupart des DOs fixes, c. à d. non portables, le phénomène de transport des molécules sur des distances non négligeables nécessite un système de dispersion des odeurs, consistant généralement en un système classique de ventilation. Dans ce cas, le phénomène majoritaire de transport des molécules est la convection. Le transport convectif est régi par la mécanique des fluides et la dispersion de l'odeur est fortement dépendante des paramètres de ventilation (vitesse et orientation), du gradient de température et de la stabilité de l'atmosphère.

Classiquement, les dispositifs odorants comportant un système de ventilation nécessitent d'être placés à des distances (données constructeurs) de l'utilisateur variant de 20 à 50 cm pour les diffuseurs de bureau, tandis que les dispositifs grande-échelle nécessitent d'être placés à une distance minimale de 50 cm et jusqu'à 5 m pour les plus importants systèmes de ventilation (ventilateurs multiples).

Dans le cas des DOs portables (tels que le "Scent Collar" (cf. Table 2.4)), ou le "arm-mounted OD"(cf. Table 2.3), les molécules libérées localement sont soumises au phénomène physique de diffusion selon la Loi de Fick qui tend à égaliser la concentration des molécules dans l'espace environnant et sur de courtes distances. La diffusion des molécules s'effectue selon un gradient de concentration fonction de la distance. Les paramètres à contrôler sont, dans ce cas, la température et la quantité de molécules libérées.

2.2.3.2 Les diffuseurs olfactifs commercialisés et prototypes

De nombreux brevets concernant les technologies et dispositifs de diffusion d'odeurs ont été déposés au cours des vingt dernières années [87]. Certains d'entre-eux concernent la diffusion à l'échelle de bâtiments [48], l'"olfactorisation" des véhicules [49]. De nombreux autres brevets exploitent les différentes technologies de diffusion et dispersion d'odeurs [130], [131], [27]. Enfin certains plus récents sont orientés applications multi-média [95], [26]. Pendergrass en 1996 a breveté un OD qui se place sur le cou de l'utilisateur et inclut un casque HMD [111].

Ce paragraphe présente une liste non exhaustive de diffuseurs disponibles sur le marché ou à l'état de prototypes dans les laboratoires.

De nombreux dispositifs odorants sont commercialisés par diverses entreprises [107], [8], [143], [136]. Celles-ci sont essentiellement fournisseurs de dispositifs type "grand public" pour des applications culturelles, de type marketing sensoriel "olfactorisés" ou pour une utilisation

personnelle type multi-media sur PC. Certains de ces dispositifs, disponibles sur le marché, peuvent être utilisés pour l'intégration de la composante olfactive en RV. En outre, des prototypes récents sont également utilisés dans le cadre académique pour servir les recherches à l'intersection des domaines de l'olfaction et de la RV [156], [140], [61].

2.2.3.2.1 Diffuseurs commercialisés Il existe de nombreux diffuseurs d'odeurs déjà commercialisés. La liste proposée ci-dessous n'est pas exhaustive mais permet d'apprécier l'étendue de la gamme de diffuseurs disponible, en termes d'ergonomie, du nombre d'odeurs proposées, des technologies utilisées et des techniques de diffusion et de dispersion.

ScentKioskTM Le ScentKioskTM de ScentAir [148] est un diffuseur à base fixe qui envoie des quantités précises de molécules odorantes via un tube dont l'extrémité doit être située à moins de 45 cm du nez de l'utilisateur. Le DO classique distribue trois odeurs différentes via trois tuyaux séparés pour éviter le mélange des odeurs [137].

SniffmanTM Le SniffmanTM développé par l'entreprise allemande Ruetz Technologies contient de minuscules alvéoles (fig. 2.4). La synchronisation des images et des odeurs est gérée par un pilote qui envoie, par signal-radio, la commande de la libération d'une gouttelette de liquide odorant. Une gouttelette d'odeur précise, contenue dans le dispositif, est libérée sur une minuscule plaque chauffante qui répand alors l'odeur [136].

Pinoke[®] L'OD Pinoke[®] d'AromaJet peut être installé sur différents supports comme un visiocasque, un siège, à côté de l'écran dans une configuration de type "desktop" ou peut être porté directement autour du cou du sujet (tab. 2.4, p. 72) [8]. Le principe de ce dispositif basé sur des micro-diffuseurs (MicroFab Technologies) dont la commande est contrôlée par un algorithme, permet le mélange de plusieurs ingrédients de base (jusqu'à 16) pour créer différentes odeurs.

Vortex Active Le Vortex Active de la Société DaleAir est réservé aux applications "olfactorisées" grand-public d'odeurs (film) mais il peut être également utilisé de manière autonome et peut distribuer 4 odeurs différentes, de manière contrôlée. Ce système est surtout utilisé avec le logiciel Exhalia pour les applications (tab. 2.4, p. 72)[38].

Olfacom[®] Le diffuseur d'Olfacom[®] de l'entreprise AC2i utilise la diffusion gazeuse par sublimation (passage d'air sur un solide). La commande s'effectue directement sur les cartouches olfactives contrairement aux autres technologies. L'appareil est pour le moment piloté

par une connexion de type port-série mais le développement s'oriente vers une connexion de type wi-fi. Ce diffuseur est composé d'un moto-réducteur, d'un système de ventilation, d'une carte électronique et d'une cartouche interchangeable. La carte électronique est équipée du micro contrôleur 89C2051 de la famille 8051 pour rendre le fonctionnement intelligent (tab. 2.4, p. 72)[106].

ScentCartridge Le système ScentCartridge d'Aerome[®] est composé de plusieurs tubes de verre contenant les odeurs à diffuser sous forme de granulés. La diffusion des odeurs est commandée par un microprocesseur. Les jets d'air passent par les tubes et sont émis en une fraction de seconde (tab. 2.4, p. 72)[4].

SENX ScentTM Le SENX ScentTM de Trisenx utilise une technologie qui consiste à imprimer des odeurs sur des feuilles de papier de fibre. L'utilisateur peut par la suite sentir ou goûter ces saveurs spécifiques en léchant le papier enduit de l'odeur. Comme une imprimante classique, les fragrances et les arômes sont stockés dans une cartouche dans le dispositif. La cartouche a vingt chambres, chacune contenant une odeur distincte [17], [136]

ScentDomeTM Le ScentDomeTM de Trisenx peut contenir jusqu'à 20 odeurs différentes (fig. 2.4, p. 72)[143].

P@dTM et M@dTM Les P@dTM d'Osmooze utilisent la technologie de stockage en gels. L'utilisation de ces diffuseurs est bien adaptée à une configuration "desktop". Le M@dTM regroupe six p@d dont le design a été modifié (fig. 2.4, p. 72) [107].

ONYXTM et MicroPulseTM 400 L'ONYXTM et le MicroPulseTM 400 d'Osmooze utilisent le stockage sous forme liquide et une mini-pompe à résonateur piézoélectrique qui permet de nébuliser le liquide odorant. Des quantités importantes peuvent aisément être émises, en fonction de l'application, par exemple pour odoriser toute une pièce. Les substances sont contenues dans des réservoirs hermétiques L'évaporation rapide des substances évite la rémanence d'odeur pendant les périodes qui séparent les images olfactives (fig. 2.4, p. 72) [107].

Kaori Tsushin de NTT Communications NTT Communications, société japonaise, a créé un système de communication de fragrances par internet nommé "Kaori Tsushin". La technologie est basée sur un dispositif de diffusion spécial programmé avec des données téléchargées par internet. Le système, après avoir récupéré une "recette" d'arôme sur le site désiré,

enregistre l'information dans une "LAN-Box". Cette "LAN-Box" peut ensuite être retirée de l'ordinateur et être utilisée partout (tab. 2.4, p. 72).

Ce système a notamment été utilisé lors de l'odorisation du film " The new world" au Japon [104]. La boîte était alors reliée à des diffuseurs placés sous un certain nombre de sièges dans le théâtre. Chaque dispositif contenait six huiles, qui ont été combinées. La "LAN-Box" commandait la diffusion automatique de ces arômes pendant des scènes choisies du film. Le diffuseur utilisé est commercialisé.

Scent Collar Le Scent Collar a été développé dans le cadre d'une collaboration entre l'ICT de l'Université de Californie du Sud et la société AnthroTronix Inc. Le dispositif consiste en un collier qui permet la libération contrôlée d'odeurs (4 pour le prototype). Ce dispositif est léger, peu intrusif et bien adapté à une utilisation dans des EVs. Chaque odeur est contenue dans une cartouche individuelle rechargeable. Il est radio-commandé grâce au Bluetooth par la simulation virtuelle ou le jeu. De plus, il gère le contrôle en durée et en quantité des odeurs et permet une rapide dispersion des molécules odorantes. (tab. 2.4, p. 72). L'ICT l'utilise actuellement pour différents projets exploratoires concernant la composante olfactive, dans les EVs, en collaboration avec l'armée américaine (cf. paragraphe 2.2.2.2, p. 2.2.2.2) [6].

Diffuseur MDS-Systems En collaboration avec le laboratoire de Robotique de Versailles (LRV), la société française MDS-systems a réalisé un système de diffusion composé de deux éléments : une boîte électronique contenant un microcontrôleur et des diffuseurs [108](tab. 2.4, p. 72). Ces diffuseurs ont été utilisés pour l'application de RV "DIODE" développée au LISA [110]. L'application dialogue avec un ordinateur via le port série "RS-232". Le microcontrôleur utilisé est de type "PICBASIC-3B". Le programme sur le PC qui assure la commande des diffuseurs est en C++ ce qui permet de l'intégrer dans de nombreux logiciels.

2.2.3.2.2 Prototypes académiques

Système du LISA Ce dispositif olfactif a été développé au sein du laboratoire [84] (fig. 2.4). Il est basé sur un principe analogue à celui du système de MDS-Systems à savoir, diffusion à froid et ventilation mécanique sauf que des améliorations ont été apportées.

Le port série disparaît maintenant des PC au profit des ports USB plus rapides, c'est pourquoi la nouvelle carte de commande se connecte au PC via le port USB. Le deuxième point important est qu'il est possible de faire varier la vitesse des diffuseurs dynamiquement pour simuler un signal olfactif plus ou moins fort, plus ou moins proche. Enfin, le bruit des diffu-

seurs est réduit, ceci afin d'éviter que les sujets utilisent le son comme indice lors de futures expériences de réalité virtuelle.

La carte électronique est composée de différentes parties dont un microcontrôleur de type Pic 18F8720. Elle comprend un connecteur USB pour connecter le câble USB du PC à la carte, un connecteur RJ11 pour pouvoir programmer le microcontrôleur. La transmission des données se fait sur huit bits. Actuellement six bits sont utilisés pour le numéro du diffuseur et deux bits pour la vitesse choisie (trois vitesses possibles plus l'arrêt du diffuseur). Ce système permet donc d'envisager soit une discrétisation de la vitesse des ventilateurs sur 128 niveaux soit un nombre plus important de diffuseurs. Le contrôle est écrit en langage C++ afin de permettre une insertion rapide dans les applications.

Diffuseur de Yamada et al. Des chercheurs de l'Université de Tokyo ont créé un diffuseur portable qui se place sur le nez de l'utilisateur. L'odeur est stockée en phase liquide et utilise un système pneumatique de nébulisation. Afin d'éviter les fuites odorantes, le dispositif utilise des tubes pour amener les odeurs au nez de l'utilisateur. Le système contrôle en temps et quantité la distribution de l'odeur en fonction de l'emplacement de l'utilisateur et de la source odorante dans le monde virtuel [154].

Spot-scents Yanagida et al. de Japanese ATR Media Information Science Laboratories, ont développé un dispositif olfactif robotisé qui permet de projeter en direction du nez de l'utilisateur, un flux d'air olfactorisé. Le système appelé SpotScents incorpore un algorithme de tracking du visage de l'utilisateur (tab. 2.4, p. 72) [155]. Le dernier prototype gère deux canons à air [102].

Diffuseur du jeu FRAGRA Pour les besoins de leur application, A. Mochizuki et al. ont utilisé un diffuseur qui se place sur la main. Les odeurs sont stockées sur le dos de la main et le diffuseur est placé à l'intérieur de la main (tab. 2.4, p. 72).

Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons rappelé les fondements, l'historique et les différentes interfaces de RV et avons abordé en particulier deux notions essentielles en RV : l'immersion et la sensation de présence.

Un état de l'art sur les travaux antérieurs et actuels concernant la composante olfactive en RV a été proposé. Bien qu'il ait été antérieurement mis en évidence que la composante olfac-

		
Vortex Active de DaleAir	ONYX [®] de Osmooze	MicroPulse TM 400 de Osmooze
		
Diffuseur de FRAGRA	Diffuseur de Yamada et <i>al.</i>	Scent Collar TM de ICT
		
Sniffman TM de Ruetz Tech.	Pinoke TM d'Aromajet	Diffuseur de NTT Communications
		
M@d TM de Osmooze	ScentDome TM de Trisenx	Système Olfacom [®] de AC2I
		
SpotScents TM de ATR	Diffuseur de MDS-Systems	Diffuseur du LISA

Table 2.4 – Quelques dispositifs odorants commerciaux et prototypes académiques

tive avait une influence positive en ce qui concerne l'immersion et la sensation de présence d'un sujet dans un EV, elle est encore peu utilisée. A ce jour, dans la plupart des applications ou des environnements de RV, les modalités sensorielles utilisées sont des modalités visuelle, auditive et haptique. Peu de laboratoires développent des activités de recherche dans les domaines conjoints de la RV et de l'olfaction. Quelques laboratoires japonais ont développé des prototypes de dispositifs odorants pour des applications de RV et de multi-média. Aux États-Unis quelques travaux concernent l'influence de la composante olfactive pour l'apprentissage, l'entraînement et la rééducation et le traitement des phobies.

A ce jour, aucune méthodologie n'existe pour intégrer le retour olfactif de manière efficace, en fonction des caractéristiques du système de RV (interfaces et techniques d'interaction). Outre les problèmes de subjectivité de perception des odeurs, un certain nombre de questions essentielles pour l'intégration de la composante olfactive dans un EV ont été posées antérieurement par Barfield et Danas [10]. Par exemple la dispersion contrôlée de l'odeur dans le temps et l'espace est un problème majeur.

Méthodologie d'intégration de la composante olfactive dans les EVs

Introduction

Il existe de nombreux diffuseurs qui peuvent être intégrés dans une application de réalité virtuelle. Certains ont été présentés dans le chapitre précédent (paragraphe 2.2.3.2).

Pour un concepteur d'application de réalité virtuelle, il peut être difficile de savoir quel matériel l'application nécessitera et quels types d'interactions il devra mettre en place. En ce qui concerne l'utilisation des interfaces olfactives en RV, encore peu de retours d'expériences sont disponibles et aucune taxonomie ou méthodologie d'intégration de la composante olfactive dans les EVs n'a été proposée.

D.A. Bowman et *al.* [22] ont proposé des taxonomies pour les tâches de sélection, manipulation, et de locomotion par exemple. L. Arns et C. Cruz-Neira ont étendu cette taxonomie dans le cadre de la navigation et en proposant une intégration tenant compte de la tâche et des périphériques utilisés [7].

Dans la première partie de ce chapitre, nous proposons une méthodologie pour l'intégration des dispositifs odorants dans les environnements virtuels, en nous basant d'une part sur une classification des diffuseurs d'odeurs effectuée par rapport à des critères ergonomiques et d'autre part sur une analyse des différents éléments des taxonomies relatives aux techniques d'interaction en RV proposées antérieurement [22], [7]. Cette méthodologie est complétée par une analyse de critères de compatibilité des diffuseurs d'odeurs en fonction des différentes interfaces visuelles et du nombre d'utilisateurs de l'application virtuelle.

Afin de rendre effective une intégration complète de la composante olfactive, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des paramètres à calibrer et/ou à contrôler du dispositif olfactif

choisi. Dans la seconde partie de ce chapitre, quatre expérimentations sont définies et testées pour déterminer ces paramètres. Les résultats de ces expériences sont ensuite utilisés pour proposer une méthode de caractérisation d'un diffuseur.

Une application de ces deux méthodologies (choix du diffuseur et caractérisation de ce diffuseur) est présentée dans la troisième partie de ce chapitre pour l'intégration d'un diffuseur sur la plate-forme PREWISE.

3.1 Taxonomie d'intégration des diffuseurs olfactifs

Dans le chapitre précédent nous avons recensé et décrit un ensemble non exhaustif des diffuseurs olfactifs, commercialisés ou prototypes de laboratoires (cf. paragraphe 2.2.3.2). Nous proposons dans une première partie une classification de ces différents dispositifs selon des critères ergonomiques de portabilité et d'espace de travail disponible.

Cette classification servira de base pour le choix des diffuseurs et sera couplée aux taxonomies relatives aux techniques d'interaction dans les EVs, de D. A. Bowman et *al.* [22], concernant la sélection et de L. Arns et C. Cruz-Neira [7] concernant la navigation.

3.1.1 Classification ergonomique des diffuseurs olfactifs

3.1.1.1 Critères de portabilité et espace de travail

Les diffuseurs commercialisés ou prototypes de laboratoires présentés dans le paragraphe 2.2.3.2 peuvent être classés en deux grandes catégories (fig. 3.1) :

- **Interfaces olfactives fixes :**

Les diffuseurs **fixes** ont une position figée dans le monde réel et ne sont donc pas liés aux mouvements éventuels de l'utilisateur. Cette catégorie est elle-même divisée en deux groupes : les diffuseurs à *grande-échelle* qui peuvent olfactoriser une pièce de grande dimension très rapidement grâce à un dispositif de ventilation puissant et les diffuseurs de *bureau* qui se placent sur le poste de travail près de l'écran d'ordinateur pour lesquels la distance de dispersion des molécules odorantes est limitée par la taille du ventilateur.

- **Interfaces olfactives portables :**

Les diffuseurs **portables** sont solidaires d'une partie du corps de l'utilisateur (torse, nez, bras ou main). Ils sont mis en mouvement, d'une manière plus ou moins complexe, par rapport à un repère fixe lié au monde réel (référentiel fixe noté R). Nous avons vu que pour ce type d'interfaces, la dispersion des odeurs est réalisée localement et en petite quantité,

nécessitant une proximité avec le nez de l'utilisateur (de l'ordre de 5-20 cm) suivant les dispositifs pour que les odeurs soient perçues (cf. paragraphe 2.2.3.1).

Certains d'entre-eux ont un mouvement relatif par rapport à l'utilisateur très restreint car nous considérons que le mouvement de la tête et donc du nez (récepteur) par rapport au torse peut être négligé. Nous les qualifions de *figés* par rapport au référentiel lié à l'utilisateur (figés/référentiel R'), d'autres ont un mouvement plus complexe puisque leur mouvement dans un repère lié au monde réel est composé de deux mouvements : celui de l'opérateur par rapport au repère lié au monde réel et son mouvement par rapport à l'utilisateur (torse), nous les qualifions de *mobiles* par rapport au référentiel lié à l'utilisateur (mobiles/référentiel R').

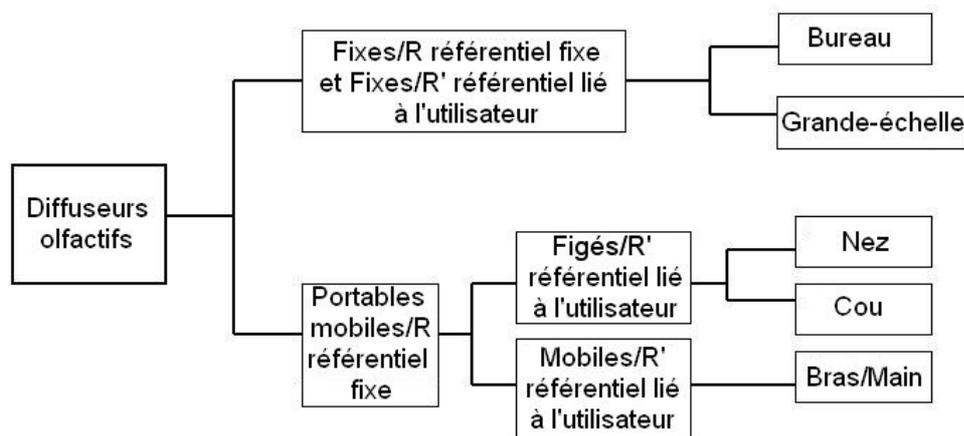


Figure 3.1 – Classification ergonomique des diffuseurs olfactifs

Le critère de classification relatif à l'espace de travail est basé sur les distances et volumes autorisés pour le retour olfactif. Nous avons vu précédemment que les différentes techniques utilisées par les diffuseurs et en particulier la présence de ventilateurs autorise la dispersion des molécules odorantes sur de plus ou moins longues distances (cf. paragraphe 2.2.3.1).

La table 3.1 regroupe les différents dispositifs odorants présentés au paragraphe 2.2.3.2 et classés selon les catégories de la classification ergonomique proposée.

3.1.1.2 Correspondance avec la classification des interfaces haptiques

Un point intéressant, qui plaide pour la classification que nous proposons, est sa similarité avec la classification généralement présentée pour les interfaces haptiques [22], [132].

	Mobilité/R	Mobilité/R'	Localisation	Espace de travail	Diffuseurs commercialisés et prototypes de laboratoires
Portabilité	Fixes	Fixes	Bureau	Distance OD-nez < 50 cm	ScentKiosk TM , ScentPop TM Olfacom [®] , ScentCartridge TM ScentDome TM , Ismell TM P@d TM , M@d TM , Pinoke TM Système MDS-Systems Système LISA, SpotScents
			Grande-échelle	Distance OD-nez 50cm < > 5m	ScentWave TM Vortex Active TM , ONYX TM MicroPulse TM 400
	Portables	Figés	Nez	Quelconque sauf si limité par la longueur des tuyaux	Système de Yamada et <i>al.</i> Pinoke [®] , Sniffman TM Système FRAGRA
			Cou		
		Mobiles	Bras/main		

Table 3.1 – Diffuseurs olfactifs classés selon les catégories de la fig. 3.1 (R: référentiel fixe du monde réel et R' référentiel lié à l'utilisateur)

Dans les interfaces haptiques, la loi d'action et de réaction impose un bouclage de la chaîne des efforts, de sorte que l'on peut en distinguer deux types :

– **Interfaces haptiques fixes :**

La chaîne des efforts se referme sur un socle fixe ; on parle de retour d'efforts à réaction externe. C'est le cas, par exemple, pour le SPIDAR-H (Space Interface Device for Artificial Reality) qui est adapté à une configuration *grande-échelle* (cf. Table 2.2) [123] et les interfaces adaptées à une configuration de bureau, comme l'interface Omni de SensAble Technologies [125].

– **Interfaces haptiques portables :**

La chaîne des efforts se referme sur l'opérateur ; on parle alors de retour d'efforts à réaction interne. Parmi ces interfaces, nous distinguons les interfaces *figées* c.-à-d. fixes par rapport à l'utilisateur, telles que le Haptic GEAR [75] ou *mobiles* par rapport un référentiel lié au torse de l'utilisateur. Cette dernière catégorie regroupe les gants à retour d'effort, tels que les Rutgers Master I et II (cf. Table 2.2) [19].

Le tableau 3.2 illustre la correspondance entre la classification ergonomique des interfaces olfactives et la classification basée sur les réactions internes et externes du retour d'effort dans le cas des interfaces haptiques (cf. 2.2).

En ce qui concerne les interfaces haptiques, notons cependant qu'elles n'impliquent toujours qu'un seul utilisateur, alors que les interfaces olfactives peuvent impliquer plusieurs utilisateurs simultanément, en particulier dans le cas des configurations immersives grand-écran.

3.1.2 Taxonomie des techniques d'interaction

Dans les paragraphes suivants, nous nous intéressons à l'intégration de la composante olfactive basée sur l'analyse des différentes techniques d'interaction utilisées dans les applications de RV.

Les techniques d'interaction en EV sont regroupées en quatre catégories :

- la *sélection*,
- la *manipulation*,
- la *locomotion*,
- le *contrôle d'application*.

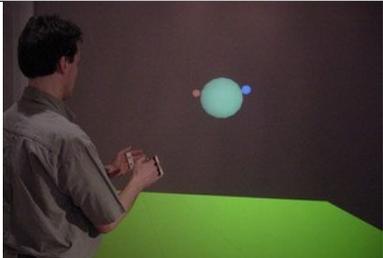
Catégories	Interfaces haptiques	Interfaces olfactives
Fixes - Bureau	 Phantom [®] Premium 6DOF	 M@d TM
Fixes - Grande-échelle	 SPIDAR-H	 ONYX TM
Portables - Figés	 Haptic Gear	 Aromajet TM
Portables - Mobiles	 LRP Hand Dextrous Master	 Système Fragra

Table 3.2 – Correspondance entre les classifications des interfaces haptiques et des interfaces olfactives

3.1.2.1 La sélection

D.A. Bowman et *al.* ont proposé une taxonomie pour la classification des techniques de sélection [22]. Cette taxonomie, à laquelle nous avons ajouté une composante olfactive dans la partie "retour sensoriel" est illustrée à la figure 3.2. En effet, l'utilisation de la composante olfactive nous semble pertinente dans les cas suivants :

- surcharge de canaux sensoriels (visuel ou auditif)
- renforcement de retours sensoriels
- déficience visuelle et/ou sonore

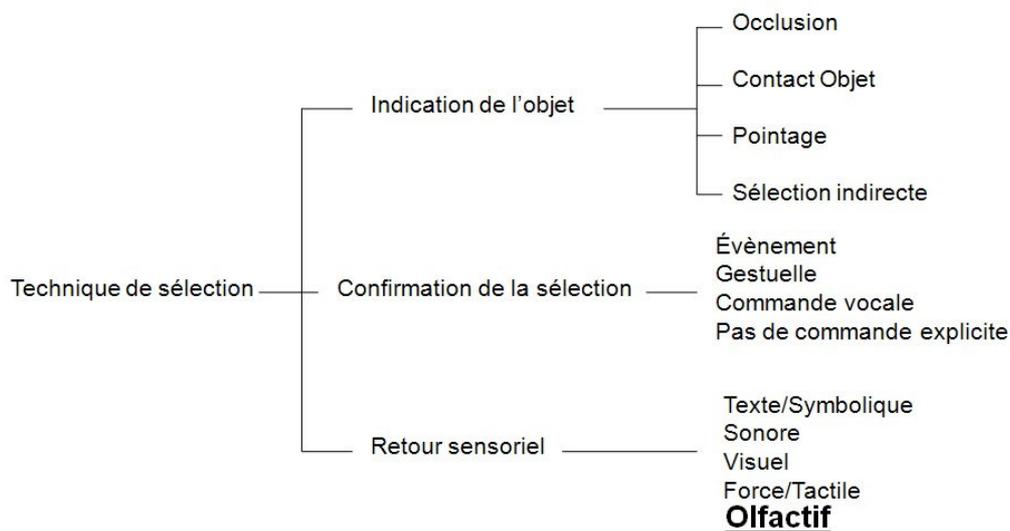


Figure 3.2 – Taxonomie des techniques de sélection proposée par D.A. Bowman [22] ; intégration de la composante olfactive dans la partie "retour sensoriel"

3.1.2.2 La manipulation

Selon D. A. Bowman et *al.* [22], il existe, en plus de la sélection, deux primitives impliquées pour la manipulation :

- *la translation* : modification de la position d'un objet virtuel
- *la rotation* : modification de l'orientation d'un objet virtuel

Notons que la manipulation d'objets virtuels peut impliquer, contrairement à la manipulation d'objets réels, la modification de l'ensemble des paramètres de l'état d'un objet tels que sa taille, sa couleur, etc.

En outre, la manipulation d'objets virtuels peut impliquer des techniques d'interaction reposant sur différentes interfaces motrices au contraire de la manipulation d'objets réels qui

implique généralement l'utilisation de la main pour prendre, déplacer et positionner l'objet.

Ainsi, Zhai [159] distingue deux types d'interfaces motrices pouvant être utilisées pour la manipulation :

- Les interfaces **isotoniques** qui impliquent une commande en position et regroupent l'ensemble des interfaces motrices ayant au moins un degré de liberté (1ddl) non contraint. Ce type d'interface peut donc être mis mouvement par l'utilisateur et n'offre aucune résistance. Une souris classique est une interface isotonique à deux degrés de liberté (ddl). Un capteur de mouvement tel que le système Polhemus Patriot [114] est une interface isotonique à 6ddl (3ddl en position et 3ddl en orientation).
- Les interfaces **isométriques** qui impliquent une commande en effort et regroupent les interfaces motrices qui contraignent à une zone très restreinte l'ensemble des degrés de liberté (ddl) utilisés pour la commande. Ces interfaces sont également qualifiés de dispositifs de pression ou de force. La Space-mouse [34] est l'une des interfaces isométriques à 6ddl les plus utilisées. Un simple capteur d'effort peut être considéré comme une interfaces isométriques à 1 ddl.

Zhai a montré qu'une interface isotonique est plus adaptée pour une commande en vitesse alors qu'une interface isométrique est plus efficace pour une commande en position [159].

La compatibilité des diffuseurs d'odeurs selon la technique de manipulation d'objets odorants est proposée sur la figure 3.3.

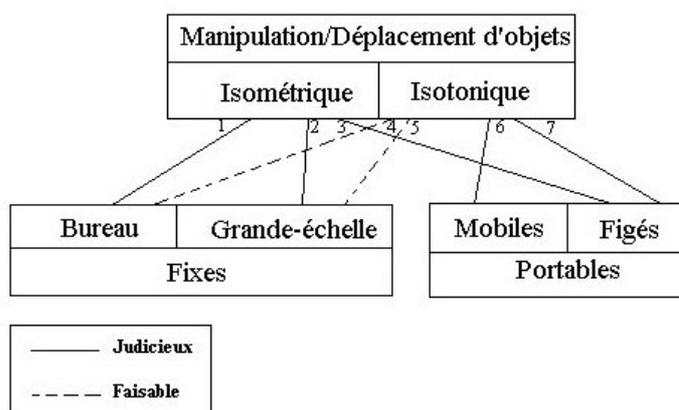


Figure 3.3 – Compatibilité des diffuseurs selon la technique de manipulation (isométrique ou isotonique)

- **Liaisons 1-2-3 :** Si la manipulation est isométrique, dans ce cas, le sujet ne fait pas de mouvement réel pour manipuler un objet dans le virtuel c.-à-d. les mouvements de la main sont

limités. Les diffuseurs fixes peuvent être utilisés, ainsi que les diffuseurs portables figés.

- **Liaisons 6-7** : Si la manipulation est isotonique, les DOs portables sont bien adaptés, le mouvement peut être de grande amplitude, aussi un diffuseur *mobile* est conseillé : pour l'application Fragra (paragraphe 2.2.2.1), les sujets effectuent un mouvement du bras pour sentir l'objet qu'ils ont attrapé ; c'est pourquoi un diffuseur est placé sur la main du sujet. L'autre solution adaptée est le diffuseur *figé* : le sujet peut manipuler sans être gêné par ce diffuseur.

- **Liaisons 4-5** : Les diffuseurs *fixes* peuvent être utilisés mais sont beaucoup moins adaptés. Le diffuseur de *bureau* nécessite d'être posé près du sujet et peut entraver les mouvements de l'utilisateur. Les diffuseurs à *grande-échelle* saturent très vite l'atmosphère, il est difficile de diffuser plusieurs odeurs à la suite.

3.1.2.3 La locomotion

En 2002, L. Arns et C. Cruz-Neira [7] ont proposé une nouvelle taxonomie pour la locomotion basée sur le travail de Bowman et *al.*, auquel elles ont ajouté des considérations relatives aux interfaces motrices, aux interfaces visuelles, au type de tâche, ainsi qu'à la taille de l'EV utilisé.

Deux sous-tâches ont été définies : la *rotation* et la *translation* (voir fig. 3.4).

Dans le cadre de l'intégration de la composante olfactive dans les EV où le sujet doit se déplacer, nous proposons de nous baser sur la taxonomie proposée par Arns, en retenant les deux catégories suivantes : *mouvement physique* (réel) ou *mouvement virtuel*.

Le *mouvement réel* signifie que le sujet effectue un mouvement avec son corps ou une partie de son corps, dans le but de se déplacer dans l'EV. Dans le cas du *mouvement virtuel*, les mouvements du sujet dans le monde réel sont très restreints, il s'agit de gestes de la main par exemple (action sur une manette ou un joystick). Le schéma 3.5 représente les possibilités qui existent pour les deux différents modes de locomotion (réelle ou virtuelle).

- **Liaisons 1-2** : Pour la locomotion d'un sujet dans un EV à l'aide de mouvements dans le réel, deux solutions de diffuseurs peuvent être envisagées. La première concerne l'utilisation de diffuseurs *portables*. Le sujet se déplace dans le monde réel et le diffuseur se déplace en même temps que lui. L'inconvénient est souvent la longueur de fil ou de tube. Si le sujet se déplace, il faut être sûr que le diffuseur puisse le faire dans le même espace de travail.

La deuxième solution est le placement d'un diffuseur *fixe*. Mais ce diffuseur doit appartenir à la catégorie des diffuseurs de grande-échelle pour être sûr que le sujet sente l'odeur même s'il bouge plus loin.

- **Liaisons 3-5** : Si le sujet ne bouge pas dans le monde réel, les diffuseurs *de bureau*, comme les diffuseurs figés, peuvent être utilisés : les deux permettent une détection de l'odeur

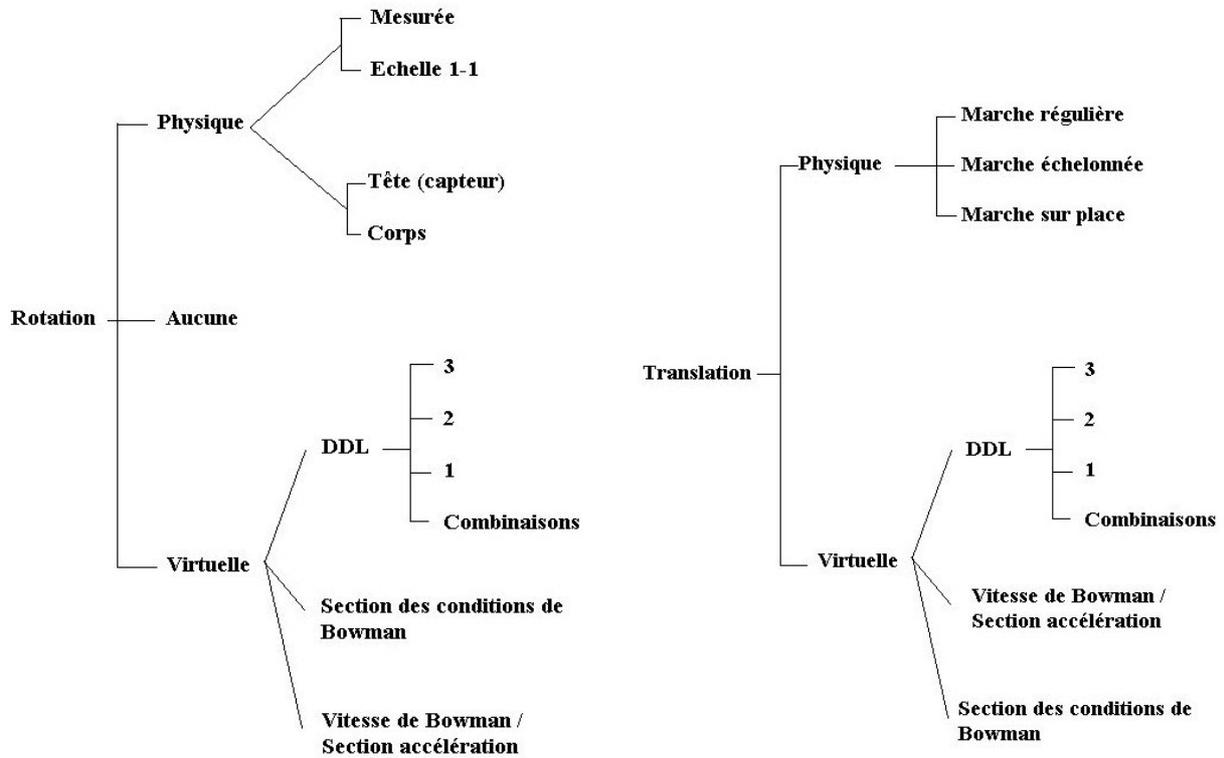


Figure 3.4 – Taxonomie pour la locomotion proposée par L. Arns et al. [7]

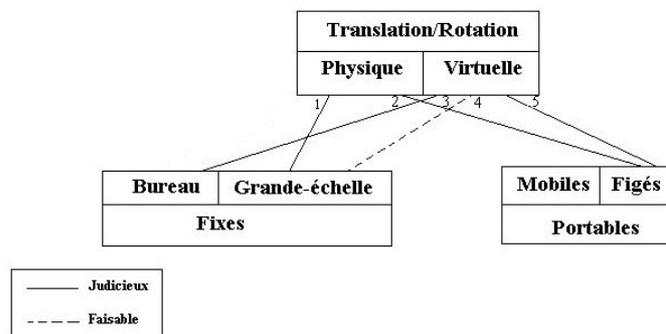


Figure 3.5 – Compatibilité des diffuseurs avec la technique de locomotion mise en oeuvre (réelle ou virtuelle)

assez rapide. L'avantage du diffuseur *portable* est qu'il ne nécessitera pas une table devant le sujet.

• **Liaison 4** : Si le sujet ne bouge pas, il est possible d'utiliser un diffuseur fixe à grande-échelle. Mais la quantité d'odeur dispersée est beaucoup plus importante que pour les deux autres diffuseurs proposés et l'élimination de l'odeur est plus difficile.

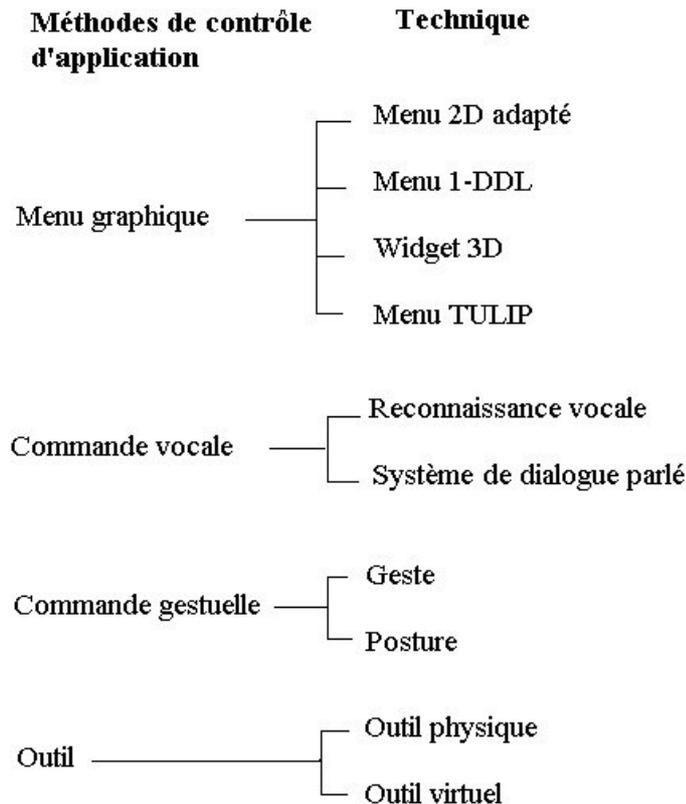


Figure 3.6 – Classification des techniques utilisées pour le contrôle d'application selon D.A. Bowman et *al.* [22]

3.1.2.4 Le contrôle d'application

La figure 3.6 représente différentes méthodes mises en oeuvre pour le contrôle d'applications. Quelle que soit la technique employée, le retour olfactif peut être utilisé.

• Pour le **menu graphique**, ce qui va déterminer le choix du diffuseur sera plutôt la technique d'interaction avec ce menu.

• Pour la **commande vocale**, les diffuseurs utilisés se rapporteront aux critères ergonomiques (portabilité et espace de travail).

• Pour la **commande gestuelle**, on se ramène à la manipulation isotonique (figure 3.3). Pour la commande par posture, cela va dépendre du type de posture : si le sujet reste sur place, on se rapporte aux mouvements virtuels, si le sujet bouge, on se rapporte à la locomotion réelle (cf. fig. 3.5).

• Pour les **outils**, si les outils sont virtuels, on se rapporte à la manipulation isométrique ; si les outils sont réels, on se rapporte à la manipulation isotonique (cf. fig. 3.3).

Les techniques d'interaction ne sont pas les seules caractéristiques de l'application à prendre en compte pour le choix des diffuseurs. Le nombre d'utilisateurs et la plate-forme sur laquelle sera exécutée l'application participent également au choix du diffuseur.

3.1.3 Choix du diffuseur olfactif en fonction du nombre d'utilisateurs

Une application peut être mono ou multi-utilisateurs. Selon le scénario de l'application, des odeurs identiques peuvent être proposées en même temps à tous les utilisateurs, ce qui se rapporte aux applications réelles de cinéma "olfactorisé" (cf. 3.1.4).

Une alternative peut être de proposer des odeurs différentes dans le temps ou l'espace, à chaque utilisateur.

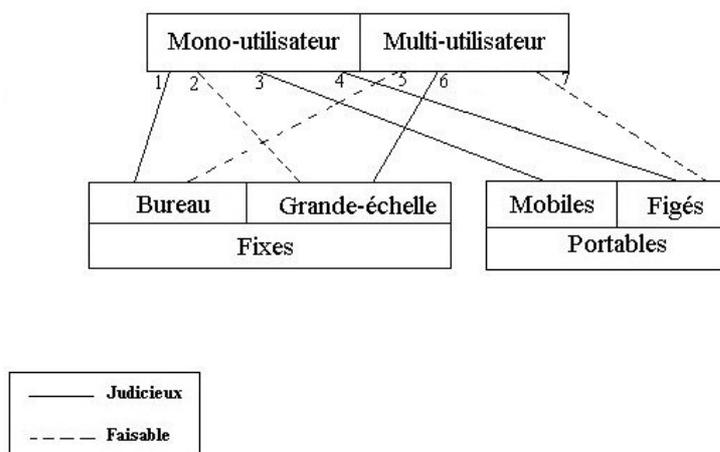


Figure 3.7 – Compatibilité des diffuseurs olfactifs en fonction du nombre d'utilisateurs

• **Liaison 1-2-3-4:** Les quatre types de diffuseurs peuvent être utilisés si l'application est mono-utilisateur mais l'utilisation du diffuseur grande-échelle est déconseillée. L'air est rapidement saturé avec la diffusion de plusieurs odeurs et très difficile à rafraîchir.

• **Liaison 5 :** Il est possible d'utiliser un diffuseur de bureau pour une application regroupant plusieurs sujets dans le cas où la plate-forme hébergeant l'application est de type cinéma/auditorium. En effet, un diffuseur peut être installé par siège comme dans le cas des

diffuseurs de NTT communications. Ils étaient ici associés à un film, mais on peut facilement imaginer le faire avec une application de RV.

- **Liaison 6** : Le diffuseur à grande-échelle peut odoriser une pièce entière rapidement, donc tous les sujets pourront avoir l'odeur au même moment. C'est le type de diffuseur le plus adapté.

- **Liaison 7** : De la même manière, chaque utilisateur peut avoir un diffuseur figé sur lui qui lui enverra l'odeur au moment voulu. Ces interfaces permettent une diffusion personnalisée pour chaque utilisateur en fonction de leurs interactions avec l'EV (manipulation, déplacement, etc.).

3.1.4 Compatibilité des diffuseurs olfactifs en fonction du dispositif de visualisation

Une application de RV peut s'effectuer sur de nombreuses plates-formes. Selon la taille et le type de système de visualisation utilisé, le choix des diffuseurs ne sera pas le même. Les interfaces visuelles listées au paragraphe 2.1.2.4, sont représentées à la figure 3.8.

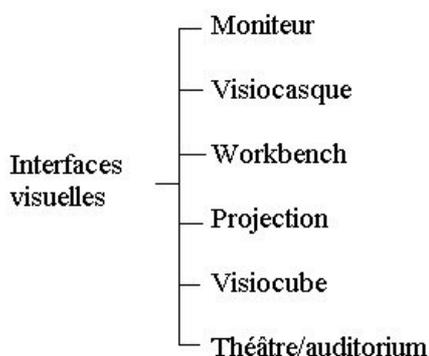


Figure 3.8 – Interfaces visuelles

Les choix de diffuseurs par rapport à l'interface visuelle sont représentés à la figure 3.9.

Moniteur Si l'interface visuelle est un moniteur, tous les diffuseurs peuvent être utilisés, cela dépend de la configuration matérielle et de la représentation de l'EV (table devant le sujet, casque audio...). Le moins aisé à utiliser sera le diffuseur à *grande-échelle* car l'utilisation d'un écran d'ordinateur signifie souvent la présence d'une table devant le sujet.

Visiocasque Les visiocasques actuels ne recouvrent généralement pas le nez de l'utilisateur. Tous les types de diffuseurs peuvent donc être utilisés. Il est également possible d'avoir un

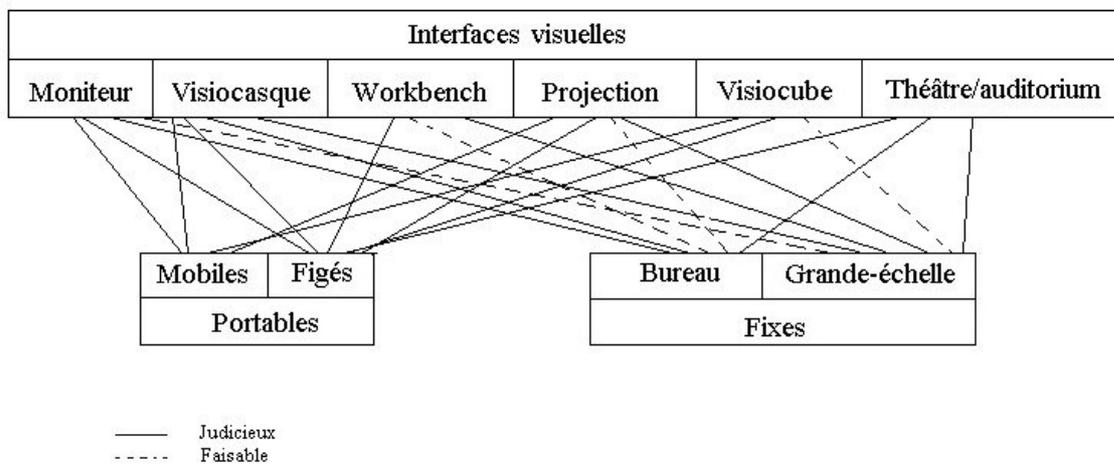


Figure 3.9 – Compatibilité des diffuseurs olfactifs en fonction du dispositif de visualisation

diffuseur *portable* accroché au niveau du casque.

Plan de travail virtuel Les workbenches étant utilisés pour l'interaction avec des maquettes numériques de taille moyenne et impliquant généralement une superposition des espaces de manipulation et de visualisation, l'utilisation de diffuseurs *fixes* est préconisée, à condition de les placer en dehors des zones d'affichage. L'utilisation de diffuseurs portables est également possible à condition d'introduire un décalage spatial (offset) entre les espaces de visualisation et de manipulation, en gardant à l'esprit qu'un décalage trop important peut engendrer une baisse de la performance dans certaines tâches.

Murs immersifs Tous les diffuseurs peuvent être utilisés pour des systèmes de type murs immersifs (un grand écran plat) : les diffuseurs à *grande-échelle* ou *portables* sont les plus adaptés.

Visiocube Pour un visiocube, nous préconisons, pour les mêmes raisons que celles relatives aux workbenches, l'utilisation de diffuseurs *fixes*, mais à *grande-échelle*. L'utilisation de diffuseurs *portables* semble délicate pour les mêmes raisons.

Théâtre/Auditorium Un théâtre, tel qu'un reality Center est destiné à recevoir simultanément un grand nombre d'utilisateurs. Il est donc a priori pertinent d'utiliser un système de diffuseurs à *grande-échelle*, qui peut utiliser le système de rafraîchissement de l'air. Le choix le plus judicieux est cependant d'utiliser un diffuseur par utilisateur. Cette configuration fonctionnera

avec une quantité moindre de produit dans l'air et donc un meilleur contrôle de la diffusion et une évacuation plus rapide des odeurs.

3.2 Caractérisation d'un diffuseur olfactif

3.2.1 Problèmes et enjeux liés à l'intégration du retour olfactif

Jusqu'ici, le traitement le plus complet du système olfactif dans le contexte de RV a été fourni il y a une dizaine d'années par Barfield et Danas qui passent en revue les aspects physiologiques et psychologiques de la perception olfactive, discutent des mécanismes pour la présentation des odorants et énumèrent un certain nombre d'analogues olfactifs aux paramètres visuels, tels que le champ de l'odeur (champ visuel), la grande variété d'odeurs (couleurs), et la résolution spatiale [10].

Leurs travaux ont permis de mettre en avant les interrogations nécessaires pour l'intégration du retour olfactif dans un EV. Plusieurs difficultés techniques existent, comme la dispersion contrôlée de l'odeur dans le temps et l'espace qui est un problème majeur. Ils posent un certain nombre de questions essentielles pour l'intégration de la composante olfactive dans un EV, par exemple :

1. Quelle quantité d'odeur faut-il envoyer ?
2. Combien d'odeurs simultanées est-il possible d'envoyer ? (cf. paragraphe 1.4.1.1)
3. A quelle vitesse l'odeur disparaît ?

Dans le cas où plusieurs odeurs sont diffusées alternativement lors de l'expérimentation, une technique de rafraîchissement rapide de l'air doit être associée au diffuseur d'odeur. Plusieurs techniques d'évacuation rapide ont été antérieurement proposées [157] :

- une pièce scellée avec un système de filtration d'air
 - un compartiment non scellé qui dirige l'air traité vers le visage de l'utilisateur et qui fournit un passage derrière sa tête pour évacuer l'odeur (nécessite un système de filtration)
 - une pièce complètement scellée dans laquelle seulement l'air traité est envoyé et l'air exhalé est continuellement évacué
 - un système associé à une interface déjà portée par le sujet (exemple : casque)
4. Quelle est la fréquence adéquate de stimulation olfactive pour éviter l'adaptation ?

L'adaptation est la réduction de la sensibilité à une odeur. Pour qu'une odeur soit sentie en continu et donc pour éviter l'adaptation à cette odeur, la diffusion doit se faire en créneau.

Les auteurs ont également recensé les problèmes psychophysiques concernant les seuils de détection, de reconnaissance et d'identification. Ces seuils ont été définis au chapitre I (cf. paragraphe 1.4.2, p. 26).

De plus, des odeurs non contrôlées présentes dans l'espace environnant peuvent fournir des informations qui entreraient en conflit avec la sensation de présence de l'utilisateur dans l'EV.

Ces considérations ne sont pas obsolètes et la conception de chaque nouvel EV olfactif ainsi que l'intégration des diffuseurs doivent tenir compte de ces considérations pour une efficacité maximale du retour olfactif en termes (au minimum) de sensation de présence et d'immersion qui sont des caractéristiques qualitatives essentielles d'un système de RV.

Cependant, de nombreux problèmes se posent pour rendre efficace le contrôle du dispositif olfactif destiné à diffuser des odeurs dans un EV et continuent à limiter l'utilisation des DOs en EV. Outre le problème lié au codage de l'information olfactive, un autre inconvénient est que la dispersion de l'odeur se fait de façon plus ou moins contrôlée dans un périmètre de taille variable et ne se dissipe pas facilement. Les caractéristiques du milieu environnant influent de façon notable sur ces considérations (taille, géométrie, aération, présence d'autres odeurs, température, hygrométrie, etc.). Ces influences doivent être prises en compte ainsi que la concentration de l'odeur dans la phase de stockage, la durée de diffusion ou de ventilation, la fréquence et le débit de libération des molécules pour permettre un retour olfactif efficacement contrôlé et reproductible dans un EV.

3.2.2 Expérimentations de caractérisation

Quatre dispositifs odorants sont disponibles pour la plate-forme PREWISE pour l'intégration du retour olfactif dans un EV.

Trois de ces dispositifs sont commercialisés et un diffuseur a été développé au laboratoire (fig. 2.4)(cf. chapitre 2, paragraphe 2.2.3.2) :

- le diffuseur de bureau M@dTM d'Osmooze (cf. paragraphe 2.2.3.2.1) [107]
- le diffuseur de bureau de MDS-systems (cf. paragraphe 2.2.3.2.1) [108]
- le prototype du LISA (cf. paragraphe 2.2.3.2.2) [84]
- le diffuseur grande-échelle ONYXTM d'Osmooze (cf. paragraphe 2.2.3.2.1)[107]

Ces diffuseurs diffèrent par leurs procédés de stockage des molécules odorantes sous forme liquides (DOs de MDS-systems, du LISA et ONYXTM) ou gels encapsulés (M@dTM). Cependant, ces quatre diffuseurs mettent en oeuvre un système de dispersion classique, la ventilation mécanique contrôlée (en vitesse de rotation) permettant le transport des odeurs sur de plus ou

moins longues distances (cf. tableau 3.1).

L'intégration de ces diffuseurs à ventilation dans des applications temps réel est limitée par les problèmes liés à la dispersion de l'odeur dans le temps et l'espace. Aussi, nous proposons dans les paragraphes suivants de caractériser ce type de diffuseurs grâce à de petites expérimentations. Dans un premier temps, nous nous intéressons au traitement du signal et à la caractérisation d'une antenne. Dans un deuxième temps, les questions psychophysiques posées par W. Barfield et E. Danas [10] sont utilisées pour réaliser un ensemble d'expériences qui va permettre de déterminer les paramètres pouvant influencer la diffusion. Les expérimentations sont réalisées par des sujets humains non entraînés et susceptibles de représenter un panel de candidats aux expérimentations de RV intégrant le retour olfactif.

Les expériences présentées ne se basent pas sur des mesures de concentration, à un instant donné, mais sur des mesures temporelles de détection et de persistance de l'odeur.

3.2.2.1 Analogie avec le traitement du signal

La dispersion des molécules odorantes par un ventilateur mécanique peut être comparée à un signal qui se propage, l'expression *signal olfactif* s'y rapporte. Le signal est capté par un humain via son système olfactif. Schématiquement, nous avons un système émetteur-récepteur où l'émetteur est le diffuseur et le récepteur est le nez du sujet humain (récepteur subjectif). Le canal de transmission est l'air.

La figure 3.10 représente le système Émetteur-Canal de transmission-Récepteur.

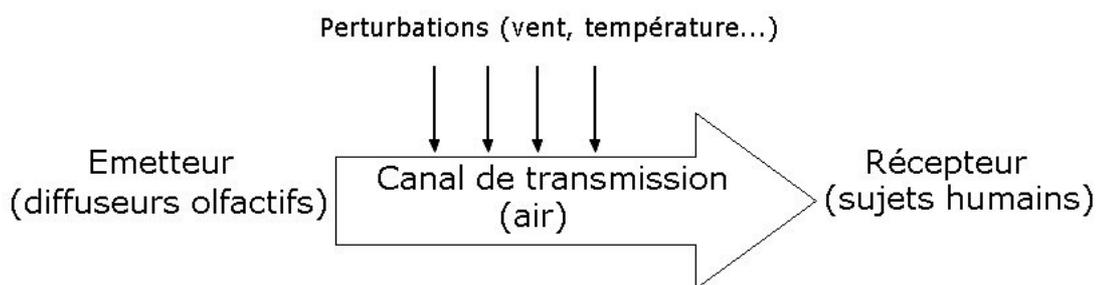


Figure 3.10 – Analogie avec le traitement du signal: Émetteur - Canal de transmission - Récepteur

En traitement du signal, la directivité de l'antenne est une caractéristique importante dans le choix de celle-ci. La directivité est représentée par des lobes (voir figure 3.11).

Par analogie, nous voulons caractériser le diffuseur olfactif avec un principe équivalent.

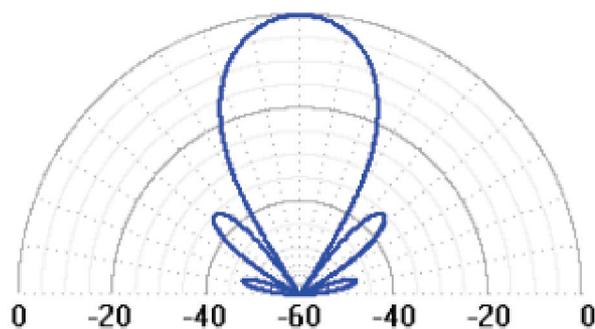


Figure 3.11 – Exemple d'un lobe d'antenne

3.2.2.2 Caractérisation d'un diffuseur olfactif selon le principe d'une antenne

Objectif L'objectif de cette expérimentation est de pouvoir caractériser le diffuseur olfactif avec une seule expérience. L'influence de la position relative (distance et angle) du sujet par rapport à une source olfactive sur les *temps de détection* est étudiée, ainsi que l'influence de la vitesse de rotation des ventilateurs.

Matériel Le diffuseur d'odeurs du LISA (cf. paragraphe 2.2.3.2.2) a été utilisé pour cette expérience. Il comporte quatre réceptacles à liquide odorant munis chacun d'un ventilateur.

Une seule odeur est utilisée lors de cette expérience, il s'agit d'une odeur de caramel. Elle est synthétisée par Osmooze et stockée sous forme liquide.

Tous les essais de cette expérimentation sont effectués en utilisant une même quantité initiale de liquide odorant (correspondant à 3 gouttes déposées initialement dans le réceptacle du diffuseur prévu à cet effet). Cette quantité permet de diffuser une odeur dont le niveau d'intensité se situe au dessus du seuil de détection et sous le seuil de saturation de l'odeur.

Données Une seule variable est enregistrée à chaque essai : le *temps de détection* précédemment défini (cf. paragraphe 3.2.2.3). Les paramètres qui varient sont la vitesse de rotation des ventilateurs qui influe sur la vitesse de dispersion des molécules odorantes, la distance entre l'utilisateur et le DO ainsi que l'angle formé par la direction de ventilation et la direction d'emplacement de l'utilisateur.

Sujets Trente-deux sujets participent à l'expérience. Ils sont divisés en quatre groupes de huit sujets G1, G2, G3, G4 correspondant chacun à une session d'expérimentation. Les sujets sont des étudiants de sexe masculin et féminin, âgés de 18 à 25 ans.

Description de la tâche Chaque sujet a en sa possession, une fiche, un crayon et un chronomètre. Le diffuseur est mis en route à l'instant t^0 , le sujet déclenche simultanément son chronomètre. Dès qu'il détecte l'odeur, il arrête le chronomètre, note le temps sur la fiche ainsi que le code de l'emplacement où il est positionné.

Protocole Le diffuseur est placé sur une table, au centre de cercles concentriques sur lesquels sont repérés 22 emplacements matérialisés par un code sur le sol et schématisés sur la figure 3.12. Les emplacements sont numérotés en fonction de la distance au centre des cercles concentriques (sans chiffre; 1; 2; et 3 correspondant aux rayons 70; 120; 170; et 220 cm) et en fonction de l'angle d'ouverture formé par la direction du diffuseur et l'emplacement des sujets (lettre F; FL ou FR; L ou R; BL ou BR; B correspondants aux angles d'ouverture 0° ; 45° ; 90° ; 135° ; et 180°).

Huit sujets participent à une session d'expérimentation qui est divisée en quatre parties appelées "tours":

- **Premier tour** : Les huit sujets se placent sur les huit emplacements modélisés par des carrés sur le schéma 3.12. Ils s'assoient sur une chaise et déclenchent à la mise en route du DO, leurs chronomètres simultanément. Lorsque les huit *temps de détection* ont été relevés. Le DO est arrêté. Chaque sujet recule alors sa chaise d'un cran et change d'emplacement.
- **Deuxième tour** : Les huit sujets se placent sur les huit emplacements modélisés par des ronds sur le schéma 3.12. Un protocole identique à celui du *premier tour* est effectué.
- La pièce est aérée pendant une minute afin d'éliminer les odeurs résiduelles. Trois sujets quittent le lieu d'expérimentation.
- **Troisième tour** : Cinq sujets se placent sur les huit emplacements modélisés par des losanges sur le schéma 3.12. Le protocole est réitéré puis à l'issue de ce *troisième tour*, quatre sujets quittent le lieu d'expérimentation.
- **Quatrième tour** : Le protocole est le même que précédemment mais un seul sujet, placé sur l'emplacement modélisé par un triangle (3.12), effectue la tâche demandée.
- Entre chaque session d'expérimentation, la pièce est aérée pendant trois minutes.

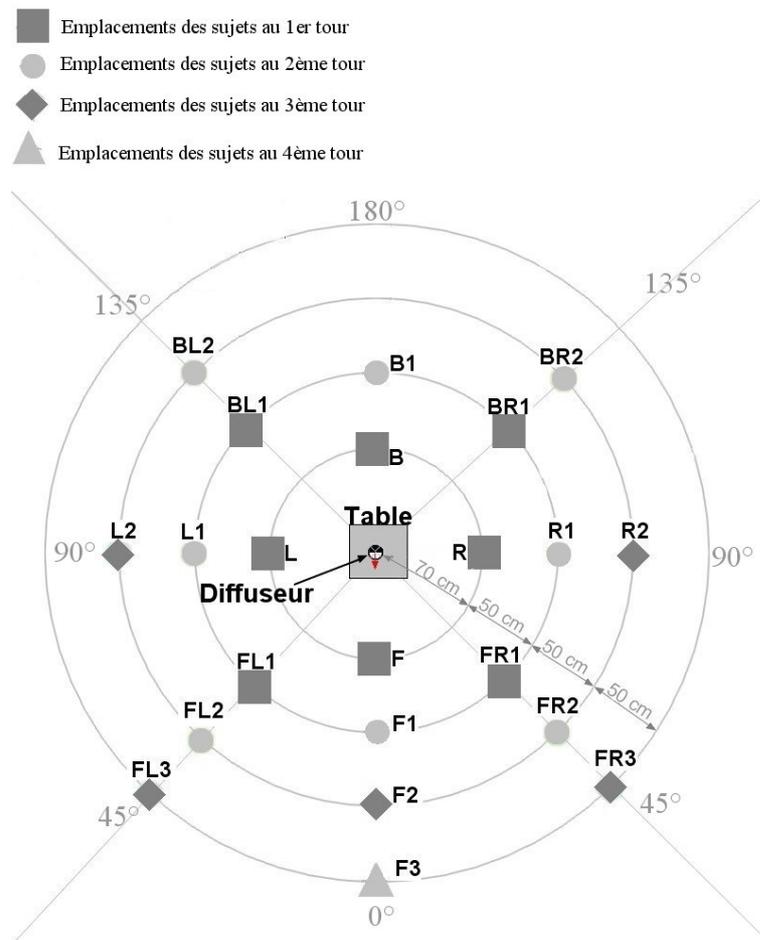


Figure 3.12 – Schématisation de l'emplacement des sujets

Trois autres sessions d'expérimentation sont effectuées selon le même protocole.

Afin d'analyser l'influence de la vitesse de ventilation (rotation des pales) sur les valeurs du *temps de détection* du signal olfactif, deux vitesses de rotation différentes ont été utilisées au cours des quatre sessions d'expérimentation (table 3.3).

La vitesse de rotation 2 ($V2 = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$) est 3 fois plus importante que la vitesse de rotation 1 ($V1 = 500 \text{ tr.min}^{-1}$)

Tours	1	2	3	4
Groupe/Session 1	V2	V2	V1	V1
Groupe/Session 2	V2	V2	V1	V1
Groupe/Session 3	V1	V1	V2	V2
Groupe/Session 4	V1	V1	V2	V2

Table 3.3 – Répartition des deux vitesses de ventilation selon les sessions d'expérimentation (V1: vitesse de rotation 1; V2: vitesse de rotation 2

)

Un questionnaire est distribué à chaque participant à la fin de l'expérimentation. Il est visible à l'annexe A.2.

Résultats L'analyse des résultats est divisée en deux parties. Dans une première partie, les résultats concernant l'évolution des *temps de détection* moyens en fonction de l'emplacement des sujets sont donnés et analysés. Puis, une étude statistique portant sur l'influence de la vitesse de ventilation sur les *temps de détection* est développée.

Evolution des *temps de détection* moyens en fonction de l'emplacement des sujets Les graphiques 3.13 et 3.14 illustrent l'évolution des *temps de détection* moyens en fonction des catégories d'emplacement (selon la distance au diffuseur et l'angle d'ouverture), pour une vitesse de rotation des ventilateurs donnée. La figure 3.13 présente les graphiques pour la vitesse de ventilation V1, et la figure 3.14 pour la vitesse de ventilation V2. Les deux graphiques (a) affichent les évolutions pour les emplacements (F, FL, FR), les deux graphiques (b) pour les emplacements (L, R) et enfin les graphiques (c) pour les emplacements (B, BL, BR) (d'après la fig. 3.12).

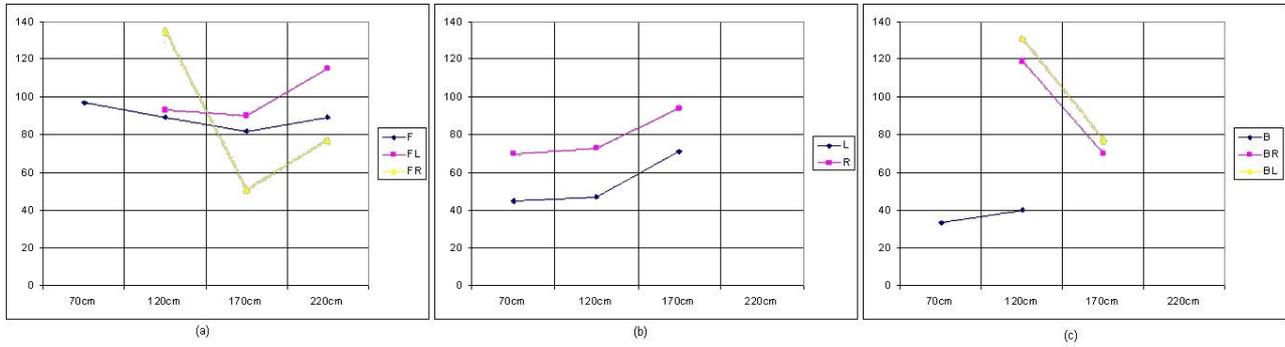


Figure 3.13 – Evolution des *temps de détection* par catégorie d'emplacements pour la vitesse V1

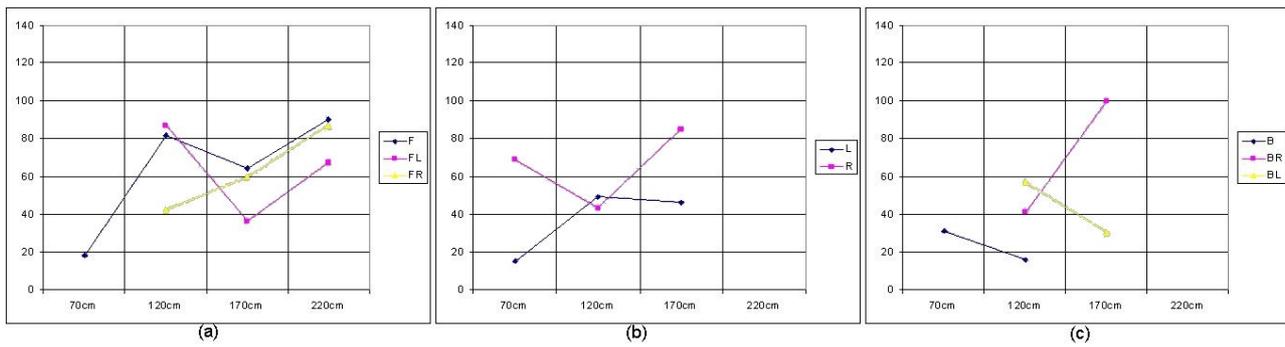


Figure 3.14 – Evolution des *temps de détection* par catégorie d'emplacements pour la vitesse V2

Ces graphiques montrent l'évolution des *temps de détection* moyens en fonction de la distance au diffuseur central et de l'angle d'ouverture par rapport à la direction de ventilation. Le peu de données enregistrées (quatre au maximum pour chaque emplacement) ne permet pas de tirer de conclusions très significatives quant à l'évolution des *temps de détection* moyens du signal olfactif en fonction des emplacements des sujets.

Cependant, certains résultats sont représentatifs de tendances concernant l'évolution des *temps de détection*:

- En ce qui concerne les catégories d'emplacements (F; FL et FR), c.-à-d. situées dans un angle d'ouverture de 45° par rapport à la direction de ventilation, les *temps de détection* moyens augmentent de 10 s à 30 s suivant les courbes, lorsque la distance au diffuseur passe de 170 cm à 220 cm (cf. graphiques (a) des figures 3.13 et 3.14). Pour les autres distances, l'allure des courbes ne permet pas de mettre en valeur une évolution significative des *temps de détection* moyens
- En ce qui concerne les catégories d'emplacements (L et R), c.-à-d. situées perpendiculairement par rapport à la direction de ventilation, l'allure globale des courbes obtenues semble indiquer une augmentation des *temps de détection* moyens en fonction de la distance au diffuseur (hormis le point d'abscisse 70 cm du graphique (b) figure 3.14) (cf. graphiques (b) des figures 3.13 et 3.14).

Une augmentation du nombre de sessions permettrait sans doute de confirmer ces tendances.

Influence de la vitesse de ventilation sur les *temps de détection* La figure 3.15 représente les moyennes et écarts-types des *temps de détection* en fonction de la vitesse de rotation des ventilateurs, pour l'ensemble des vingt-deux emplacements catégorisés.

La moyenne des *temps de détection* pour la vitesse de ventilation V1 est 83 s (écart-type : 29) tandis que pour la vitesse de ventilation V2, la moyenne est égale à 55 s (écart-type : 26). Les deux écarts-types sont équivalents. Les méthodes ANOVA ¹ ($F(1,21) = 12.68$, $p < 0.002$) et de Scheffé indiquent une différence significative, en ce qui concerne les deux vitesses de ventilation choisies.

Discussion L'objectif de cette expérience est la caractérisation du diffuseur par une représentation graphique du panache d'odeur en analogie avec le lobe de l'antenne. Cette expérience

¹Voir annexe B.1, p. 195

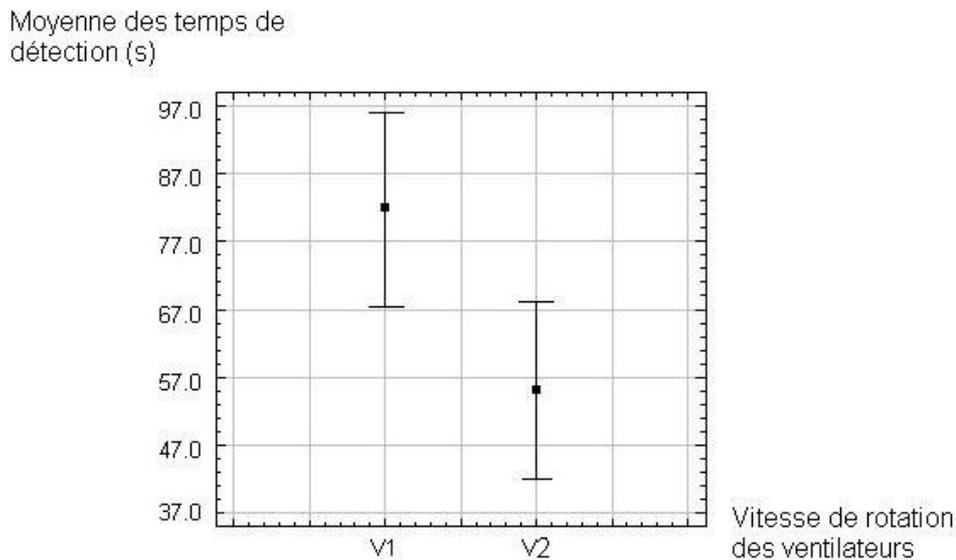


Figure 3.15 – Moyennes et écarts-types des *temps de détection* en fonction de la vitesse de rotation des ventilateurs

n'a pas pu permettre une telle caractérisation. L'étude porte sur l'évaluation des *temps de détection* du signal olfactif en fonction de la position relative du sujet par rapport au DO (distance et angle). Le manque de données enregistrées n'est pas compatible avec une analyse fine de l'évolution de la détection du signal. Les phénomènes de transport de matière mettant en jeu un système ventilation mécanique sont très complexes et se rapportent au domaine de la dynamique des fluides.

Pour caractériser un diffuseur, l'expérience présentée ne suffit pas, aussi, plusieurs expérimentations faciles à mettre en oeuvre vont être développées. Ces expérimentations vont permettre d'étudier certains paramètres fondamentaux pour l'intégration de la composante olfactive dans des EVs. La première expérience s'intéresse à la capacité humaine de localisation d'une odeur. Les expériences suivantes étudient les seuils de saturation et de persistance.

3.2.2.3 Expérience de localisation de la source odorante

Objectif La méthode mise en oeuvre dans cette expérience permet de déterminer la capacité des sujets à détecter et localiser la direction de provenance des odeurs dispersées par ventilation mécanique.

Le terme *localisation de la source odorante* se réfère à l'indication de la provenance des odeurs c.-à-d. la direction d'emplacement du dispositif odorant. Cette information est utile pour déterminer la position précise des diffuseurs dans l'espace réel. Une analogie avec les interfaces auditives pour le son spatialisé peut-être faite (cf. paragraphe 2.1.2.4).

Matériel L'expérience décrite utilise le diffuseur de la société MDS-systems dont le principe de fonctionnement a été décrit au paragraphe 2.2.3.2.1. Une seule odeur a été utilisée pour cette expérience. Il s'agit d'une odeur de fruits rouges, synthétisée par Osmooze et stockée en phase liquide.

Tous les essais de cette expérimentation ont été effectués en utilisant une même quantité initiale de liquide odorant (correspondant à 3 gouttes déposées initialement dans le réceptacle du diffuseur prévu à cet effet). Cette quantité initiale permet de diffuser une odeur dont le niveau d'intensité se situe au dessus du seuil de détection et sous le seuil de saturation de l'odeur.

Données Quatre données sont enregistrées automatiquement pour chaque position de diffuseur :

1. le *temps de détection* : temps écoulé entre la mise en route du diffuseur (ventilation) et le moment où le sujet perçoit le signal olfactif (unité: s).
2. le *temps de localisation* : temps écoulé entre la mise en route du diffuseur (ventilation) et le moment où le sujet indique la direction de provenance du signal olfactif (unité: s).
3. la *localisation de la source odorante* : c'est le terme désignant la direction de provenance du signal olfactif. Seules, quatre directions sont proposées: droite, gauche, derrière, devant.
4. le *temps de persistance* : temps écoulé entre l'arrêt du diffuseur et le moment où le sujet ne sent plus l'odeur (unité: s).

Sujets Huit sujets ont participé à l'expérience. Ils sont divisés en quatre groupes de deux sujets G1, G2, G3, G4. Les sujets sont tous étudiants entre 18 et 25 ans (homme ou femme).

Description de la tâche Le diffuseur est mis en route à l'instant t^0 . La tâche est décrite en 3 étapes :

- Dès que le sujet détecte l'odeur, il prévient l'expérimentateur oralement. Le *temps de détection* est enregistré.
- Dans un second temps, le sujet essaie de localiser la direction de provenance de l'odeur. Il a la possibilité de dire "je ne sais pas". Le *temps de localisation* est enregistré lorsqu'il donne une direction de provenance de la source (*localisation de la source odorante*).
- Enfin, le diffuseur est arrêté et le sujet prévient l'expérimentateur oralement lorsqu'il ne sent plus l'odeur. Le *temps de persistance* est enregistré.

Protocole Quatre diffuseurs identiques sont placés à 80 cm du sujet. Ils sont positionnés aux quatre coins d'un carré dont le point central représente la position du sujet pendant la session. L'emplacement des quatre diffuseurs (devant, derrière, à gauche et à droite) par rapport au sujet central est représenté sur la figure 3.16.

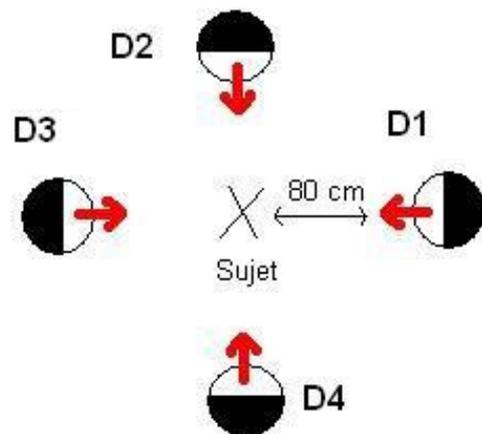


Figure 3.16 – Emplacement des diffuseurs autour du sujet (D1: Diffuseur droit ; D2: Diffuseur avant; D3: Diffuseur gauche et D4: Diffuseur arrière)

Les DOs sont orientés vers la tête du sujet et à une hauteur légèrement plus basse que son nez.

Chaque sujet participe à une session d'expérimentation qui est divisée en quatre essais. Un essai se déroule comme suit :

Le sujet s'installe sur la chaise au centre du carré formé par les DOs. Il met un casque audio avec de la musique pour éviter d'entendre le bruit émis par le ventilateur du diffuseur. Il n'est pas autorisé à bouger la tête pour détecter l'odeur ou pour la localiser. Le programme de

pilotage des DOs se lance et l'un des quatre diffuseurs se met en marche. Le sujet effectue la tâche 3.2.2.3. Le diffuseur est arrêté après la localisation orale du sujet.

Pour chaque session d'expérimentation, les quatre diffuseurs sont mis en route alternativement par le programme de pilotage selon un ordre prédéfini pour chaque groupe de sujets (table 3.4).

Groupe 1	D1	D2	D3	D4
Groupe 2	D2	D1	D4	D3
Groupe 3	D4	D1	D3	D2
Groupe 4	D3	D2	D4	D1

Table 3.4 – Ordre d'utilisation des diffuseurs pour chaque groupe de sujet

A la fin de chaque essai, un tableau rassemble par sujet : le *temps de détection*, le *temps de localisation*, la *localisation de la source odorante*, le *temps de persistance*. A ces données sont ajoutés, les commentaires faits par le sujet ainsi qu'un nombre de points correspondant aux résultats des *localisations de la source odorante* (1 point pour une bonne réponse, 0.5 pour une hésitation entre deux réponses dont une correcte et 0 dans tous les autres cas).

A la fin de la session, un questionnaire est rempli par l'utilisateur. Il contient des informations sur l'âge, le sexe, sa sensibilité aux odeurs en général. Un modèle du questionnaire est présenté en annexe A.1.

Résultats L'analyse des résultats est divisée en trois parties, correspondant à la détection de l'odeur, la localisation de la source odorante et la persistance de l'odeur.

Temps de détection Les moyennes des *temps de détection* par emplacement des diffuseurs sont reportées sur le graphe 3.17. Les résultats du sujet 5 ont été retirés de l'analyse car ils diffèrent beaucoup des autres résultats. En ce qui concerne les moyennes des *temps de détection* pour les diffuseurs situés à gauche, devant et à droite du sujet, aucune différence significative n'est reportée. Par contre, le *temps de détection* pour le diffuseur placé à l'arrière est significativement plus important.

La moyenne des *temps de détection* pour le diffuseur de droite est 11s (écart-type : 6), celle du diffuseur gauche 10 s, (écart-type : 3), celle du diffuseur avant, 15 s (écart-type : 6) alors que pour celui placé à l'arrière du sujet, la moyenne est de 27 s (écart-type : 14). La méthode d'analyse de la variance (ANOVA) nous confirme une différence significative ($F(3,18) = 7.98$,

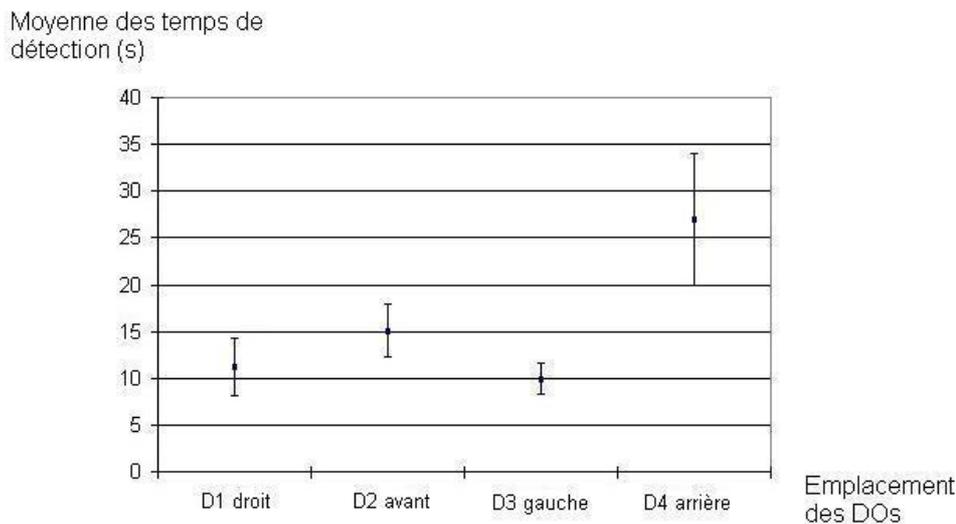


Figure 3.17 – Moyennes et écarts-types des *temps de détection* en fonction de l'emplacement des diffuseurs

$p < 0.001$). L'analyse par la méthode de Scheffé montre qu'il y a une différence statistique significative entre le diffuseur arrière et chacun des autres diffuseurs.

On peut remarquer également que la moyenne des temps de détection et l'écart-type pour le diffuseur de gauche sont moins importants que pour les autres. Ceci est peut-être expliqué par le fait que nous avons sept droitiers sur huit sujets et que des études antérieures ont démontré que la perception olfactive était influencée par la latéralité [23].

Localisation de la source odorante et temps de localisation Pour quantifier la réussite de la *localisation de la source odorante* des points ont été attribués (1 point par bonne réponse et 0.5 si le sujet hésite entre deux réponses incluant la bonne, 0 dans tous les autres cas). Le graphe 3.18 représente les points cumulés (au cours de toutes les sessions) en fonction de l'emplacement des diffuseurs.

Plusieurs remarques peuvent être déduites de cette figure. Le nombre maximal de points cumulables (8) pour l'ensemble des sessions n'a pas été atteint, quel que soit l'emplacement du diffuseur par rapport au sujet. Ceci démontre la difficulté des sujets à localiser la provenance d'une odeur, celle-ci est d'autant plus grande que la source se situe à l'arrière du sujet. D'autre part, l'analyse des tableaux de données nous permet de constater que deux sujets n'ont pas mentionné de localisation.

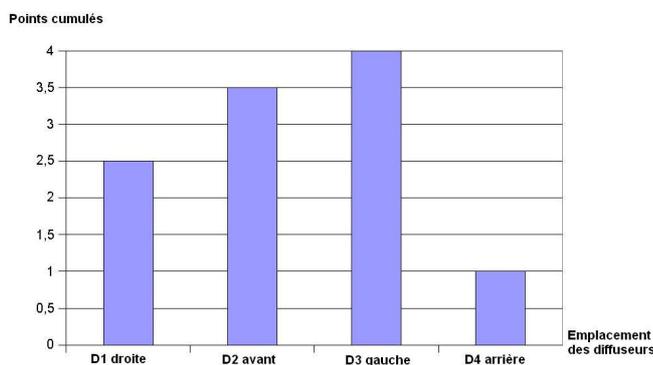


Figure 3.18 – Points cumulés en fonction de l'emplacement des diffuseurs

La tendance est légèrement confirmée par la méthode ANOVA ($F(3,21) = 1,16$; $p < 0.35$). Celle-ci pourrait être améliorée en réalisant l'expérimentation avec un nombre de sujets accru.

Les résultats de la fig.3.18 montrent que les odeurs venant du diffuseur placé à gauche ont été mieux détectées que celles venant de celui placé à droite de l'utilisateur (4 points contre 2.5 pour la droite). Ceci confirme les résultats observés dans d'autres études concernant la latéralité [23].

Les moyennes des *temps de localisation* selon l'emplacement des diffuseurs n'indiquent pas de différence significative. La moyenne concernant le diffuseur D1 (droite) est 26 s (écart-type: 15), celle concernant le diffuseur D2 (avant) 24 s (écart-type: 9) celle concernant le diffuseur D3 (gauche) 24 s (écart-type: 14), alors que celle du diffuseur D4 (arrière) est 29 s (écart-type: 13). La méthode ANOVA ($F(3,19) = 0.55$; $p < 0.65$) ne permet pas de conclure quant aux moyennes des temps de localisation.

Temps de persistance Le *temps de persistance* est le temps écoulé entre l'arrêt du diffuseur et le moment où le sujet ne sent plus l'odeur. Contrairement aux moyennes du *temps de détection*, la moyenne du *temps de persistance* du diffuseur D2 (avant) est nettement plus grande (29 s ; écart-type: 37) que celles des trois autres diffuseurs situés à droite (17 s ; écart-type: 11), gauche (15 s, écart-type: 8) ou derrière (15 s ; écart-type: 9).

Cependant la grande dispersion des écarts-types conduit à une analyse ANOVA ($F(3,21) = 1,30$; $p < 0.30$) qui ne permet pas de conclure de façon significative sur l'influence des quatre emplacements des ODs.

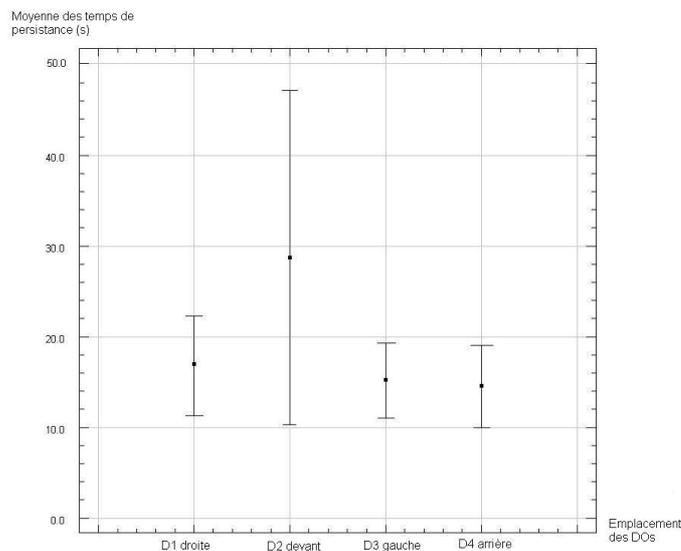


Figure 3.19 – Moyennes et écarts-types des *temps de persistance* en fonction de l'emplacement des diffuseurs

Discussion Cette expérimentation, qui a pour objectif de déterminer la capacité des sujets à détecter et à déterminer la direction de provenance d'une odeur dispersée par ventilation mécanique, permet de mettre en évidence la difficulté des sujets à indiquer, dans ces conditions, la provenance de l'odeur, de manière juste et précise.

L'analyse des résultats permet de souligner quelques points intéressants concernant l'utilisation de ce type de diffuseurs dans des EVs :

Le positionnement sur le bureau, des DOs à ventilation mécanique, par rapport au sujet peut se faire dans des directions balayant un angle d'ouverture relativement important. Aucune différence significative dans les *temps de détection* n'a été mise en évidence pour les diffuseurs placés à gauche, devant ou à droite et à distance constante (80 cm) du sujet. Des études antérieures ont montré que le "champ d'odeur" sur le plan horizontal était de l'ordre de 130° et que l'être humain pouvait en localiser la source avec une précision de l'ordre de $7-10^\circ$ en exploitant les différences d'intensité perçues par les deux narines, en termes de gradient de concentration et de délai relatif [14].

Cependant d'autres expérimentations sont nécessaires pour déterminer les positions relatives (distances et angles) entre le DO et l'utilisateur, adéquates afin de restituer l'information olfactive, avec un délai minimum. De même, si l'information olfactive doit être utilisée ponctuellement dans une application de RV, ou doit être déclinée en plusieurs odeurs consécutives-

ment, par exemple, les *temps de persistance* doivent être fortement réduits et le rafraîchissement de l'air facilité.

Le dernier point mis en évidence par cette expérimentation menée sur une grande majorité de sujets droitiers, est la notion de latéralité : en effet, la moyenne et l'écart-type du diffuseur de gauche sont moins importants que pour les autres. De même, les odeurs venant de gauche ont été mieux repérées. Des études antérieures qui ont analysé l'influence de la latéralité sur la perception olfactive ont également rapporté ce type de résultats [23].

3.2.2.4 Expérience de saturation

Objectif L'objectif de cette expérimentation est de déterminer les *temps de saturation* ou *d'adaptation* à une odeur lorsque celle-ci est diffusée à concentration suffisamment élevée et pendant un temps suffisamment long. Nous définissons le *temps de saturation* ou *d'adaptation* à une odeur comme étant le temps écoulé entre la mise en route du diffuseur et le moment auquel le sujet perd la sensation de cette odeur alors que celle-ci est toujours présente (cf. paragraphe 1.6.1). Ce phénomène intervient lorsque la concentration de l'odeur atteint le seuil de saturation au-delà duquel, quelle que soit la concentration, l'intensité de l'odeur paraît identique au sujet (cf. paragraphe 1.4.2.3).

Cette expérimentation est une caractérisation du diffuseur à ventilation lorsque celui-ci libère dans l'atmosphère des molécules odorantes en quantité suffisamment importante pour engendrer les phénomènes de saturation et d'adaptation.

Les *temps de saturation* ou *d'adaptation* à différentes odeurs vont être déterminés et l'influence de la vitesse de propagation des odeurs (vitesse de rotation des ventilateurs) est étudiée.

Matériel Le diffuseur d'odeurs du LISA (cf. paragraphe 2.2.3.2.2) a été utilisé pour cette expérience. Il comporte quatre réceptacles à liquide odorant munis chacun d'un ventilateur.

Quatre odeurs sont utilisées et sont numérotées : caramel (O1), parfum floral (O2), prune (O3) et terre mouillée (O4). Ces essences artificielles de chez Osmooze sont stockées en phase liquide.

Tous les essais de cette expérimentation sont effectués en utilisant une même quantité initiale de liquide odorant (correspondant à 3 gouttes déposées initialement dans le réceptacle du diffuseur prévu à cet effet). Cette quantité permet de diffuser une odeur dont le niveau d'intensité se situe au dessus du seuil de saturation de l'odeur.

Une station météo Lacrosse technologie est connectée au PC pour l'enregistrement de la température (paramètre d'environnement).

Données Deux données sont enregistrées : le *temps de détection* précédemment défini (cf. paragraphe 3.2.2.3) et le *temps de saturation* ou *d'adaptation*. Les paramètres qui varient sont la nature de l'odeur et la vitesse de rotation des ventilateurs qui influe sur la vitesse de dispersion des molécules odorantes.

Sujets Vingt-quatre sujets participent à cette expérimentation. Ils sont divisés en quatre groupes correspondant chacun à une session d'expérimentation. Les sujets sont des étudiants de sexe masculin et féminin, âgés de 20 à 30 ans, gauchers et droitiers.

Description de la tâche Chaque sujet doit, dès qu'il détecte l'odeur, appuyer sur la barre d'espace du clavier de l'ordinateur, le *temps de détection* est alors automatiquement enregistré. Lorsqu'il ne sent plus l'odeur, il appuie de nouveau sur la barre d'espace et le *temps de saturation* est également enregistré.

Protocole Tous les essais se déroulent dans un même lieu. La température de la pièce est enregistrée et varie entre 18,5° et 20°C. Le sujet est placé à 40 cm de la table sur laquelle est positionné le DO. Il lui est demandé de ne pas bouger pendant l'expérience. Les yeux ne sont pas bandés.

Chaque sujet réalise une session qui se décompose en quatre essais, chaque essai est relatif à une odeur. Les quatre odeurs sont présentées de façon aléatoire au cours des quatre essais. La vitesse de rotation des ventilateurs est constante tout au long d'une session, c.-à-d. par sujet et elle varie en fonction des différentes sessions. Chaque essai peut être décrit de la façon suivante :

- Le diffuseur est mis en route
- Étape 1 : Le sujet appuie sur la barre d'espace du clavier de l'ordinateur, dès qu'il détecte une odeur, le *temps de détection* est alors automatiquement enregistré
- Le diffuseur ne s'arrête pas
- Étape 2 : Le sujet appuie sur la barre d'espace du clavier de l'ordinateur, dès qu'il ne perçoit plus l'odeur, le *temps de saturation* est alors automatiquement enregistré
- Étape 3 : Arrêt du diffuseur et pause de 30 s avant l'essai suivant.

Les différentes étapes (1, 2 et 3) d'un essai et les quatre essais de la session d'expérimentation sont schématisés sur la figure 3.20.



Figure 3.20 – Représentation schématique d'une session du protocole d'expérimentation

A la fin de l'expérience, un questionnaire est rempli par l'utilisateur. Il contient des informations sur son âge, son sexe, sa sensibilité aux odeurs d'une manière générale ainsi que quelques questions par rapport à l'expérience (un exemplaire du questionnaire est reporté en annexe A.3).

Résultats L'analyse des résultats est divisée en deux parties. Dans une première partie, les résultats concernent la variation des *temps de détection* moyens en fonction de la nature de l'odeur et de la vitesse de ventilation du diffuseur. Puis, en seconde partie, les résultats concernant l'évolution des *temps de saturation* moyens en fonction des mêmes variables (nature de l'odeur et vitesse de ventilation) sont analysés.

◇ Variation des *temps de détection*

Influence de la vitesse de ventilation Afin d'analyser l'influence de la vitesse de ventilation (rotation des pâles) sur les valeurs des *temps de détection* du signal olfactif, trois vitesses de rotation différentes ont été utilisées au cours des différentes sessions d'expérimentation.

- La vitesse de rotation 1 est $V1 = 500 \text{ tr.min}^{-1}$.
- La vitesse de rotation 2 est $V2 = 1000 \text{ tr.min}^{-1}$
- La vitesse de rotation 3 est $V3 = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$

La figure 3.21 rassemble les valeurs moyennes du *temps de détection* en fonction des trois vitesses de rotation des ventilateurs. Pour la vitesse 1, le *temps de détection moyen* est 21 s, pour la vitesse V2, il est égal à 9 s ainsi que pour la vitesse V3.

Les *temps de détection* varient en fonction de la vitesse de dispersion des molécules et une différence significative apparaît pour la valeur V1, en comparaison avec les deux autres valeurs. La méthode ANOVA ($F(2,62) = 7.21$; $p < 0.001$) indique que les résultats obtenus sont significatifs quant à la différence entre les vitesses. La méthode de Scheffé nous montre des différences significatives entre les vitesses V1 et V2 ainsi qu'entre les vitesses V1 et V3. Ce résultat confirme la tendance observée dans l'expérimentation précédente.

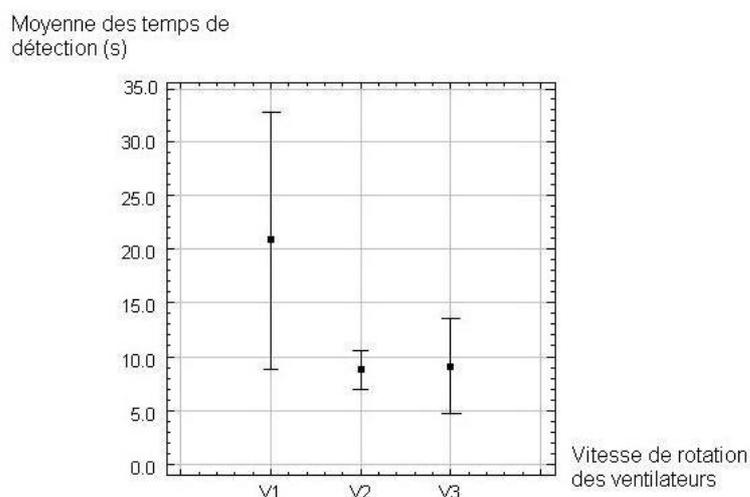


Figure 3.21 – Moyennes et écarts-types des *temps de détection* en fonction de la vitesse de ventilation (V1 = 500 tr.min⁻¹; V2 = 1000 tr.min⁻¹; V3 = 1500 tr.min⁻¹)

Influence de la nature de l'odeur Le *temps de détection* moyen est de 13 s pour l'odeur de caramel (O1), de 12 s pour l'odeur de parfum (O2), de 10 s pour l'odeur de prune (O4) et 18 s pour l'odeur de terre mouillée (O4) (fig. 3.22).

Les résultats obtenus par les méthodes statistiques ANOVA ($F(3,69) = 1.59$; $p < 0.19$), et de Scheffé indiquent une très légère différence significative entre les moyennes obtenues pour l'odeur de terre mouillée (O4) et les autres odeurs.

◇ Variation des *temps de saturation*

Influence de la vitesse de ventilation La figure 3.23 rassemble les valeurs moyennes du *temps de saturation* en fonction des trois vitesses de rotation des ventilateurs. Pour la vitesse 1, le *temps de saturation* moyen est de 1 min 30 s, pour la vitesse V2, il est de 58 s, pour la vitesse V3 il est égal à 2 min 16 s.

Les résultats statistiques obtenus par la méthode ANOVA ($F(2,62) = 4,80$; $p < 0.00115$), indiquent une variation significative des *temps de saturation* en fonction des vitesses de ventilation. Ceci est confirmé par la méthode de Scheffé pour la comparaison entre la vitesse 2 et la vitesse 3.

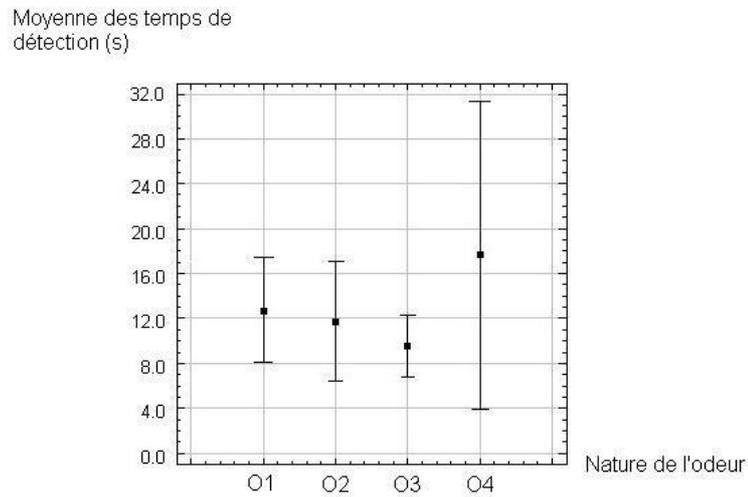


Figure 3.22 – Moyennes et écarts-types des *temps de détection* en fonction de la nature de l'odeur (O1 caramel ; O2 parfum floral ; O3 prune ; O4 terre mouillée)

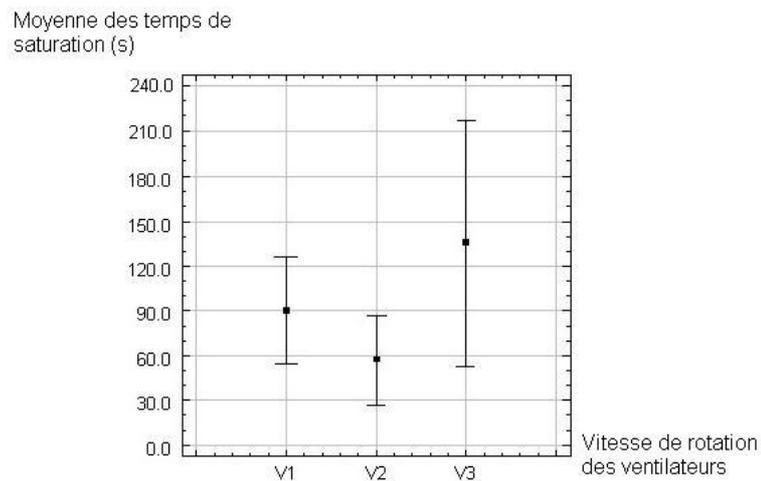


Figure 3.23 – Moyennes et écarts-types des *temps de saturation* en fonction de la vitesse de ventilation (V1 = 500 tr.min⁻¹; V2 = 1000 tr.min⁻¹; V3 = 1500 tr.min⁻¹)

Influence de la nature de l'odeur Les temps moyens de saturation sont de 89 s pour l'odeur 1, de 75 s pour l'odeur 2, de 1 min 44 s pour l'odeur 3 et de 1 min 51 s pour l'odeur 4. La représentation graphique des moyennes est présentée à la figure 3.24. Les résultats par la méthode ANOVA sont $F(3,69)=0.89$; $p<0.4531$, donc des résultats non significatifs.

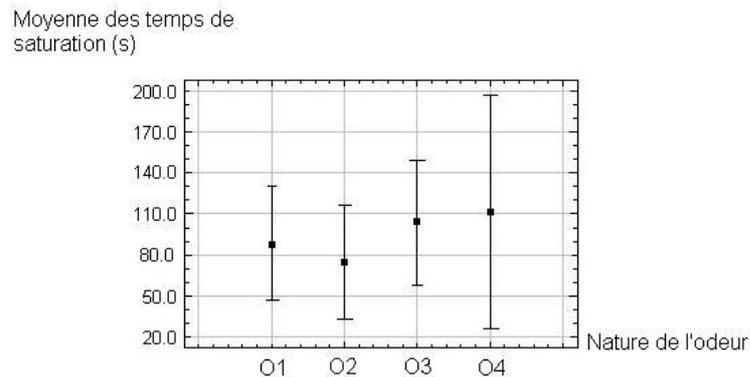


Figure 3.24 – Moyennes et écarts-types des *temps de saturation* en fonction de la nature de l'odeur (O1 caramel ; O2 parfum floral ; O3 prune ; O4 terre mouillée)

Discussion En ce qui concerne les variations des *temps de détection* et de *saturation* en fonction de la vitesse de ventilation, les résultats indiquent des différences significatives. Les temps varient en fonction de la dynamique de dispersion des molécules dans l'air, c.-à-d. avec la vitesse de ventilation. Le *temps de détection* est significativement supérieur pour la vitesse V1 à la moyenne des temps enregistrés pour les vitesses V2 et V3. La vitesse de dispersion des molécules dans l'espace augmente avec la vitesse de rotation des ventilateurs. Pour une vitesse de rotation trop importante et à une distance limitée (DO-sujet : 40 cm), le temps de détection ne semble plus lié à la vitesse de rotation des ventilateurs. Ce point pourrait être étudié plus en détail en rajoutant une vitesse entre V1 et V2 et en examinant les temps de détection.

En ce qui concerne les *temps de saturation*, leurs valeurs moyennes varient en fonction des vitesses de ventilation. Pour atteindre le phénomène d'adaptation, la concentration des molécules en un lieu donné doit être supérieure au seuil de saturation. La répartition spatio-temporelle des molécules odorantes est dépendante de la dynamique de transport dans l'air.

La nature des odeurs n'influe pas de façon très importante sur les *temps de détection*, ce qui a priori semble normal. Les légères différences peuvent être attribuées aux différences de concentration des différents produits synthétiques utilisés. Une essence artificielle contient générale-

ment un mélange complexe de plusieurs molécules dans des proportions variables. L'odeur de terre mouillée est plus longue à être détectée. Cela peut être dû au fait qu'elle est moins connue des sujets que les autres odeurs.

3.2.2.5 Expérience de persistance

Objectif L'objectif est de déterminer les variations des *temps de persistance* en fonction de diverses variables telles que la vitesse de propagation des odeurs (vitesse de rotation des ventilateurs), la durée de fonctionnement du diffuseur (durée de ventilation), et la nature de l'odeur. Nous définissons le *temps de persistance* à une odeur comme étant le temps écoulé entre l'arrêt du diffuseur et le moment où le sujet ne sent plus l'odeur.

Matériel Le diffuseur d'odeurs du LISA (cf. paragraphe 2.2.3.2.2) a été utilisé pour cette expérience.

Deux odeurs sont utilisées, une huile essentielle de vanille et une odeur de gazon coupé synthétique d'Osmooze.

Tous les essais de cette expérimentation sont effectués en utilisant une même quantité initiale de liquide odorant (correspondant à 3 gouttes déposées initialement dans le réceptacle du diffuseur prévu à cet effet), cependant ces quantités ne correspondent pas à des concentrations identiques en composés odorants.

Une station météo Lacrosse technologie est connectée au PC pour l'enregistrement de la température.

Données Deux données sont enregistrées: le *temps de détection* précédemment défini (cf. paragraphe 3.2.2.3) et le *temps de persistance*. Les paramètres qui varient sont la nature de l'odeur, la vitesse de rotation des ventilateurs qui influe sur la vitesse de dispersion des molécules odorantes et la durée de ventilation (activation des ventilateurs). La nature de l'odeur est ici étroitement reliée à une différence de concentration initiale (une huile essentielle et une odeur synthétisée).

Sujets Seize sujets participent à cette expérience, ils sont divisés en huit groupes de deux sujets (G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7 et G8).

Description de la tâche Chaque sujet doit, dès qu'il détecte l'odeur, appuyer sur la barre d'espace du clavier de l'ordinateur, le *temps de détection* est alors automatiquement enregistré. Lorsqu'il ne sent plus l'odeur, le sujet appuie de nouveau sur la barre d'espace et le *temps de persistance d'essai* est également enregistré .

Protocole Tous les essais se déroulent dans un même lieu. La température de la pièce est enregistrée et varie entre 18,5° et 20°C. Les diffuseurs sont placés devant le sujet à une distance de 40 cm environ devant le clavier (fig. 3.25).

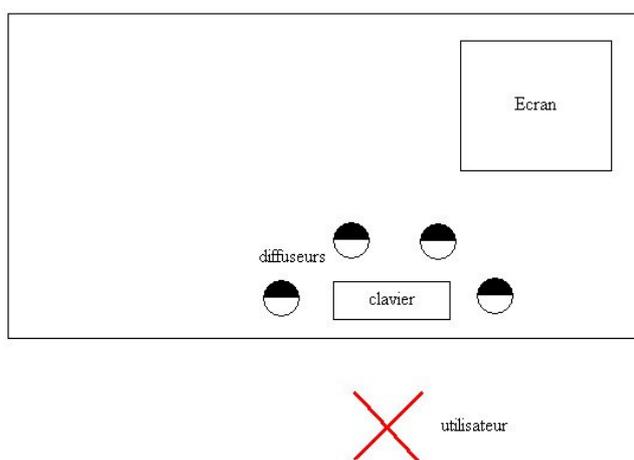


Figure 3.25 – Représentation schématique de la configuration expérimentale

Chaque sujet réalise une session qui se décompose en huit essais, chaque essai est relatif à une condition. Les huit conditions de la session sont regroupées dans le tableau 3.5. Une pause de 20 s est appliquée entre chaque essai.

Afin d'analyser l'influence de la vitesse de ventilation (rotation des pales) sur les valeurs de *temps de persistance* du signal olfactif, deux vitesses de rotation différentes ont été utilisées :

- La vitesse de rotation 1 est $V1 = 500 \text{ tr.min}^{-1}$)
- La vitesse de rotation 2 est $V2 = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$).

Un essai se déroule comme suit :

- Le diffuseur est mis en route
- Le chronomètre de détection est enclenché en même temps que le diffuseur
- Le diffuseur s'arrête après un temps défini par la condition de l'essai. Il peut donc s'arrêter avant la détection de l'odeur par le sujet

Configuration	Odeur Vanille	Configuration	Odeur Gazon coupé
C11	7 s/V1	C12	7 s/V1
C21	7 s/V2	C22	7 s/V3
C31	25 s/V1	C32	25 s/V1
C41	25 s/V2	C42	25 s/V3

Table 3.5 – Tableau regroupant les huit conditions relatives à une session d'expérimentation

Groupes /ordre des conditions	1	2	3	4	5	6	7	8
G1	C11	C12	C21	C22	C31	C32	C41	C42
G2	C12	C21	C32	C41	C22	C31	C42	C11
G3	C21	C32	C41	C12	C11	C42	C31	C22
G4	C22	C11	C42	C31	C12	C41	C32	C21
G5	C31	C42	C11	C32	C41	C22	C21	C12
G6	C32	C31	C22	C11	C42	C21	C12	C41
G7	C41	C22	C31	C42	C21	C12	C11	C32
G8	C42	C41	C12	C21	C32	C11	C22	C31

Table 3.6 – Ordre des diffusions selon les groupes

- Le sujet appuie sur la barre d'espace du clavier de l'ordinateur, dès qu'il détecte une odeur, le *temps de détection* est alors automatiquement enregistré. Le chronomètre de persistance est démarré
- Le sujet appuie sur la barre d'espace du clavier de l'ordinateur, dès qu'il ne perçoit plus l'odeur, le *temps de persistance d'essai* est relevé
- Arrêt du diffuseur et pause de 30 s avant l'essai suivant.

Le schéma 3.26 représente le déroulement du protocole.

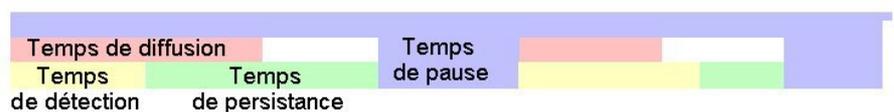


Figure 3.26 – Représentation schématique du protocole

Les différentes sessions présentent aux sujets les huit conditions selon un ordre préalablement défini (table 3.6).

A la fin de l'expérience, un questionnaire est rempli par l'utilisateur. Un modèle de ce questionnaire se trouve en annexe A.4.

Résultats L'analyse des résultats est divisée en deux parties. Dans une première partie, les résultats concernent la variation des *temps de détection* moyens en fonction de la vitesse de ventilation du diffuseur, de la nature de l'odeur, et de la durée de ventilation. Puis, dans une deuxième partie, les résultats concernant la variation des *temps de persistance* moyens en fonction des mêmes variables sont analysés.

◇ **Variation des *temps de détection***

Influence de la vitesse de ventilation Quatre *temps de détection* moyens sont calculés, en fonction de la nature de l'odeur et des valeurs de vitesse de ventilation, et indépendamment de la durée de ventilation c.-à-d. en regroupant les résultats par couples de conditions (C11, C31), (C12 et C32), (C21, C41), (C22 et C42). Les temps moyens arrondis à la seconde sont donnés dans la table 3.7

En ce qui concerne l'odeur de vanille, la différence entre les *temps de détection* en fonction des vitesses V1 et V2 est significative, d'après les méthodes ANOVA ($F(1,29) = 12.31$, $p < 0.0015$) et de Scheffé. Ces variations du *temps de détection* avec les vitesses de rotation des ventilateurs ont été observées dans les expérimentations précédemment décrites (cf. paragraphes 3.2.2.3, 3.2.2.2, 3.2.2.4)

Pour l'odeur de gazon coupé, on obtient avec la méthode ANOVA $F(1, 27)=0.47$; $p<0.5006$. Il n'y a donc pas de différence notable entre les deux vitesses de diffusion concernant la détection de cette odeur.

Influence de la nature de l'odeur L'analyse des *temps de détection* indique des différences importantes entre les deux odeurs utilisées. Il est utile de développer cet aspect. En effet, les odeurs utilisées sont stockées en phase liquide, mais leurs natures différentes impliquent des concentrations très différentes en molécules odorantes. Bien que les quantités initiales déposées dans les réceptacles des diffuseurs soient les mêmes, les concentrations initiales différentes influent sur les *temps de détection* de manière importante.

Odeur	Temps de	détection (s)
Vanille	Moyenne	Écart-type
Vitesse V1	11 s	5 s
Vitesse V2	8 s	3 s
Gazon coupé	Moyenne	Écart-type
Vitesse V1	22 s	22 s
Vitesse V2	18 s	23 s

Table 3.7 – Moyennes et écarts-types des *temps de détection* en fonction de la nature de l'odeur et des vitesses de ventilation (V1 = 500 tr.min⁻¹ et V2 = 1500 tr.min⁻¹)

Influence de la durée de ventilation Les résultats des *temps de détection* moyens en fonction de la durée de ventilation montrent qu'il n'y a pas de différence significative, quelle que soit la durée de ventilation (7 s ou 25 s).

◇ **Variation des *temps de persistance*** Le *temps de persistance* que nous avons défini précédemment comme étant le temps écoulé entre l'arrêt du diffuseur et le moment où le sujet ne sent plus l'odeur n'a pas été enregistré directement lors des essais. Lors des essais, sont enregistrés les temps de persistance d'essai qui est le temps entre la détection du sujet et le temps où il ne sentait plus l'odeur. Le *temps de persistance* est recalculé à partir des données enregistrées selon la formule :

$$\text{Temps de persistance} = T_{Det} + T_{Per} - T_{Diff}$$

où

T_{Det} : temps de détection

T_{Per} : temps de persistance d'essai

T_{Diff} : temps de diffusion

Influence de la vitesse de ventilation

Quatre *temps de persistance* moyens sont calculés, en fonction de la nature de l'odeur et des valeurs de vitesse de ventilation, et indépendamment de la durée de ventilation c.-à-d. en regroupant les résultats par couples de conditions (C11, C31), (C12 et C32), (C21, C41), (C22 et C42). Les temps moyens arrondis à la seconde sont donnés dans la table 3.8

Pour l'odeur de vanille, la méthode ANOVA ($F(1,25) = 0$, $p < 0.99$) indique qu'il n'existe aucune différence significative des valeurs des *temps de persistance* en fonction des vitesses de

Vitesse de ventilation	Temps de	persistance (s)
Vanille	Moyenne	Écart-type
Vitesse V1	20.5 s	22 s
Vitesse V2	20 s	28 s
Gazon coupé	Moyenne	Écart-type
Vitesse V1	49 s	53 s
Vitesse V2	23 s	30 s

Table 3.8 – Moyennes et écarts-types des *temps de persistance* en fonction de la nature de l'odeur et des vitesses de ventilation ($V1 = 500 \text{ tr.min}^{-1}$ et $V2 = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$)

ventilation V1 et V2. Par contre, pour l'odeur de gazon coupé, la vitesse de ventilation a une influence sur le temps de persistance. On obtient par la méthode ANOVA: $F(1,25) = 4,4$; $p < 0.04$. La méthode de Scheffé confirme ce résultat.

Influence de la nature de l'odeur

L'analyse des *temps de persistance* indique une différence importante entre les deux odeurs utilisées, comme dans le cas du *temps de détection*. Les mêmes raisons peuvent être évoquées pour expliquer la différence entre les temps enregistrés.

Influence de la durée de ventilation

Les résultats des *temps de persistance* moyens en fonction de la durée de ventilation sont regroupés dans la table 3.9.

Durée de ventilation	Temps de	persistance (s)
Vanille	Moyenne	Écart-type
7 s	27 s	32 s
25 s	12 s	7 s
Gazon coupé	Moyenne	Écart-type
7 s	34 s	39 s
25 s	35 s	50s

Table 3.9 – Moyennes et écarts-types des *temps de persistance* en fonction de la nature de l'odeur et des durées de ventilation

La méthode ANOVA nous donne pour l'odeur de vanille $F(1,24) = 5.24$; $p < 0.0312$ et pour l'odeur de gazon coupé: $F(1,18) = 0.02$; $p < 0.90$.

Questionnaires Des questionnaires sont remplis par les sujets après l'expérience. Les questions concernant l'expérience sont :

1. Combien d'odeurs avez vous différenciées ?
2. Les odeurs étaient elles bonnes ou mauvaises ?

Oralement, il est demandé aux sujets de mettre s'ils ont reconnu les odeurs diffusées.

A la première question, la plupart des sujets (7 sur 16) ont répondu qu'ils avaient détecté trois odeurs. Ils ont en fait senti l'odeur de gazon coupé et l'odeur de vanille à deux concentrations différentes. On peut voir dans la table 3.10 la répartition des sujets selon le nombre d'odeurs qu'ils ont senti. On notera que peu de sujets ont senti 1 ou 4 odeurs et plus (seulement 4 sur 16).

Nombres d'odeurs détectées	1	2	3	4 et plus
Nombre de sujets	2	5	7	2

Table 3.10 – Répartition des sujets selon le nombre d'odeurs senties

Pour la deuxième question, la plupart des sujets ont répondu que les odeurs étaient plutôt bonnes à sentir. Deux sujets ont mis qu'il y en avait une amère ou moins bonne et un sujet a dit qu'il y en avait une agressive.

En ce qui concerne la reconnaissance de l'odeur, les résultats sont synthétisés dans les tables 3.11 et 3.12.

Odeurs senties	aucune odeur	une odeur de vanille	une autre odeur
Nombre de sujets ayant reconnu	7	4	7

Table 3.11 – Répartition des sujets selon les odeurs senties

Les autres odeurs senties par les sujets sont toutes des odeurs sucrées ou fruitées (voir la table 3.12). On peut remarquer le mot utilisé par un sujet : l'odeur de barbe à papa. Ce nom montre que pour reconnaître une odeur, on fait appel à ses souvenirs et l'odeur est nommée par rapport à ceux-ci.

Odeur sentie	fraise	pomme	cannelle	citron	barbe à papa
Nombre de sujets ayant reconnu	2	1	2	1	1

Table 3.12 – Répartition des sujets selon les odeurs senties autre que vanille

Discussion En ce qui concerne les *temps de détection* et les *temps de persistance*, le choix de l'odeur est un paramètre déterminant. Dans les expériences précédentes (expérience de cartographie et de saturation), aucune différence significative n'est apparue, quelle que soit l'odeur, la détection dépendait surtout de la vitesse de ventilation. Plutôt que la qualité de l'odeur elle-même (vanille ou gazon coupé), c'est la nature du liquide odorant (huile essentielle ou produit de synthèse) qui semble être à l'origine des disparités. En effet, une même quantité initiale des deux produits ne contient pas la même concentration de ces deux produits, ce qui influe sur les *temps de détection et de persistance*.

En ce qui concerne la persistance, le premier paramètre étudié est la vitesse de ventilation. Pour l'odeur de vanille, la vitesse de ventilation n'influe pas du tout sur le temps de persistance alors que pour l'odeur de gazon coupé, le temps de persistance est plus long pour la vitesse la plus faible.

Pour l'odeur de vanille, le temps de persistance est nettement influencé par la durée de la ventilation. Plus la durée est longue, plus le temps de persistance est court. Certains temps ont été retirés, car il s'agissait de temps de saturation étant donné que les sujets ne sentaient plus l'odeur avant la fin de la diffusion.

Les questionnaires ont permis de montrer que l'identification d'une odeur était très compliquée. Les sujets n'ont pas été capables de déterminer le nombre d'odeurs diffusées et seulement 25% des sujets ont su reconnaître une odeur.

Il était également demandé aux sujets combien d'odeurs ils avaient senti et lesquelles ils avaient reconnu. Aucun sujet n'a reconnu l'odeur de gazon coupé alors que plusieurs ont reconnu la vanille (quatre sujets sur seize). De plus certains sujets se sont plaints d'une odeur forte qui couvrait les autres odeurs. La persistance est donc dépendante de l'odeur mais peut-être aussi des odeurs diffusées avant.

3.2.2.6 Conclusion des expérimentations

L'objectif de ces expérimentations est de connaître les différents paramètres qui font varier les temps de détection, saturation et persistance. La vitesse des ventilateurs du diffuseur influe sur les temps de détection ainsi que la nature des odeurs et les odeurs elles-mêmes. Pour les temps de saturation, la vitesse de ventilation est le paramètre le plus déterminant et pour les temps de persistance, la vitesse de ventilation, l'odeur précédemment diffusée ainsi que la durée de ventilation peuvent modifier les temps de persistance. Cela montre qu'il est nécessaire avant toute intégration d'un diffuseur olfactif, de le caractériser selon les odeurs prévues dans l'application, la salle où l'expérience va se dérouler.

Ces différentes expérimentations ont également confirmé quelques points importants, dont

il est nécessaire de tenir compte pour une intégration efficace de la composante olfactive dans des EVs, pour des diffuseurs munis d'un système de dispersion des odeurs par ventilation. En particulier, l'attention devra être portée sur la disposition des dispositifs à ventilation, les temps de latence entre la diffusion de plusieurs odeurs. De plus la latéralité des sujets peut influencer sur leur sensibilité olfactive : les droitiers détectent plus rapidement une odeur venant de gauche et inversement pour les gauchers. Il faut essayer de placer le diffuseur devant le sujet s'il n'y en a qu'un seul sinon placer les diffuseurs de chaque côté du sujet (cf. expérimentation de localisation 3.2.2.3). L'expérience de localisation a permis de voir que les sujets ne distinguent pas la localisation de la source odorante pour des diffuseurs de bureau, ce qui permet de ne pas placer les diffuseurs dans le monde réel comme les sources d'odeur du monde virtuel (voir expérience de localisation 3.2.2.3).

Le paragraphe suivant présente l'utilisation de la méthodologie d'intégration dans un EV.

3.3 Utilisation de la méthodologie d'intégration pour le m@d sur la plate-forme PREWISE

3.3.1 Choix du diffuseur

Trois expériences sont réalisées pour évaluer le retour olfactif en environnement virtuel. Le même diffuseur sera utilisé pour les trois expérimentations. Le choix du diffuseur est effectué en fonction des taxonomies présentées dans ce chapitre (cf. paragraphe 3.1).

Dans les taxonomies concernant les techniques d'interaction en RV, seule celle pour la locomotion est intéressante pour nos applications. Aucune sélection ni manipulation d'objet n'est utilisée. Le menu est en 2D et n'est pas odorisé. Aucune des applications ne nécessite une locomotion du sujet dans le monde réel, aussi le choix s'effectue sur les liaisons 3, 4, 5. Le diffuseur de bureau est une possibilité (voir fig. 3.27).

Les trois applications nécessitent un seul utilisateur en même temps. Selon la taxonomie présentée figure 3.28, le choix du diffuseur de bureau est judicieux.

Les trois applications se déroulent sur la plate-forme PREWISE. La plate-forme possède un écran de projection 2x2,5m pour la visualisation. La taxonomie présentée ci-dessous (fig. 3.29) déconseille le cas du diffuseur de bureau. Dans notre cas, deux des applications acceptent la présence d'une table devant le sujet pour poser le diffuseur (cuisine, ville). Pour la dernière application (supermarché), le diffuseur peut être posé non loin du sujet, à sa hauteur, étant donné qu'aucune locomotion réelle n'est demandée.

Parmi les diffuseurs de bureau existants, le choix s'est porté sur le m@d d'Osmooze (voir

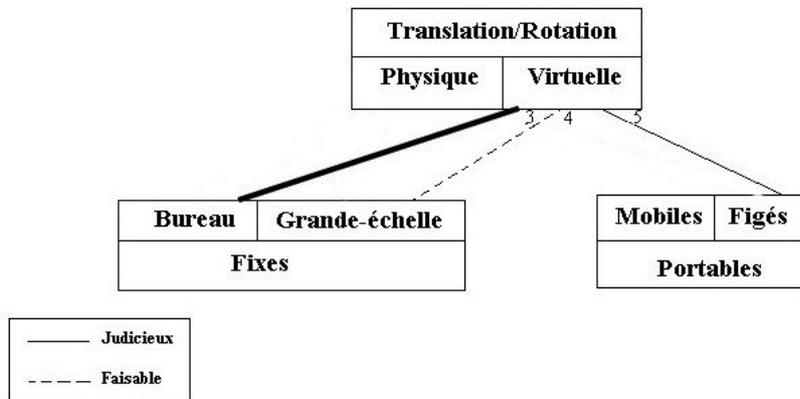


Figure 3.27 – Choix du diffuseur selon la locomotion dans les applications

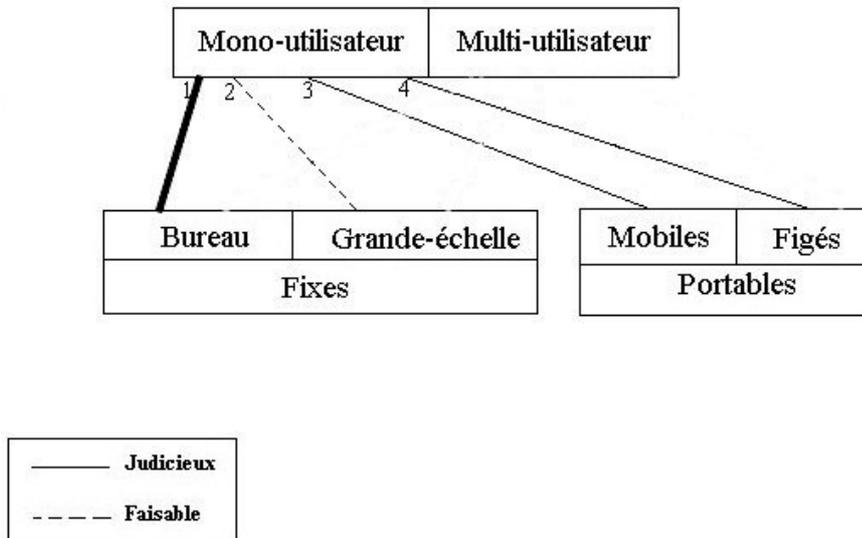


Figure 3.28 – Choix du diffuseur selon le nombre d'utilisateurs

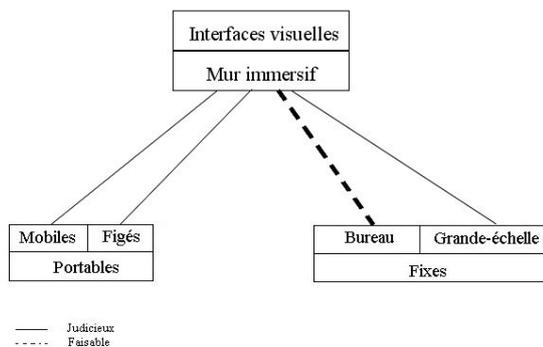


Figure 3.29 – Choix du diffuseur selon le dispositif de visualisation

paragraphe 2.2.3.2.1).

3.3.2 Caractérisation du diffuseur

Dans les expérimentations pour l'évaluation du retour olfactif, deux données sont nécessaires : le temps de détection (temps nécessaire au déclenchement préalable du diffuseur) et le temps de persistance (temps avant de diffuser une deuxième odeur).

Une expérience préliminaire est effectuée : il s'agit de l'expérience de persistance présentée au paragraphe 3.2.2.5. Cette expérience se déroule sur la plate-forme PREWISE, avec un seul sujet et les odeurs utilisées pour les expérimentations d'évaluation.

3.3.2.1 Objectif

L'objectif est de récupérer les temps de détection et de persistance pour le diffuseur choisi : le m@d d'Osmooze.

3.3.2.2 Matériel

Le diffuseur m@d d'Osmooze est utilisé pour cette expérience.

L'expérience est effectuée deux fois : la première fois, les quatre odeurs présentes dans la ville virtuelle sont diffusées (lilas, gazon coupé, bois brûlé et parfum). La seconde fois, les quatre odeurs de la cuisine et du supermarché sont utilisées (menthe poivrée, jus d'orange, café, sous-bois). Les odeurs sont toutes sous la même forme, stockées sous forme de gel dans des capsules commercialisées par Osmooze.

Le logiciel d'Exhalia est utilisé pour diffuser les odeurs.

3.3.2.3 Sujets

Dix sujets participent à chaque expérience.

3.3.2.4 Description de la tâche

La tâche est équivalente à l'expérience de persistance présentée au paragraphe 3.2.2.5.

3.3.2.5 Protocole

Cette expérience doit servir à récupérer les temps de détection et de persistance dans des conditions préalablement définies. Chaque sujet sentira les quatre odeurs. La vitesse des diffuseurs est configurée au maximum.

Les odeurs sont diffusées dans l'ordre de diffusion de l'application, c.-à-d. l'odeur de parfum, l'odeur de lilas, l'odeur de gazon coupé puis l'odeur de bois brûlé pour la première expérience et l'odeur de café, l'odeur de menthe poivrée, l'odeur de terre mouillée et enfin l'odeur de jus d'orange pour la deuxième expérience (ordonnancement dans le supermarché).

L'expérience se déroule comme suit :

- Le diffuseur est mis en route
- Le chronomètre de détection est enclenché en même temps que le diffuseur
- Le sujet appuie sur la barre d'espace du clavier dès qu'il détecte l'odeur. Le temps de détection est alors automatiquement enregistré.
- Le diffuseur est arrêté et le chronomètre de persistance est enclenché.
- Le sujet appuie sur la barre d'espace du clavier dès qu'il ne sent plus l'odeur. Le temps de persistance est alors automatiquement enregistré.
- Un temps de délai de 10s est prévu avant la diffusion suivante. Le temps est court car le sujet appuie sur la touche seulement lorsqu'il ne sent plus l'odeur.

3.3.2.6 Résultats

Temps de détection Quelle que soit l'odeur diffusée, la majorité des temps de détection est comprise entre 7s et 15s. La moyenne est de 9s.

Temps de persistance La majorité des temps de persistance se situe autour de 15s, en sachant que la concentration des sujets est essentiellement située sur la présence ou non d'une odeur. Dans une application, la concentration du sujet sera perturbée par les images.

Conclusion

En ce qui concerne l'utilisation des interfaces olfactives en RV, encore peu de retours d'expériences sont disponibles et aucune taxonomie ou méthodologie d'intégration de la composante olfactive dans les environnements virtuels n'a, à l'heure actuelle, été proposée.

Nous avons proposé dans ce chapitre, l'établissement d'une taxonomie relative à l'intégration de la composante olfactive en nous basant sur certains travaux antérieurs reconnus relatifs aux techniques d'interaction, aux interfaces visuelles et de navigation, proposées par D. A. Bowman *et al.* [22] et L. Arns et C. Cruz-Neira [7] et sur l'analyse en terme d'ergonomie des dispositifs odorants précédemment décrits.

D'autre part, la multiplicité des technologies de diffusion et de dispersion de diffuseurs disponibles sur le marché ainsi que la subjectivité de la perception olfactive des sujets humains

nécessitent une caractérisation de tout diffuseur susceptible d'être intégré dans une application de réalité virtuelle. Nous nous sommes donc intéressés à la mise en place d'expérimentations pouvant caractériser le diffuseur choisi pour une application.

La taxonomie d'intégration présentée en première partie ainsi que la caractérisation du diffuseur par l'intermédiaire d'expérimentations ont permis l'intégration du diffuseur M@d d'Os-mooze sur la plate-forme PREWISE.

Nous proposons dans la suite de ce travail de concevoir des environnements virtuels originaux dédiés à des évaluations expérimentales sur la présence et la mémoire. Nous utiliserons dans ces expériences le diffuseur choisi et caractérisé dans ce chapitre.

Evaluation de la composante olfactive

Introduction

Ce chapitre constitue une contribution à l'étude de l'influence de la composante olfactive sur la performance humaine en environnement virtuel. Nous traitons en particulier les notions fondamentales d'immersion et de présence. Nous nous intéressons aussi à la mémorisation d'informations ou d'événements associés à des odeurs. Les expérimentations effectuées reposent sur la méthodologie d'intégration que nous avons proposés au chapitre précédent. La performance et le comportement humain sont analysés lors de tâches impliquant des environnements virtuels auxquels nous sommes confrontés régulièrement, et qui, pour certaines personnes (âgées et/ou handicapées), posent des difficultés en terme d'autonomie : un environnement urbain, un supermarché et une cuisine.

4.1 Justification des expérimentations

Ces environnements virtuels ont été choisis pour différentes raisons. La première est d'ordre applicatif. En effet, nous souhaitons les utiliser dans le cadre du projet que nous menons avec des chercheurs et praticiens du Centre Hospitalier Universitaire (CHU) d'Angers [119]. Un des objectifs de ce projet est d'utiliser les techniques de réalité virtuelle pour le diagnostic et la rééducation cognitive de patients cérébraux-lésés, vis-à-vis de tâches de la vie quotidienne telles que préparer un plat, faire du café, faire ses courses ou aller à la banque.

La deuxième raison est que ces environnements ont des caractéristiques très complémentaires, en particulier concernant leur taille, et impliquent des techniques d'interaction différentes, pouvant aller de la manipulation d'objets (cuisine) à la navigation ou la locomotion (environnement urbain ou supermarché). Afin de renforcer cette complémentarité, nous avons utilisé des paradigmes expérimentaux impliquant des degrés d'activité très différents. Ainsi, pour l'environnement urbain, les sujets sont complètement actifs : ils ont une entière liberté de

contrôle sur leur déplacement dans l'environnement. Dans le cas du supermarché (environnement de taille plus réduite), les sujets ne contrôlent que leur vitesse de déplacement, leur itinéraire étant totalement prédéterminé. Dans le cas de la cuisine (environnement de taille encore plus réduite), les sujets sont totalement passifs. Ceci nous permet d'étudier l'influence conjointe de la composante olfactive et du degré d'implication des sujets sur la sensation d'immersion, la présence et la mémorisation d'objets ou d'événements.

Concernant les techniques d'interaction, nous proposons pour la première expérimentation (navigation dans l'environnement urbain) un modèle reposant sur l'utilisation d'un volant à retour d'effort. Ceci est une solution relativement écologique (proche de la réalité) puisqu'elle implique le schème comportemental acquis de la conduite automobile. Dans la troisième expérimentation (déplacement dans un supermarché) nous avons développé une technique d'interaction basée sur l'utilisation d'une interface de type "step-in-place" [132]. Cette technique de navigation repose sur une interaction sensori-motrice impliquant une dépense d'énergie importante de la part de l'utilisateur et donc une implication a priori plus forte dans la simulation.

Enfin, les expérimentations proposées reposent sur la méthodologie d'intégration de la composante olfactive que nous avons proposée au chapitre précédent.

4.2 Expérimentation 1 : ville virtuelle

La problématique présentée ici repose sur deux aspects liés à la sensation d'immersion et de présence : (1) la technique d'interaction mise en oeuvre et (2) les retours sensoriels et en particulier la composante olfactive. Elle concerne aussi la mémorisation et la restitution d'informations ou d'événements.

Nous considérons les hypothèses suivantes :

- Plus l'environnement virtuel intègre de retours sensoriels, plus la sensation de présence va augmenter
- Les lieux virtuels odorisés vont être plus facilement enregistrés par les sujets

Nous avons choisi, dans cette première expérimentation, un environnement virtuel de grande dimension, comportant un grand nombre d'informations : une ville.

4.2.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est donc multiple :

- mettre en application notre méthodologie d'intégration de la composante olfactive
- évaluer l'influence de la technique d'interaction sur la sensation d'immersion et de présence

- évaluer l’influence de la composante olfactive sur la mémorisation d’objets ou d’événements dans le contexte de l’exploration d’un environnement virtuel de type urbain.

4.2.2 Matériel

Les expérimentations présentées dans ce chapitre ont été réalisées sur la plate-forme PRE-*PRE* (Plate-Forme de Réalité Virtuelle pour la Simulation et l’Expérimentation) du LISA. Cette plate-forme est basée à l’Institut des Sciences et Techniques de l’Ingénieur d’Angers (ISTIA). Elle est pilotée par une station de travail dotée de deux processeurs Xéon IV cadencés à 3 Ghz.

PRE-*PRE* est constituée d’un système de visualisation permettant la restitution, en rétro-projection stéréoscopique passive, d’un environnement virtuel de grande dimension. La taille de la surface de projection (2 x 2,5m) permet une immersion visuelle relativement bonne.

L’objectif de cette plate-forme est, d’une part, de permettre une interaction avec les environnements simulés la plus naturelle et la moins intrusive possible et d’autre part, de renforcer la sensation d’immersion grâce à l’utilisation de différents types d’interfaces (auditives, haptiques et olfactives).

Le diffuseur utilisé pour cette expérimentation est un M@d de chez Osmooze. Une description de ce diffuseur est faite au paragraphe 2.2.3.2.1. Un partenariat avec la société Exhalia [52] nous permet, via une mise à disposition de modules de configuration et de pilotage de différents diffuseurs, une intégration logicielle rapide de la composante olfactive dans nos environnements virtuels.

4.2.3 Environnement virtuel

L’environnement virtuel développé pour cette expérimentation est un environnement urbain dont une vue d’ensemble est donnée à la figure 4.2. Cet environnement est composé de différents bâtiments, d’espaces verts, de parkings. Des personnages se déplacent sur les trottoirs, traversent les voies de circulation, ou discutent devant un cinéma. Diverses automobiles sont garées sur les trottoirs (voir figure 4.1).

Cet environnement virtuel peut être qualifié d’environnement multi-sensoriel puisqu’en dehors des images, il stimule les canaux auditif, olfactif et haptique des sujets. En effet, quatre odeurs (un parfum, des odeurs de lilas, de gazon coupé et de bois brûlé) sont diffusées à différents endroits, et des informations sonores (bruit de moteur, pépiements d’oiseaux, etc.) sont envoyées dans un casque porté par le sujet.

En ce qui concerne les informations haptiques, elles sont restituées via un volant Ferrari Thrustmaster à retour d’effort.



Figure 4.1 – Image de la ville virtuelle



Figure 4.2 – Vue de dessus de la ville virtuelle

Ce type d'environnement virtuel a été choisi pour sa taille et la grande richesse d'informations et d'événements qu'il contient. De plus, c'est un environnement auquel la plupart d'entre nous sommes confrontés quotidiennement.

4.2.4 Fonctionnement de l'application

Cette application comporte un menu principal qui permet de lancer la simulation (l'utilisateur doit entrer le nom d'un fichier dans lequel sera sauvegardée sa trajectoire) ou de rejouer un parcours précédent.

Dans le cas de l'utilisation de la souris, les sujets doivent placer le pointeur au centre de l'écran, cliquer (clic gauche) et déplacer le pointeur vers le haut pour avancer, vers la droite pour tourner à droite et vers la gauche pour tourner à gauche. Cette commande en vitesse, intuitive, est illustrée à la figure 4.3.

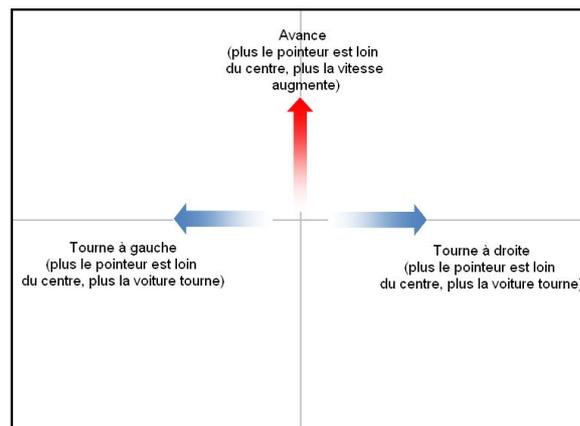


Figure 4.3 – Schéma de pilotage du point de vue basé sur l'utilisation d'une souris

Dans le cas de l'utilisation du volant, les sujets doivent appuyer sur la pédale de droite pour avancer et tourner le volant à droite ou à gauche pour effectuer une rotation vers la droite ou vers la gauche.

4.2.4.1 Parcours du sujet

Afin que tous les sujets suivent le même itinéraire (contrôle des stimuli visuels), le parcours est indiqué par des flèches. L'affichage des flèches se fait séquentiellement (fig. 4.4). Ainsi, une flèche apparaît lorsque le sujet arrive à hauteur de la précédente. La première flèche apparaît juste après le chargement des objets (voir figure 4.5). Elle signifie ainsi au sujet qu'il peut

démarrer. Le trajet du sujet est chronométré : toutes les 200 ms, sa position est enregistrée dans un fichier, afin de permettre une analyse post-expérimentale du trajet.

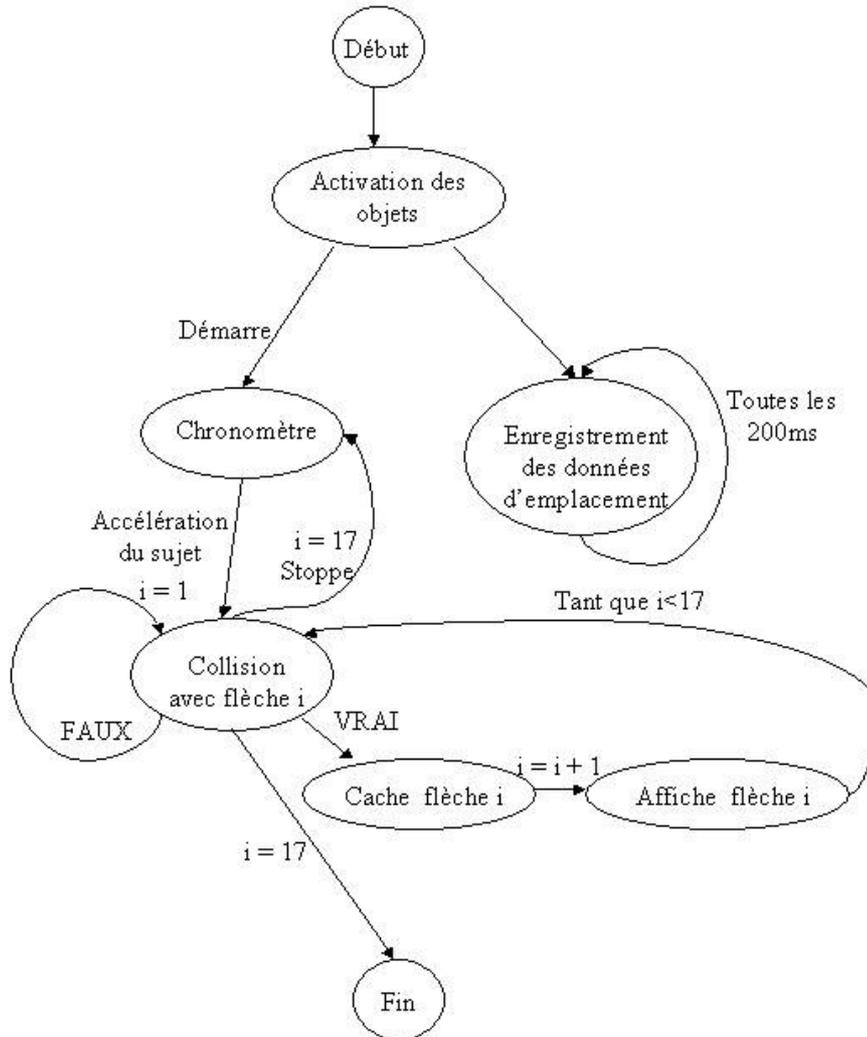


Figure 4.4 – Algorithme d’indication et d’enregistrement du parcours

4.2.4.2 Affichage d’un parcours pré-enregistré

Le menu principal permet de rejouer les différents parcours empruntés par les sujets. Il suffit pour cela de saisir le nom du fichier dans le menu. Une vue de dessus de la ville apparaît (voir



Figure 4.5 – Intersection : une flèche rouge indique la direction à prendre.

fig. 4.2) et le parcours effectué précédemment s’affiche en temps réel sur cette vue, au fur et à mesure de la lecture du fichier contenant les positions enregistrées.

4.2.5 Protocole

Sujets : Vingt-quatre sujets volontaires, tous étudiants de l’ISTIA, ont participé à cette expérience. Ils ont été répartis en quatre groupes ($G_{V,SO}$, $G_{V,O}$, $G_{S,SO}$ et $G_{S,O}$), et ont réalisé l’expérience comme suit:

- $G_{V,SO}$ avec volant / sans odeurs
- $G_{V,O}$ avec volant / avec odeurs
- $G_{S,SO}$ avec souris / sans odeurs
- $G_{S,O}$ avec souris / avec odeurs

Tâche : La tâche consiste pour chaque sujet à se déplacer dans l’environnement urbain à l’aide du volant ou de la souris selon son groupe d’appartenance, en suivant l’itinéraire indiqué par des flèches (cf. fig. 4.5). Au cours de son itinéraire, le sujet doit essayer de mémoriser le plus d’informations ou d’événements possibles.

Le temps moyen de réalisation du parcours est d’environ six minutes. La tâche est effectuée une seule fois par chaque sujet. L’itinéraire de celui-ci ainsi que le temps de réalisation de la tâche sont enregistrés.

Chaque sujet est assis devant une table sur laquelle est posé le diffuseur d’odeur, le volant

ou la souris. En fonction de son groupe d'appartenance, des odeurs sont diffusées ou non (voir fig. 4.6). Le sujet se trouve à une distance approximative de l'écran de 2 m. Cette distance a été choisie pour que les images de l'environnement virtuel occupent une grande partie de son champ visuel.



Figure 4.6 – Configuration expérimentale

Pendant l'expérimentation, pour les sujets des groupes $G_{V,O}$ et $G_{S,O}$, quatre odeurs sont diffusées à des endroits prédéterminés de l'environnement.

- arrêt de bus : odeur d'un parfum
- parterre de fleurs : odeur de lilas
- parc : odeur de gazon coupé
- camionnette : odeur de brûlé

Les endroits du parcours associés à chaque odeur sont illustrés à la figure 4.7. Leur emplacement a été déterminé afin que les temps de persistance (définis au chapitre 3) soient inférieurs au temps entre les différentes stimulations olfactives.

4.2.6 Questionnaire

À la fin de l'expérience, les sujets doivent remplir un questionnaire.

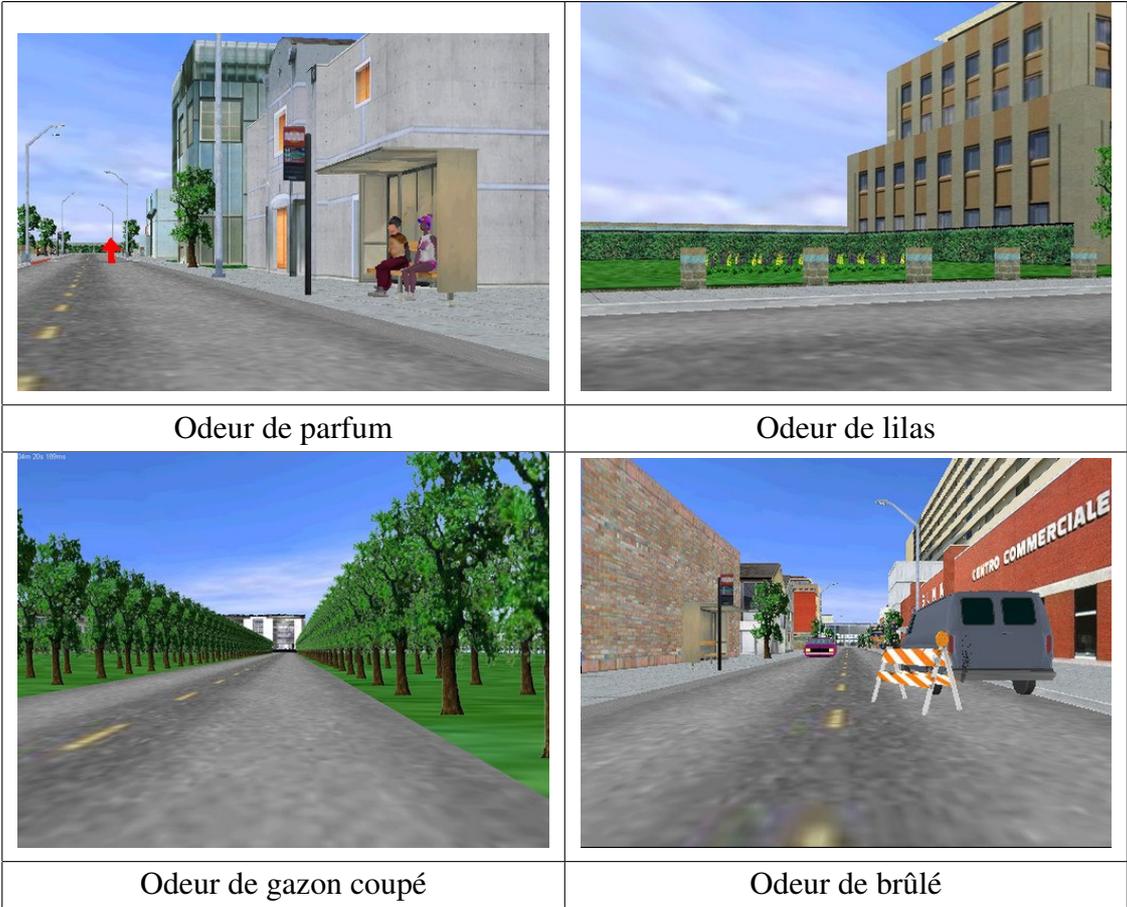


Figure 4.7 – Emplacements du parcours associés aux différentes odeurs

Ce questionnaire a pour objectif de recueillir des informations relatives à l'effet de la composante olfactive sur la sensation de présence et la capacité des sujets à traiter, enregistrer et mémoriser des informations provenant de l'environnement virtuel.

En ce qui concerne la notion de présence, les questions posées sont standard et sont issues des travaux de Slater [129] et de Morineau [101]. Elles permettent de quantifier le degré d'immersion du sujet (réponses graduées de 1 à 7) ainsi que la sensation de présence au sein de l'environnement virtuel (cf. paragraphe 2.1.3.1).

La partie du questionnaire relative à la mémorisation se divise en deux parties : la première partie consiste à répertorier le plus de souvenirs de la simulation effectuée par le sujet. La deuxième partie consiste à répondre à des questions concernant des informations spécifiques. Le questionnaire est donné en annexe A.5.

4.2.7 Résultats

Les résultats de cette expérience sont présentés en deux parties. La première partie est consacrée aux résultats concernant l'influence de la composante olfactive sur l'immersion et la présence. La seconde partie présente les résultats relatifs à la mémorisation d'informations et d'événements.

4.2.7.1 Présence

4.2.7.1.1 Etude selon les questionnaires La table 4.1 répertorie les moyennes des réponses par groupe et par option. Les cases grisées correspondent aux plus fortes moyennes.

		Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Moyenne
Moyennes par question		4,417	3,854	5,125	4,708	4,125	4,446
A	Groupe V,SO	4,571	3,286	5,429	4,714	3,286	4,257
	Groupe V,O	5,167	4,250	5,333	5,167	4,667	4,917
	Groupe S,SO	3,167	3,500	4,833	3,833	3,667	3,800
	Groupe S,O	4,800	4,600	4,800	5,200	5,200	4,920
B	Avec odeur	4,983	4,425	5,067	5,183	4,933	4,918
	Sans odeur	3,869	3,393	5,131	4,274	3,476	4,029
C	Avec volant	4,869	3,768	5,381	4,940	3,976	4,587
	Sans volant	3,983	4,050	4,817	4,517	4,433	4,360

Table 4.1 – Tableau récapitulatif des moyennes concernant la présence

Pour le cas (A) (voir sur la table 4.1), il s'agit des moyennes des réponses des sujets par groupe. On remarque que les meilleurs résultats sont souvent obtenus par les sujets du groupe $G_{S,O}$ (Q4, Q6, Q7).

La méthode ANOVA donne $F(3,12) = 6.34$; $p < 0.008$. Il existe donc une différence statistique significative entre la performance de ces quatre groupes. La méthode de Scheffé permet de constater une différence significative entre $G_{V,O}$ et $G_{V,SO}$ ainsi qu'entre $G_{S,SO}$ et $G_{S,O}$. On peut donc conclure à une influence positive de la composante olfactive sur la sensation de présence.

Ceci est confirmé par la méthode ANOVA ($F(1,4)=12.31$; $p < 0.02$) pour le cas (B) (voir sur la table 4.1). Il s'agit des moyennes par question et par option odeur ou sans odeur. Pour le cas (C) (voir sur la table 4.1), qui concerne les moyennes par question et par option volant ou souris, ANOVA donne $F(1,4) = 0.8$; $p < 0.42$. On ne peut donc pas conclure sur l'intérêt du volant pour améliorer le sentiment de présence dans cet EV.

4.2.7.1.2 Temps de réalisation du parcours Le temps de réalisation du parcours correspond au temps mis par le sujet pour effectuer la tâche définie au paragraphe 4.2.5.

Les résultats présentés dans la table 4.2, illustrent une nette différence entre les groupes $G_{V,SO}$ et $G_{V,O}$ et les groupes $G_{S,SO}$ et $G_{S,O}$ (90 s).

Groupe	Temps en sec
$G_{S,SO}$	277
$G_{S,O}$	289
$G_{V,SO}$	367
$G_{V,O}$	378
Avec volant	283
Avec souris	373
Sans odeur	322
Avec odeur	345

Table 4.2 – Temps moyen de réalisation de la tâche

La méthode ANOVA nous confirme largement ce résultat ($F(1,19) = 40$; $p < 10^{-4}$). Ceci indique, qu'indépendamment de la présence d'odeurs dans l'environnement, l'utilisation du volant a été moins intuitive que celle de la souris sur l'ensemble des essais effectués.

En ce qui concerne les odeurs, les groupes $G_{V,O}$ et $G_{S,O}$ ont mis, en moyenne, plus de temps que les autres : 345 secondes, soit 23 secondes d'écart. Sur une simulation qui dure en moyenne 5 min 30, un écart de 23 s ne peut être considéré comme significatif.

4.2.7.2 Mémoire

L'étude de l'influence de la composante olfactive sur la capacité de mémorisation est uniquement basée sur les réponses des sujets aux questionnaires.

4.2.7.2.1 Partie 1 - Éléments listés

Question n°1 : Énumérez les détails ou événements dont vous vous souvenez Chaque questionnaire a été traité individuellement. Toutes les réponses des sujets sont listées, puis regroupées dans la table 4.3.

	V,SO	V,O	S,SO	S,O	Sans odeur	Avec odeur
Abri bus	2	1	1	1	3	2
Accident		1	1			
Affiches (SW ou pas)	5	3	4	3		
Ballon en l'air				1		
Fleurs		1				1
Mer/plage	2	1		2		
Odeurs		4	1	2		
Parking		1				
Piéton (JF, fou etc...)	6	4	2	5		
Ruelle marron				1		
Signalisation (panneaux, bandes, flèches)	4	3	3	2		
Travaux	2	2	2			
Batiments			3			
Cabanons	1	1				
Cinema	2	3	1	3		
Crédit suisse (banque suisse, banque)	2	2	1	3		
ISTIA	2	1	1			
Magasin de chaussures	1		1	1		
Magasin de vin rouge	1					
Maisons en briques	1		2			
Porte de garage (warning)	1			1		
Usine		1		1		
Oiseau		1		2		
Son oiseaux	1	2	2			
Arbres	1	3	4	1	8	7
Espaces verts	1	2	2	1		
Camionnette	1			1	1	1
Son voiture	1	1	1			
Voitures n'importe où	7	2	2	2		
Sommes	44	40	35	32	12	11

Table 4.3 – Informations restituées par les sujets concernant la question 1

Ce tableau nous permet d'étudier la quantité d'informations enregistrée par les sujets.

Au niveau de la quantité d'informations, les sujets ayant eu les odeurs n'ont pas obtenu de meilleurs scores que les sujets n'ayant pas eu d'odeurs pendant l'expérimentation : 72 informations ont été restituées par les groupes $G_{V,O}$ et $G_{S,O}$, les groupes $G_{V,SO}$ et $G_{S,SO}$ ont donné 79 informations. Si l'on analyse en détail les informations associées aux odeurs, les sujets des groupes avec odeurs ont trouvé 7 informations contre 8 pour les autres.

Il serait intéressant d'étudier la précision des informations. En effet, certains sujets ont donné comme réponse "affiches" alors que d'autres ont spécifié "affiches de star wars", "publicités"...

Question n°2 : Quels éléments vous ont le plus marqué ? Les réponses sont compilées dans la table 4.4.

	V,S,O	V,O	S,S,O	S,O
Abri bus				1
Affiches	2		3	
Allée d'arbres			1	2
Bruits	1	1		1
Camionette				1
Crédit suisse	1			
ISTIA	1		1	
Ligne droite	1			
Magasin de chaussures	1			
Magasin de vin rouge	1			
Odeurs		4		4
Piétons	3	2	1	1
Plage	1			
Travaux		1		
Voitures	3			1
Sommes	15	8	6	11

Table 4.4 – Informations restituées par les sujets concernant la question 2

Ici encore, on remarque que les sujets des groupes $G_{V,O}$ et $G_{S,O}$ n'ont pas restitué plus d'informations (19) que les sujets des deux autres groupes (21). Par contre, la majeure partie des sujets ayant fait l'expérience avec les odeurs ont noté cette information dans les éléments qui les ont le plus marqué (huit sujets sur douze). Au niveau des emplacements odorants, trois sont cités : l'abri-bus, la camionnette et l'allée d'arbres. Seule, l'allée d'arbres a été citée par un sujet n'ayant pas les odeurs lors de l'expérience, alors que quatre sujets ont cité l'un de ces emplacements.

4.2.7.2.2 Partie 2 - Éléments précis La deuxième partie sur la mémoire concerne les réponses des sujets à des questions concernant des informations spécifiques relatives à l'environnement. Il y avait huit questions que l'on peut retrouver à la table 4.5 avec les réponses associées. Les réponses en image sont présentées à la figure 4.8.

Pour étudier les réponses des sujets, 1 point est accordé lorsque la réponse est juste, 0.5 point lorsque une partie de la réponse est juste (exemple : nombre de personnes devant le cinéma

N°	Question	Réponses acceptées
8 (a)	Combien de personnes étaient sous l'abri bus ?	2
9 (c)	Combien de personnes étaient présentes à l'entrée du cinéma ?	7
10 (b)	A la fin de la simulation, quelle était la couleur du camion garé ?	gris, bleu ou noir
11 (d)	Quel est le nom du film qui apparaît à plusieurs reprises sur les affiches ?	Star Wars
12	Quel bâtiment familier reconnaissez vous ?	ISTIA
13 (e)	Quel(s) type(s) de fleur(s) avez vous rencontré ?	jaune, violette, digitale
14	Quelle(s) marque(s) de voiture avez vous reconnu ?	
15	Combien d'espace(s) vert(s) (parc, jardin...) avez vous rencontré ?	1, 2 ou 3

Table 4.5 – Questions sur la mémoire

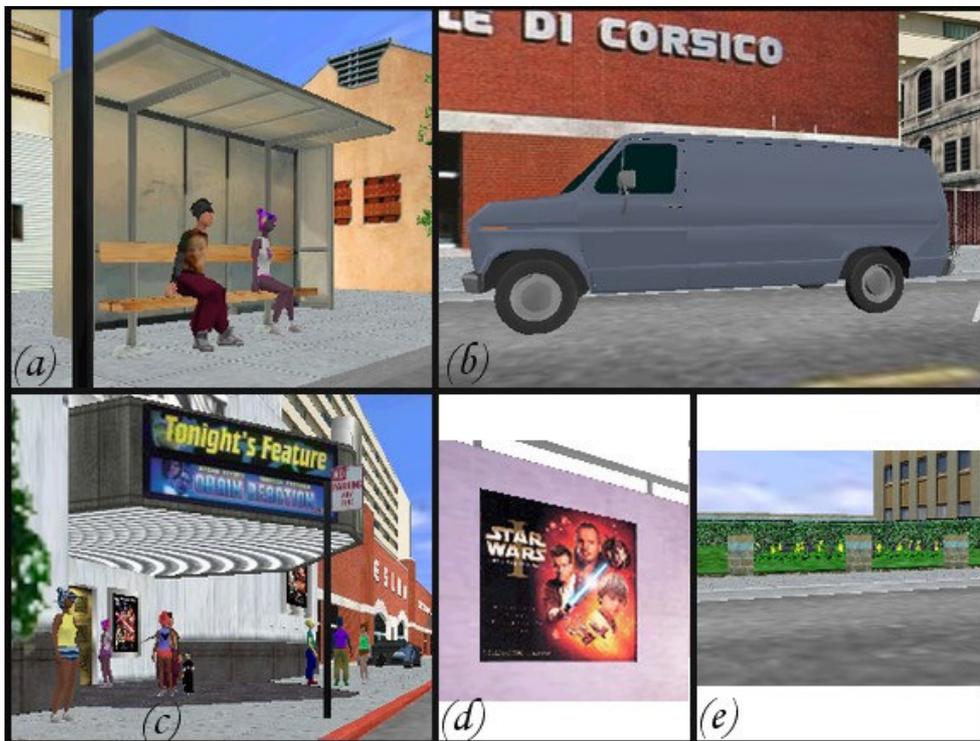


Figure 4.8 – Réponses aux questions en image

supérieur à 5 : 0.5 point). Certaines questions acceptent plusieurs réponses, comme par exemple la question 15. En effet, il existe un seul parc dans l'application mais qui est partagé par des routes. On peut donc considérer qu'il y a un, deux ou trois parcs. De même, le camion garé est gris foncé mais les réponses bleu foncé ou noir sont acceptées. Ces réponses sont donc comptabilisées comme bonnes. La table 4.6 contient les moyennes des réponses des sujets à chaque question. La question 14 est retirée de l'étude car elle est trop subjective (connaissance des marques de voitures) et n'est pas une question fermée.

	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q15	Moyenne
$G_{V,SO}$	0.25	0	0.5	0.5	0.5	0.17	0.75	0.38
$G_{V,O}$	0.8	0.2	0.8	0.6	0.4	0	0.6	0.49
$G_{S,SO}$	0.33	0	0.17	0.67	0.17	0	0.67	0.29
$G_{S,O}$	0.6	0.2	1	0.8	0.4	0	1	0.57
Moyennes	0.5	0.1	0.62	0.64	0.37	0.04	0.75	0.43
Avec odeur	0.7	0.2	0.9	0.7	0.4	0	0.8	0.53
Sans odeur	0.29	0	0.33	0.58	0.33	0.08	0.71	0.33
Avec volant	0.53	0.1	0.65	0.55	0.45	0.08	0.68	0.43
Sans volant	0.47	0.1	0.58	0.73	0.28	0	0.83	0.43

Table 4.6 – Moyennes des points obtenus par les sujets aux questions 8 à 15

Le groupe qui a obtenu le meilleur taux de bonnes réponses est le groupe $G_{S,O}$ (0.57 points en moyenne), c.-à-d. les sujets qui avaient les odeurs et la souris. Les groupes dont les sujets ont eu les odeurs dans les applications ($G_{V,O}$ et $G_{S,O}$) ont en moyenne mieux répondu (0.53 points en moyenne) que les deux autres groupes (0.33 points en moyenne). La méthode ANOVA confirme une différence significative pour ces résultats : $F(3,18)=3,83$; $p<0.03$. La méthode de Scheffé nous indique que les différences significatives sont entre les groupes $G_{V,SO}$ et $G_{S,O}$, entre les groupes $G_{V,O}$ et $G_{V,SO}$ ainsi qu'entre les groupes $G_{V,SO}$ et $G_{S,O}$.

4.2.8 Discussion

Il est intéressant de constater que les meilleurs résultats ne sont jamais obtenus par les sujets du groupe $G_{V,O}$, c.-à-d. le groupe avec la plus grande immersion mais plutôt par les sujets du groupe $G_{S,O}$ (utilisation de la souris). Ces résultats ne se retrouvent pas seulement pour la mémorisation mais également pour la sensation de présence.

Contrairement à l'hypothèse de départ, l'utilisation du volant ne signifie par forcément une plus grande sensation de présence. Les résultats pour la présence sont quand même meilleurs en

moyenne lorsqu'il y a le volant, les résultats les plus mauvais sont pour le groupe $G_{S,SO}$, c.-à-d. celui avec le moins de retours sensoriels. Par contre, le temps de réalisation du parcours est plus long que lorsque les sujets avaient la souris.

Pour la mémoire, les sujets ne paraissent pas avoir enregistré plus d'informations avec les odeurs que les sujets sans monde olfactif. Par contre, si des questions précises sont posées aux sujets, ceux qui ont eu la ville olfactorisée ont eu de meilleures réponses que les autres. La mémorisation semble efficace pour des odeurs ponctuelles sur un événement ou un lieu, ce qui confirme notre hypothèse initiale.

4.3 Expérimentation 2 : cuisine virtuelle

La problématique principale à laquelle nous sommes confrontés ici concerne l'influence de la composante olfactive sur la mémorisation d'objets et d'emplacements, dans un environnement virtuel au sein duquel le sujet est passif. Notre hypothèse étant que la présence d'odeur a une influence positive dans ce type de tâche cognitive.

Nous nous intéressons aussi à l'influence de la composante olfactive sur la sensation d'immersion et de présence dans une telle configuration. L'environnement expérimental que nous avons utilisé est une cuisine, pièce comportant généralement une grande quantité d'objets odorants (ingrédients, produits d'entretien, pain grillé, plats cuisinés, etc.).

4.3.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est multiple :

- mettre en application notre méthodologie d'intégration de la composante olfactive
- évaluer l'influence de la composante olfactive sur la mémorisation d'objets et d'emplacements
- évaluer l'influence de la composante olfactive sur la sensation de présence et d'immersion dans un environnement virtuel au sein duquel le sujet est passif.

4.3.2 Matériel

Cette expérimentation s'est déroulée sur la plate-forme PREWISE présentée précédemment (cf. paragraphe 4.2.2). Le diffuseur M@d d'Osmooze, décrit au paragraphe 2.2.3.2.1 a été utilisé pour diffuser les différentes odeurs.

4.3.3 Environnement virtuel

L'environnement virtuel utilisé pour cette expérience est une cuisine aménagée comportant six placards et un réfrigérateur. Le point de vue des sujets sur cet environnement est fixe et correspond à la figure 4.9. Divers objets ont été placés sur la table, sur le plan de travail, sur les étagères, dans les placards et le réfrigérateur. Ces objets peuvent être classés en deux catégories :

- objets que l'on peut trouver habituellement dans une cuisine
- objets que l'on trouve généralement ailleurs que dans une cuisine.

Cinq odeurs ont été utilisées : odeur de jus d'orange, de café, de menthe poivrée, de sous-bois et de cumin. Ces odeurs sont stockées sous forme de gel dans des cartouches et diffusées par le système M@D d'Osmooze.



Figure 4.9 – Capture d'écran de la cuisine virtuelle

4.3.4 Fonctionnement de l'application

L'application développée sous l'environnement Virtools Dev 3.5 permet de placer différents objets dans les placards ou le réfrigérateur d'une cuisine. Les objets ainsi que leur emplacement et leur odeur éventuellement associée sont stockés sous la forme d'un tableau, dans un fichier texte chargé lors du lancement de l'application. Il est ainsi relativement facile de modifier les

paramètres. Quatre configurations d'emplacements des objets ont ainsi été créées.

4.3.4.1 Protocole

4.3.4.1.1 Sujets Un total de 30 sujets volontaires, tous étudiants à l'ISTIA, ont participé à cette expérience. Ils ont été répartis en deux groupes. Les sujets du groupe G_{SO} ont effectué l'expérience sans odeurs, tandis que les sujets du groupe GG_O ont effectué l'expérience avec les 5 odeurs, les deux groupes ayant une phase de présentation des objets (définie au point 4.3.4.1.3). Chaque sujet a effectué l'expérience avec une configuration préalablement déterminée.

4.3.4.1.2 Déroulement de l'expérience Douze objets sont placés dans les six placards (deux objets par placard). Trois objets se trouvent dans le réfrigérateur et un objet, dans le congélateur, ce qui fait un total de seize objets à retenir. Le sujet s'installe sur une chaise à une distance d'environ 2 mètres de l'écran. Le diffuseur est juste devant lui, sur une table (cf. fig.4.10).



Figure 4.10 – Configuration expérimentale pour l'expérience de la cuisine virtuelle

Parmi les cinq objets odorants, quatre sont dans les placards et un est situé à l'extérieur des placards. Il s'agit des épices pour lesquelles une odeur de cumin est diffusée au début et à la fin de l'expérience. Sur les quatre objets placés dans les placards, deux seulement ont une odeur cohérente (c.-à-d. qui correspond à l'objet).

La table 4.7 présente les objets placés dans les placards et les objets placés dans la cuisine avec leur odeur associée.

4.3.4.1.3 Présentation des objets La présentation des objets dure 4 min 40 et se déroule comme suit :

Chaque placard s'ouvre (en commençant par le placard le plus à gauche). L'objet situé dans la partie supérieure du placard vient se positionner au dessus de la table devant laquelle est assis



Odeur de menthe



Odeur de sous-bois



Odeur de jus d'orange



Odeur de café

Figure 4.11 – Objets virtuels associés aux différentes odeurs

Objet	Odeur associée
Beurre	
Cannette	
Crème fraîche	Menthe poivrée
Jambon	
Corn Flakes	
Farine	Sous bois
Harry's	
Finger	
Jus d'orange	Orange
Lait	
Thé	
Filtres à café	Café
Oeufs	
Pizza	
Zanimos	
Riz	

Objet	Odeur associée
Casseroles	
Epices	Cumin
Fleurs	
Jeux	
Chaussure	
Ours	
Téléphone	
Crayons	
Lampe	
Vêtement	
Radio	

Objets placés dans les placards Objets placés en dehors des placards

Table 4.7 – Noms des objets placés dans la cuisine avec leur éventuelle odeur associée.



Figure 4.12 – Objet en rotation devant le sujet

le sujet, il tourne sur lui même pendant 10 secondes, puis retourne à sa position initiale (cf. fig. 4.12). L'objet positionné dans la partie basse du placard est soumis au même comportement. Si une odeur est associée à un objet placé dans un placard, le diffuseur est activé dès l'ouverture de la porte et s'éteint lorsque l'objet retourne dans le placard. Ceci permet que le sujet détecte l'odeur lorsque l'objet est à l'image. En effet, si l'on attend que l'objet soit en rotation pour activer le diffuseur, l'odeur correspondant à l'objet sera perçue (temps de détection) avec un décalage. De même, les objets olfactifs ont été placés dans des placards suffisamment éloignés pour que l'odeur associée à l'objet précédent ne vienne pas perturber la perception de l'odeur de l'objet actuellement en rotation devant le sujet.

4.3.4.1.4 Questionnaire A l'issue de la phase de présentation des objets, un questionnaire est donné à chaque sujet. Ce questionnaire contient une liste d'objets ainsi qu'un schéma de la cuisine (cf.annexe A.6). Sur ce schéma, chaque porte est numérotée (placards et réfrigérateur). Le sujet doit placer en face du nom de l'objet, le numéro de l'emplacement où il pense l'avoir vu dans la cuisine. Une fois ce questionnaire rempli, chaque sujet doit remplir le questionnaire relatif à la mémorisation et à la présence. Ce questionnaire est présenté en annexe A.6.

4.3.5 Résultats

Les résultats de cette expérimentation sont divisés en deux parties : dans un premier temps les aspects relatifs à la sensation de présence sont traités, dans un deuxième temps, les résultats concernant la mémorisation sont présentés.

4.3.5.1 Présence

Quatre questions concernent la sensation d'immersion et de présence. Pour chacune des questions, l'influence des odeurs a été étudiée. Les résultats sont présentés dans la table 4.8. Ils montrent qu'il n'existe aucune différence statistique significative en ce qui concerne les trois premières questions (Q1, Q2, Q3). Par contre, pour la dernière question (estimation sur une échelle de 1 à 100 de la sensation de présence), les résultats obtenus plaident largement en faveur de la condition sans odeurs. Ce résultat intéressant indique que la composante olfactive peut avoir, dans certains cas, une influence négative sur l'immersion et la sensation de présence. En particulier, quand aucun autre indice visuel ou sonore n'y contribue, ce qui est notre cas (pas de stéréo, pas de tracking de tête, pas de son spatialisé).

Question	Q1		Q2		Q3		Q estimation	
	G _{SO}	G _O						
Moyenne	3,71	3,36	3,57	2,86	5,5	4,43	54,29	36,79
écart-type	1,22	1,29	1,95	1,51	1,45	2,29	22,59	19,79

Table 4.8 – Moyennes et écarts-types des résultats relatifs aux questions sur la présence

4.3.5.2 Mémoire

Les résultats relatifs à la mémoire sont étudiés à partir des questionnaires.

Pour la question concernant l'emplacement des objets (cf. question I sur questionnaire A.6), un point est attribué par bonne réponse. Pour les questions II et III, un point par bon objet cité est attribué. Pour les questions IV à VII, un point par bonne réponse également.

Quatre configurations des emplacements des objets dans la cuisine ont été utilisées. La table 4.9 donne les moyennes des résultats des sujets selon chaque configuration. Les configurations différentes ont été réalisées pour éviter qu'un objet soit repéré plus facilement de par sa position dans la cuisine (par exemple, la farine dans le réfrigérateur). La table 4.9 montre que les résultats au niveau des quatre configurations sont similaires.

Indépendamment de la configuration de placement des objets dans les placards, les résultats concernant l'influence de la composante olfactive sur la capacité des sujets à mémoriser les

Configurations	C1	C2	C3	C4
Moyennes	13,56	12,06	12,5	12,83
Écart-types	4,84	5,23	5,21	2,8

Table 4.9 – Moyennes et écarts-types pour les quatre configurations

objets et leur emplacement ne sont pas significatifs. En effet, la moyenne des points obtenus par les sujets du groupe G_{SO} est de 12.8 (écart-type : 3.5), alors que la moyenne pour le groupe G_O est de 12 points (écart-type : 5.6). L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 4.10.

Dans ce tableau, **Total 1** correspond aux moyennes des points relatifs à la question sur l'emplacement des objets (question 1). **Total 2** correspond à la question 2 : objets des placards qui ne sont pas cités dans la question 1 (crème fraîche, farine, thé, lait, filtre, beurre, zaimo's). **Total 3** correspond à la question sur les objets de la cuisine en dehors des placards (question 3). Enfin, **Total 4** correspond aux questions 4, 5, 6 et 7.

				Anova	
		Moyenne	ET	F	P
Total1	Sans odeurs	3,93	2,37	6	0,03
	Avec odeurs	2,33	1,95		
Total2	Sans odeurs	3,4	1,72	0,02	0,89
	Avec odeurs	3,47	1,36		
Total3	Sans odeurs	3,93	2,19	0,01	0,94
	Avec odeurs	4	2,62		
Total4	Sans odeurs	2,03	0,67	0,4	0,54
	Avec odeurs	2,17	1,03		

Table 4.10 – Tableaux de résultats relatif à la mémoire

4.3.5.3 Question 1 : Emplacement des objets

Nous présentons dans cette partie, l'analyse des résultats concernant l'emplacement des objets dans les placards.

On observe dans la partie du tableau 4.10 correspondant à la question 1 qu'il existe une différence significative entre les scores obtenus par les groupes G_{SO} et G_O . L'analyse de la variance donne $F(1,29) = 6$; $p < 0.03$. La moyenne obtenue dans le groupe G_{SO} est de 3.93 points (écart-type 2.37), alors que celle obtenue par le groupe G_O est de 2.33 points (écart-type 1.95). Ce résultat montre que la présence d'odeurs, associées à certains objets (crème fraîche, farine, filtres et jus d'orange) a globalement perturbé la mémorisation des emplacements des objets par les sujets du groupe G_O .

Si l'on étudie les réponses des sujets pour chaque objet, indépendamment de leur groupe, on obtient le tableau 4.11.

Crème	Farine	Thé	Lait	Filtres	Beurre	Zanimó's	Jus d'orange
13	12	13	6	18	6	15	11
43,33%	40,00%	43,33%	20,00%	60,00%	20,00%	50,00%	36,67%

Table 4.11 – Nombre de sujets ayant mémorisé l'emplacement des objets listés

On remarque sur ce tableau que la mémorisation de l'emplacement des objets est très dépendante des objets en question. En effet, l'emplacement du lait et du beurre a été deux fois moins bien mémorisé que l'emplacement des autres objets. Ainsi, 18 sujets sur 30 ont retrouvé l'emplacement de la boîte de filtres à café. En ce qui concerne le nombre de sujets qui ont retrouvé l'emplacement de la crème fraîche (13), de la farine (12), du jus d'orange (11), du thé (13) et des Zanimó's (15), les résultats sont relativement proches.

Pour analyser plus en détail l'effet "objet" sur ces résultats, la table 4.12 donne les résultats par groupe.

	Crème	Farine	Thé	Lait	Filtres	Beurre	Zanimó's	Jus d'orange
$G_{V,SO}$	8 53,33%	6 40,00%	9 60,00%	5 33,33%	11 73,33%	4 26,67%	10 66,67%	6 40,00%
G_2	5 33,33%	6 40,00%	4 26,67%	1 6,67%	7 46,67%	2 13,33%	5 33,33%	5 33,33%

Table 4.12 – Nombre de sujets par groupe ayant mémorisé l'emplacement des objets listés.

En ce qui concerne le groupe G_O , la méthode ANOVA montre que l'effet "objet" peut être considéré comme significatif ($F(6,104) = 1,92$; $p < 0,09$). En ce qui concerne le groupe G_{SO} , une différence légèrement plus significative ($F(6,104) = 2,56$; $p < 0,02$) est mise en évidence. Ceci montre que l'effet "objet" est plus significatif que l'effet "odeur".

Les résultats du groupe G_O sont nettement inférieurs à ceux du groupe G_{SO} (7,4 points en moyenne pour les sujets du groupe G_{SO} ; 4,4 points en moyenne pour les sujets du groupe G_O). Ceci confirme les résultats présentés précédemment concernant les scores obtenus par les sujets. Ainsi, il semble que la présence d'odeurs ait eu un effet plutôt négatif sur la performance des sujets.

	Crème		Thé		Filtres		Zanimo's		Farine		Lait		Beurre		Jus d'orange	
	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
G _{SO}	0,53	0,52	0,60	0,51	0,73	0,46	0,67	0,49	0,40	0,51	0,33	0,49	0,27	0,46	0,40	0,51
G _O	0,33	0,49	0,27	0,46	0,47	0,52	0,33	0,49	0,40	0,51	0,07	0,26	0,13	0,35	0,33	0,49
ANOVA	F(1,29)	p<	F(1,29)	p<	F(1,29)	p<	F(1,29)	p<	F(1,29)	p<	F(1,29)	p<	F(1,29)	p<	F(1,29)	p<
	1,31	0,27	7	0,02	5,09	0,04	4,37	0,05	0	1	5,09	0,04	0,65	0,4	0,19	0,7

Table 4.13 – Résultats statistiques pour les huit objets

4.3.5.4 Résultats de la question 2 : objets situés dans les placards

Il s'agit de citer le plus d'objets situés dans les placards de la cuisine, sans les objets de la question précédente. Il était possible de citer la canette, le jambon, les corn-flakes, le pain de mie, les gâteaux fingers, les œufs, la pizza et le riz.

Les résultats apparaissent similaires pour les deux groupes au niveau de la deuxième question (total2 dans la table 4.10). Pour le groupe G_{SO}, la moyenne des objets trouvés est de 3,4 (51 objets au total) et pour le groupe G_O, de 3,47 (52 objets au total).

Si l'on compare les objets entre eux, on observe une différence significative ($F(7,239)=2.7$; $p<0.01$), particulièrement entre le jambon et les œufs ; le jambon et le riz ; les corn flakes et les œufs. Comme précédemment, l'effet "objet" prédomine sur l'effet "odeur".

Si l'on étudie les différences pour chaque objet, deux objets ressortent. Pour l'objet canette, les sujets ayant eu la configuration 1 ont tous cité cet objet contrairement aux trois autres configurations où trois sujets à chaque fois l'ont cité. Dans la première configuration, la canette est le premier objet à apparaître. Pour les trois autres configurations, la canette est placée dans les placards du milieu (placards 3, 6 et 5).

Au contraire pour le pain de mie, aucun sujet de la configuration 1 ne l'a cité (placard 5) alors que pour les trois autres configurations trois (C2) (réfrigérateur) ou quatre sujets (C3, C4) l'ont noté sur leur questionnaire (placards 6 et 4).

4.3.5.5 Résultats de la question 3 : objets en dehors des placards

La question 3 consiste à lister tous les objets dont les sujets se souviennent dans la cuisine (question ouverte). Rappelons qu'une odeur de cumin est diffusée au début et à la fin de l'expérimentation. Cette odeur est associée aux boîtes d'épices accrochées sur le mur du fond de la cuisine. La table 4.14 donne les résultats pour chaque objet.

Trois sujets seulement ont noté la présence des épices. Deux d'entre eux appartiennent au groupe G_O. Par contre, 23 sujets (13 du groupe 2 contre 10 du groupe G_{SO}) se sont souvenus de la présence des fleurs, objet généralement odorant.

	Total	G _{SO}	G _O
Crayons	1	0	1
Gobelets	1	0	1
Sopalin	1	1	0
Grille pain	2	0	2
Epices	3	1	2
Lampe	5	2	3
Poubelle	5	1	4
Téléphone	5	2	3
Ours	8	4	4
Cubes	9	4	5
Verres	10	7	3
Casseroles	14	7	7
TV	15	9	6
Chaussure	21	12	9
Fleur	23	10	13

Table 4.14 – Réponses des sujets à la question III, triées par groupe

4.3.5.6 Résultats des questions 4, 5, 6, et 7

Il s'agit pour les sujets de répondre à quatre questions concernant la couleur des placards, des fleurs, la marque des filtres et le parfum du thé. La table 4.15 donne les pourcentages de bonnes réponses pour chaque question.

	Total	G _{SO}		G _O	
Couleur des placards	90%	14	93%	13	87%
Couleur des fleurs	57%	7	47%	10	67%
Marque des filtres	13%	2	13%	2	13%
Parfum du thé	50%	7,5	50%	7,5	50%

Table 4.15 – Pourcentages de bonnes réponses aux questions 4,5 6 et 7

On remarque que le plus mauvais résultat concerne la marque du filtre pour les deux groupes, or c'est le seul objet odorant des quatre questions. La marque est écrite en petit sur le paquet et n'est pas connue de tout le monde, c'est peut-être pour cette raison que seulement cinq sujets ont bien répondu.

En ce qui concerne la couleur des placards et le parfum du thé, les résultats sont sensiblement

Chaussure	Placement aléatoire	Odeurs	Objets qui arrivent vers le sujet	TV	Autres	Rien
50%	36,67%	13,33%	13,33%	10%	10%	10%

Table 4.16 – Pourcentage des objets qui ont le plus marqué

Configuration	Chaussure	Placement aléatoire	Odeurs	Objets qui arrivent vers le sujet	TV	Autres	Rien
C1	62,5%	25%	12,5%	25%	12,50%	25%	12,5%
C2	50%	12,5%	0%	0%	25%	0%	25%
C3	62,5%	37,5%	12,5%	0%	0%	12,5%	0%
C4	16,67%	83,33%	0%	0%	0%	0%	0%

Table 4.17 – Résultats de la question subsidiaire par configuration

les mêmes.

La différence la plus notable est au niveau de la couleur des fleurs. Comme pour la question précédente, les sujets du groupe G_O (avec odeurs) ont de meilleurs résultats que ceux du groupe G_{SO} . L'analyse de la variance montre une tendance significative concernant la différence de résultats pour les fleurs entre les deux groupes ($F(1,29)=3,5$; $p<0.08$).

4.3.5.7 Résultats de la question subsidiaire : objets "marquants" dans l'expérience

Les sujets doivent indiquer ce qui les a le plus marqué lors de l'expérience. Les résultats sont présentés à la table 4.16. Il est possible de donner plusieurs réponses.

Il est intéressant de remarquer que 50% d'entre eux ont cité la chaussure. Seuls 13.33% des sujets du groupe G_O ont noté la présence de l'odeur.

La table 4.17, donne les pourcentages des réponses des sujets par configuration (C1, C2 C3 ou C4). Il est intéressant de voir que la chaussure a beaucoup perturbé les sujets des configurations 1 (62.5%), 2 (50%) et 3 (62.5%) mais beaucoup moins ceux de la configuration 4 (16.67%) qui semblent beaucoup plus dérangés par l'emplacement aléatoire des objets (83.33%).

4.3.5.8 Discussion

Au niveau de la présence, quelques questions ont été posées aux sujets mais étant donné que dans cette application les sujets sont passifs, le niveau de présence ne peut être très important. On observe ici des résultats légèrement meilleurs pour le groupe 1, c.-à-d. le groupe sans odeurs mais sans aucune différence significative.

D'un point de vue de la mémoire, pour la question sur les emplacements des objets dans

l'environnement, les résultats ont été largement meilleurs pour le groupe G_{SO} (3.93) que pour le groupe G_O (2.33). Il existe une différence statistique significative entre ces deux groupes selon ANOVA. Ceci montre que la présence d'odeurs a globalement perturbé les sujets du groupe G_O , dans la mémorisation de l'emplacement des objets. Cette perturbation peut être due à une focalisation mentale des sujets sur l'aspect "olfactif" de certains objets mettant au second plan l'emplacement de ces objets.

Pour la seconde question, qui concerne les objets présents dans les placards, les différences entre les objets sont plus importantes que les différences entre les groupes, l'effet "objet" prédomine sur l'effet "odeur".

Pour la troisième question, qui concerne les objets présents dans la cuisine, les épices n'ont pas été plus remarquées dans le groupe G_O que dans le groupe G_{SO} . Par contre, les résultats montrent que les fleurs ont été plus remarquées par les sujets du groupe G_O que par les sujets du groupe G_{SO} , or les fleurs peuvent facilement être associées aux odeurs par les sujets.

Pour les autres questions, il n'existe pas de différence importante, sauf pour les fleurs. Les sujets se sont mieux remémorés la couleur des fleurs lorsqu'ils appartenaient au groupe G_O , c.-à-d. le groupe avec odeurs. Cela confirme les résultats de Dinh et *al.* . Dans leur expérience, l'ajout de l'odeur de café avait aidé les sujets à remarquer et à enregistrer la présence d'une cafetière, ici la présence des fleurs a été mieux enregistrée pour les sujets du groupe G_O , même si l'odeur des fleurs n'était pas diffusée. L'expérience personnelle des sujets les a sans doute influencé pour faire un lien odeur-fleurs et donc enregistrer la présence et la couleur de ces fleurs.

La question subsidiaire fait également ressortir l'expérience personnelle des sujets : ils semblent plus choqués par les objets censés être rangés au frais dans les placards et inversement que par la présence d'odeurs (13% seulement l'ont noté dans leur questionnaire). L'effet "objet" précédemment cité est amplifié par leurs connaissances et habitudes personnelles.

4.4 Expérimentation 3 : Supermarché virtuel

La problématique à laquelle nous nous intéressons dans cette troisième expérimentation est liée à l'influence de la composante olfactive sur la mémorisation d'objets lors d'une tâche impliquant la locomotion. Afin d'évaluer l'effet de l'activité exploratoire des sujets, nous avons choisi de réutiliser les odeurs diffusées et les objets disposés dans la cuisine (passivité totale). Nous nous intéressons également à l'influence de la composante olfactive sur la sensation d'immersion et de présence dans un paradigme expérimental impliquant une interaction sensori-motrice fortement énergétique. Nous posons l'hypothèse que la locomotion active du sujet dans l'EV augmente la sensation de présence. Deux autres hypothèses sont formulées :

- Les objets odorisés sont mieux enregistrés par les sujets
- L'estimation du temps de parcours par les sujets ayant un retour olfactif sera inférieur au temps réellement passé

L'environnement virtuel que nous avons choisi d'utiliser dans cette expérimentation est un supermarché.

4.4.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est double :

- mettre en application notre méthodologie d'intégration de la composante olfactive
- évaluer l'influence de la composante olfactive sur la mémorisation d'objets et sur la sensation d'immersion et de présence dans le contexte d'une interaction sensori-motrice fortement énergétique.

4.4.2 Matériel

Cette expérimentation a été menée sur la plate-forme PREWISE décrite au paragraphe 4.2.2. La technique de navigation mise en oeuvre repose sur l'utilisation d'un mini-stepper (voir fig. 4.13). Ce système est muni de capteurs afin de pouvoir piloter, via l'utilisation des connecteurs, les clics d'une souris sans fil. Ainsi, un front descendant d'un des deux éléments mobiles du système correspond à un clic droit ou gauche de la souris.



Figure 4.13 – Interface de locomotion : mini-stepper

4.4.3 Environnement virtuel

Comme nous l'avons mentionné, l'environnement virtuel utilisé dans cette expérimentation est un supermarché dont une vue d'ensemble est présentée à la figure 4.14. Cet environnement est composé de trente-deux rayons et d'un espace commercial comprenant des articles de sport. L'entrée se fait par un tourniquet illustré sur la (figure 4.16). La sortie se fait par les caisses. Des personnages sont présents dans le magasin : quatre caissières et un agent de sécurité.

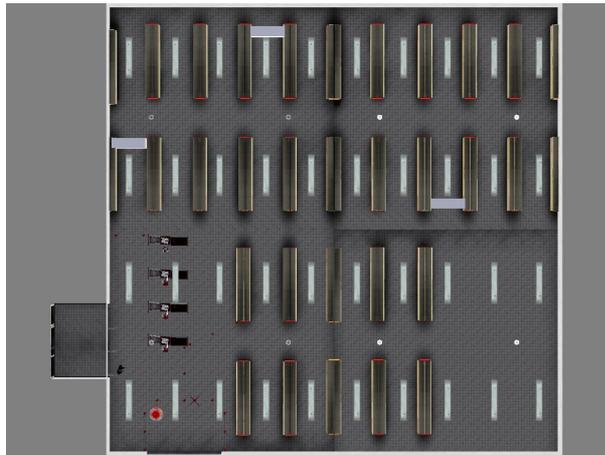


Figure 4.14 – Vue d'ensemble du supermarché

Les quatre rayons associés à des odeurs sont présentés à la figure 4.15. Les odeurs diffusées dans le magasin sont les mêmes que pour la cuisine (café, menthe poivrée, terre mouillée et orange). Elles sont associées aux mêmes objets à savoir :

- le café pour le rayon des filtres à café et café
- l'orange pour le rayon jus d'orange
- la menthe poivrée pour le rayon crème fraîche
- la terre mouillée pour le rayon farine et levure

Comme dans l'expérience précédente, la cohérence entre les articles et l'odeur qui leur est associée n'est respectée que pour les cas de l'orange et du café.

Quelques vues de l'environnement expérimental sont présentées à la figure 4.16.

4.4.4 Protocole

Sujets : 20 sujets volontaires, tous étudiants à l'ISTIA, ont participé à cette expérience. Ils ont été répartis en deux groupes (G_O et G_{SO}) et ont réalisé l'expérience comme suit:

- G_O avec les quatre odeurs

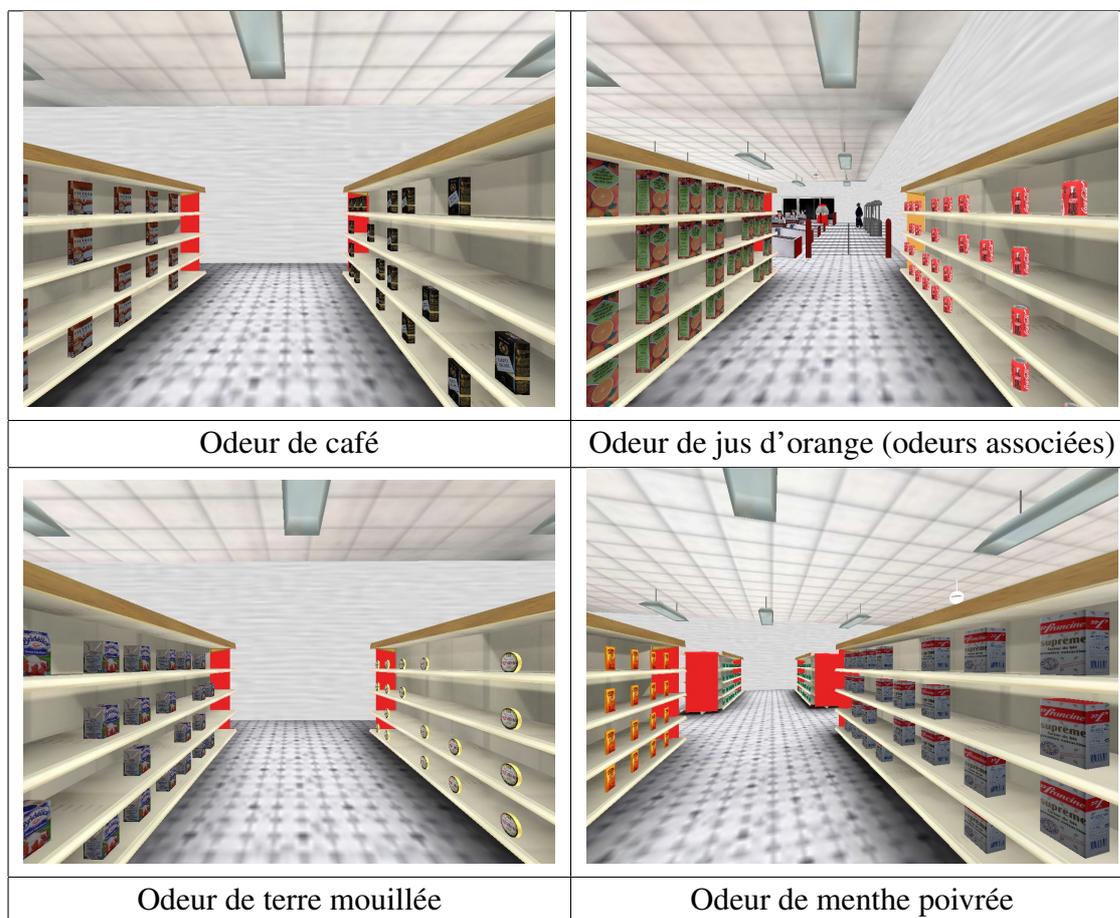


Figure 4.15 – Vues des rayons olfactorisés du supermarché

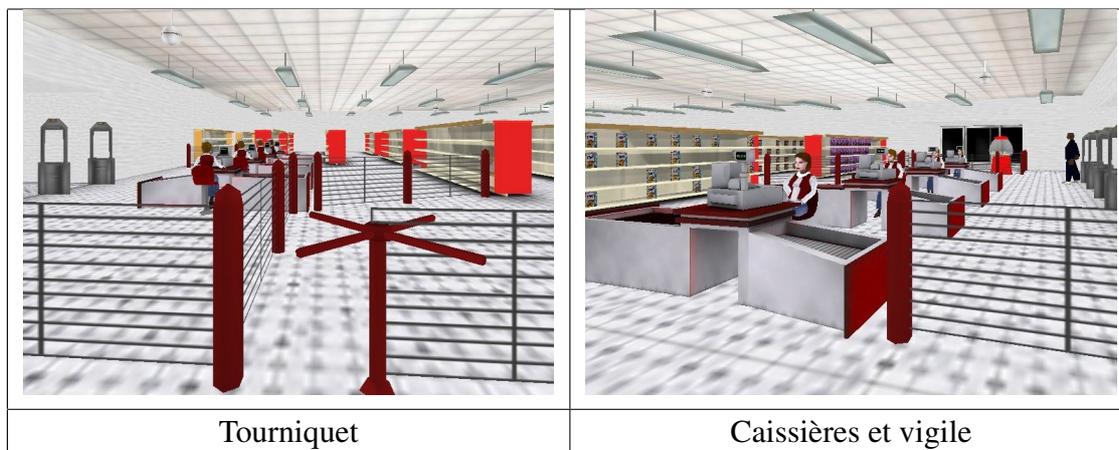


Figure 4.16 – Vues du supermarché

– G_{SO} sans odeur

Tâche La tâche consiste à effectuer un parcours prédéfini dans le supermarché et à mémoriser le plus d'informations possibles. La vitesse de déplacement dans l'environnement virtuel est proportionnelle à la fréquence d'activation du stepper par le sujet (fig. 4.13). Les sujets ont la possibilité de s'arrêter à tout moment. Une fois le sujet arrivé au centre de chaque rayon, une aide comportementale logicielle prend le contrôle de la simulation pour positionner le sujet en face du produit à mémoriser.

4.4.4.1 Déroulement de l'expérience

Le sujet se place sur le mini-stepper. Lorsque l'application est chargée, il commence à actionner le système pour se déplacer. Le trajet est prédéfini, c.-à-d. que le sujet ne s'occupe pas de choisir les rayons où il passe, il décide juste d'avancer ou de s'arrêter. Dans chaque rayon traversé, le point de vue est stoppé, et la caméra effectue une rotation de chaque côté, afin que le sujet visualise les produits du rayon. L'installation expérimentale est présentée à la figure 4.17.

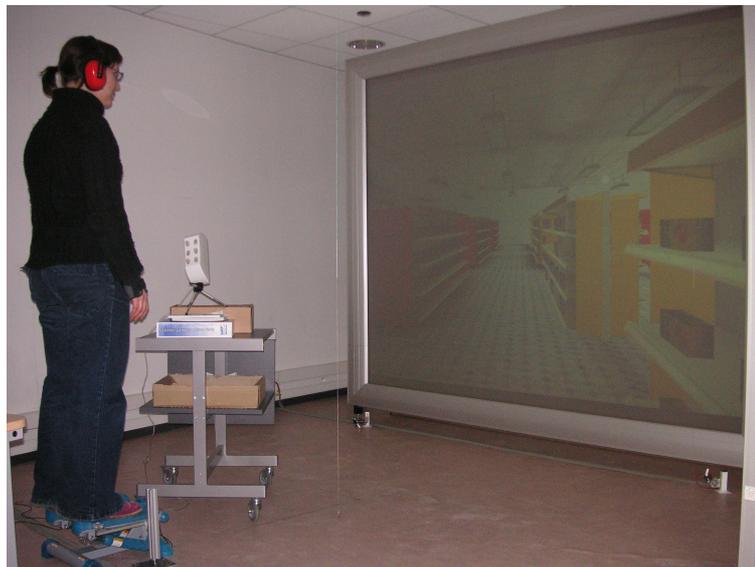


Figure 4.17 – Configuration expérimentale

4.4.5 Questionnaires

Les questionnaires portent sur la mémoire et la présence. Les questions concernant la présence sont les mêmes que pour les autres expériences, à savoir le questionnaire de Thierry

Morineau [101]. Le questionnaire est présenté en annexe A.7. Deux questions d'estimation sont ajoutées : l'une concerne la sensation de présence, l'autre le temps passé dans le monde virtuel.

4.4.6 Résultats

Les résultats sont divisés en deux parties. Dans un premier temps nous étudions les résultats concernant la sensation de présence puis dans un deuxième temps les résultats sur la mémorisation. L'analyse des données a été effectuée avec ANOVA.

4.4.6.1 Présence

L'étude de la présence se fait exclusivement sur les réponses aux questionnaires, c.-à-d. sur les cinq questions du questionnaire de Thierry Morineau [101] et sur les deux questions d'estimation.

Questionnaires Cinq questions composent ce questionnaire. Les deux premières questions concernent les actions dans l'environnement. Les trois autres questions concernent la sensation de présence.

Pour les questions 1, 3, 4 et 5, lorsqu'on analyse les résultats avec ANOVA, on obtient des $F < 1$, c.-à-d. qu'il n'existe aucune différence statistique.

Pour la question 2, on obtient $F(1,9) = 2.09$; $p < 0.18$. On observe donc une tendance qui n'est pour le moment pas statistiquement significative. La table 4.18 récapitule les moyennes pour chaque question par groupe. Les résultats en gras italique sont les meilleures moyennes par question.

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
G_O	4.1	3.5	4.5	4.9	5.15
G_{SO}	3.9	4.3	5	4.9	5.3

Table 4.18 – Moyennes des résultats aux questions de présence par rapport aux groupes

Lorsque l'on compare les résultats de ces questions à l'expérience antérieure en RV des sujets, on observe une similitude. La méthode ANOVA nous donne des résultats plus précis concernant cette donnée. Pour la première question par exemple, on obtient $F(1,10) = 7.86$; $p < 0.02$, soit une différence statistiquement significative. Pour les questions 4 et 5, on obtient également des $F > 1$, mais les p ne sont pas inférieurs à 5%. Dans tous les cas, on obtient des scores supérieurs pour les sujets ayant déjà une grande expérience en RV que ceux qui ont très peu d'expérience (voir tab. 4.19).

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Beaucoup d'expérience en RV	4.56	3.77	4.78	5.27	5.61
Peu d'expérience en RV	3.54	4	4.72	4.59	4.9

Table 4.19 – Moyennes des résultats aux questions de présence par rapport à l'expérience du sujet en RV

Il apparaît que les groupes ne sont pas homogènes quant à l'expérience des sujets en RV. En effet, huit sujets ont une grande expérience en réalité virtuelle et seulement deux d'entre eux appartiennent au groupe 2, soit le groupe avec odeurs. On remarque que la seule question où ANOVA montre une tendance concernant le retour olfactif sur la sensation du sujet, est la question 2, c.-à-d. la seule question où la moyenne des valeurs des sujets avec peu d'expérience en RV est supérieure à celle dont l'expérience est grande.

Questions d'estimation La première question d'estimation concerne la sensation de présence du sujet dans l'EV. Les résultats sont équivalents entre les deux groupes. La moyenne pour le groupe G_{SO} est de 60.89 et pour le groupe G_O (avec odeurs), de 67.5, soit supérieure, mais ANOVA ne nous donne pas de différence significative.

Au niveau des différences d'expérience en RV, indépendamment des odeurs, le groupe qui a eu très peu d'expérience a une moyenne de 57, le groupe avec beaucoup d'expérience a une moyenne de 66.5, soit supérieure à l'autre groupe mais sans différence statistique significative.

La seconde question d'estimation concerne le temps que dure l'immersion dans le supermarché. Il était demandé aux sujets d'estimer le temps qu'ils avaient eu l'impression de passer dans l'EV. Une comparaison est ensuite effectuée avec le temps réel.

Les résultats ne montrent pas de différences notables entre les deux groupes de sujets au niveau des estimations supérieures ou inférieures (voir table 4.20).

	Estimation supérieure au temps réel	Estimation inférieure au temps réel	Estimation identique
G_{SO}	3	6	1
G_O	4	6	0

Table 4.20 – Répartition des sujets par estimation de temps

Par contre, lorsque l'on regarde la table 4.21 qui présente la répartition des sujets par temps d'écart avec le temps réel, on peut voir qu'un plus grand nombre de sujets appartenant au groupe G_O ont une estimation proche du temps réel.

	Estimation exacte	Écart d'une min	Écart de deux min	Écart de trois min	Écart de quatre min	Écart supérieur à quatre min
G_{SO}	1	1	3	2	1	2
G_O	0	5	2	1	1	1

Table 4.21 – Répartition des sujets par écart d'estimation de temps

4.4.6.2 Mémoire

Les questions concernant la mémoire sont de différents types. La première question propose les réponses, le sujet doit entourer les objets qu'il pense avoir vus dans l'EV. Les quatre questions suivantes demandent un produit en réponse. Les questions 6 et 7 demandent des réponses ouvertes c.-à-d. le sujet doit donner toutes les informations dont il se souvient, il n'est pas guidé.

Question 1 La question 1 concerne les objets que les sujets ont vus dans le supermarché. Trois objets sont placés dans des rayons traversés par la caméra, trois objets sont dans des rayons visibles de loin et quatre objets ne sont pas présents dans le supermarché.

Peu de sujets (quatre sur vingt) ont su voir au moins un des objets qui n'était pas dans les rayons traversés (pain de mie, crayons ou sucre).

Très peu de sujets ont fait une erreur : un sujet a mis le beurre, deux sujets ont mis la radio.

La table 4.22 donne le nombre de sujets qui ont bien entouré les objets. Les objets issus des rayons traversés par le sujet sont en gras.

Objets	Nombre de sujets ayant entouré l'objet
TV	18
Pain de Mie	1
Sucre	1
Crayons	2
Cubes	8
Jeu locomotive	16

Table 4.22 – Récapitulatif des objets et du nombre de sujets avec réponse juste

Si l'on compare les résultats entre les deux groupes, on obtient pour le groupe G_{SO} , une moyenne de 0.37 et pour le groupe G_O , une moyenne de 0.45, soit une meilleure moyenne pour le groupe avec odeurs. ANOVA nous donne $F(1,59) = 1.95$; $p < 0.16$ soit une tendance pour le moment. Le nombre de sujets pourrait être augmenté pour que la tendance soit confirmée.

Si par contre, on compare les résultats des sujets, indifféremment des groupes, on obtient pour les trois objets les plus entourés, $F(2,38) = 10.23$; $p < 3.10^{-4}$ soit une forte tendance, statistiquement significative. Les différences entre les objets sont plus importantes que les différences entre les groupes : aucun objet dans cette première question n'était placé dans un rayon olfactorisé.

Questions 2 à 5 Il s'agissait pour le sujet de donner le nom du produit qui se situait en face du produit proposé. La crème fraîche et le coca se trouvaient dans des rayons olfactorisés. Les réponses étaient le camembert (odeur différente : menthe poivrée) et le jus d'orange (même odeur : jus d'orange).

Le nombre de sujets ayant donné les bonnes réponses est présenté à la table 4.23.

Questions	G_{SO}	G_O	Total
Question 2	2	2	4
Question 3	5	5	10
Question 4	2	2	4
Question 5	2	1	3

Table 4.23 – Nombre de sujets ayant donné les bonnes réponses aux questions 2, 3, 4 et 5

A première vue, les résultats concernant le jus d'orange, c.-à-d. le seul objet ayant une odeur associée, sont les meilleurs. Or, si on regarde les résultats des groupes, on obtient le même score pour les deux. De la même façon, pour les trois autres objets, les scores sont identiques selon que les sujets appartiennent au groupe G_{SO} ou au groupe G_O .

Question 6 La question VI est une question à réponse ouverte. Il s'agissait pour les sujets de citer le plus de produits du supermarché dont ils se souvenaient. Les résultats sont compilés à la table 4.24. Les noms des objets ont été regroupés. Les objets étant placés dans des rayons olfactorisés sont en gras.

On remarque que les objets issus des rayons olfactorisés sont plutôt vers les plus hauts scores de remémoration. Si on utilise ANOVA sur tous les résultats, on n'obtient aucune tendance. Par contre, si on effectue ANOVA seulement sur les objets issus des rayons olfactorisés, on obtient $F(1,5) = 1.6$; $p < 0.2$, soit une légère tendance.

Les sujets n'ont pas tous donné comme réponse du thé par exemple, ils ont parfois précisé la couleur de la boîte, le parfum, la marque, etc. L'étude suivante reprend les mêmes objets mais en comptabilisant les détails que chaque sujet a pu donner.

Les moyennes obtenues sont compilées à la table 4.25.

Objets	Nombre de sujets l'ayant cité
Triangles colorés	1
Objets jaune bleu	1
Mannequins	1
TV 2	2
Maillot de bain	2
Vélo d'appartement	3
Tours de Hanoi	3
Lampes	3
Chaussures	3
Gâteaux chocolat	4
Purée	4
Levure	4
Thé 2	6
Jouets	6
Céréales 2	7
TV 1	7
Filtres	9
Farine	9
Fromage	10
Jus de fruit	11
Thé 1	15
Café	15
Céréales 1	17

Table 4.24 – Réponses compilées aux question 2, 3, 4 et 5

	Moyenne	Moyenne G_{SO}	Moyenne G_O
Objets jaune bleu	0,05	0	0,1
Mannequins	0,05	0	0,1
Triangles colorés	0,05	0,1	0
Maillot de bain	0,1	0,1	0,1
Vélo d'appartement	0,15	0,2	0,1
Chaussures	0,15	0,1	0,2
Tours de Hanoi	0,15	0,3	0
Lampes	0,15	0,2	0,1
Levure	0,2	0,1	0,3
Purée	0,25	0,4	0,1
Gâteaux choc	0,35	0,4	0,3
Thé 2	0,35	0,5	0,2
Farine	0,45	0,2	0,7
Filtres	0,45	0,6	0,3
Céréales 2	0,5	0,8	0,2
TV 2	0,6	0,8	0,4
Fromage	0,85	0,7	1
Café	0,9	0,8	1
Jus de fruit	1	0,9	1,1
Jouets	1,05	1,2	0,9
Thé 1	1,1	1,5	0,7
Céréales 1	1,2	1,3	1,1

Table 4.25 – Moyennes par objet et par groupe pour la question VI avec la quantification des détails

Si on effectue ANOVA sur tous les objets, on obtient $F(1,21) = 2.36$; $p < 0.13$ soit une légère tendance, avec les résultats du groupe G_{SO} (Moy : 0.51) supérieurs à ceux du groupe G_O (Moy : 0.41). Pour les objets issus des rayons olfactorisés, on obtient $F(1,5) = 2.89$; $p < 0.15$ soit une légère tendance également, non statistiquement significative. Dans ce cas, la moyenne du groupe G_{SO} (Moy : 0.55) est nettement inférieure à la moyenne du groupe G_O (Moy : 0.73).

Question 7 La question 7 est également une question à réponse ouverte. Il s'agissait pour le sujet d'énumérer tous les détails du supermarché dont il se souvenait, en dehors des produits.

Les résultats sont compilés à la table 4.26.

	Moy	G_{SO}	G_O
Salle de gymnastique	0,05	0	0,1
Lampes néon	0,05	0,1	0
Plafond bas avec plaques blanches	0,05	0,1	0
Murs blancs/gris	0,05	0	0,1
Quatre étages par rayon	0,05	0,1	0
Parcours linéaire puis détour	0,05	0	0,1
Couleur marron beige du supermarché	0,1	0	0,2
Rayons rouge/jaune	0,1	0,2	0
Etagères pas complètes	0,1	0,2	0
Tourniquet	0,1	0,1	0,1
rayon(s) vide(s)	0,3	0,4	0,2
Personnes au fond	0,35	0,4	0,3
Vigile	0,65	0,8	0,5
Caissières	0,75	0,6	0,9

Table 4.26 – Moyennes par objet et par groupe pour la question VII

Aucune différence significative entre les deux groupes n'est à noter.

De la même manière que pour la question précédente, la table 4.27 prend en compte le nombre de détails supplémentaires donnés par les sujets pour chaque objet.

Sur ce deuxième tableau, ANOVA nous donne $F(1,13) = 3.55$; $p < 0.08$ soit une tendance quasi statistiquement significative mais qui indique les meilleures performances des sujets du groupe G_{SO} (Moy : 0.26) par rapport à ceux du groupe G_O (Moy : 0.18).

	Moy	G _{SO}	G _O
Salle de gymnastique	0,05	0	0,1
Lampes néons	0,05	0,1	0
Plafond bas avec plaques blanches	0,05	0,1	0
Murs blancs/gris	0,05	0	0,1
Parcours linéaire puis détour	0,05	0	0,1
Quatre étages par rayon	0,05	0,1	0
Couleur marron beige du supermarché	0,1	0	0,2
Rayons rouge/jaune	0,1	0,2	0
Etagères pas complètes	0,1	0,2	0
Tourniquet	0,15	0,2	0,1
Vigile	0,2	0,4	0
rayon(s) vide(s)	0,3	0,4	0,2
Personnes au fond	0,75	0,9	0,6
Caissières	1,1	1,1	1,1

Table 4.27 – Moyennes par objet et par groupe pour la question VII avec la quantification des détails

4.4.6.3 Discussion

Les résultats de cette expérience ont été divisés en deux parties. La première concerne les résultats sur la sensation de présence des sujets. L'analyse montre que sur toutes les questions posées aux sujets, une seule fait apparaître une différence entre les deux groupes G_{SO} et G_O. Une étude sur l'expérience en RV des sujets montre la grande différence entre les groupes. En effet, dans le groupe G_{SO}, sans odeur, six sujets sur dix ont une grande expérience en RV et seulement deux sur dix dans le groupe G_O. L'étude montre que cette iniquité entre les groupes influe sur les résultats, l'étude de la présence étant seulement étudiée par rapport aux réponses subjectives des sujets.

Dans la deuxième partie, qui concerne la mémoire, les résultats sont partagés. Concernant la question I dans laquelle n'intervenaient pas d'objets odorants, les sujets du groupe G_O ont de meilleurs résultats que ceux du groupe G_{SO}. Pour les questions VI et VII, les résultats sont meilleurs pour le groupe G_{SO} si on prend tous les objets, mais inférieurs si l'on ne prend que les objets issus de rayons olfactorisés. ANOVA montre à chaque fois une tendance mais qui n'est pour le moment pas statistiquement significative. Aggrandir les échantillons de sujets pourrait améliorer les résultats.

Conclusion

Ce chapitre a permis de développer le déroulement de trois expérimentations qui intègrent le retour olfactif. Les résultats de chaque expérience ont été étudiés par rapport à deux données : la mémoire et la présence.

La première expérience avait pour objectif d'étudier si les objets odorisés dans le monde virtuel étaient plus facilement enregistrés par les sujets que les autres. Dans l'expérience de Dinh et *al.* [44], les sujets ayant les odeurs dans l'expérience ont plus facilement enregistré la présence d'une cafetière dans une pièce. Notre expérience reprend le même principe mais ce ne sont pas des objets qui sont olfactorisés mais des lieux ou des actions. L'environnement virtuel est une ville virtuelle qui contient quatre lieux olfactorisés. Certains sujets se sont déplacés dans l'environnement virtuel avec un volant, d'autres avec une souris. Les résultats ont montré que dans les deux cas, pour la présence et pour la mémoire, les sujets ont obtenu de meilleurs scores lorsqu'ils avaient le retour olfactif. Le meilleur groupe est celui qui avait le retour olfactif mais pas de volant.

La deuxième expérience se déroulait dans une cuisine virtuelle. Le sujet était passif. L'objectif était, ici, la mémorisation d'objets et d'emplacements d'objets. Il y avait des objets dans les placards de la cuisine virtuelle et d'autres, qui pouvaient ne pas avoir de lien avec une cuisine, étaient placés en dehors. Concernant la présence, aucun résultat n'a été concluant. Pour la mémoire, les résultats sont divisés. Au niveau de la remémoration des emplacements, le groupe sans odeurs a été largement meilleur. Au niveau des autres questions, il ne se dégage aucune tendance, même si les résultats du groupe avec odeurs sont sensiblement supérieurs à ceux du groupe sans odeurs. Par contre, cette expérience confirme les résultats de Dinh et *al.* . Il y a eu plus de sujets du groupe avec odeurs qui ont été capables d'enregistrer la présence et la couleur des fleurs de la cuisine, même si aucune odeur de fleur n'était diffusée.

La troisième expérience avait pour objectif la mémorisation d'objets mais avec un déplacement actif du sujet, comme dans la première expérience. La sensation de présence a également été étudiée. L'EV était un supermarché dans lequel les sujets se déplaçaient à l'aide d'une interface composée d'un mini-stepper et de capteurs de souris. Les résultats ont montré que les groupes n'étaient pas homogènes au niveau de l'expérience antérieure du sujet en réalité virtuelle ce qui a influé sur les réponses des sujets dans le questionnaire. Au niveau de la mémoire, les résultats ont été souvent meilleurs pour le groupe avec odeurs, mais il n'y a pas de différences statistiquement significatives, seulement des tendances. Un plus grand nombre de sujets pourrait confirmer ces tendances.

Au niveau de la présence, bien que la première expérimentation ait montré que les résultats étaient largement meilleurs pour les groupes avec retour olfactif, il n'est pas possible d'affirmer

catégoriquement que dans tous les environnements ce sera le cas. La présence étant une donnée purement subjective ici, il est important de bien homogénéiser les groupes étudiés.

Au niveau de la mémoire, il existe différents aspects. L'ajout du retour olfactif dans un lieu virtuel bien précis permet de faire remarquer ce lieu et de l'enregistrer, surtout si les odeurs sont associées à ce lieu. Concernant la mémorisation d'objets, le retour olfactif paraît moins déterminant que le choix des objets. Néanmoins, il peut permettre d'insister sur un objet particulier.

Conclusion et perspectives

Dans ce mémoire, nous avons contribué à l'intégration du retour olfactif en environnement virtuel. Nous avons, dans un premier temps, situé le sens olfactif dans son contexte historique et présenté les différentes utilisations des odeurs au cours du temps, de la préhistoire à aujourd'hui. Ensuite, le système olfactif humain a été présenté ainsi que des considérations sur la perception olfactive en termes d'intensité, qualité et hédonisme. Les nombreux facteurs influençant cette perception ont été abordés afin de répondre aux questionnements psychophysiques que l'on peut se poser avant l'intégration du retour olfactif.

La deuxième partie de ce travail est consacrée à la réalité virtuelle. Après un bref historique, nous avons présenté les outils existants, que ce soient les interfaces utilisateur ou les techniques d'interaction. Ce contexte se voit réduit, dans la deuxième partie de ce chapitre, par le sujet de l'olfaction en réalité virtuelle. Un état de l'art relativement exhaustif sur les applications olfactives de la RV dans tous les domaines est présenté. Les caractéristiques générales des différents dispositifs odorants existants sont décrits dans ce chapitre également. Nous avons présenté le travail de deux précurseurs dans le domaine de l'intégration des odeurs dans les environnements virtuels, W. Barfield et E. Danas [10].

La troisième partie de ce document consiste en une proposition de taxonomie des diffuseurs. Elle est basée sur les travaux précédents de D. A. Bowman *et al.* [22] et L. Arns *et al.* [7], notamment pour les taxonomies de choix de diffuseur par rapport aux interactions dynamiques. Ce modèle s'avère être analogue à une classification haptique, qui est également présentée dans ce chapitre.

La nécessité de caractériser les diffuseurs nous a conduit à débiter une série d'expériences destinées à définir les paramètres influençables lors d'une application. Nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la caractérisation du diffuseur, en analogie avec la caractérisation d'une antenne. Malheureusement, le signal olfactif étant très facilement perturbé par les variations de l'air ambiant, les résultats n'ont pu donner une représentation graphique de l'évolution de l'odeur dans l'espace. L'expérience suivante s'intéressait aux capacités humaines concernant la localisation d'odeur. Il s'est avéré que dans nos conditions d'expérimentation, les sujets étaient la plupart du temps incapables de désigner d'où venait l'odeur. Les deux dernières

expériences étudiaient les temps de saturation et de persistance des sujets ce qui a permis de montrer que si les temps dépendaient du sujet, ils dépendaient également des odeurs choisies.

Ce chapitre se conclut par une application concrète de la taxonomie du choix du diffuseur pour l'intégration d'un système olfactif sur la plate-forme PREWISE. L'utilisation des expérimentations présentées a permis une caractérisation du diffuseur choisi, le M@d d'Osmooze, pour les expériences applicatives présentées au chapitre suivant.

Le dernier chapitre a permis dans le cadre de trois expérimentations d'évaluer l'influence du retour olfactif sur la performance et le comportement de sujets sains. Les critères d'évaluation retenus étaient la sensation de présence et la mémorisation d'objets ou d'événements. Les expériences, présentées dans ce chapitre, ont permis de montrer qu'au niveau de la présence, le retour olfactif pouvait l'améliorer (expérience 1 surtout). Au niveau de la mémoire, les résultats peuvent être classés en deux catégories : la mémoire concernant les objets et la mémoire concernant des événement ou actions. Concernant la première, le retour olfactif paraît moins déterminant que le choix des objets et est plus facilement assimilable lorsque l'odeur associée à l'objet lui correspond. Au niveau des événements ou actions, la première expérience a montré que le retour olfactif aidait à la mémorisation. .

Peu de travaux se sont intéressés à l'intégration du retour olfactif dans les environnements virtuels. Plusieurs raisons peuvent être sans conteste évoquées. Le problème majeur est lié au codage de l'information olfactive, un autre inconvénient est que la dispersion de l'odeur se fait de façon plus ou moins contrôlée dans un périmètre de taille variable et ne se dissipe pas facilement. Enfin, le caractère subjectif, comme dans le monde réel, de la perception olfactive en terme d'intensité, de qualité et d'hédonisme, est un facteur limitant aux développements des applications de RV olfactives .

Il existe encore de nombreux points à étudier pour une intégration optimale du retour olfactif en environnement virtuel mais il est déjà possible de diffuser aisément une odeur dans un monde virtuel, une odeur de fond ou encore une odeur ponctuelle prédéfinie.

Nous nous sommes plus spécifiquement intéressés, dans ce travail, à proposer une taxonomie pour le choix du diffuseur, en nous basant sur une analyse des caractéristiques de dispositifs odorants disponibles (commercialisés ou prototypes) et en fonction des techniques d'interaction, des interfaces visuelles. Il serait très intéressant de prolonger cette analyse en fonction des autres périphériques existants, en particulier les interfaces haptiques. L'analogie de classifica-

tion qui existe entre les deux types d'interfaces (olfactives et haptiques) peut en effet être très utile pour l'intégration dans une application.

Les expérimentations du chapitre 4 ont contribué à une validation partielle de la taxonomie proposée. Des expériences similaires sur notre plate-forme PREWISE utilisant d'autres techniques d'interaction et d'autres types de diffuseur seraient nécessaires pour compléter cette étude. L'investigation d'ODs permettant d'envoyer les odeurs directement au nez de l'utilisateur permettrait d'envisager d'autres types de scénarios que ceux proposant des parcours prédéfinis par exemple. Il serait intéressant d'étudier la diffusion d'une odeur d'un objet mobile, qui se déplace dans l'environnement, ou d'un sujet mobile qui se déplace dans le monde réel.

D'autre part, les potentialités offertes par la RV pour l'étude et la rééducation des fonctions cognitives et/ou des troubles du comportement n'ont été reconnues que plus récemment. Ces dernières années, un nombre croissant de travaux a vu le jour, consacrés à différents processus cognitifs (attention, mémoire, fonctions exécutives, traitement spatial) ou à des scénarii fonctionnels relatifs aux activités de vie quotidienne (faire la cuisine, etc.) [119].

Bibliographie

- [1] Guidelines for unimodal symbols : Olfaction. ETSI EG 202 048, version 1.1.1, section 5.1.4, European Telecommunications Standard Institute, 2002.
- [2] Un flair unique. *Sciences et Avenir*, page 27, juillet 2003.
- [3] 5dt Glove. Site du 5dt glove. <http://www.5dt.com/products/pdataglove5u.html>.
- [4] Aerome. Site d'aerome. <http://www.aerome.com/>.
- [5] J.P. Aggleton and L. Waskett. The ability of odours to serve as state-dependent cues for real-world memories : Can viking smells aid the recall of viking experiences? *British Journal of Psychology*, 90(1):1–7, Février 1999.
- [6] Anthrotronix. Site du projet "anthrotronix". <http://www.anthrotronix.com>.
- [7] L. Arns and C. Cruz-Neira. A new taxonomy for locomotion in virtual environments. *Proceedings of 4th Virtual Reality International Conference, Laval, France*, pages 141–149, 2002.
- [8] AromaJet. Site de aromajet. <http://www.aromajet.com>.
- [9] J. Van Baren and W. Ijsselsteijn. Compendium of presence measures. IST FET OM-NIPRES project Eindhoven University of Technology, 2004-2005.
- [10] W. Barfield and E. Danas. Comments on the use of olfactory displays for virtual environments. *Presence*, 5(1):109–121, 1996.
- [11] M. Bensafi, C. Rouby, V. Farget, B. Bertrand, M. Vigouroux, and A. Holley. Influence of affective and cognitive judgments on autonomic parameters during inhalation of pleasant and unpleasant odors in humans. *Neuroscience letters*, 319(3):162–166, Février 2002.
- [12] J. Beros. Les odeurs de la colère. <http://www2.cnrs.fr/presse/journal/837.htm>, 2003.
- [13] B. Bideau, L. Fradet, F. Multon, S. Ménardais, R. Kulpa, and B. Arnaldi. Validation d'un processus de traitement allant de la capture du mouvement à l'immersion de sujets en réalité virtuelle : application au tir au handball. *Revue Internationale de CFAO*, 2004.
- [14] G. Von Békésy. Olfactory analog to directional hearing. *J. of Applied Physiology*, 19:369–373, 1964.
- [15] G. Bloch. Economie : Firmenich finance une étude genevoise pour déceler nos émotions face aux odeurs. *Le Temps*, Octobre 2006.

- [16] M. T. Bolas. Human factors in the design of an immersive display. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 14(1):55–57, 1994.
- [17] K. Bonsor. How internet odors will work. 2001. Available at <http://www.howstuffworks.com/internet-odor.htm>.
- [18] L. Bouguila, F. Evequoz, M. Courant, B. Hirsbrunner, and P. Richard. Active locomotion interface for virtual environments. In *Proc. 14th Int. Conf. on Artificial Reality and Tele-Existence*, November 2004. Coex, Korea.
- [19] M. Bouzit, V. Popescu, G. Burdea, and R. Boian. The rutgers master ii-nd force feedback glove. In *Proc. IEEE Virtual Reality Conf.*, 2002. (VRC'02) Haptics Symposium.
- [20] D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola Jr., and I. Poupyrev. *3D User Interfaces : Theory and Practice*, chapter Travel, pages 183–226. Addison-Wesley, 2004.
- [21] D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola Jr., and I. Poupyrev. *3D User Interfaces: Theory and Practice*, chapter 3D User Interface Output Hardware, pages 27–86. Addison-Wesley, 2004.
- [22] D.A. Bowman, E. Kruijff, Jr J. J. LaViola, and I. Poupyrev. *3D User Interfaces : Theory and Practice*. Addison-Wesley, 2004.
- [23] G. Brand. *L'olfaction : de la molécule au comportement*. édition Solal, 2001.
- [24] S. Bryson and C. Levit. The virtual wind tunnel. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 12(4):25–34, 1992.
- [25] L. Buck and R. Axel. A novel multigene family may encode odorant receptors : a molecular basis for odor recognition. *Cell*, 65(1):175–187, 1991.
- [26] Budman. Aroma sensory stimulation in multimedia. Brevet américain US 6 338 818, Janvier 2002. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [27] Mc Carthy. Scent-emitting systems. Brevet américain US 4,603,030, Juillet 1986. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [28] J. P. Cater. Approximating the senses. smell/taste: Odors in virtual reality. *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics*, 2:1781, 1994.
- [29] Challenge.fr. La vanille comme thérapie pour les prématurés. http://challengestempsreel.nouvelobs.com/france/arti_17031_8743.html, Janvier 2006.
- [30] D. Chen and J. Haviland-Jones. Rapid mood change and human odors. *Physiology & Behavior*, 68(1-2):241–250, Décembre 1999.
- [31] S. Chu and J.J. Downes. Odour-evoked autobiographical memories: Psychological investigations of proustian phenomena. *Chem. Senses*, 25(1):111–116, 2000.

- [32] S. Chu and J.J. Downes. Proust nose best: Odors are better cues of autobiographical memory. *Memory & Cognition*, 30:511–518(8), 2002.
- [33] Clarté. Site de clarté. <http://www.clarte.asso.fr/index.php?info=immersif>.
- [34] 3D Connexion. site de 3d connexion. <http://www.3dconnexion.fr/>.
- [35] S. Coquillart and G. Wesche. The virtual palette and the virtual remote control panel: A device and an interaction paradigm for the responsive workbench (tm). In *VR '99: Proceedings of the IEEE Virtual Reality*, page 213, Washington, DC, USA, 1999. IEEE Computer Society.
- [36] G. Costa. Lorsque le nez fait défaut. Available at http://www.hugge.ch/_library/pdf/Actualite_sante/pulsations_sept_2005.pdf, Septembre 2005.
- [37] C. Cruz-Neira, D. Sandin, and T. F. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality : The design and implementation of the cave. In *Proc. SIGGRAPH*, pages 135–142, 1993.
- [38] DaleAir. Site de daleair. <http://www.daleair.com/>.
- [39] B. Daucé. Marketing sensoriel, marketing olfactif et actus internet. <http://www.mercadoc.org/index.php/toc>, 2004-2006.
- [40] F. Davide, M. Holmberg, and I. Lundström. *Virtual olfactory interfaces : electronic noses and olfactory displays*, chapter 12, pages 193–219. 2001.
- [41] J. Degel and E.P. Köster. Odors: Implicit memory and performance effects. *Chem. Senses*, 24(3):317–325, 1999.
- [42] Société Français des Parfumeurs. La classification. <http://parfumeur-createur.com/>.
- [43] V. G. Dethier. Chemosensory physiology in an age of transition. *Annu. Rev. Neurosci.Act.*, 13:1–13, 1990.
- [44] H. Q. Dinh, N. Walker, C. Song, A. Kobayashi, and L. F. Hodges. Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments. *Proc. IEEE Virtual Reality Conf.*, pages 222–228, 1999.
- [45] H. Distel and R. Hudson. Judgement of odor intensity is influenced by subjects' knowledge of the odor source. *Chem. Senses*, 26(3):247–251, 2001.
- [46] EADS. Un limier électronique pour flairer les bombes. <http://www.eads.com/web/lang/fr/1024/content/OF00000000400005/9/81/41143819.html>, Décembre 2005.
- [47] J. F. Morie et al. Sensory design for virtual environments. *SIGGRAPH 2003*, July 2003.

- [48] Machida et al. Method for supplying aromas, apparatus therefore and facilities provided with same. Brevet américain US 5 023 020, Juin 1991. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [49] Tokuhiko et al. Method of supplying scents to a room of a motor vehicle. Brevet américain US 5 071 621, Décembre 1991. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [50] B.G. Witmer et M.J. Singer. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence*, 7(3):225–240, 1998.
- [51] Exhalia. "nice-smelling interactive multimedia alphabet" project homepage. Available at : <http://www.exhalia.com/>.
- [52] Exhalia. Site d'exhalia. <http://www.exhalia.com/>.
- [53] Jr. F. P. Brooks, M. Ouh-Young, J. J. Batter, and P. J. Kilpatrick. Project grope - haptic displays for scientific visualization. In *SIGGRAPH '90: Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 177–185. ACM Press, 1990.
- [54] FAA Human Factors. Olfactory displays. Available at http://www.hf.faa.gov/Webtraining/NonVisDisplays/n08_Olfactory.htm.
- [55] P. Faure. *Parfums et aromates de l'Antiquité*. Fayard, 1987.
- [56] S. S. Fisher, M. McGreevy, J. Humphries, and W. Robinett. Virtual environment display system. In *SI3D '86: Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics*, pages 77–87. ACM Press, 1987.
- [57] B. Fox. Invention: Soldiers obeying odours. http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn8282&feedId=online-news_rss20, 2005.
- [58] P. Fuchs, a. Berthoz, and J.-L. Vercher. *Traité de la réalité virtuelle, Tome I*, chapter 1. Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [59] P. Fuchs, M. Hafez, M. Benali Koudja, N. Tsingos, and O. Warusfel. *Traité de la réalité virtuelle, Tome I*, chapter 3. Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [60] P. Fuchs, G. Moreau, and J. P. Papin. *Le Traité de la Réalité Virtuelle*. Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines, 2001.
- [61] P. Fuchs, J. P. Papin, P. Richard, and A. Tijou. *Les interfaces olfactives*, volume 2 : L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel, chapter IV-11. Presse de l'Ecole des Mines, 2006.
- [62] T. A. Furness, R. E. Fischer, P. K. Purdy, and H. Beech. Display system for a head mounted viewing transparency. Brevet américain US 5, 162,828, 1992. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.

- [63] A.N. Gilbert and C.J. Wysocki. The smell survey results. *National Geographic*, 122:514–525, 1987.
- [64] N. Godinot. Perception et catégorisation des odeurs par l’homme. Master’s thesis, Université Claude Bernard Lyon I, 1994.
- [65] Gottfried and Dolan. The nose smells what the eye sees: Crossmodal visual facilitation of human olfactory perception. *Neuron*, 39(2):375–386, 2003.
- [66] S. Guerrand. Vers un marketing olfactif ? <http://recherche.sncf.com/dossiers/confort/pdv4.html>, 2002.
- [67] N. Guéguen. *100 petites expériences en psychologie du consommateur : Pour mieux comprendre comment on vous influence*. Dunod, 2005.
- [68] A. Le Guérec. Editions F. Bourin, 1ère édition édition, 1988.
- [69] R. Gutierrez-Osuna. *Olfactory Interaction*, pages 507–511.
- [70] Haption. Site de haption. <http://www.haption.com/>.
- [71] M. Heilig. Sensorama simulator. Brevet américain US 3,050,870, Août 1962. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [72] R. S. Herz. Are odors the best cues to memory? a cross-modal comparison of associative memory stimuli. *Ann. N-Y Acad. Sci.*, 855:670–674, 1998.
- [73] R. S. Herz. *Olfaction, Taste, and Cognition*, chapter 3, pages 160–177. Cambridge University Press, 2002.
- [74] R. S. Herz and T. Engen. Odor memory: Review and analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, 3:300–313, 1996.
- [75] M. Hirose, K. Hirota, T. Ogi, H. Yano, N. Kakehi, M. Saito, and M. Nakashige. Hapticgear: The development of a wearable force display system for immersive projection displays. In *VR '01: Proceedings of the Virtual Reality 2001 Conference (VR'01)*, page 123, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.
- [76] J.-M. Hémerly. Effets de l’immersion multi-sensorielle sur l’utilisateur d’un simulateur de lance-missile. Technical report, LISA - Université d’Angers, 2004. Rapport interne.
- [77] C. Ho and C. Spence. Olfactory facilitation of dual-task performance. *Neuroscience Letters*, 389(1):35–40, Novembre 2005.
- [78] A. Holley. Le physiologiste et la catégorisation des odeurs. *Intellectica*, 24:21–27, 1997.
- [79] Immersion. Site de immersion corporation. <http://www.immersion.com>.
- [80] F.-X. Inglese, S. Jeong, P. Richard, and M. Sato. A multi-modal human-scale virtual environment. In *Proc. 3rd Int. Conf. Virtual Concept Int.*, November 2005.

- [81] F. X. Inglese, P. Lucidarme, P. Richard, and J. L. Ferrier. Previs: A human-scale virtual environment with haptic feedback. In *Proc. 2nd Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pages 140–145, September 2005. ICINCO'05.
- [82] H. Iwata. Walking about virtual environments on an infinite floor. In *Proc. IEEE Virtual Reality Conf.*, pages 286–293. IEEE Press, 1999.
- [83] H. Iwata. Gaitmaster: A versatile locomotion interface for uneven virtual terrain. In *Proc. IEEE Virtual Reality Conf.*, pages 131–137. IEEE Press, 2001.
- [84] O. Jousset, F. Lethielleux, and C. Speter. Conception et réalisation d'un système de diffusion d'odeur pour la réalité augmentée. Technical report, LISA CNRS - Université d'Angers, Juin 2005.
- [85] J. Kahn. Aroma therapy in the military, it's known as 'nonlethal weapons development'. <http://www.sfgate.com/cgi-bin/article.cgi?file=/gate/archive/2001/05/22/smell.DTL>, 2001.
- [86] J. Kaye. Smell as media. Not for publication or redistribution; For discussion only, 2001.
- [87] J. Kaye. Symbolic olfactory display. Master's thesis, Media Arts and Sciences School of Architecture and Planning, Massachusetts Inst. of Technology, 2001.
- [88] P. E. Keller, L. J. Kangas, L. H. Liden, S. Hashem, and R. T.Kouzes. Electronic nose and their applications. *Neural Network Applications Studies Workshop, IEEE North-con/Technical Applications Conference (TAC'95)*, 1995.
- [89] P. E. Keller, R.T. Kouzes, L.J. Kangas, and S. Hashem. *Transmission of Olfactory Information for Telemedicine*, volume 18 of *Interactive Technology and the New Paradigm for Healthcare*, pages 168–172. IOS Press and Ohmsha Amsterdam, Janvier 1995.
- [90] L. Knapp. E-nose sniffs out nasty bugs. *Wired*, 2001. Available at <http://www.wired.com/news/medtech/0,1286,47008,00.html>.
- [91] W. Krüger and B. Fröhlich. The responsive workbench. In *IEEE Computer Graphics and Applications*, volume 14, pages 12–15. IEEE Press, 2001.
- [92] H.-C. Liu, S.-J. Wang, K.-P. Lin, K.-N. Lin, J.-L. Fuh, and E. L. Teng. Performance on a smell screening test (the modsit): A study of 510 predominantly illiterate chinese subjects. *Physiology & Behavior*, 58(6):1251–1255, Décembre 1995.
- [93] Clinique St Luc. Objectiver l'odorat. Available at <http://www.saintluc.be/newsletter/053/index.html>, Avril 2005.
- [94] O. Luminati. L'odorat d'internet. <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/024/24150.htm>, 2004.

- [95] Manne. Multimedia linked scent delivery system. Brevet américain US 5 949 522, Septembre 1999. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [96] M. Meehan. *Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments*. PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, 2001.
- [97] U. J. Meierhenrich, J. Golebiowski, X. Fernandez, and D. Cabrol-Bass. De la molécule à l'odeur: Les bases moléculaires des premières étapes de l'olfaction. *L'actualité chimique*, Aout-Septembre(289):29–40, 2005.
- [98] D. Mestre. Immersion et présence. *Ecole thématique "Réalité Virtuelle et Sciences du Comportement"*, 2003.
- [99] Miniature-angel. Les origines du parfum remontent à l'antiquité. <http://www.miniature-angel.com/productslink23.html>.
- [100] A. Mochizuki, T. Amada, S. Sawa, T. Takeda, S. Motoyashiki, K. Kohyama, M. Imura, and K. Chihara. Fragra: A visual-olfactory. In *SIGGRAPH 2004 Sketches*, August 2004. Los Angeles, California, USA.
- [101] T. Morineau. Influence des environnements virtuels. *Traité Telecom TE 5 950*, 2002. 16p.
- [102] F. Nakaizumi, Y. Yanagida, H. Noma, and K. Hosaka. Spotscents : A novel method of natural scent delivery using multiple scent projectors. *Proc. IEEE Virtual Reality Conf.*, pages 207–212, Mars 2006.
- [103] C. Di Natale, A. Macagnano, E. Martinelli, R. Paolesse, G. D'Arcangelo, C. Roscioni, A. Finazzi-Agro, and A. D'Amico. Lung cancer identification by the analysis of breath by means of an array of non-selective gas sensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 18:1209–1218, 2003.
- [104] NTT. Movie enhanced with internet-based fragrance system. Communiqué de presse disponible ici : http://www.ntt.com/release_e/news06/0004/0411.html, 2006.
- [105] ODOTECH. Odile^{MC}. <http://www.odotech.qc.ca/fr/>.
- [106] Olfacom. Site d'olfacom. <http://www.olfacom.com/>.
- [107] OSMOOZE. Site d'osmooze. <http://www.osmooze.com/>.
- [108] A. Ouali. Développement de logiciels de diffusion informatisée d'odeurs dans les environnements naturels et virtuels. Technical report, Laboratoire de Robotique de Versailles, Juin 2002.
- [109] T. Pagé. Odeurs. Support de cours de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 2006.

- [110] J. P. Papin, M. Bouallagui, A. Ouali, P. Poisson, P. Richard P, and A. Tijou. Diode : Diffusion d'odeurs dans les environnement virtuels et réels. In *Proc. 5th Virtual Reality Int. Conf.*, May 2003. VRIC'03.
- [111] Jr Pendergrass. Device for selectively providing a multiplicity of aromas. Brevet américain US 5 565 148, Octobre 1996. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [112] C. Philpott, P. Goodenough, C. Passant, A. Robertson, and G. Murphy. The effect of temperature, humidity and peak inspiratory nasal flow on olfactory thresholds. *Clinical otolaryngology and allied sciences*, 29:24–31, 2004.
- [113] C. Platt. You've got smell. *Wired*, 1999. Available at http://www.wired.com/wired/archive/7.11/digiscent_pr.html.
- [114] Polhemus. Site de polhemus. <http://www.polhemus.com/>.
- [115] Sté REALM. Innerpherose. <http://www.realm.de/fr/>.
- [116] E. Richard, A. Tijou, and P. Richard. Multi-modal virtual environments for education: from illusion to immersion. *LNCS*, 3942:1273–1278, 2006.
- [117] E. Richard, A. Tijou, and P. Richard. *Multi-modal Virtual Environments for Education: from Illusion to Immersion*, volume 3942, pages 1273–1278. Presse de l'Ecole des Mines, 2006.
- [118] P. Richard. Analyse de l'interaction homme-monde virtuel lors de tâches de manipulation d'objets déformables. Master's thesis, Université Pierre et Marie Curie(Paris 6), October 1994.
- [119] P. Richard, P. Allain, F. X. Inglese, E. Richard, and D. M. Le Gall. Evacog - virtual environments for cognitive sciences. *AMSE Journal*, 2006.
- [120] A. A. Rizzo, J. Pair, K. Graap, B. Manson, P.J. Mcnerney, B. Wiederhold, M. Wiedehold, and J. Spira. A virtual reality exposure therapy application for iraq war military personnel with post traumatic stress disorder : From training to toy to treatment. *NATO Advanced Research Workshop on Novel Approaches to the Diagnosis and Treatment of Posttraumatic Stress Disorder*, IOS Press, pages 235–250, 2006.
- [121] C. Rouby, B. Schaal, D. Dubois, R. Gervais, and A. Holley. *Olfaction, Taste, and Cognition*. Cambridge University Press, 2002.
- [122] Y. Sarig. Potential applications of artificial olfactory sensing for quality evaluation of fresh product. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(3):239–258, 2000.
- [123] M. Sato. Evolution of spidar. In *Proc. 3rd Int. Virtual Reality Conf.*, 2001. Invited speaker.

- [124] F. R. Schab. Odors and the remembrance of things past. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 16(4):648–655, 1990.
- [125] SensAble. Site de sensible technologies. <http://www.sensible.com>.
- [126] N. Shachtman. An army travels on its stomach. <http://www.wired.com/news/technology/0,60094-0.html>, 2003.
- [127] M. Slater, C. Alberto, and M. Usoh. In the building or through the window? an experimental comparison of immersive and non-immersive walkthroughs. *Virtual Reality Environments in Architecture*, Novembre 1994. Leeds, UK.
- [128] M. Slater and A. Steed. A virtual presence counter. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):413–434, 2000.
- [129] M. Slater, A. Steed, J. McCarthy, and F. Maringelli. The influence of body movement on subjective presence in virtual environment. *Human Factors*, 40(3):469–477, 1998.
- [130] Spector. Disc-playing aroma generator. Brevet américain US 4 556 539, Décembre 1985. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [131] Spector. Multi-aroma cartridge player. Brevet américain US 4 629 604, Décembre 1986. Issu de <http://www.uspto.gov/patft/index.html>.
- [132] K. Stanney. *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation and Applications*. Lawrence Erlbaum Associates, 2002.
- [133] J. R. Stetter. Electronic nose research at iit. Available at <http://www.iit.edu/jrs-teach/enose.html>.
- [134] I. E. Sutherland. The ultimate display. In *Proc. IFIP Congress*, pages 506–508, 1965. Available at <http://www.cs.utah.edu/classes/cs6360/Readings/UltimateDisplay.pdf>.
- [135] R. M. Taylor, W. Robinett, V. L. Chi, Jr. F. P. Brooks, W. V. Wright, R. S. Williams, and E. J. Snyder. The nanomanipulator: a virtual-reality interface for a scanning tunneling microscope. In *SIGGRAPH '93: Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 127–134. ACM Press, 1993.
- [136] Ruetz Tech. Site de ruetz tech. <http://www.ruetz.de>.
- [137] ScentAir Tech. Site de scentair tech. <http://www.scentair.com>.
- [138] Technodor. Site de technodor. <http://technodor.com>.
- [139] A. Tijou, E. Richard, and P. Richard. *Using Olfactive Virtual Environments for Learning Organic Molecules*, volume 3942, pages 1223–1233. Presse de l'École des Mines, 2006.

- [140] A. Tijou, P. Richard, J. P. Papin, and J. L. Ferrier. Diffusion d'odeurs dans les environnements virtuels : étude préliminaire. In *IEEE Conf. Int. Francophone d'Automatique, CIFA'06*, Juin 2006. Bordeaux, France.
- [141] Y. Touati. Un nez électronique pour limiter les odeurs des décharges. http://www.ambascience.co.uk/article.php3?id_article=721, 2005.
- [142] S. E. Tremblay. La mémoire est "nez". Concours journalistique Fernand-Seguin - Association des communicateurs scientifiques <http://www.acs.qc.ca>.
- [143] TriSenx. Site de trisenx. <http://www.trisenx.com>.
- [144] N. Tsingos and O. Warusfel. *Traité de la réalité virtuelle, Tome II*, chapter 15. Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [145] M. Vigouroux. <http://olfac.univ-lyon1.fr/documentation/olfaction/>, 2003.
- [146] Team WadaOroshi. Fragra an interactive olfactory game system. Available at <http://chihara.aist-nara.ac.jp/ivrc2003/index.html>, 2003.
- [147] I. Walker. Introduction to the other sense. Cours, 2004.
- [148] D. Washburn. Advanced research in olfaction for multi-modal applications (aroma)laboratory. Projet de recherche Available at <http://www.ist.ucf.edu/projects.htm>, 2004.
- [149] D. Washburn and L. C. Jones. Could olfactory displays improve data visualization? *Computing in Science and Engineering*, Nov-Dec:80–83, 2004.
- [150] D. A. Washburn, L. M. Jones, R. V. Satya, C. A. Bowers, and A. P. Cortes. Olfactory use in virtual environment training. *Modeling and Simulation Magazine*, 2(3), 2003.
- [151] Encyclopédie Wikipédia. Théophraste. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9ophraste>.
- [152] D. A. Wilson and R. J. Stevenson. The fundamental role of memory in olfactory perception. *Trends in Neurosciences*, 26(5):243–247, 2003.
- [153] W. Winn. A conceptual basis for educational applications of virtual reality. Technical Publication R-93-9, Human Interface Technology Laboratory of the Washington technology Center, Univ. Washington, Seattle, WA, 1993.
- [154] T. Yamada, S. Yokoyama, T. Tanikawa, K. Hirota, and M. Hirose. Wearable olfactory display : Using odor in outdoor environment. In *VR '06: Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, page 28, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [155] Y. Yanagida, S. Kawato, H. Noma, N. Tetsutani, and A. Tomono. A nose-tracked, personal olfactory display. *ACM SIGGRAPH 2003 Sketches and Applications*, 2003.

-
- [156] Y. Yanagida, S. Kawato, H. Noma, A. Tomono, and N. Tetsutani. Projection-based olfactory display with nose tracking. *Proc. IEEE Virtual Reality Conf.*, pages 43–50, 2004.
- [157] C. Youngblut, R. E. Johnson, S. H. Nash, R. A. Wienclaw, and C. A. Wil. Review of virtual environment interface technology. Technical report, Institute for Defense Analyses (IDA), 1996.
- [158] D. Zeltzer. Autonomy, interaction and presence. *Presence*, 1:127–132, 1994.
- [159] S. Zhai. *Human Performance in Six Degree of Freedom Input Control*. PhD thesis, Université de Toronto, 1995.
- [160] M. Zybura and G. A. Eskeland. Olfaction for virtual reality. Technical report, Quarter Project - University of Washington, 1999.

Annexes

Questionnaires

A.1 Questionnaire pour l'expérience de localisation

A.1.1 Identité

Mail :

Latéralité : gaucher/droitier¹

Age :

Fumeur : oui/non¹

Sexe :

A.1.2 Prédispositions

Sentez vous correctement les odeurs ? oui/non¹

Si vous êtes non fumeur, avez-vous déjà fumé ? oui/non¹

Avez-vous des allergies ? oui/non¹

A.1.3 Expérience

Avez-vous bien identifié les odeurs ?

Sont-elles agréables ou désagréables ?

Commentaires particuliers :

¹Rayer la mention inutile

A.2 Questionnaire pour l'expérience de cartographie

A.2.1 Identité

Mail : Latéralité : gaucher/droitier¹
Age : Fumeur : oui/non¹
Sexe :

A.2.2 Prédispositions

Sentez vous correctement les odeurs ? oui/non¹

Si vous êtes non fumeur, avez-vous déjà fumé ? oui/non¹

Avez-vous des allergies ? oui/non¹

A.2.3 Expérience

Avez-vous facilement détecté les odeurs ?

Commentaires particuliers :

A.3 Questionnaire pour l'expérience de saturation

A.3.1 Identité

Mail : Latéralité : gaucher/droitier¹
Age : Fumeur : oui/non¹
Sexe :

A.3.2 Prédispositions

Sentez vous correctement les odeurs ? oui/non¹

Si vous êtes non fumeur, avez-vous déjà fumé ? oui/non¹

Avez-vous des allergies ? oui/non¹

A.3.3 Expérience

Combien d'odeurs avez-vous différencié ?

Les odeurs étaient-elles agréables ou désagréables ?

Commentaires particuliers :

A.4 Questionnaire pour l'expérience de persistance

A.4.1 Identité

Mail : Latéralité : gaucher/droitier¹
Age : Fumeur : oui/non¹
Sexe :

A.4.2 Prédispositions

Sentez vous correctement les odeurs ? oui/non¹

Si vous êtes non fumeur, avez-vous déjà fumé ? oui/non¹

Avez-vous des allergies ? oui/non¹

A.4.3 Expérience

Combien d'odeurs avez-vous différencié ?

Les odeurs étaient-elles agréables ou désagréables ?

Commentaires particuliers :

A.5 Questionnaire pour l'expérience sur la ville virtuelle

A.5.1 Prédispositions

Sentez-vous correctement les odeurs ? OUI / NON

Si vous êtes non fumeur, avez-vous déjà fumé ? OUI / NON

Avez-vous des allergies ? OUI / NON

Pensez-vous avoir des problèmes de mémorisation ? OUI / NON

A.5.2 Mémoire - partie 1

QUESTION 1 : Énumérez les détails ou événements dont vous vous souvenez :

QUESTION 2 : Quels éléments vous ont le plus marqué ?

A.5.3 Présence

QUESTION 3 : J'ai la sensation d'être là dans cet environnement ...

1. Pas du tout. 2 . 3 . 4 . 5 . 6 . 7 : Beaucoup

QUESTION 4 : Il y a eu des moments durant l'expérience où l'environnement virtuel devint presque réel pour moi...

1 : À aucun moment. 2 . 3 . 4 . 5 . 6 . 7 : Presque tout le temps.

QUESTION 5 : L'environnement virtuel semble pour moi plus comme...

1 : Des images que je regarde. 2 . 3 . 4 . 5 . 6 . 7 : Un endroit que je visite.

QUESTION 6 : J'ai eu un plus fort sentiment d'être présent dans...

1 : Le monde réel du laboratoire. 2 . 3 . 4 . 5 . 6 . 7 : La réalité virtuelle

QUESTION 7 : Je considère l'environnement virtuel comme un endroit similaire à d'autres endroits où je suis allé aujourd'hui...

1 : Pas du tout. 2 . 3 . 4 . 5 . 6 . 7 : Beaucoup.

A.5.4 Mémoire - partie 2

QUESTION 8 : Combien de personnes étaient présentes sous l'abri bus ?

QUESTION 9 : Combien de personnes étaient présentes à l'entrée du cinéma ?

QUESTION 10 : A la fin de la simulation, quelle est la couleur du camion garé ?

QUESTION 11 : Quel est le nom du film qui apparaît à plusieurs reprises sur les affiches ?

QUESTION 12 : Quel bâtiment familier reconnaissez-vous ?

QUESTION 13 : Quel(s) type(s) de fleur(s) avez-vous rencontré ?

QUESTION 14 : Quelle(s) marque(s) de voiture avez-vous reconnue(s) ?

QUESTION 15 : Combien d'espace(s) vert(s) (parc, jardin) avez-vous rencontré(s) ?

A.6 Questionnaire pour l'expérience sur la cuisine virtuelle

A.6.1 Prédispositions

Sentez-vous correctement les odeurs ? OUI / NON

Si vous êtes non fumeur, avez-vous déjà fumé ? OUI / NON

Avez-vous des allergies ? OUI / NON

Avez-vous déjà eu une expérience de réalité virtuelle ? OUI / NON

Combien de temps, combien de fois ?

A.6.2 Mémoire

QUESTION 1 : Voici un schéma de la cuisine virtuelle. Donner l'emplacement où se trouvent les objets suivants :

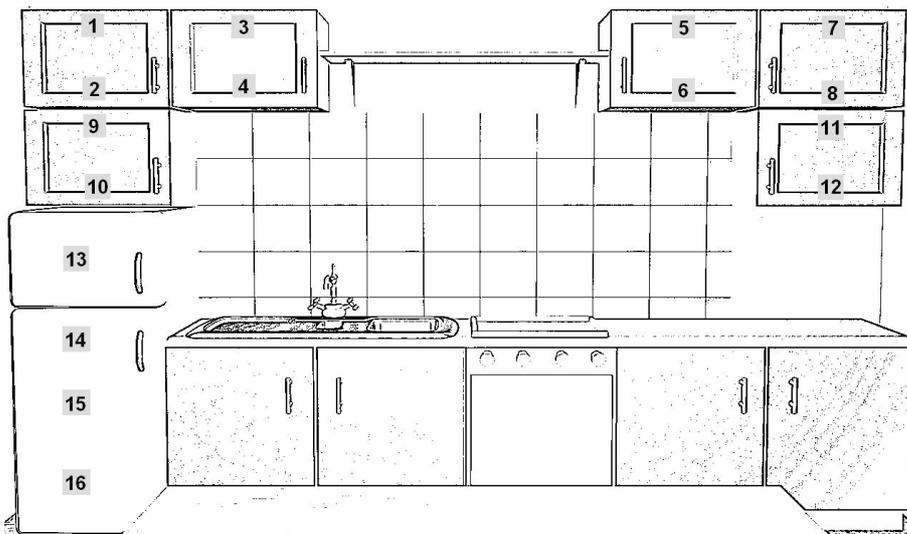


Figure A.1 – Schéma de la cuisine

- crème fraîche
- farine
- thé
- lait
- filtres
- beurre
- zanimos

– jus d'orange

QUESTION 2 : Quels autres objets des placards vous rappelez vous ?

QUESTION 3 : Citez le plus possible d'objets présents dans la cuisine.

QUESTION 4 : De quelle couleur sont les placards ?

QUESTION 5 : De quelle couleur sont les fleurs ?

QUESTION 6 : Quelle est la marque des filtres ?

QUESTION 7 : Quel est le parfum du thé ?

QUESTION 8 : Qu'est ce qui vous a le plus interpellé dans cette cuisine ?

A.6.3 Présence

QUESTION 1 : J'avais la sensation d'être là dans cette cuisine

1. Pas du tout. 2 . 3 . 4 . 5 . 6 . 7 : Beaucoup

QUESTION 2 : L'environnement virtuel semblait pour moi plus comme :

1 : Des images que je regarde. 2 . 3 . 4 . 5 . 6 . 7 : Un endroit que je visite.

QUESTION 3 : Durant l'expérience, j'ai souvent pensé au fait que je me trouvais dans un laboratoire

1 : La plupart du temps 2 . 3 . 4 . 5 . 6 . 7 : Jamais

Question d'estimation :

Sur une échelle de 1 à 100, 1 étant le niveau le plus bas, 100 le maximum, évaluez votre sensation de présence dans la cuisine virtuelle.

A.7 Questionnaire pour l'expérience du supermarché virtuel

A.7.1 Prédipositions

Sentez-vous correctement les odeurs ? OUI / NON

Si vous êtes non fumeur, avez-vous déjà fumé ? OUI / NON

Avez-vous des allergies ? OUI / NON

Avez-vous déjà eu une expérience de réalité virtuelle ? OUI / NON

Combien de temps, combien de fois ?

A.7.2 Expérience

Qu'est ce qui vous a le plus marqué pendant l'expérience ?

Quels commentaires positifs pouvez vous faire sur cette expérience ?

Quels commentaires négatifs pouvez-vous donner sur cete expérience ?

A.7.3 Mémoire

1- Entourez les produits de la liste suivante que vous avez vu dans le supermarché.

TV	Yaourts
Pain de mie	Cubes
Radio	Jeu locomotive
Sucre	Salade
Crayons	Beurre

2- Quel produit se situe en face de la crème fraîche ?

3- Quel produit se situe en face du coca ?

4- Quel produit se situe en face des pâtes ?

5- Quel produit se situe en face du lait ?

6- Citez le plus de produits dont vous vous souvenez, présents dans le supermarché (en dehors de ceux cités précédemment)

7- Citez tous les détails supplémentaires du supermarché dont vous vous souvenez (couleurs, personnages...)

A.7.4 Présence

Entourez pour chaque question, le chiffre le plus proche de votre sensation.

1- J'ai trouvé que les actions dans l'environnement étaient naturelles

1 : Pas du tout 2 3 4 5 6 7 : Beaucoup

2- J'ai trouvé que l'environnement répondait naturellement à mes actions

1 : Pas du tout 2 3 4 5 6 7 : Beaucoup

3- J'avais la sensation d'être là dans ce supermarché

1 : Pas du tout 2 3 4 5 6 7 : Beaucoup

4- L'environnement virtuel semble pour moi plus comme :

1 : Des images que je regarde 2 3 4 5 6 7 : Un endroit que je visite

Durant l'expérience, j'ai souvent pensé au fait que je me trouvais dans un laboratoire

1 : La plupart du temps 2 3 4 5 6 7 : Jamais

Question d'estimation :

Sur une échelle de 1 à 100, 1 étant le niveau le plus bas, 100 le maximum, évaluez votre sensation de présence dans ce supermarché virtuel.

Combien de temps estimez-vous avoir passé dans le supermarché ?

Méthodes statistiques

B.1 ANOVA

Pour mesurer l'influence d'une variable indépendante (retour olfactif/pas de retour olfactif par exemple) sur une variable dépendante (temps de réalisation par exemple) on procède généralement à une analyse de variance qui permet de séparer la performance de groupes de données obtenue dans les deux cas.

B.1.1 Description de la méthode

ANOVA est une méthode pratique de séparation des effets de multiples facteurs dans un ensemble de données.

Cette méthode examine quel facteur a un effet significatif sur une variable dépendante, en comparant la variance à l'intérieur d'un facteur à la variance entre les facteurs.

B.1.1.1 La variable "F"

La méthode ANOVA permet de calculer deux paramètres statistiques importants pour chacun des facteurs: la valeur **F**, et sa valeur associée **p**. Dans un ensemble de résultats, **F** est une mesure de la variation causée par un facteur expérimental particulier, quand tous les autres facteurs ont été pris en compte. Nous pouvons nous la représenter comme une estimation du poids d'un facteur sur l'évolution d'une variable dépendante. Ainsi, plus **F** est élevée, plus l'effet du facteur associé est significatif. La valeur de **F** est obtenue en faisant le rapport des valeurs de **MS effect** et de **MS error** comme l'indique l'équation B.1:

$$F = \frac{\text{MS Effect}}{\text{MS Error}} \quad (\text{B.1})$$

B.1.1.2 La variable "p"

La variable **p** donne la probabilité associée à une valeur **F** correspondante. Autrement dit, **p** représente la probabilité pour que la variation des résultats associés à un facteur donné soit due au hasard.

Par exemple, une valeur de p de 0.1 signifie qu'il y a une chance sur 10 pour que l'effet observé soit due à une variation aléatoire des résultats. Les résultats seront d'autant plus sûrs que la valeur de p est faible. Il est généralement reconnu qu'un effet est significatif si p a une valeur inférieure ou égale à 0.05 ($p \leq 5\%$). Ce seuil est accepté comme critère de signification en psychologie de la perception. Ceci est signalé dans les tables STAT GENERAL ANOVA par une astérisque portée sur la probabilité.

B.1.1.3 Les valeurs MS

"MS effect" est la variance calculée pour une variabilité entre les groupes de données, "MS error" est la variance calculée pour une variabilité à l'intérieur d'un groupe. La variance étant calculée comme la somme des carrés des écarts à la valeur moyenne, divisée par le nombre de valeurs moins un **Equation B.2**.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (\text{B.2})$$

B.1.1.4 Les valeurs df

La variable "df Effect" est le nombre de degrés de liberté (ddl) entre les groupes de données: il est égal au nombre de valeurs des variables moins un (**Equation B.3**).

$$\text{dfEffect} = n - 1 \quad (\text{B.3})$$

La variable "df Error" est le nombre de degrés de liberté (ddl) à l'intérieur d'un groupe de N sujets (**Equation B.4**).

$$\text{dfError} = (n - 1) \times (N - 1) \quad (\text{B.4})$$

La terminologie "effect/error" vient du fait que l'on ne peut vraiment décrire une variabilité à l'intérieur d'un groupe de données, c'est une erreur de variance (Error), alors que l'on peut par la différence des moyennes entre groupes montrer les effets significatifs entre facteurs (Effect).

$$t = \frac{(\text{moyenne du groupe 1} - \text{moyenne du groupe 2})}{\sqrt{\frac{\text{variance du groupe 1}}{\text{taille du groupe 1}} + \frac{\text{variance du groupe 2}}{\text{taille du groupe 2}}}} = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{N_1} + \frac{S_2^2}{N_2}}} \quad (\text{B.5})$$

B.1.2 Les effets croisés

Les facteurs simples, qui ont une importance significative sur les variables, sont appelés *facteurs principaux*. En addition aux effets principaux, ANOVA peut étudier aussi les *interactions d'ordre plus élevé* entre les facteurs. Ces interactions, appelées *effets croisés*, sont des facteurs dont les effets dépendent de l'état d'un ou plusieurs facteurs additionnaux. Une fois que ANOVA a déterminé lesquels des facteurs sont significatifs sur une variable dépendante, une technique inférentielle est utilisée pour déterminer la direction des effets. Pour les tests relatifs à l'interaction visuelle par exemple, la direction de ces effets sera la variation du temps de saisie, la variation de la distance de suivi, etc....

Le t-test

Ce test permet de comparer deux-à-deux plusieurs valeurs moyennes. C'est la méthode inférentielle la plus simple. Elle compare les valeurs moyennes pour des tests avec et sans facteur particulier. Le signe de la valeur **t-test** dit si le facteur a un effet significatif (positif) ou non (négatif).

Le **t-test** produit également une valeur de probabilité notée (**p-level**) associée qui indique la différence de fiabilité entre les moyennes. Cette probabilité différera de la valeur **p** associée à **F**, de par le nombre d'observations indépendantes, ou degrés de liberté (**df**), qui interviennent dans le calcul des **t-tests** et des **F**.

En général, la statistique **F** est la mesure la plus puissante et la plus fiable d'un effet. Notons qu'il y a deux tests possibles : le **test de Scheffé**, qui est le plus dur au niveau de l'attribution d'un effet significatif, et le **test LSD** qui est plus tolérant (composé de simples t-tests). L'équation B.5 rappelle la formule du t-test.

B.2 Scheffé

La méthode de Scheffé repose sur le test de contrastes. On appelle contraste une somme pondérée de moyennes :

$$C = c_1m_1 + c_2m_2 + \dots + c_km_k \quad (B.6)$$

$$\text{avec } \sum c_i = 0$$

$$\text{et } \sum |c_i| = 2 \text{ (afin d'homogénéiser les coefficients)}$$

Exemples :

1, -1, 0, 0 pour comparer m_1 avec m_2

1, 0; -1; 0 pour comparer m_1 et m_3

1/2, 1/2, -1/2, -1/2 pour comparer m_1 et m_2 avec m_3 et m_4 .

Le contraste est jugé significatif si la valeur absolue de C est supérieure à :

$$S = \sqrt{(p-1)F_c C M_\alpha \left(\sum \frac{c_i^2}{n_i} \right)} \quad (\text{B.7})$$

- p étant le nombre de niveaux de la variable indépendante
- F_c étant la valeur critique de F avec $p-1$ et $n-p$ degrés de liberté, pour le seuil α déterminé.
Cette valeur est lue dans la table de Fisher - Snedecor
- n_i étant l'effectif du groupe du niveau i
- $C M_\alpha$ étant les carrés moyens du facteur a à p niveaux.

Contribution à l'intégration et à l'évaluation du retour olfactif en environnement virtuel

Angèle TIJOU

Résumé

La réalité virtuelle est un domaine en plein essor actuellement. Un des sujets de recherche dans ce domaine concerne l'immersion et la sensation de présence en environnement virtuel. Pour augmenter l'immersion, les chercheurs se sont intéressés aux retours sensoriels comme le retour sonore, haptique ou tactile. Très peu de recherches ont été réalisées sur les retours olfactifs. Ce travail traite de l'intégration du retour olfactif en environnement virtuel.

Dans un premier temps, différentes expériences ont été réalisées afin de mettre en place une méthodologie permettant de caractériser les types de diffuseurs. Les résultats ont montré que la subjectivité des sujets entraîne l'obligation de calibrer un diffuseur avant de l'utiliser dans une application. Ce document présente une taxinomie du choix de diffuseurs en fonction de différents paramètres comme les techniques d'interaction définies par D.A. Bowman et al. ou les interfaces de visualisation. Ce travail a permis également une première évaluation du retour olfactif sur deux points : la sensation de présence du sujet et la mémorisation d'objets ou d'événements.

Mots-clés : Réalité virtuelle, Environnement virtuel, olfaction, méthodologie d'intégration, performance humaine, immersion, présence

Abstract

The Virtual reality is currently a field in full growth. One of the research areas is about immersion and the presence sensation. To increase immersion, researchers have focused their interest in sensory feedbacks like sound, haptic or tactile. Few researches have been carried out on olfactory feedback. This work is about the integration of olfactory feedback in virtual environment.

First time, some experiments have been performed in order to create a methodology to characterize the olfactory displays. Results showed that subjectivity of subjects involves the need to calibrate olfactory displays before their use in virtual reality application. This document presents a taxonomy of olfactory display's choice according to different parameters like interaction's techniques defined by D.A. Bowman et al. or visualization interfaces. This work did also a first evaluation of olfactory feedback on two points : the sensation of presence and the memorization of objects or events.

Keywords: Virtual reality, virtual environment, olfaction, integration methodology, human performance, immersion, presence