

***Étude des relations spatiales visuelles et
de leur implication dans la discrimination
des expressions faciales émotionnelles :
arguments anatomo-fonctionnels***

Présentée et soutenue par

Valérie Buron

le 9 juillet 2004

Réalisée sous les directions du Pr. Olivier Koenig et du Dr. Christoph Segebarth

Jury : M. Jean-François Démonet (rapporteur) M. Olivier Koenig (directeur) Mme Jacqueline Nadel
(rapporteur) M. Christoph Segebarth (directeur) M. Rémy Versace (président)

Table des matières

CHAPITRE 1. Étude des relations spatiales visuelles (cadre théorique) . .	6
1. Dissociation fonctionnelle entre la voie ventrale et la voie dorsale . .	6
1.1. Études de lésions provoquées chez le singe . .	6
1.2. Données d'imagerie cérébrale . .	7
1.3. Études chez des patients présentant des lésions cérébrales . .	8
2. Distinction entre les relations métriques et les relations catégorielles . .	10
2.1. Le modèle de Kosslyn et Koenig (1992) . .	10
2.2. Définitions des relations catégorielles et des relations métriques . .	15
2.3. Des sous-systèmes distincts ? . .	16
2.4. Effet de pratique dans le traitement des relations spatiales visuelles . .	31
2.5. Discussion générale et extensions de la dichotomie catégorielle - métrique . .	34
CHAPITRE 2. Étude du traitement des expressions faciales émotionnelles et de l'implication des relations spatiales visuelles dans leur discrimination (cadre théorique)	37
1. L'hypothèse de configuration . .	38
1.1. Les relations de premier ordre et les relations de second ordre . .	41
1.2. L'information relationnelle . .	43
1.3. L'information holistique . .	44
1.4. Synthèse . .	45
1.5. Extensions de la notion de configuration et conclusion . .	49
2. L'hypothèse des relations catégorielles et des relations métriques . .	51
Théorie de Cooper et Wojan (2000) reprise par White (2002) . .	52
Synthèse . .	54
3. L'hypothèse d'automaticité . .	55
4. L'hypothèse d'un codage catégoriel versus continu . .	57
4.1. La notion d'émotions de base . .	57
4.2. L'hypothèse de perception catégorielle («Categorical Perception», CP) . .	60
4.3. Vers un modèle multidimensionnel du codage de l'expression faciale . .	61
4.4. Un traitement spécifique à chaque expression particulière ? Étude des corrélats neuronaux des expressions faciales . .	64
5. Synthèse . .	67
6. Vers une interaction du traitement visuel et du traitement émotionnel des expressions faciales ? . .	69
CHAPITRE 3. Présentation des hypothèses et introduction aux expériences . .	71
1. Présentation des hypothèses . .	71
Hypothèse de l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des relations spatiales visuelles . .	72
Hypothèse d'un effet d'apprentissage dans le traitement des relations spatiales visuelles . .	72
Hypothèse de l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles . .	73
Hypothèse d'automaticité du traitement des expressions faciales émotionnelles . .	73
2. Introduction aux expériences . .	74

CHAPITRE 4. Techniques et méthodes utilisées . .	75
1. La technique d'IRMf . .	75
1.1. <i>Bref historique : la naissance et l'évolution de l'IRMf . .</i>	75
1.2. <i>Que mesure-t-on en IRMf ? . .</i>	76
1.3. <i>Pourquoi faire une expérience d'IRMf ? . .</i>	77
1.4. <i>Comment faire une expérience d'IRMf ? . .</i>	78
1.5. <i>L'interprétation des cartes d'imagerie cérébrale . .</i>	80
1.6. <i>Les apports, les limites et les perspectives de l'IRMf . .</i>	83
2. Les paradigmes de champ visuel divisé et d'amorçage . .	84
3. Les techniques de transformations des images . .	85
3.1. <i>Les techniques de transformation des relations spatiales dans la perception et la reconnaissance des visages et dans la perception et la reconnaissance des expressions faciales : brève revue de littérature . .</i>	86
3.2. <i>Description et justification de notre choix : le morphing d'intensités d'expressions faciales émotionnelles . .</i>	87
CHAPITRE 5. Étude des relations spatiales visuelles (cadre expérimental) . .	90
Expérience 1. Expérience réalisée en IRMf . .	90
1. <i>Objectifs . .</i>	90
2. <i>Méthode . .</i>	90
3. <i>Résultats . .</i>	95
4. <i>Discussion . .</i>	101
CHAPITRE 6. Étude de l'implication des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles (cadre expérimental) . .	105
Expérience 2. Expérience préliminaire à l'IRMf, réalisée en champ visuel divisé . .	105
1. <i>Objectifs . .</i>	105
2. <i>Méthode . .</i>	106
3. <i>Résultats . .</i>	111
4. <i>Discussion . .</i>	118
Expérience 3. Expérience réalisée en IRMf . .	122
1. <i>Objectifs . .</i>	122
2. <i>Méthode . .</i>	123
3. <i>Résultats . .</i>	126
4. <i>Discussion . .</i>	136
CHAPITRE 7. Mise en œuvre des sous-systèmes de traitement de l'expression faciale émotionnelle (cadre expérimental) . .	142
Expérience 4. Expérience réalisée avec un paradigme d'amorçage (SOA=600ms) . .	142
1. <i>Objectif . .</i>	142
2. <i>Méthode . .</i>	142
3. <i>Résultats . .</i>	146
4. <i>Discussion . .</i>	147
Expérience 5. Expérience réalisée avec un paradigme d'amorçage (SOA=200ms) . .	147
1. <i>Objectif . .</i>	147
2. <i>Méthode . .</i>	148
3. <i>Résultats . .</i>	148

4. <i>Discussion</i> . .	149
Expérience 6. Expérience réalisée avec un paradigme d'amorçage (double tâche) . .	150
1. <i>Objectif</i> . .	150
2. <i>Méthode</i> . .	150
3. <i>Résultats</i> . .	151
4. <i>Discussion</i> . .	154
5. <i>Discussion générale sur les expériences 4, 5 et 6</i> . .	155
DISCUSSION GENERALE . .	157
Étude des mecanismes de traitement des relations spatiales visuelles . .	157
Test de l'hypothèse de sous-systèmes distincts impliquees dans le traitement des relations spatiales visuelles . .	157
Test de l'hypothèse de l'implication des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles . .	158
Étude des mecanismes de traitement des expressions faciales émotionnelles . .	158
Test de l'hypothèse de polarite dans le traitement des expressions faciales émotionnelles . .	159
Test de l'hypothese d'automaticite du traitement des expressions faciales emotionnelles . .	160
Étude de l'interaction des mecanismes de traitement des relations spatiales visuelles et des mecanismes de traitement des expressions faciales émotionnelles . .	160

CHAPITRE 1. Étude des relations spatiales visuelles (cadre théorique)

Le chapitre 1 porte sur l'étude de la façon dont notre système visuel est capable d'effectuer des traitements spatiaux. Le cœur de ce chapitre réside dans la description du modèle de vision de haut niveau de Kosslyn et Koenig (1992) et, plus particulièrement, dans la spécification par ces auteurs de l'existence de deux des sous-systèmes de traitement distincts décrits dans le modèle, c'est-à-dire le sous-système d'encodage des relations spatiales catégorielles et le sous-système d'encodage des relations spatiales coordonnées. La question de l'existence de ces deux sous-systèmes de traitement est posée et confirmée à travers des données provenant d'études réalisées en champ visuel divisé, de simulations, d'études effectuées chez des patients et d'études de neuroimagerie, que nous présenterons successivement. Enfin, à la fin de ce chapitre, une extension de la dichotomie entre les deux types de traitement est proposée. Mais avant d'aborder la question de la distinction entre les deux types de traitement catégoriel et coordonné, une dissociation fonctionnelle entre la voie dorsale, qui encode les propriétés spatiales d'un objet (sa position, sa taille, son orientation) et la voie ventrale, qui encode les propriétés permettant l'identification d'un objet (sa couleur, sa forme), est exposée.

1. Dissociation fonctionnelle entre la voie ventrale et la voie dorsale

On ne peut pas aujourd'hui ignorer l'impact de l'article de Ungerleider et Mishkin qui, en 1982, proposaient l'existence de deux voies corticales de traitement visuel : la voie occipito-temporale ventrale, qui serait sollicitée dans l'encodage de l'identification d'un objet (voie «*what*») et la voie pariétale dorsale, qui interviendrait dans la localisation et l'orientation d'un objet (voie «*where*»). Un corpus de données, issues d'études de lésions provoquées chez le singe, d'études issues de la neuroimagerie et d'études neuropsychologiques chez l'Homme, ont permis d'étayer cette théorie.

1.1. Études de lésions provoquées chez le singe

Deux types de données provenant d'études réalisées chez le singe ont apporté des arguments à la théorie d'Ungerleider et Mishkin. Premièrement, des données neuroanatomiques et neurophysiologiques soutiennent l'existence d'une dichotomie entre les deux voies de traitement (Mishkin & Ungerleider, 1982 ; Van Essen, 1985). Les aires visuelles de la voie dorsale semblent avoir des propriétés différentes de celles de la voie ventrale : (i) elles incluent rarement la fovéa dans leurs champs récepteurs, (ii) elles sont sensibles à la direction du mouvement, (iii) elles ne sont pas particulièrement sensibles à la forme et à la couleur et (iv) certaines cellules répondent sélectivement à la localisation d'un objet. Deuxièmement, des données comportementales fournissent des preuves en faveur

de l'existence de représentations distinctes pour le «*what*» et le «*where*» et du rôle critique des lobes temporal et pariétal, respectivement, dans le traitement de ces représentations. Par la méthode des lésions, une double dissociation des effets des lésions provoquées au niveau des lobes temporal et pariétal a été mise en évidence, dans une expérience devenue célèbre. Dans cette expérience (par exemple, Ungerleider & Mishkin, 1982), deux couvercles étaient placés devant des singes qui devaient apprendre, au cours de tests, à discriminer entre les couvercles celui qui renfermait de la nourriture. Dans une tâche (tâche de discrimination d'objets), les deux couvercles différaient par des caractéristiques qui leur étaient propres (par exemple, la forme et la couleur), et qui étaient modifiées de façon aléatoire d'un essai à l'autre, la nourriture étant toujours disposée sous un couvercle présentant toujours les mêmes caractéristiques. Dans une autre tâche (tâche de discrimination de localisations), les deux couvercles étaient gris et un point de repère, une petite tour, était placé à proximité d'un couvercle, sa position variant d'un essai à l'autre ; dans cette tâche, la nourriture était toujours placée sous le couvercle le plus proche de la tour. Les résultats obtenus étaient les suivants : les singes ayant subi une lésion au niveau de leurs lobes temporaux mais ayant préservé leurs lobes pariétaux présentaient beaucoup de difficultés à effectuer correctement la première tâche leur demandant de discriminer des objets, mais n'avaient pas de difficultés majeures à réaliser la seconde tâche leur demandant de discriminer des localisations. D'un autre côté, chez les singes ayant subi une lésion au niveau de leurs lobes pariétaux mais ayant conservé intacts leurs lobes temporaux, le pattern inverse était observé : les singes avaient beaucoup plus de difficultés à apprendre à discriminer des localisations qu'à discriminer des objets (Mishkin & Ungerleider, 1982 ; Pohl, 1973 ; Ungerleider & Mishkin, 1982). Depuis Ungerleider et Mishkin (1982), il est important de souligner qu'une modification certes mineure mais essentielle a été apportée à leur théorie : le système dorsal permet non seulement la représentation de localisations d'objets et de relations spatiales entre des objets distincts, mais également la représentation de relations spatiales entre des parties d'un même objet (Kosslyn, 1987).

Ces études et des études ultérieures (par exemple, Yaginuma, Osawa, Yamaguchi, & Iwai, 1993) ont démontré l'existence de circuits différents des voies ventrale et dorsale dans le cortex visuel extra-strié. Ainsi, il semble exister chez le singe deux voies distinctes impliquées dans le traitement de l'information visuelle : d'une part, la voie ventrale qui relie le cortex strié au lobe temporal inférieur par l'intermédiaire de la partie ventro-latérale du cortex visuel extra-strié, d'autre part, la voie dorsale qui relie le cortex strié au lobe pariétal par l'intermédiaire de la partie externe du cortex visuel extra-strié. La première est spécialisée dans le traitement de la forme et plus généralement des caractéristiques figurales des objets mais également des visages, tandis que la seconde joue un rôle majeur dans les traitements visuo-spatiaux comprenant la localisation, le déplacement de l'attention spatiale et la mémoire de travail spatiale.

1.2. Données d'imagerie cérébrale

Dans une étude de Tomographie par Emission de Positons (TEP), Horwitz et al. (1992) ont utilisé deux tâches expérimentales : une tâche d'appariement de visages, consistant à pointer où se trouvait, parmi deux carrés, le visage correspondant à celui présenté simultanément dans un troisième carré, et une tâche de position de points, consistant à indiquer le carré où se situaient une barre et un point, dont la position par rapport à la barre était identique à celle présentée dans un troisième carré. Le choix du deuxième carré entraînant une mauvaise réponse contenait soit, dans la première tâche un visage, mais différent de celui du troisième carré, soit dans la seconde tâche, une barre et un

point dont la position était différente de celle du troisième carré. De plus, dans les deux tâches, les deux carrés de réponse subissaient une rotation de 90° ou de 180° par rapport au troisième carré. Dans la tâche d'appariement de visages, les auteurs ont observé une activation bilatérale du cortex occipital extra-strié au niveau de V4 et une activation bilatérale de la région occipito-temporale. Dans la tâche de position de points, ces mêmes régions étaient activées, mais dans une moindre mesure, accompagnées de l'activation de plusieurs régions pariétales. Globalement, ces résultats apportent des arguments en faveur de l'existence, chez l'Homme, d'une distinction entre une voie occipito-temporale, dédiée à l'identification des objets et des visages, et une voie occipito-pariétale, spécialisée dans le traitement visuo-spatial.

1.3. Études chez des patients présentant des lésions cérébrales

La dissociation entre la voie du «*what*» et la voie du «*where*» a également été mise en évidence chez l'Homme après une lésion d'une partie du cortex. Afin d'apporter des arguments en faveur d'une dissociation entre ces deux voies de traitement, nous étudierons successivement les déficits liés au traitement de la forme associés à une lésion de la voie ventrale et les déficits spatiaux dits « complexes » associés à une lésion de la voie dorsale. Enfin, nous présenterons, à travers le syndrome de Balint, un exemple d'intégration de l'information par ces deux voies.

1.3.1. Déficits liés au traitement de la forme associés à une lésion de la voie ventrale

Les déficits liés au traitement de la forme font partie des déficits associés à une lésion de la voie ventrale. Ils comprennent l'agnosie visuelle, la simultagnosie ventrale, l'alexie, l'agnosie des lieux et la prosopagnosie. L'agnosie visuelle peut être définie comme une incapacité à reconnaître des objets présentés visuellement bien que les fonctions visuelles élémentaires (notamment l'acuité) soient préservées ; elle est souvent engendrée par des lésions bilatérales des lobes temporaux inférieurs (Farah, 1990). La simultagnosie ventrale correspond à une incapacité à intégrer les différents éléments d'une image complexe et à identifier simultanément plusieurs objets ; elle est associée à une lésion de la région temporo-occipitale inférieure gauche (Farah, 1990). L'alexie résulte d'une incapacité à reconnaître visuellement des mots et survient souvent consécutivement à des lésions occipitales de l'hémisphère gauche (Farah, 1991). L'agnosie des lieux correspond à une incapacité à s'orienter dans l'espace, ce qui peut s'expliquer par une incapacité à reconnaître des lieux familiers (Aguirre & D'Esposito, 1999) et qui se manifeste suite à des lésions occipito-temporales inférieures droites ou bilatérales. Enfin, la prosopagnosie se définit comme une incapacité à reconnaître les visages de manière « explicite », une reconnaissance « implicite » ou non consciente étant souvent préservée. Ce trouble touche principalement la région occipito-temporale inférieure droite ou bilatérale, en particulier le gyrus fusiforme (voir Beyn & Knyazeva, 1962 ; Damasio, Damasio, & Van Hoesen, 1982, pour une revue de dix cas d'études post-mortem ; Davidoff, 1994, pour une revue des différents types de prosopagnosie).

1.3.2. Déficits spatiaux « complexes » associés à une lésion de la voie dorsale

Le syndrome de l'orientation spatiale, le syndrome d'héminégligence, le syndrome de Gerstmann et le syndrome de Balint font partie des déficits dits « complexes » associés à

des lésions de la voie dorsale. Ce dernier sera présenté en tant qu'exemple d'interaction des deux voies ventrale et dorsale de traitement visuel. Le syndrome de l'orientation spatiale correspond à une incapacité à s'orienter dans l'espace et à se situer sur un plan, sans problème d'identification des lieux ; il est lié à des lésions pariétales postérieures droites. Le syndrome d'héminégligence résulte d'une incapacité à percevoir et à répondre à des stimuli présentés dans l'hémichamp controlatéral à la lésion située le plus souvent dans la partie postéro-inférieure des lobes pariétaux. Le syndrome de Gerstmann (Gerstmann, 1940) peut se définir par les quatre déficits qui lui sont généralement associés : l'agnosie digitale, la confusion droite-gauche, l'acalculie et l'agraphie. Il survient principalement suite à une lésion pariétale inférieure localisée au niveau du gyrus angulaire de l'hémisphère gauche (aire 39 de Brodmann).

1.3.3. Intégration de l'information provenant des voies dorsale et ventrale : exemple du syndrome de Balint

La reconnaissance normale d'un objet dépend d'une perception intacte des traits spatiaux constituant cet objet (et de ceux qui permettent de distinguer deux objets) et de leur intégration. Pour former des représentations perceptives des objets présents dans notre champ visuel, les informations provenant de la voie ventrale (combinaisons des traits) et les informations provenant de la voie dorsale (localisations exactes des traits) doivent se lier ou « s'assembler ». Cette question est connue comme le « problème de l'assemblage » (« **binding problem** ») ou problème d'intégration des traits. La perte de l'information spatiale conduit alors à des erreurs d'assemblage (« **binding errors** ») des traits. Les fonctions spatiales du lobe pariétal sont très importantes : une lésion au niveau des lobes pariétaux entraîne une incapacité à lier correctement les traits (par exemple, la couleur, la forme, la taille, le mouvement). Ceci s'observe même quand les patients ont accès explicitement aux stimuli (Bernstein & Robertson, 1998 ; Friedman-Hill, Robertson, & Treisman, 1995 ; Humphreys, Caterina, Wolfe, Olson, & Klempe, 2000 ; Robertson, Treisman, Friedman-Hill, & Grabowecky, 1997). Les déficits liés à l'assemblage des traits chez des patients présentant une lésion pariétale suggèrent fortement que les fonctions spatiales du lobe pariétal interagissent avec la perception des traits (par exemple, la couleur, la forme, la taille) codés au niveau des aires ventrales (Robertson et al., 1997). Ce type de déficit a été nommé « **syndrome de Balint** » (Balint, 1909 ; Holmes & Horrax, 1919 ; De Renzi, 1982, chap. 4). Ayant perdu la capacité à localiser, certains patients perdraient également la capacité à percevoir plus d'un item à la fois (Robertson et al., 1997). Les deux déficits (localisation et perception de deux objets) pourraient être attribués à une déconnexion entre une représentation intacte des objets et une représentation spatiale intacte (Dehaene & Cohen, 1994). Cependant, certains patients atteints du syndrome de Balint peuvent identifier des objets présentés seuls, même si la perception de la forme implique une représentation de la distribution spatiale du contour. C'est pourquoi la distinction entre les relations spatiales à l'intérieur d'un même objet (qui vraisemblablement dépendent en partie de la voie ventrale) et les relations spatiales entre objets distincts (qui vraisemblablement dépendent de la voie dorsale) semble pertinente. Ainsi, avec une voie ventrale préservée, l'accès aux relations spatiales qui définissent la forme d'un objet individuel devrait être disponible même pour les patients atteints du syndrome de Balint. Ajoutons que Robertson et al. (1997) ont été les premiers à apporter des preuves en faveur de l'hypothèse selon laquelle l'information spatiale non accessible de manière explicite reste préservée de manière implicite. Ainsi, le système dorsal (au moins la portion occipito-pariétale), indispensable à la perception consciente de l'espace ne serait pas nécessaire à l'encodage implicite de l'espace (Kim & Robertson, 2001).

1.3.4. Synthèse

Ungerleider et Mishkin (1982) ont proposé l'existence de deux voies corticales de traitement visuel, la voie occipito-temporale ventrale impliquée dans l'encodage de l'identification d'un objet et la voie pariétale dorsale qui interviendrait dans la localisation et l'orientation d'un objet. Bien que d'autres points de vue concernant la distinction dorsale-ventrale aient été proposés depuis (par exemple, Mareschal & Johnson, 2003, chez des enfants de quatre mois ; Milner & Goodale, 1995), il n'en reste pas moins que la voie dorsale semble être utile dans le codage de l'information spatiale pour l'action. Cependant, la nature des codes impliqués n'a pas été complètement spécifiée. La description de ces différentes études, que nous avons proposée, n'avait d'autre but que de montrer la séparation des deux traitements et leur intégration (par exemple, dans le syndrome de Balint). Ajoutons qu'une dichotomie entre la voie ventrale et la voie dorsale pourrait également exister dans le domaine de l'imagerie mentale (voir Mellet, 1998).

2. Distinction entre les relations métriques et les relations catégorielles

Cette partie porte principalement sur la distinction entre les relations métriques et les relations catégorielles, telle que proposée par Kosslyn (1987). Après avoir exposé le modèle de Kosslyn et Koenig (1992), nous donnerons des définitions précises de ces deux types de relations puis nous nous attacherons à justifier la pertinence de l'existence de sous-systèmes de traitement distincts impliqués dans les deux types de relations. Ensuite, nous expliciterons l'existence d'un effet de pratique observé dans le traitement des relations spatiales visuelles. Enfin, nous discuterons de l'implication des relations spatiales visuelles dans d'autres types de jugements que les jugements purement visuels.

2.1. Le modèle de Kosslyn et Koenig (1992)

La distinction entre les représentations de relations spatiales catégorielles et coordonnées (ou métriques) a originellement été proposée dans les travaux de Kosslyn (1987, 1994) et de Kosslyn et ses collaborateurs (Kosslyn, Flynn, Amsterdam, & Wang, 1990), et plus particulièrement dans le modèle de la reconnaissance visuelle de haut niveau de Kosslyn et Koenig (1992), élaboré avec une approche computationnelle.

2.1.1. L'approche computationnelle en vision

« *The computational approach to the study of vision inquires directly into the sort of information processing needed to extract important information from the changing visual image-information such as the three-dimensional (3-D) structure and movement of objects in the scene, or the color and texture of objects surfaces. An important contribution that computational studies have made is to show how difficult vision is to perform and how complex are the processes needed to perform visual tasks successfully* » (Hildreth & Ullman, 1989, p.581). Se basant sur l'idée de l'existence d'une « **théorie computationnelle** » (telle que définie par Marr, 1982), qui propose d'appréhender le cerveau comme composé de sous-systèmes de traitement qui interprètent et transforment les données, Kosslyn (1987) définit une computation de la

manière suivante : « (...) *a computation can be regarded as a « black box” that transforms input in a systematic, informationally interpretable way. A theory of a computation is a theory that specifies what must be computed and why* » (Kosslyn, 1987, p.150).

Plus tard, l'analyse computationnelle a été définie par Kosslyn et Koenig comme « *a logical exercise aimed at determining what processing subsystems are necessary to produce a specific behavior, given specific input* » (Kosslyn & Koenig, 1995, p.41), un sous-système de traitement correspondant à « (...) *a functional description of a neural network* » (Kosslyn, 1987, p.159). Plus précisément, il peut être décrit comme « (...) *a functional unit; it is a set of neurons delineated on the basis of what the neurons do. A processing subsystem characterizes a group of neurons that carry out a computation or set of related computations to perform one component of a task* » (p.150). Kosslyn et Koenig (1992) ont différencié plusieurs groupes de sous-systèmes interagissant lors de l'identification d'un objet. Ces sous-systèmes composent une architecture fonctionnelle, décrite sur la Figure 1.

2.1.2. Présentation du modèle de Kosslyn et Koenig (1992)

Dans cette partie, nous décrirons brièvement chacun des sous-systèmes du modèle de la vision de haut niveau de Kosslyn et Koenig (1992), avant de nous attacher plus particulièrement aux deux sous-systèmes d'encodage des relations spatiales, le sous-système d'encodage des relations spatiales catégorielles et le sous-système d'encodage des relations spatiales coordonnées ou métriques. Notre description se réduira à la modalité visuelle du modèle.

Le premier sous-système du modèle est celui du buffer visuel (« *visual buffer* »), une mémoire tampon dont le rôle premier est la capture d'images rétiniennes. Il correspond à un ensemble de régions corticales rétinotopiques (c'est-à-dire organisées spatialement) qui reçoivent des inputs (informations qui arrivent au niveau d'un système) de V1. Le buffer visuel ne permet pas d'identifier les objets ni de les distinguer du fond. Comment alors reconnaissons-nous un même objet quand celui-ci apparaît à différents endroits du buffer visuel ? Sa nature spatiale préserve les relations spatiales entre les différentes localisations de l'espace, les localisations proches dans le buffer correspondant à de petites séparations entre les objets. C'est l'attention qui nous permet de comprendre comment nous identifions les objets lorsqu'ils apparaissent à différents endroits sur la rétine. Considérons l'attention spatiale visuelle comme une « fenêtre » se déplaçant dans le buffer visuel. Ainsi, celui-ci comprendrait une fenêtre attentionnelle (« *attention window* ») qui a pour fonction de sélectionner une région du buffer visuel, afin de réaliser un traitement détaillé et d'identifier des objets perçus en différents emplacements. La fenêtre attentionnelle peut se déplacer et s'ajuster (s'étendre ou se rétrécir) sur la partie de l'espace dans laquelle se trouve un stimulus et inhiber ainsi les informations contenues dans les autres régions de l'espace. Ce déplacement et cet ajustement peuvent être initialisés par le sous-système de modification de l'attention liée au stimulus (« *stimulus-based attention shifting subsystem* »), qui pourrait être sous-tendu par le colliculus supérieur.

Comme nous l'avons vu précédemment, la capacité à identifier les objets reflète (même si seulement en partie) un traitement du système ventral. Afin de mieux comprendre son rôle, Kosslyn et Koenig (1992) ont considéré le système ventral comme étant constitué de trois sous-systèmes réalisant des fonctions particulières : le sous-système de prétraitement (« *preprocessing subsystem* »), le sous-système d'encodage des relations de mouvement (« *motion relations subsystem* »), et le sous-système d'activation de patterns (« *pattern* »).

activation subsystem "). Le sous-système de prétraitement permet d'identifier des objets quelle que soit leur localisation dans le champ visuel et quelle que soit la distance à laquelle ils sont placés. Cette caractéristique est due à sa capacité d'extraire des propriétés « non accidentelles » des objets (voir Biederman, 1987). Ce sous-système serait sous-tendu par la région occipito-temporale. Simultanément, le sous-système d'encodage des relations de mouvement organise l'information reçue de deux manières différentes, en groupant d'une part, les éléments qui se déplacent selon des caractéristiques communes (par exemple, un déplacement simultané, dans la même direction et à la même vitesse), d'autre part, les patterns de mouvement utiles pour distinguer des objets. Ce sous-système serait sous-tendu par les aires MT et MST, qui bien qu'appartenant à la voie dorsale seraient en constante interaction avec l'aire V4 appartenant, elle, à la voie ventrale. Il pourrait recevoir de l'information du sous-système de prétraitement. Le sous-système d'activation de patterns contient un stock de représentations visuelles d'objets ou de parties d'objets qui peuvent être activées de plusieurs manières : les images mentales peuvent être formées par l'activation des représentations «top-down» ou par des outputs (informations qui sortent d'un système, résultant d'un traitement cognitif) provenant des deux sous-systèmes précédents, le sous-système de prétraitement et le sous-système d'encodage des relations de mouvement. Dans ce cas, les outputs du sous-système d'activation de patterns sélectionnent le pattern d'activation stocké qui s'apparie le mieux aux inputs. Ce sous-système aurait donc des fonctions de stockage et d'appariement des patterns visuels. Il est composé du sous-système d'activation d'exemplaires ou sous-système d'activation de patterns spécifiques et du sous-système d'activation de catégories ou sous-système d'activation de patterns catégoriels. Le premier représente les différentes instances d'une catégorie, tandis que le second contient une représentation prototypique de la catégorie, non spécifique. Le sous-système d'activation d'exemplaires serait sous-tendu par le lobe temporal inférieur droit alors que le sous-système d'activation de catégories serait sous-tendu par le lobe temporal inférieur gauche.

Les informations provenant du sous-système d'activation de patterns vont transiter vers la mémoire associative (« **associative memory** "). Si les informations fournies par le sous-système de prétraitement et par le sous-système d'encodage des relations de mouvement sont dégradées (par exemple, des parties de l'objet manquent ou ne correspondent pas), la représentation conduisant à la reconnaissance ne sera pas activée et le stimulus ne sera pas reconnu. Ainsi, les outputs provenant du sous-système d'activation de patterns seront eux aussi endommagés et, en conséquence, ils n'aboutiront pas à la formation d'une seule représentation dans la mémoire associative. Dans ce cas-là, l'information spatiale encodée par le système dorsal jouera un rôle important et pourra permettre la reconnaissance de l'objet. Dans le cas contraire, si les outputs provenant du sous-système d'activation de patterns s'apparient correctement avec un pattern stocké au niveau de la mémoire associative, alors la représentation issue du sous-système d'activation de patterns sera unique et suffira à reconnaître l'objet ; c'est pourquoi dans ce cas précis, l'intégration des propriétés spatiales de l'objet ne contribuera pas obligatoirement à l'identification de l'objet. Le premier cas est le plus courant ; souvent, plus d'une représentation stockée en mémoire associative peut potentiellement s'apparier à l'information provenant du sous-système d'activation de patterns. La mémoire associative contient les informations permettant l'identification du stimulus (par exemple, son nom, sa fonction) quelle que soit la modalité. Elle serait sous-tendue par plusieurs régions cérébrales dont le lobe temporal supérieur. Examinons maintenant comment l'information spatiale provenant du système dorsal se combine avec l'information issue du système ventral.

La voie dorsale va encoder les propriétés spatiales d'un objet (sa position, sa taille, son orientation), grâce à trois sous-systèmes : le sous-système d'appariement spatiotopique (« **spatiotopic mapping** »), le sous-système d'encodage des relations spatiales catégorielles (« **categorical spatial relations encoding subsystem** ») et le sous-système d'encodage des relations spatiales coordonnées ou métriques (« **coordinate spatial relations encoding subsystem** »). Le sous-système d'appariement spatiotopique ou sous-système de transformation des coordonnées rétinien en coordonnées spatiales spécifie des paramètres tels que la taille, la position ou encore l'orientation exacte du stimulus dans l'espace, avec des coordonnées égocentriques ou allocentriques. Le sous-système d'appariement spatiotopique serait sous-tendu par le lobe pariétal postérieur droit. L'information provenant de ce sous-système se dirige vers le système moteur et elle est également envoyée indirectement vers la mémoire associative où elle est combinée avec l'information provenant du système ventral. De plus, cette information transite vers les deux sous-systèmes d'encodage des relations spatiales. La nature de ces deux sous-systèmes étant largement détaillée dans la partie suivante, nous les caractériserons à ce niveau brièvement. Le principal rôle du sous-système d'encodage des relations spatiales catégorielles (dites relations spatiales *abstraites*) est de catégoriser les positions relatives des objets et de leurs différentes parties permettant ainsi la reconnaissance d'un objet, quelle que soit sa position. Il serait sous-tendu par le lobe pariétal postérieur gauche. Le sous-système d'encodage des relations spatiales coordonnées ou métriques serait plus spécifiquement performant pour saisir un objet ou encore pour reconnaître un visage. Il serait sous-tendu par le lobe pariétal postérieur droit.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, l'information provenant de l'encodage des parties d'un objet dans le système ventral et l'information relative à leurs relations spatiales dans le système dorsal, convergent en mémoire associative lorsque nous percevons un objet sous différentes configurations. Lorsque les propriétés de l'objet et les propriétés spatiales sont appariées, alors la représentation d'un seul objet est impliquée. Par contre, si nous encodons une séquence d'information dans le temps, le système se trouve confronté à un problème fondamental, c'est-à-dire où bouger les yeux. Trois solutions sont possibles : soit les orienter au hasard, soit les guider par le sous-système de modification de l'attention liée au stimulus, soit, enfin, les diriger selon les connaissances acquises ou les attentes. Cette dernière hypothèse (« **top-down hypothesis** ») conduit à considérer deux sous-systèmes supplémentaires : le sous-système de recherche de propriétés catégorielles (« **categorical property lookup subsystem** ») et le sous-système de recherche de propriétés coordonnées ou métriques (« **coordinate property lookup subsystem** »). Ces deux sous-systèmes permettent de rechercher de manière active l'information saillante en mémoire associative et d'utiliser cette information pour diriger l'attention vers une nouvelle localisation. Ils seraient sous-tendus respectivement par le cortex dorso-latéral préfrontal gauche et par le cortex dorso-latéral préfrontal droit. L'information métrique stockée peut être utilisée immédiatement pour guider l'attention, mais l'information catégorielle stockée doit être convertie par un sous-système de conversion de l'information catégorielle en information métrique (« **categorical-to-coordinates conversion subsystem** »). Ce sous-système serait probablement localisé au niveau du lobe frontal. Une fois que la position exacte de la partie pertinente de l'objet est identifiée, les coordonnées de cette partie sont calculées et transmises au sous-système de l'orientation de l'attention afin de déplacer et de réengager la fenêtre attentionnelle du buffer visuel vers la partie pertinente de l'objet. La mémoire associative envoie alors des informations sur le candidat le plus probable, dans le sous-système d'activation de patterns, ce qui facilite l'appariement du stimulus avec sa représentation lors du second cycle de traitement. Une alternative se pose : soit le stimulus

est reconnu, soit une nouvelle hypothèse est élaborée et testée au cours d'un nouveau cycle de traitement.

En résumé, le modèle computationnel de la vision de haut niveau élaboré par Kosslyn et Koenig (1992) permet (i) de rendre compte de la façon dont nous parvenons à reconnaître et à identifier les objets qui nous entourent, (ii) de localiser les régions cérébrales les plus aptes à effectuer chacune des étapes décrites à travers des sous-systèmes de traitement, (iii) d'expliquer les déficits visuels observés suite à une lésion cérébrale quand l'un ou l'autre sous-système (ou leurs connections) est lésé et (iv) d'intégrer les études comportementales, les études neuropsychologiques et les études d'imagerie cérébrale décrites plus haut. Sa description, même brève, était nécessaire afin de replacer les sous-systèmes d'encodage des relations spatiales catégorielles et métriques dans le contexte des autres sous-systèmes de traitement participant à la reconnaissance et à l'identification d'un objet. Désormais, nous focaliserons notre attention sur ces deux derniers sous-systèmes de traitement.

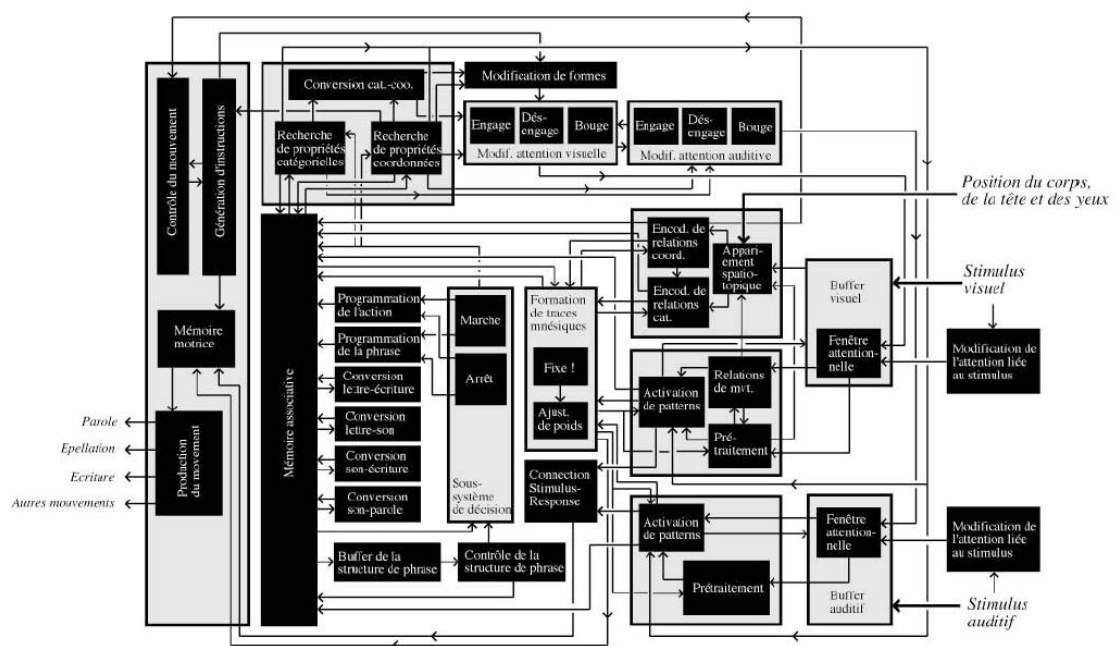


Figure 1 : Modèle de l'architecture fonctionnelle de la vision de haut niveau de Kosslyn et Koenig (1992) (notre traduction).

2.2. Définitions des relations catégorielles et des relations métriques

Les considérations computationnelles suggèrent que différentes sortes de représentations de relations spatiales, catégorielles et métriques, seraient utilisées dans différents buts (Kosslyn, Chabris, Marsolek, & Koenig, 1992). Les relations spatiales catégorielles entre les items sont décrites par des catégories discrètes ne se chevauchant pas. Au contraire, les relations spatiales métriques correspondent à des relations qui varient selon un continuum et qui sont requises dans des jugements de distance.

Relations catégorielles

Les représentations catégorielles assignent un rang de positions à une classe d'équivalence (en termes de « connecté à », « non connecté à », « à gauche de », « à droite de », « au-dessus de », « au-dessous de », etc.). Pour de nombreux objets, les parties conservent les mêmes relations spatiales catégorielles. Ainsi, la spécification des relations spatiales catégorielles est un aspect critique d'une représentation robuste de la forme d'un objet (voir Marr, 1982). Par exemple, quelle que soit la position d'un avion dans l'espace, c'est-à-dire lorsqu'il se trouve au sol ou lorsque le pilote lui fait faire des acrobaties, la position des ailes de l'avion par rapport à son fuselage est invariante. Dans de nombreux cas, il est utile de décrire les relations entre les parties dans des termes abstraits, en utilisant des relations plus restrictives que celles qui sont spécifiées par des descriptions topologiques. Ces représentations catégorielles prennent des propriétés générales de la structure spatiale sans tenir compte des propriétés topographiques spécifiques qui sont susceptibles de changer d'exemple en exemple. Ces relations sont catégorielles dans la mesure où elles assignent une configuration à des classes qui ont des frontières assez proches dont les membres partagent seulement des caractéristiques générales. Par exemple, deux objets peuvent se situer à la gauche d'un autre objet même s'ils diffèrent largement dans leurs localisations axiales verticales et horizontales.

Relations métriques

Il existe certains cas où les relations catégorielles n'offrent pas d'informations suffisamment pertinentes pour permettre la détection d'une variation subtile, par exemple, lorsqu'il s'agit de décider si l'espace entre deux rochers n'est pas trop grand pour l'enjamber. De même, pour des objets qui ne varient pas beaucoup d'un exemplaire à un autre et qui contiennent des relations spatiales entre leurs parties différant seulement de manière subtile de celles d'objets similaires, les représentations des relations catégorielles ne seront pas suffisantes pour reconnaître et discriminer ces objets. En effet, pour reconnaître un visage, les relations catégorielles seraient inutiles : tout le monde a des yeux qui sont très près l'un de l'autre et placés au-dessus du nez. Dans ces cas-là, on a besoin de connaître de manière plus précise, avec des informations métriques, la façon dont les objets et les parties se situent dans l'espace. Il s'avère alors nécessaire d'utiliser une représentation métrique dans laquelle les localisations des objets ou des parties d'objets sont spécifiées précisément en termes d'unités métriques.

Les représentations métriques spécifient des localisations spatiales précises d'une manière particulièrement utile pour guider l'action. Les unités de ces représentations ne sont pas des classes équivalentes ; plutôt, elles décrivent la division de l'espace la plus fine possible (sujette aux limitations de la résolution du système visuel). Ces représentations ne correspondent pas à des mouvements particuliers ; plutôt, elles spécifient les coordonnées spatiales pour pouvoir guider une multitude de mouvements (voir Kosslyn & Koenig, 1995,

chapitre 7). De plus, ce type de représentation spécifie les coordonnées d'objets ou de parties d'objets relatives à une seule origine, centrée par rapport à un objet ou à un espace (coordonnées allocentriques) ou par rapport au corps d'un individu (coordonnées égocentriques) ; il s'agit d'un « **système coordonné global** » puisqu'une seule origine est utilisée pour coordonner des objets ou des parties d'objets.

2.3. Des sous-systèmes distincts ?

Intérêts et justification de l'existence de sous-systèmes distincts

Consécutivement aux travaux d'Ungerleider et Mishkin (1982) et afin de préciser le rôle de la voie pariétale, Kosslyn (1987) a proposé de distinguer, à l'intérieur du système des relations spatiales, deux sous-systèmes qui permettraient de justifier l'existence de représentations des relations spatiales métriques et catégorielles. Considérons deux contextes dans lesquels nous utilisons l'information spatiale. Tout d'abord, il peut s'avérer nécessaire d'encoder les relations spatiales pour identifier un objet ou une scène. Pour atteindre cet objectif, le cerveau n'a pas besoin de représenter l'information métrique de manière précise ; les différences dans les positions précises de deux objets ou de deux parties ne sont souvent pas pertinentes (et en fait peuvent être nuisibles) pour les discriminer d'autres objets ou parties. Plutôt, les relations spatiales sont assignées à une catégorie, telle que « connecté à », « à gauche de », « au-dessus de ». Par ailleurs, nous utilisons l'information spatiale pour guider nos actions, comme bouger les yeux ou atteindre un objet ou encore naviguer entre des objets. En fait, de nombreuses cellules dans les lobes pariétaux postérieurs semblent jouer un rôle dans le contrôle du mouvement ou dans l'enregistrement de la position d'un effecteur. Pour guider une action, l'information spatiale métrique doit être spécifiée ; en sachant simplement qu'une table est proche d'un mur, cette seule information ne va pas nous éviter de nous cogner dans un coin de la table. Ces considérations conduisent à faire l'hypothèse que le cerveau représente les relations spatiales de deux manières, par des représentations catégorielles et par des représentations métriques.

De plus, pour Kosslyn et al. (1989), ces deux types de représentations qualitativement différents seraient produits par des sous-systèmes de traitement distincts. Pour les auteurs, chaque sous-système correspond à un groupe de neurones qui travaillent ensemble pour transformer une entrée en un type spécifique de sortie : plus la différence entre les réseaux d'entrée et de sortie est grande, plus il y a de chances que des sous-systèmes séparés réalisent les transformations. Par ailleurs, pour Banich et Federmeier (1999), le traitement spatial catégoriel et le traitement spatial métrique sont supposés orthogonaux puisque caractériser les relations spatiales entre deux items via un seul système (c'est-à-dire soit catégoriel soit métrique) ne fournit pas d'information sur les relations existant entre ces deux items via l'autre (voir Kosslyn, 1987 ; Kosslyn et al., 1989). Par exemple, décrire les relations entre une tasse et une bouilloire en termes catégoriels, tels que déclarer que la tasse est à la droite de la bouilloire ne fournit pas d'information sur leur relation métrique - c'est-à-dire si la tasse est à 6 mm, 1 cm ou 3 m de la bouilloire. Une validation de l'hypothèse de l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des relations spatiales catégorielles et métriques consiste à démontrer que chacun des deux types de relations spatiales siège *préférentiellement* (non obligatoirement de manière absolue) au sein de l'un des deux hémisphères cérébraux, cette préférence hémisphérique étant différente pour les deux types de relations spatiales. Ajoutons qu'une absence de spécialisation hémisphérique ne conduirait pas nécessairement à la conclusion selon laquelle un seul sous-système produirait les deux types de représentation, reflétant ainsi une absence de l'existence de

sous-systèmes de traitement distincts. En effet, une interprétation alternative consiste à considérer que des sous-systèmes de traitement distincts pourraient co-exister au sein d'un même hémisphère cérébral.

Hypothèses soutenant l'existence d'une spécialisation hémisphérique

Un argument en faveur d'une distinction entre les deux types de représentations repose sur l'observation d'une implication différenciée des deux hémisphères cérébraux. John Hughlings Jackson (1874/1915) est souvent cité pour être le premier à avoir noté que les hémisphères cérébraux possèdent différentes capacités visuelles. Par ailleurs, déjà en 1969, Kimura faisait référence à un système métrique spatial (« **spatial co-ordinate** ») probablement implémenté dans l'hémisphère droit. D'après Kosslyn (1987), l'hémisphère droit serait plus spécialisé dans le traitement métrique, tandis que l'hémisphère gauche serait plus spécifiquement engagé dans le traitement catégoriel. Ces résultats semblent particulièrement manifestes au niveau des lobes pariétaux postérieurs (Kosslyn, 1994 ; Laeng, 1994), en particulier au niveau des gyri angulaires (Baciu et al., 1999) et des lobules pariétaux inférieur et supérieur (Kosslyn, Thompson, Gitelman, & Alpert, 1998). Un des points initiaux de discussion par rapport à la théorie de Kosslyn (1987 ; et al., 1989) concerne ce que « spécialisé » signifie exactement. Est-ce que le traitement des relations spatiales catégorielles est exclusivement le domaine de l'hémisphère gauche, et, est-ce que le traitement des relations spatiales métriques est exclusivement le domaine de l'hémisphère droit, ou est-ce que la dichotomie est basée sur une différence *relative* de la contribution des deux hémisphères dans la computation des deux types de représentations de relations spatiales ? Cette controverse est posée depuis longtemps, et depuis longtemps, il est généralement accepté que la différence hémisphérique n'est que relative. Suite à l'observation de compétences préservées à *la fois* dans les jugements catégoriels et métriques des deux hémisphères cérébraux de patients « **split brain** » (voir section 2.3.3. de ce chapitre), Sergent (1991a) a conclu que les deux hémisphères cérébraux, lorsqu'ils sont déconnectés, conservent la capacité à traiter les deux types de relations spatiales. Ainsi, ils semblent posséder la capacité à réaliser *tous les deux* les deux types de traitement. Précisons que l'idée d'une spécialisation *absolue*, considérant que chaque hémisphère est impliqué uniquement dans la réalisation d'un seul type de jugement, a néanmoins toujours été rejetée par Kosslyn et ses collaborateurs (voir Kosslyn, 1987 ; Kosslyn et al., 1989). Sergent (1991a, 1991b) semble ainsi avoir conduit ses études à l'encontre de la théorie du débat initial concernant la spécialisation hémisphérique relative ou absolue, interprétant la théorie de Kosslyn comme si chacun des deux types de représentations spatiales était médiatisé par un seul des deux hémisphères.

Pour Hellige et Michimata (1989), une interaction des facteurs « tâche » et « champ visuel » serait un argument pour affirmer que des mécanismes de traitement de l'information qualitativement différents soutiennent les deux tâches. Cependant, Dunn et Kirsner (1988) ont fait l'hypothèse qu'une telle dissociation de traitement (c'est-à-dire une interaction « tâche » x « champ visuel ») n'exclut pas l'interprétation selon laquelle les deux tâches seraient contrôlées par un mécanisme commun. En effet, si les deux tâches varient en difficulté, des patterns différents de résultats n'impliquent pas nécessairement l'existence de sous-systèmes de traitement différents ; un seul système peut opérer différemment quand il se trouve confronté à différentes charges de travail en mémoire. Ainsi, un même pattern de résultats peut être obtenu, que les différentes tâches proposées dépendent de différents processus ou qu'elles dépendent des mêmes processus, qualitativement différemment. Pour Dunn et Kirsner (1988), la prise en compte d'un autre critère est nécessaire : « **l'association inverse** » (*reversed association*). Pour déterminer si une association inverse

existe, il est nécessaire de faire varier les deux tâches selon une variable ayant au moins trois conditions. L'association inverse correspond à une analyse de covariance des résultats obtenus dans deux tâches différentes en fonction d'une variable indépendante ayant au moins trois niveaux. Les performances obtenues dans l'une des deux tâches sont alors distribuées en fonction des performances obtenues dans l'autre tâche, pour les trois niveaux de la variable. L'observation d'une courbe non monotone suite à l'analyse de covariance est alors une preuve de l'existence de mécanismes distincts impliqués dans les deux tâches. C'est la raison pour laquelle les études de Hellige et Michimata (1989) et de Kosslyn et al. (1989) ont utilisé, en plus de la présentation dans le champ visuel gauche et dans le champ visuel droit, une troisième condition de présentation : la présentation dans le champ visuel « **bilatéral** » (Hellige & Michimata, 1989) ou dans le champ visuel « **central** » (Kosslyn et al., 1989). Dans le premier cas, une information identique était présentée dans chaque champ visuel, tandis que dans le second cas, l'information était présentée au centre de l'écran. En outre, Banich et Federmeier (1999) ont présenté les stimuli sous quatre conditions : en plus des présentations unilatérales, ils ont utilisé les deux présentations bihémichampiques, en champ visuel bilatéral et en champ visuel central. Précisons qu'il y a beaucoup à gagner à considérer les présentations bihémichampiques non plus comme de simples paradigmes contrôles des présentations unilatérales, mais en tant que paradigmes en soi, permettant de trancher entre des hypothèses théoriques.

Kosslyn et ses collaborateurs ont énuméré un certain nombre de mécanismes possibles non mutuellement exclusifs par lesquels les différences hémisphériques dans le traitement spatial pourraient se produire, entraînant une spécialisation hémisphérique qui ne s'expliquerait pas (ou pas seulement) par un traitement spatial. Premièrement, Kosslyn (1987) a suggéré que, puisque la plupart des langues dépendent de la formation de catégories variées, l'hémisphère gauche pourrait être adéquat pour le traitement catégoriel en général, comprenant le traitement utilisé en perception spatiale visuelle. Au contraire, il a émis l'hypothèse que l'hémisphère droit est spécialisé pour les relations spatiales métriques parce que traiter de telles relations est essentiel pour la navigation, qui est une tâche pour laquelle l'hémisphère droit est spécialisé. Deuxièmement, Kosslyn et al. (1992) ont suggéré que les différences hémisphériques dans le traitement des relations spatiales pourraient provenir des différences hémisphériques dans le traitement de l'information visuelle de plus bas niveau. Ils ont proposé que les réseaux prédisposés à recevoir de l'information provenant de neurones visuels ayant des champs récepteurs relativement larges se recouvrant beaucoup seraient sensibles à l'information spatiale de basse fréquence et à l'information spatiale métrique. Au contraire, les réseaux recevant une entrée filtrée sous des unités ayant de petits champs récepteurs se recouvrant peu seraient sensibles aux hautes fréquences spatiales et à l'information spatiale catégorielle. Une telle approche est compatible avec celle de Sargent (1985) qui a suggéré que les différences hémisphériques dans le traitement de l'information sensorielle peut influencer ou sous-tendre les différences hémisphériques dans des processus cognitifs de plus haut niveau. Cette hypothèse a été confirmée par Banich et Federmeier (1999). Néanmoins, précisons que l'hypothèse des fréquences spatiales, postulant que l'avantage de l'hémisphère droit pourrait s'expliquer en raison de sa plus grande compétence que l'hémisphère gauche dans l'extraction de l'information de basse fréquence, et que l'avantage de l'hémisphère gauche pourrait s'expliquer en raison de sa plus grande compétence que l'hémisphère droit dans l'extraction de l'information de haute fréquence, ne suffit pas à expliquer l'asymétrie hémisphérique, observée dans les traitements métriques et catégoriels. En effet, Horner et Freides (1996) ont validé l'hypothèse de l'existence de sous-systèmes neuronaux discrets pour les traitements catégoriel et métrique lorsque les stimuli étaient présentés à 3 degrés

d'angle visuel, mais non lorsqu'ils étaient présentés à 1 degré ou à 9 degrés d'angle visuel, ces présentations facilitant respectivement la manifestation des hémisphères gauche et droit. Or, dans les deux cas, un avantage de l'hémisphère droit a été observé pour les deux tâches. Troisièmement, Kosslyn (1987) a suggéré que les différences dans des biais attentionnels entre les hémisphères pourraient aussi contribuer aux différences dans le traitement spatial. L'hémisphère gauche est perçue comme présentant un biais attentionnel pour le traitement de l'information provenant de petites régions de l'espace - un biais induit en partie par une tendance pour le contrôle de l'information provenant de neurones ayant des champs récepteurs relativement petits et ne se chevauchant pas, qui fournissent un output d'une résolution relativement importante. Au contraire, l'hémisphère droit est perçue comme présentant un biais attentionnel pour consacrer de l'attention à des régions plus larges de l'espace parce qu'il tend à contrôler l'information provenant de neurones ayant des champs récepteurs larges et qui se chevauchent.

2.3.1. Dissociations fonctionnelles mises en évidence dans des études de champ visuel divisé

Plusieurs études qui avaient pour objectif d'obtenir une dissociation fonctionnelle entre les traitements catégoriel et métrique dans les deux hémisphères ont employé la méthode de champ visuel divisé. Cette méthode, qui consiste à présenter sélectivement un stimulus pendant une période très courte dans l'un des deux champs visuels, présuppose que l'hémisphère contralatéral a accès à ce stimulus avant l'autre (Beaumont, 1982 ; Bryden, 1982 ; Springer & Deutsch, 1981). Ce phénomène se manifeste par des temps de réaction plus rapides et moins d'erreurs quand le stimulus est présenté dans le champ visuel droit *versus* dans le champ visuel gauche (ce qui est le résultat d'un avantage relatif de l'hémisphère gauche) dans le jugement catégoriel. De même, des temps de réaction plus rapides et moins d'erreurs sont observés quand le stimulus est présenté dans le champ visuel gauche *versus* dans le champ visuel droit (ce qui est le résultat d'un avantage relatif de l'hémisphère droit) dans le jugement métrique.

Les premières études (Hellige & Michimata, 1989 ; Kosslyn et al., 1989) considérant l'existence d'une distinction entre les relations catégorielles et métriques se sont centrées sur l'existence d'effets des champs visuels, indiquant l'existence d'une latéralisation fonctionnelle. La plupart de ces expériences bénéficient d'un paradigme avantageux en utilisant le même ensemble de stimuli dans toutes les conditions. Ce paradigme a été mis au point par Hellige et Michimata (1989). Il consiste à présenter une barre et un point apparaissant au-dessus ou au-dessous de la barre. Les jugements catégoriel et métrique se différencient respectivement par une évaluation abstraite (si un point se situe au-dessus ou au-dessous de la barre) et par une évaluation plus précise (si un point se situe à moins ou à plus de 2 cm de la barre, représentant environ 2° d'angle visuel, étant donné la distance séparant les participants de l'écran). Dans l'expérience de Hellige et Michimata, le point pouvait occuper douze localisations possibles. Dans les deux premières expériences de leur étude, qui en comportait trois, Kosslyn et al. (1989) ont utilisé d'autres types de stimuli et d'autres types de tâches. Dans la première expérience, les stimuli étaient composés d'une ligne fermée délimitant une tache et d'un point se situant sur la ligne ou en dehors de la ligne, extérieure à la tache. Dans la deuxième expérience, les stimuli étaient composés de signes géométriques « plus » (+) et « moins » (-). Les tâches catégorielles consistaient à évaluer si le point était situé « sur » ou « en dehors de » la tache (Expérience 1) et si le « + » se situait à droite ou à gauche du signe « - » (Expérience 2). Les tâches métriques consistaient à estimer si les stimuli étaient séparés de plus ou de moins de 2 mm, représentant environ 0.13° d'angle visuel (Expérience 1) et de plus ou de moins de 1 inch (équivalent à 2.54

cm), ce qui représente environ 1.63° d'angle visuel (Expérience 2) étant donné la distance séparant les participants de l'écran. Enfin, dans leur troisième expérience, Kosslyn et al. (1989) ont repris le paradigme de Hellige et Michimata (1989) consistant en la présentation d'un point se situant au-dessus ou au-dessous d'une barre horizontale. La tâche catégorielle était identique, tandis que la tâche métrique différait dans le sens où le point se situait à plus ou à moins de 3 mm de la barre (représentant environ 0.35° d'angle visuel, étant donné la distance séparant les participants de l'écran), au lieu de 2 cm (2° d'angle visuel), distance utilisée dans l'expérience de Hellige et Michimata (1989). Cette différence avait pour objectif de rendre la tâche métrique plus difficile. Les auteurs (Hellige & Michimata, 1989 ; Kosslyn et al., 1989) faisaient l'hypothèse que, si les deux tâches dépendaient d'un seul processus, c'est-à-dire si les relations catégorielles et métriques n'étaient pas distinctes, alors il ne devrait pas y avoir de différences entre les performances pour les deux tâches entre les deux hémisphères. Au contraire, les résultats ont montré que la tâche métrique était mieux réalisée par l'hémisphère droit, tandis que la tâche catégorielle était mieux réalisée par l'hémisphère gauche. Ce résultat a été confirmé dans des études récentes (Christman, 2002 ; Niebauer, 2001 ; Okubo & Michimata, 2002). Des résultats comparables ont été obtenus chez des adultes normaux en utilisant des stimuli différents (Cowin Roth & Hellige, 1998) et chez des enfants (Koenig, Reiss, & Kosslyn, 1990).

Comme nous l'avons spécifié plus haut, certaines études (Banich & Federmeier, 1999 ; Hellige & Michimata, 1989 ; Kosslyn et al., 1989) ont utilisé des présentations bihémisphériques. Les essais en champ visuel gauche et en champ visuel droit (essais latéraux) sont examinés pour rechercher les effets de la spécialisation hémisphérique, tandis que les essais en champ visuel central et en champ visuel bilatéral (essais bihémichampiques) sont examinés pour étudier les effets de l'interaction interhémisphérique. Dans certaines études, une présentation en champ visuel bilatéral ou une présentation en champ visuel central résultait en des temps de réaction plus rapides par rapport à la présentation en champ visuel unilatéral, indiquant ainsi un traitement conjoint plus efficace des relations spatiales (Hellige & Michimata, 1989 ; Kosslyn et al., 1989, Expérience 3 ; Sergent, 1991b). L'effet bénéfique lié à la redondance des stimuli n'est pas surprenant, mais n'a pas toujours été trouvé (Banich & Federmeier, 1999 ; Hellige, Jonsson, & Michimata, 1988, avec des dessins de visages). En effet, selon Banich et Federmeier (1999), les résultats des essais bihémichampiques fournissent des arguments en faveur des hypothèses de Kosslyn (1987) selon lesquelles la taille d'un champ récepteur visuel ou la taille de la fenêtre attentionnelle pourrait influencer la facilité avec laquelle certains types de traitement spatial peuvent se produire. Plus spécifiquement, le traitement spatial catégoriel pourrait dépendre de cellules comportant des tailles de champ récepteur relativement petites ou pourrait être compatible avec un « focus » relativement petit de l'attention, tandis que le traitement métrique pourrait dépendre de cellules comportant des tailles de champ récepteur plus grandes ou pourrait être compatible avec un « focus » plus grand de l'attention. Le pattern de résultats observés par Banich et Federmeier (1999) pour les essais pour lesquels l'information était présentée au centre de l'écran (essais en champ visuel central) était similaire à celui observé pour les essais présentés dans le champ visuel droit, tandis que le pattern de résultats observé pour les essais pour lesquels une information identique était présentée dans chaque champ visuel (essais en champ visuel bilatéral) était similaire à celui observé pour les essais présentés dans le champ visuel gauche. De tels résultats sont cohérents avec la proposition de Kosslyn et al. (1992) selon laquelle un traitement catégoriel est plus adéquat pour des cellules ayant de petits champs récepteurs et un traitement métrique est plus adéquat pour des cellules ayant des champs récepteurs plus larges.

Des recherches réalisées consécutivement aux recherches princeps ont étudié les effets de certains facteurs susceptibles de moduler les patterns de latéralisation. Ces facteurs sont liés aux participants eux-mêmes (sexe et latéralité manuelle), tandis que d'autres sont relatifs aux stimuli (polarité, couleur), au mode de réponse, à la présence ou non d'un feedback, à la tâche (difficulté de la tâche) et à la pratique.

Sexe des participants

L'influence du sexe des participants dans les études en champ visuel divisé est sujette à débat. En effet, la plupart des recherches ayant étudié le facteur « sexe » n'ont pas révélé une latéralisation plus prononcée chez les hommes, les performances entre les hommes et les femmes n'étant pas différentes dans les tâches métriques et catégorielles (Hellige & Michimata, 1989 ; Kosslyn et al., 1989 ; Laeng, 1994 ; Laeng & Peters, 1995). En revanche, l'étude de Rybash et Hoyer (1992) reprenant le paradigme d'Hellige et Michimata (1989) a démontré que les performances des hommes étaient meilleures que celles des femmes au début des tâches métriques ; cette différence se manifestait par un avantage de l'hémisphère droit. De plus, les performances des femmes se sont révélées meilleures que celles des hommes dans les tâches catégorielles.

Latéralité manuelle

Contrairement au sexe, les différences de latéralité semblent présenter un réel effet sur la présence d'une interaction des facteurs « tâche » et « champ visuel ». Les droitiers et les gauchers ne semblent pas différer fondamentalement dans leur pattern d'asymétrie mais les asymétries moyennées semblent moins prononcées chez les gauchers. La raison en est qu'au niveau de la latéralisation, les gauchers représentent une population plus hétérogène que les droitiers (Hellige et al., 1994). La plupart des études ont contrôlé les influences possibles d'une latéralisation cérébrale atypique chez les gauchers en testant seulement des participants droitiers. Dans deux études (Hellige et al., 1994 ; Laeng & Peters, 1995) cependant, l'effet des différences dans la latéralité manuelle a été contrôlé de manière plus explicite. Dans les deux cas, la spécialisation hémisphérique attendue a seulement été confirmée chez les participants droitiers : chez les participants gauchers, soit un avantage de l'hémisphère droit a été observé dans les deux tâches (Hellige et al., 1994), soit aucune spécialisation hémisphérique dans l'une ou l'autre tâche (Laeng & Peters, 1995) n'a été constatée. Ces résultats confirment que les gauchers présentent souvent un taux de latéralisation moins élevé que les droitiers (Eviatar, Hellige, & Zaidel, 1997 ; Hellige et al., 1994). De plus, d'après Kosslyn et al. (1989), il semblerait exister une corrélation positive entre le degré de latéralité chez les droitiers et la probabilité d'obtenir le pattern prédit de différenciation hémisphérique dans les tâches catégorielles et métriques.

Caractéristiques de la présentation (polarité, couleur)

Les traits élémentaires des stimuli auxquels les participants doivent répondre ont fréquemment affecté les décisions spatiales critiques. La polarité du stimulus semble très importante. Avec des stimuli composés d'une barre horizontale et d'un point, Wilkinson et Donnelly (1999, Expérience 1) ont rapporté un effet de la polarité : les temps de réponse des participants étaient plus rapides quand les stimuli étaient présentés en blanc sur fond noir qu'en noir sur fond blanc. Cependant, les résultats ont attesté d'une absence d'interaction hémisphérique dans les tâches catégorielles et métriques quelle que soit la polarité. De plus, Cowin-Roth et Hellige (1998) ont utilisé des stimuli composés de deux points alignés horizontalement et d'une barre, apparaissant soit en vert sur fond rouge, soit en rouge sur

fond vert. Ils ont montré que la reconnaissance des stimuli présentés sur un fond rouge était plus difficile que la reconnaissance de stimuli présentés sur un fond vert à la même luminance, l'utilisation d'un fond rouge rendant difficile le traitement des basses fréquences. Kosslyn et al. (1992) ont mis l'accent sur le fait que les deux hémisphères cérébraux présenteraient différentes propriétés de champs récepteurs, ce qui, en retour, engendrerait une spécialisation fonctionnelle différente dans les tâches spatiales. Comme nous l'avons précisé plus haut, ils ont démontré que les réseaux prédisposés à recevoir de l'information provenant de neurones visuels ayant des champs récepteurs relativement larges se recouvrant beaucoup (principalement sous le contrôle du système magnocellulaire) seraient sensibles à l'information spatiale de basse fréquence et à l'information spatiale métrique. Au contraire, les réseaux recevant une entrée filtrée sous des unités ayant de petits champs récepteurs se recouvrant peu (principalement sous le contrôle du système parvocellulaire), seraient sensibles aux hautes fréquences spatiales et à l'information spatiale catégorielle. Ainsi, l'utilisation d'un fond rouge entravant le traitement des basses fréquences devrait avoir pour conséquence de gêner le traitement au niveau du système magnocellulaire, et ainsi, de diminuer les performances dans la tâche métrique uniquement. Effectivement, l'atténuation des performances dépendant de la voie magnocellulaire semble diminuer sélectivement les performances métriques (Cowin-Roth & Hellige, 1998 ; Hellige & Cumberland, 2001). Récemment, Okubo et Michimata (2002) ont confirmé que le fait de retirer les basses fréquences atténuait la performance métrique de l'hémisphère droit.

À un certain niveau de traitement, l'hémisphère gauche et l'hémisphère droit sont dominants pour le traitement de l'information visuelle réalisé par des canaux spécialisés dans les fréquences spatiales hautes et basses respectivement (Christman, Kitterle, & Hellige, 1991 ; Hellige, 1993 ; Kitterle, Christman, & Hellige, 1990 ; Sergent, 1983, 1987 ; Sergent & Hellige, 1986). L'analyse des résultats de l'étude de Cowin-Roth et Hellige (1998) a révélé une interaction des facteurs « tâche » et « **champ visuel** » lorsque les deux conditions de présentation (stimuli rouges présentés sur fond vert et inversement) étaient mélangées. Cependant, les performances issues de la tâche métrique étaient moins bonnes quand les stimuli étaient présentés en vert sur fond rouge qu'en rouge sur fond vert. Dans la tâche catégorielle, l'effet inverse a été observé, mais n'était pas significatif. Notons que la préservation de l'asymétrie hémisphérique dans la condition de présentation sur fond rouge est un argument en faveur du fait que les tailles des champs récepteurs des neurones ne diffèrent pas d'un hémisphère à l'autre. Il semblerait simplement que l'utilisation de l'information selon qu'elle provienne de cellules à grands ou à petits champs récepteurs soit mieux gérée respectivement par l'hémisphère droit et par l'hémisphère gauche. De plus, dans sa critique de la spécialisation hémisphérique associée à la distinction catégorielle-métrique, Sergent (1991a) a noté, avec de forts contrastes entre les stimuli cibles et le fond de présentation, aucun effet supposé de latéralisation, tandis que cet effet est apparu avec des contrastes plus bas. Les contrastes et la luminance pourraient spécifiquement affecter la contribution des cellules ayant différentes tailles de champ récepteur. Les résultats de Cowin-Roth et Hellige trouvent également une explication dans le modèle d'Ivry et Robertson (1998). Leur théorie du double filtrage des fréquences spatiales propose que le traitement sensoriel initial est identique dans les deux hémisphères ; c'est un mécanisme attentionnel qui sélectionnerait ensuite l'information pertinente à la réalisation d'une tâche par rapport à la région pertinente spécifique du spectre sensoriel. Ce modèle est proche de celui de Kosslyn (1994) dans la mesure où, dans les deux modèles, les différences hémisphériques seraient dues à des mécanismes de haut niveau comprenant un biais de sélection spécifique à chacun des deux hémisphères (les fréquences spatiales dans le

modèle d'Ivry et Robertson (1998), la taille des champs récepteurs des neurones dans le modèle de Kosslyn (1994)).

Mode de réponse

Les réponses fournies dans les études comportementales sont généralement manuelles ou vocales. Les premières, évaluées avec des touches de réponse situées sur un clavier d'ordinateur, sont effectuées soit avec l'index et le majeur d'une seule main, soit avec les index des deux mains ou soit avec simultanément les deux index et les deux majeurs. Les différents modes de réponse engagent les deux hémisphères différemment. En effet, une réponse d'une seule main recrute l'hémisphère contralatérale (et il convient donc de la contrebalancer à travers les participants ou les essais). Presser simultanément un doigt avec chaque main est le plus neutre par rapport à l'engagement hémisphérique (Hellige & Sergent, 1986), tandis qu'une réponse vocale serait principalement générée par l'hémisphère gauche. Cependant, sur toutes les études, le mode de réponse ne semble pas être un facteur important. Bruyer, Scailquin, et Coibion (1997) ont rapporté qu'un mode de réponse vocale atténuait légèrement la distinction hémisphérique entre les tâches catégorielles et métriques, mais elle ne disparaissait pas. Kosslyn et al. (1989) n'ont constaté aucun changement de performances dans les tâches catégorielles et métriques, quand le mode de réponse a changé, passant de manuel en vocal.

Feedback

Les participants peuvent bénéficier d'un feedback pour améliorer leurs performances sur, à la fois, les jugements catégoriels et métriques. L'aide apportée par le feedback est sans doute plus importante dans les jugements métriques que dans les jugements catégoriels, trop simples pour bénéficier d'un feedback. Cependant, d'après Bruyer et al. (1997), fournir un feedback peut biaiser les résultats. D'un côté, il pourrait soutenir les jugements métriques et finalement participer à la création de la supériorité de l'hémisphère droit (en révélant des effets « plafond »). D'un autre côté, il pourrait aider à l'établissement de labels catégoriels dans la tâche métrique, travaillant ainsi à l'encontre du facteur pratique. Le premier argument peut être contrecarré facilement si l'on fait une méta-analyse des études portant sur les jugements métriques : l'effet « plafond » est rarement obtenu (Jager & Postma, 2003). Bien que le fait de retirer le feedback sur les performances ait semblé éliminer la latéralisation de la distinction catégorielle-métrique (Bruyer et al., 1997), la raison de cette disparition reste peu claire. L'élimination du feedback a eu peu d'effet sur la précision ou la latence des réponses, et les deux types de tâches n'ont pas été différemment affectées par cette élimination. En résumé, à l'heure actuelle, il est difficile de vérifier et de mesurer l'influence réelle du feedback.

Difficulté de la tâche

Un facteur confondu possible indésirable pourrait être que les deux tâches spatiales diffèrent simplement en difficulté. Certes, comme l'ont remarqué Bruyer et al. (1997), les jugements catégoriels tels qu'ils sont implémentés dans la plupart des tâches sont presque systématiquement plus faciles que les jugements métriques. En effet, les jugements catégoriels s'opèrent à l'intérieur d'un cadre défini par un nombre très limité de réponses, généralement deux, tandis que la tâche métrique doit s'effectuer sur une échelle infinie, étant donné que l'on demande aux participants de calculer des coordonnées métriques exactes. Ainsi, d'après Jager et Postma (2003, p.507), « ***the functional lateralization thus could simply arise because one hemisphere (viz. the right hemisphere) is***

better in performing more difficult computations. Taking also into account that left hemisphere advantages for the (simpler) categorical tasks are usually weaker or completely absent, this could be a plausible alternative explanation ». Cependant, cette hypothèse est complètement réfutable. En effet, Kosslyn et al. (1989) ont été les premiers à introduire la notion de difficulté de la tâche en la manipulant systématiquement pour les deux tâches, catégorielles et métriques, par l'utilisation des temps de réponse et des taux d'erreur comme indices de la difficulté des tâches. Ils n'ont trouvé aucune preuve en faveur d'un effet de la difficulté de la tâche en soi.

D'autres recherches ont étudié les différences dans la difficulté des tâches à l'intérieur des tâches catégorielles et métriques (Bruyer et al., 1997 ; Parrot, Doyon, Démonet, & Cardebat, 1999 ; Slotnick, Moo, Tesoro, & Hart, 2001 ; Sergent, 1991a). Par exemple, une décision métrique telle que décider si un point est à moins ou à plus d'1 cm d'une barre horizontale est plus facile quand la configuration du stimulus inclut deux éléments qui sont *évidemment* à plus d'1 cm l'un de l'autre (Sergent, 1991a). Ce type de manipulation de difficulté de la tâche tend à interagir avec la latéralisation de la distinction catégorielle – métrique : la supériorité de l'hémisphère droit est atténuée pour les décisions métriques faciles (Bruyer et al., 1997 ; Parrot et al., 1999 ; Sergent, 1991a). Par contre, il pourrait même devenir visible pour les jugements catégoriels plus difficiles. De plus, parmi les différentes tâches métriques et catégorielles utilisées dans l'étude de Slotnick et al. (2001), le pattern d'asymétrie hémisphérique obtenu est cohérent avec les hypothèses de Kosslyn (1987) seulement lorsque les auteurs considèrent les résultats des tâches métriques les plus difficiles. Même si le facteur « difficulté » joue un rôle important dans le traitement des relations spatiales visuelles, ce facteur ne suffit pas à rendre compte du processus de latéralisation hémisphérique. Une conclusion plus plausible, selon laquelle la stratégie catégorielle serait plus appropriée aux stimuli faciles de manière générale, tandis que les stimuli difficiles tendent à engager une approche métrique, est avancée par plusieurs auteurs (par exemple, Jager & Postma, 2003 ; Kosslyn et al., 1989 ; Parrot et al., 1999).

Effet de pratique

Cette partie, fondamentale dans notre exposé, sera détaillée plus loin (section 2.4).

2.3.2. Simulations de réseaux de neurones

Kosslyn et al. (1990) ont fait l'hypothèse que les sous-systèmes de traitement des relations spatiales catégorielles et métriques correspondent à des réseaux neuronaux différents, chacun d'entre eux faisant correspondre une entrée (une représentation d'une paire de localisations) à une sortie (une représentation d'une relation spatiale). Les auteurs ont également fait l'hypothèse que des réseaux séparés sont utilisés pour réaliser des types de cartes entrée - sortie qualitativement différentes, comme lorsque différents types de représentations de relations spatiales sont traitées. En 1992, Kosslyn et al. ont conduit une série de simulations de réseaux de neurones dans le but de trouver des arguments supplémentaires en faveur de l'hypothèse de spécialisation hémisphérique. La première partie de cette étude avait pour objectif de rendre compte de l'existence de représentations séparées pour les relations spatiales catégorielles et métriques. Deux types de réseaux ont été comparés, chaque type réalisant à la fois les tâches catégorielles et métriques simultanément. Dans un type de réseau, toutes les unités cachées étaient connectées à toutes les unités de sortie (réseau non divisé), tandis que dans l'autre type de réseau, les unités cachées étaient séparées en deux groupes, chaque groupe étant connecté uniquement à des unités de sortie d'un type de tâches (réseau divisé). Les auteurs ont

proposé que lorsque deux types de tâches dépendent de computations distinctes, un réseau divisé aurait de meilleures performances qu'un réseau non divisé à cause d'une réduction des interférences d'une forme de computation sur l'autre. Effectivement, les résultats ont montré que les réseaux divisés produisaient généralement moins d'erreurs que ne le faisaient les réseaux non divisés. Ces résultats soutiennent l'idée que les deux types de relations spatiales sont conceptuellement différents, c'est-à-dire que leurs représentations ne sont pas logiquement entrelacées. La seconde partie de l'étude consistait à spécifier la nature du mécanisme sous-jacent aux différences hémisphériques observées dans le traitement de l'information spatiale catégorielle *versus* métrique. Comme nous l'avons souligné précédemment, une spécialisation hémisphérique dans l'encodage des relations spatiales pourrait être une conséquence d'une prédisposition différentielle des inputs provenant de neurones visuels à avoir différentes tailles de champs récepteurs et une sensibilité différente aux fréquences spatiales. Pour tester cette possibilité, les auteurs ont examiné le type de champs récepteurs que les unités cachées de différents réseaux ont développé après avoir été entraînés à traiter soit les relations catégorielles soit les relations métriques. Les résultats ont montré que les réseaux entraînés à réaliser une tâche catégorielle avaient développé des champs récepteurs plus petits que les réseaux entraînés à réaliser une tâche métrique. De plus, les réseaux ayant de larges champs récepteurs ont mieux réalisé la tâche métrique que les réseaux ayant de petits champs récepteurs, mais le pattern opposé attendu pour la tâche catégorielle n'était pas significatif, bien qu'une tendance ait été trouvée ; ces résultats rejoignent ceux observés dans les études comportementales. Par ailleurs, à travers leur modélisation, Kosslyn et al. (1992) ont testé les résultats de l'étude de Sergent (1991a), qui ont suggéré que le pattern de latéralisation ne se manifesterait plus quand les stimuli sont présentés avec un fort contraste. En particulier, Sergent a avancé l'hypothèse que l'avantage de l'hémisphère droit dans le traitement de l'information métrique disparaîtrait car l'hémisphère droit serait plus efficace dans le traitement de l'information de basse qualité. Kosslyn et al. (1992) ont proposé une explication différente permettant de rendre compte de la disparition de l'avantage de l'hémisphère droit : pour eux, elle serait liée au fait que lorsque les stimuli sont présentés avec de forts contrastes, un plus grand nombre de neurones requis dans le traitement de l'information de bas niveau apporteraient leur contribution aux entrées des systèmes de plus haut niveau dans les deux hémisphères. Dans ce cas, même un chevauchement minimal des petits champs récepteurs pourrait suffire à encoder l'information de la localisation spatiale métrique dans l'hémisphère gauche.

Cook, Früh, et Landis (1995) ont critiqué ces simulations de réseaux en affirmant que ces modèles ne traitaient pas des représentations « spatiales » ; les corrélations input – output, plus que les propriétés de processus d'encodage des relations spatiales, expliqueraient les performances de ces modèles. Cependant, Baker, Chabris, et Kosslyn (1999) ont rapporté de nouvelles simulations de réseaux de neurones sur les traitements catégoriel et métrique, en utilisant des modèles de simulation qui éliminent les corrélations input – output dans l'ensemble des stimuli. En accord avec les premiers résultats de Kosslyn et al. (1992), des performances relativement meilleures dans les tâches métriques ont été obtenues alors que la taille des champs récepteurs des réseaux augmentait.

2.3.3. Traitements catégoriel et métrique chez des patients

Une atteinte sélective des deux types de traitement des relations spatiales a été observée chez deux types de patients cérébro-lésés. Un premier groupe de patients examinés était composé de patients commissuraux ou patients appelés « **split-brain** » (Sergent, 1991a, 1991b). La raison principale pour laquelle cette condition neurologique plutôt unique

sert en général la recherche neuropsychologique sur la spécialisation fonctionnelle des hémisphères cérébraux est l'absence d'interférence interhémisphérique chez ces patients. Un second groupe de patients présentant des lésions cérébrales focales unilatérales a également permis de mettre en évidence les rôles différenciés des deux types de relations spatiales. En effet, une atteinte, soit des jugements de relations spatiales métriques soit des jugements de relations spatiales catégorielles, a été observée chez des patients présentant une lésion cérébrale, touchant soit le lobe pariétal droit, soit le lobe pariétal gauche respectivement (Laeng, 1994). Enfin, cette atteinte sélective a également été observée chez un troisième groupe de patients dont on a temporairement désactivé un hémisphère, en vue d'un traitement chirurgical pour soigner l'épilepsie ou des tumeurs (Slotnick et al., 2001).

Patients commissuraux

Dans deux études réalisées en 1991, Sergent (1991a, 1991b) a examiné la compétence des deux hémisphères à traiter les relations spatiales chez des patients « *split-brain* ». Dans la première étude réalisée en champ visuel divisé (Sergent, 1991a), dont le but était de déterminer si chaque hémisphère réalise les tâches catégorielles et métriques au-dessus du niveau de chance, les temps de réaction de trois patients commissuraux ont été enregistrés. Les principaux résultats ont révélé que les patients ont réalisé les tâches catégorielles et métriques de manière significative au-dessus du niveau de chance dans chaque condition de champ visuel. De plus, l'absence de différences globales au niveau des temps de réaction par rapport aux champs visuels est un argument pour affirmer que les deux hémisphères déconnectés ont tous les deux la capacité de représenter les relations spatiales catégorielles et métriques et ont traité cette information de manière également efficace. Dans une seconde étude (Sergent, 1991b), Sergent a montré que chez les patients « *split-brain* », une certaine information circule entre les hémisphères déconnectés, ce qui ne les rend pas entièrement libres d'une interférence réciproque ou d'une communication interhémisphérique. Ainsi, les deux hémisphères déconnectés auraient la capacité à partager le résultat de leurs opérations respectives pour produire une seule réponse. Les patients voyaient les stimuli en présentation bilatérale (stimuli présentés aux deux champs visuels simultanément) ou en présentation unilatérale. Comme nous l'avons vu précédemment, une présentation en champ visuel bilatéral résulte en général en des temps de réaction plus rapides par rapport à la présentation en champ visuel unilatéral, indiquant ainsi un traitement conjoint plus efficace des relations spatiales (Hellige & Michimata, 1989 ; Kosslyn et al., 1989, Expérience 3 ; Sergent, 1991a). Les résultats de Sergent (1991b) n'ont encore révélé aucun effet permettant de conclure que les représentations des relations spatiales catégorielles et métriques sont produites par des hémisphères différents, car les trois patients ont réalisé les deux tâches catégorielle et métrique au-dessus du niveau de chance après des présentations dans les champs visuels gauche et droit. De plus, de meilleures performances observées dans la condition de présentation bilatérale impliquent également une équivalence hémisphérique fonctionnelle ; probablement les *deux* hémisphères peuvent implémenter les opérations requises. Enfin, il semble que l'information visuo-spatiale pour laquelle à *la fois* les traits catégoriels et métriques étaient préservés, ait été transférée entre les hémisphères déconnectés. Les données ont suggéré une sorte de comparaison automatique de l'information passant d'un hémisphère à un autre, et une telle comparaison pourrait être effectuée à la fois sur l'information catégorielle et métrique. Sergent a conclu que si les deux hémisphères déconnectés ont la capacité de comparer leurs informations respectives sur les traits catégoriels et métriques, cela implique que les deux hémisphères sont capables de produire les deux types de représentations des relations spatiales.

Patients ayant des lésions cérébrales focales unilatérales

Laeng (1994) a testé les hypothèses de spécialisation hémisphérique de Kosslyn (1987) en demandant à des patients, ayant une lésion focale droite ou une lésion focale gauche et à un groupe similaire de participants contrôles sans lésion cérébrale, de réaliser deux tâches. Dans une première tâche (test d'identité), les participants voyaient des dessins contenant au moins un item, la plupart d'entre eux représentant des animaux, par exemple un gros chat à gauche d'un petit chat. Après un court délai, les participants devaient décider lequel d'entre deux nouveaux dessins présentés était identique au premier. Dans la moitié des items, le dessin présent à côté du dessin d'origine avait subi des transformations des relations catégorielles sans transformation des relations métriques entre les items (par exemple, le dessin original montrait un gros chat à *gauche* d'un petit chat ; le dessin à côté représentait un gros chat à *droite* d'un petit chat, tandis que la distance entre les chats était identique). Dans l'autre moitié des items, les variations du dessin présent à côté du dessin d'origine concernaient des transformations des relations métriques en conservant les relations catégorielles d'origine (par exemple, le dessin original montrait un gros chat à gauche d'un petit chat ; le dessin à côté représentait un gros chat à gauche d'un petit chat, tandis que la distance entre les chats était *réduite* ou *augmentée*). Les patients présentant une lésion dans l'hémisphère gauche ont fait en moyenne plus d'erreurs lorsque les transformations étaient catégorielles que les patients présentant une lésion dans l'hémisphère droit, tandis que ces derniers ont fait en moyenne plus d'erreurs lorsque les transformations étaient métriques. Ces effets étaient plus importants pour les patients présentant seulement une lésion au niveau des lobes pariétaux, en comparaison avec des patients présentant des lésions affectant à la fois les lobes pariétal et temporal ou les lobes pariétal et frontal. D'après Laeng, Shah, et Kosslyn (1999), ce résultat surprenant pourrait suggérer que chez des patients présentant une lésion au niveau des lobes pariétaux et d'autres structures (en particulier, les cortex frontal et temporal), le lieu de la lésion pourrait être localisé plus antérieurement. Par conséquent, la lésion pourrait avoir moins compromis la zone fonctionnelle spécifiquement impliquée dans le traitement des relations spatiales, qui serait localisée plus au centre et postérieurement dans le lobe pariétal. De plus, il est possible que des lésions plus étendues ou plus diffuses pourraient causer des déformations dans d'autres processus cognitifs au-delà des processus spatiaux, résultant en des pertes plus générales dans les performances cognitives. Dans une seconde tâche (test de similarité), Laeng (1994) présentait aux patients un premier dessin représentant au moins un objet, puis deux dessins, l'un ayant subi une altération des relations catégorielles et l'autre ayant subi une altération des relations métriques. Les patients devaient indiquer lequel des deux « **ressemblait le plus** » au dessin d'origine. Même si les deux groupes présentant une lésion tendaient à choisir les transformations catégorielles comme étant plus similaires aux originales, les patients présentant une lésion au niveau de l'hémisphère gauche évaluaient les dessins ayant des altérations catégorielles comme étant plus similaires aux dessins cibles plus fréquemment que les participants contrôles. Au contraire, les patients présentant une lésion au niveau de l'hémisphère droit ont jugé les dessins ayant des altérations catégorielles comme étant plus similaires aux dessins cibles moins fréquemment que les participants contrôles. Une analyse restreinte aux patients ayant des lésions limitées à l'un des lobes pariétaux a montré que les patients présentant une lésion pariétale gauche choisissaient plus fréquemment les dessins ayant subi une transformation des relations catégorielles alors que les patients présentant une lésion pariétale droite choisissaient plus fréquemment les dessins ayant subi une transformation des relations métriques. Ainsi, les sous-systèmes d'encodage des relations spatiales catégorielles et métriques sont tout aussi

capables de traiter les relations spatiales entre objets qu'entre parties d'objets (Kosslyn, 1994).

Patients ayant une désactivation corticale temporaire

Dans leur étude, Slotnick et al. (2001) ont testé des patients ayant subi une désactivation corticale temporaire de l'un des deux hémisphères. Ils ont ensuite conduit une série de tests cognitifs incluant des tâches visuo-spatiales catégorielles et métriques. Les auteurs ont testé les hypothèses de Kosslyn (1987) à l'aide des mêmes stimuli que ceux utilisés par Kosslyn et al. (1989) dans leurs trois expériences : une tache et un point, un plus (+) et un moins (-) et une barre et un point. Les tâches catégorielles étaient identiques, tandis que la distance utilisée dans les tâches métriques a été augmentée, elle était de deux inches (5.08 cm). Slotnick et al. (2001) ont observé que les patients chez lesquels une désactivation avait été provoquée au niveau de l'hémisphère gauche commettaient un plus grand nombre d'erreurs dans les tâches catégorielles que les patients ayant subi une désactivation au niveau de l'hémisphère droit. Au contraire, les patients chez lesquels une désactivation avait été provoquée au niveau de l'hémisphère droit produisaient un plus grand nombre d'erreurs dans l'une des trois tâches métriques que les patients ayant subi une désactivation au niveau de l'hémisphère gauche. Ce pattern de résultats n'a été observé que lorsque les tâches étaient relativement difficiles.

2.3.4. Données d'imagerie cérébrale

Des études de neuroimagerie conduites en TEP et en IRMf ont montré une forte activation dans l'hémisphère gauche dans la tâche catégorielle et une forte activation dans l'hémisphère droit dans la tâche métrique (Baciu et al., 1999 ; Kosslyn et al., 1998 ; Trojano et al., 2002). Kosslyn et al. (1998) ont conduit une étude de TEP pour rechercher les circuits cérébraux qui sont impliqués dans le traitement des deux types de relations spatiales. Suivant le travail de Laeng (1994), les aires pariétales étaient centrales dans cette étude. Les auteurs ont confirmé que notre capacité à encoder les relations spatiales dépendait d'au moins deux capacités distinctes. Au-delà de la spécialisation hémisphérique, les auteurs ont observé que ces jugements reposaient sur un large réseau de régions activées, impliquant principalement les régions pariétales (une région dans le lobe pariétal supérieur droit et une portion du precuneus droit, dans le lobe pariétal supérieur médian) dans les jugements métriques mais aucune région spécifique dans les jugements catégoriels. Cependant, par comparaison avec les traitements métriques, les régions frontales gauches étaient impliquées dans les traitements catégoriels. De plus, de nombreuses aires impliquées dans l'attention visuelle étaient activées, par exemple le noyau du pulvinar et le colliculus supérieur. Dans une expérience réalisée en IRMf avec un paradigme de type « bloc », Baciu et al. (1999) ont montré une latéralisation hémisphérique au niveau des gyri angulaires (situés dans les lobes pariétaux, aire de Brodman 39), qui résultait d'un avantage du gyrus angulaire de l'hémisphère gauche dans une tâche catégorielle et d'un avantage du gyrus angulaire de l'hémisphère droit dans une tâche métrique. Précisons qu'il existe des preuves (voir ci-dessous, paragraphe suivant) que le gyrus angulaire droit joue un rôle critique dans des tâches utilisant de l'information métrique précise. De plus, des lésions de l'hémisphère gauche impliquant le gyrus angulaire résultent souvent en un syndrome de Gerstmann, dont un aspect est l'interruption de la capacité à distinguer la gauche de la droite, une tâche typiquement catégorielle. Dans le domaine de l'imagerie mentale spatiale, Trojano et al. (2002) ont montré, dans une expérience d'IRMf conduite avec un paradigme bloc, dans un jugement catégoriel, une activation du lobule pariétal supérieur (LPS) gauche et du gyrus angulaire gauche. Dans un jugement métrique, ils ont montré une activation du LPS droit,

du gyrus angulaire bilatéral, et du sulcus frontal inférieur droit. Ensemble, ces études de neuroimagerie soutiennent l'idée que le traitement des deux types, catégoriel et métrique, de relations spatiales active des réseaux neuronaux distincts dans les hémisphères gauche et droit respectivement. Les lobes pariétaux postérieurs semblent particulièrement impliqués (le gyrus angulaire et le LPS), bien que les résultats soient moins convaincants pour le traitement spatial catégoriel que pour le traitement spatial métrique. Précisons cependant que, bien que les techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle soient particulièrement adaptées pour tester les hypothèses de Kosslyn (1987), la quantité de recherches sur ce sujet reste, encore à l'heure actuelle, limitée.

Le gyrus angulaire : un rôle plus général

Bien que le gyrus angulaire soit impliqué dans diverses tâches cognitives, son rôle est encore imprécis. Comme nous l'avons mentionné précédemment, certains auteurs postulent que cette structure pourrait être la base neuronale du traitement métrique (au niveau de l'hémisphère droit) et catégoriel (au niveau de l'hémisphère gauche) des relations spatiales visuelles (Baciu et al., 1999). De plus, Zacks, Rypma, Gabrieli, Tversky, et Glover (1999), dans une étude d'IRMf, ont mis en évidence une activation de la région située autour de la jonction occipito-temporo-pariétale gauche (incluant partiellement ou totalement le gyrus angulaire gauche) dans une tâche nécessitant une transformation, dans des coordonnées égocentriques, de dessins d'hommes vus de face, afin d'effectuer des jugements gauche-droite. Mais son rôle semble couvrir un champ plus large, en étant impliqué dans des tâches : (i) d'arithmétique, (ii) d'imagerie mentale visuelle spatiale, (iii) de lecture et (iv) de perception visuelle utilisant des stimuli émotionnels faciaux.

1. Le gyrus angulaire semble jouer un rôle dans des tâches impliquant des représentations spatiales des nombres «number line» (d'après Galton, 1880, les nombres peuvent être décrits selon une ligne mentale), c'est-à-dire dans des tâches de comparaison de nombres (Göbel, Walsh, & Rushworth, 2001, en rTMS, Transcranial Magnetic Stimulation) et dans des tâches de soustraction et d'addition (Menon, Rivera, White, Glover, & Reiss, 2000, étude d'IRMf ; van Harskamp, Rudge, & Cipolotti, 2002, étude chez un patient). Précisons que lorsque des réponses incorrectes sont suggérées, le gyrus angulaire n'est plus activé (Menon, Mackenzie, Rivera, & Reiss, 2002, étude d'IRMf événementielle).
2. Mellet et al. (2002) ont mené une étude TEP pour rechercher les régions cérébrales impliquées dans la représentation mentale d'une carte que les participants construisaient après lecture d'un texte descriptif (première tâche) et à partir d'une inspection visuelle de cette carte (seconde tâche). Les deux tâches impliquaient un réseau pariéto-frontal, mais seule la première tâche a entraîné une activation (bilatérale) au niveau du gyrus angulaire. De plus, le profil des participants ayant utilisé une stratégie métrique (attestée par une corrélation entre le temps de réaction et la distance à parcourir sur la carte) comparé à celui des participants ayant plutôt utilisé une stratégie catégorielle (attestée par une absence de corrélation) ne différait pas dans la latéralisation hémisphérique observée. Ainsi, Mellet et al. (2002) ont réfuté l'hypothèse de Baciu et al. (1999) et ont proposé que le gyrus angulaire serait plutôt impliqué dans des processus combinant des représentations symboliques et analogues, comme cela est le cas dans des tâches de lecture (combinant des traitements linguistiques et visuo-spatiaux) et de calcul (combinant des symboles et des représentations de magnitude). Le gyrus angulaire est également impliqué dans des tâches de navigation mentale (par exemple, Ino et al., 2002, étude d'IRMf).

3. Par ailleurs, le gyrus angulaire semble jouer un rôle dans la lecture. En effet, l'étude de Horwitz, Rumsey, et Donohue (1998) chez des participants normaux et chez des patients dyslexiques a montré que la lecture normale est basée sur des liens fonctionnels entre d'une part, le gyrus angulaire gauche et les aires associatives visuelles des lobes occipital et temporal, et d'autre part, le gyrus angulaire et les aires postérieures du langage. De plus, il semble impliqué dans l'apprentissage de la grammaire (par exemple, Skosnik et al., 2002, étude d'IRMf événementielle).
4. Enfin, en perception visuelle, des études réalisées en IRMf, avec un paradigme de type bloc et impliquant des stimuli émotionnels faciaux, ont mis en évidence une activation du gyrus angulaire. Une première étude (Gorno-Tempini et al., 2001) a observé une activation du gyrus angulaire gauche dans des jugements d'expressions de joie et de dégoût. Une autre étude (Iidaka et al., 2001) a montré une activation bilatérale du gyrus angulaire dans une tâche de genre, lorsque la condition de valence positive était comparée avec la condition de valence négative ; cette dernière comprenait un mélange d'expressions constituées principalement de la colère et du dégoût.

2.3.5. Synthèse et critique des études comportementales, des simulations, des études neuropsychologiques et des études de neuroimagerie

Une première critique concernant les effets de latéralisation observés peut être attribuée à la technique expérimentale elle-même. En effet, le choix de participants strictement droitiers (population plus homogène au niveau de la latéralité hémisphérique que celle des gauchers) et de stimuli noirs présentés sur fond blanc ayant des contrastes limités et une durée de présentation relativement courte (inférieure ou égale à 100 ms) a une probabilité plus grande de donner des résultats tranchés au niveau des engagements hémisphériques notamment dans la latéralisation des mécanismes catégoriels et métriques. De plus, il semblerait que les hémisphères soient différemment prédisposés au traitement des inputs provenant des neurones visuels ayant des tailles de champs récepteurs différents (c'est-à-dire des champs récepteurs relativement larges pour l'hémisphère droit et des champs récepteurs relativement petits pour l'hémisphère gauche) et soient différemment sensibles aux bandes de fréquences spatiales (c'est-à-dire des fréquences relativement hautes pour l'hémisphère gauche et des fréquences relativement basses pour l'hémisphère droit). Des champs récepteurs larges et des fréquences spatiales basses facilitent le traitement métrique, tandis que des champs récepteurs petits et des fréquences spatiales hautes facilitent le traitement catégoriel. Ces résultats ont été mis en évidence dans des études de simulation informatique. Pour aller plus loin, la différence dans la facilité d'utiliser des outputs de neurones ayant de larges ou de petits champs récepteurs pour traiter les deux types de relations aurait un effet direct sur des résultats concernant d'autres travaux portant sur la spécialisation hémisphérique. Les travaux de Delis, Robertson, et Efron (1986), de Robertson et Delis (1986) et de Sergent (1982) ont rapporté que l'hémisphère gauche est préférentiellement recruté pour encoder des parties, tandis que l'hémisphère droit joue plus particulièrement un rôle dans l'encodage de formes globales. Ainsi, l'hémisphère gauche pourrait être l'hémisphère le plus adapté pour recevoir des outputs de neurones ayant de petits champs récepteurs, tandis que l'hémisphère droit pourrait être l'hémisphère le plus adapté pour recevoir des outputs de neurones ayant des champs récepteurs plus larges (Kosslyn, Anderson, Hillger, & Hamilton, 1994).

Il faut mentionner également que la tendance vers des résultats en faveur d'une latéralisation dans des études en champ visuel divisé pourrait être troublée par le

phénomène appelé « **file drawer** » : le fait que de nombreuses études qui n'ont pas pu prouver une différence ou démontrer des résultats clairs, ne seront jamais publiés (Jager & Postma, 2003). Ainsi, la force du soutien pourrait être surestimée. D'un autre côté, il pourrait être mentionné que l'absence de spécialisation hémisphérique pourrait refléter l'insensibilité de la technique de champ visuel divisé plutôt qu'une équivalence hémisphérique. Cependant, deux autres lignes de preuves empiriques – les lésions des patients et les études d'imagerie cérébrale – fournissent des preuves convergentes en faveur de la latéralisation supposée des processus catégoriels et métriques. Même si certaines recherches ne vont pas dans ce sens (par exemple, Sergent, 1991a), l'étude sur une lésion unilatérale de Laeng (1994), de même, une étude TEP (Kosslyn et al., 1998) et une étude d'IRMf (Baciu et al., 1999) ont montré une différenciation hémisphérique dans la réalisation d'une tâche catégorielle comparée à une tâche métrique. Les preuves en faveur d'une supériorité de l'hémisphère droit ont été les plus claires. Comme il a également été conclu pour les expériences réalisées en champ visuel divisé, une spécialisation de l'hémisphère gauche dans le traitement des relations catégorielles semble plus difficile à révéler. Par ailleurs, quand cet effet se manifeste, il est beaucoup plus faible que l'avantage de l'hémisphère droit pour le traitement des relations spatiales métriques. Néanmoins, ce résultat devient évident lorsque les résultats provenant de toutes les expériences sont considérés ensemble dans une méta-analyse (voir Jager & Postma, 2003). Après avoir décrit les études comportementales, de simulation, neuropsychologiques et de neuroimagerie, il semble donc, comme l'avaient déjà énoncé, il y a plus de dix ans, Kosslyn et ses collaborateurs, que « **these findings suggest that the distinction between categorical and coordinate spatial relations encoding is both conceptually sound and computationally plausible** » (Kosslyn et al., 1992, p.575).

2.4. Effet de pratique dans le traitement des relations spatiales visuelles

2.4.1. Présentation

De nombreuses études ont indiqué qu'un avantage initial de l'hémisphère droit dans le traitement des relations spatiales métriques disparaissait après les premiers blocs d'essais (Baciu et al., 1999 ; Banich & Federmeier, 1999 ; Cowin & Hellige, 1994 ; Hoyer & Rybash, 1992 ; Koenig et al., 1990 ; Kosslyn et al., 1989 ; Michimata, 1997 ; Rybash & Hoyer, 1992). Cette diminution de l'implication de l'hémisphère droit était parfois accompagnée d'une augmentation de l'implication de l'hémisphère gauche (Baciu et al., 1999 ; Cowin & Hellige, 1994 ; Michimata, 1997 ; Rybash & Hoyer, 1992). Un tel effet de pratique a été observé dans la tâche catégorielle de l'étude de Michimata (1997) qui a rapporté, de manière surprenante, que non seulement l'avantage de l'hémisphère droit pour les jugements métriques mais *aussi* l'avantage de l'hémisphère gauche pour les jugements catégoriels disparaissait rapidement avec la pratique. Ce résultat reste à l'heure actuelle un cas très rare.

2.4.2. Deux groupes d'hypothèses

Deux explications ont été avancées pour rendre compte de la diminution de l'implication de l'hémisphère droit avec la pratique. D'une part, la disparition de l'avantage de l'hémisphère droit pourrait témoigner du développement, avec la pratique, de nouvelles représentations de relations spatiales catégorielles dans une tâche nécessitant pourtant le traitement de

relations métriques. Ce traitement (qui revient à estimer qu'un objet se situe près ou loin d'un autre objet) serait mis en place parce que moins coûteux et plus rapide (Banich & Federmeier, 1999 ; Kosslyn et al., 1989). D'autre part, l'hémisphère gauche pourrait apprendre, avec la pratique, à effectuer des traitements métriques (Cowin & Hellige, 1994 ; Rybash & Hoyer, 1992).

Hypothèses de Kosslyn et al. (1989) et de Banich et Federmeier (1999)

Avec la pratique, pour évaluer les distances métriques, les participants pourraient développer de nouvelles catégories ou des labels verbaux afin d'évaluer les positions proches et éloignées de la barre horizontale sans (ne plus) représenter explicitement la distance métrique. Le rôle de l'hémisphère droit au cours du traitement métrique peut alors être interprété de deux manières différentes. (i) Soit le sous-système d'encodage des relations spatiales métriques deviendrait sollicité moins souvent dans le jugement métrique ; en conséquence, dans des études de champ visuel divisé, l'avantage de présenter initialement des stimuli à l'hémisphère droit dans la tâche métrique devrait diminuer avec la pratique au profit d'un avantage de l'hémisphère gauche, ou du moins cet avantage masquerait l'avantage de l'hémisphère droit (Kosslyn et al., 1989). (ii) Soit le sous-système d'encodage des relations spatiales métriques serait toujours aussi sollicité dans le jugement métrique ; ainsi, dans des études d'imagerie cérébrale, l'observation d'un avantage de l'hémisphère gauche sur l'hémisphère droit ne serait pas nécessairement synonyme d'un plus grand recrutement de l'hémisphère gauche sur l'hémisphère droit. Simplement, étant naturellement plus expert que l'hémisphère gauche pour effectuer la tâche métrique, l'hémisphère droit n'aurait pas besoin d'autant de ressources que l'hémisphère gauche ; il en résulterait alors une moindre activation (voir chapitre 4, section 1.5, l'interprétation des cartes d'imagerie cérébrale).

Contrairement à l'effet de pratique observé dans la tâche métrique, aucun changement avec la pratique ne devrait se produire dans la tâche catégorielle ; si les catégories sont connues et peuvent être utilisées pour traiter les stimuli dès le début de l'expérience, changer de stratégie au cours du temps n'augmentera pas l'efficacité du traitement. La difficulté pour l'hémisphère gauche à réaliser la tâche métrique réside dans la transformation de la catégorie perceptuelle, qui se cache derrière le label. En effet, la formation de la catégorie perceptuelle devrait être logiquement antérieure au label verbal ; sans cette catégorie, le label ne peut pas être appliqué. La catégorie semble pouvoir se constituer assez vite, mais elle prend un temps relativement long pour se consolider (parfois, dès le deuxième bloc d'essais, Kosslyn et al, 1989, Expérience 3). En termes connexionnistes, des « poids rapides » peuvent être utilisés pour former une représentation initiale, mais un processus plus lent est nécessaire pour ajuster des poids permanents dans un réseau pour un apprentissage en continu (réactualisé à chaque moment) ; les relations spatiales catégorielles ne sont pas des propriétés statiques de notre répertoire mental. Les résultats de l'expérience 3 de Kosslyn et al. (1989) suggèrent qu'au moins une certaine forme de représentation des relations spatiales catégorielles se développe avec la pratique. L'interprétation formulée par Baciú et al. (1999) va dans ce sens. Les résultats de leur étude ont montré que le gyrus angulaire droit était activé plus fortement que le gyrus angulaire gauche pendant le début de la tâche métrique. Comparable aux effets de pratique trouvés dans les études de champ visuel divisé, l'implication du gyrus angulaire droit était réduite après la première partie de l'examen, avec un déplacement vers une implication plus grande du gyrus angulaire gauche dans la seconde partie. Pendant la tâche catégorielle, l'activation semblait plus forte dans le gyrus angulaire gauche à n'importe quel moment durant le temps de l'examen, ne révélant ainsi aucun effet de pratique.

Banich et Federmeier (1999) ont proposé que les participants pourraient appliquer plus d'une stratégie qui leur permettrait avec la pratique de traiter une tâche métrique d'une manière catégorielle. Une telle stratégie pourrait être déclenchée par l'écran de l'ordinateur lui-même devenant un cadre de référence, qui exclurait le besoin de calculer de manière métrique les relations spatiales entre les items sur lesquelles le jugement devrait être basé. Les auteurs ont ainsi fait varier les positions verticales des stimuli à travers l'écran, empêchant ainsi l'utilisation de l'écran de l'ordinateur en tant que cadre de référence. De manière inattendue, la latéralisation de la dichotomie catégorielle - métrique s'est alors restreinte aux *derniers* blocs d'essais ! Ainsi, bien qu'il existe des raisons de penser que la dichotomie catégorielle - métrique soit influencée par la pratique, les mécanismes exacts qui interviennent sont encore ouverts à débat.

Hypothèses de Rybash et Hoyer (1992) et de Cowin et Hellige (1994)

Rybash et Hoyer (1992) ont examiné la réalisation de deux versions des tâches spatiales catégorielles et métriques à travers plusieurs blocs d'essais. Une version dite « version originale » était identique à la tâche catégorielle (estimer si un point se situe au-dessus ou au-dessous d'une barre horizontale) et relativement proche de la tâche métrique (estimer si un point se situe à plus ou moins de 6 mm d'une barre horizontale), deux tâches proposées par Hellige et Michimata (1989) et par Kosslyn et al. (1989, Expérience 3). La seconde version dite « version modifiée » différait à la fois au niveau de la tâche catégorielle (estimer si une barre horizontale se situe au-dessus ou au-dessous de deux points alignés horizontalement) et de la tâche métrique (estimer si une ligne peut être contenue entre deux points). Cette version a été élaborée par Rybash et Hoyer pour résister aux effets de pratique, en étant plus difficile que la version originale. En effet, la longueur de la barre horizontale et de l'intervalle séparant les deux points variaient continuellement, ce qui forçait les participants à effectuer un jugement de type métrique à chaque essai. Ainsi, selon Rybash et Hoyer (1992), si les hypothèses de Kosslyn et al. (1989) étaient correctes, les participants devraient maintenir un avantage de l'hémisphère droit dans la version modifiée de la tâche métrique à travers tous les blocs d'essais. Les résultats ont montré que l'avantage de l'hémisphère droit observé dans le premier bloc d'essais de la tâche métrique disparaissait aussi vite pour les deux versions de cette tâche. De plus, une augmentation de l'implication de l'hémisphère gauche a été observée. Ayant fait l'hypothèse qu'une stratégie catégorielle ne pouvait pas se mettre en place dans la version modifiée, les auteurs ont conclu que l'hémisphère gauche a développé avec la pratique des capacités à former des représentations métriques.

Cowin et Hellige (1994) ont examiné l'influence d'un effet de pratique dans deux conditions de vision : dans une condition de vision normale et dans une condition de vision où les stimuli ont été brouillés suite à l'altération des fréquences spatiales visuelles élevées. Dans la tâche métrique et dans les deux conditions de présentation des stimuli, les auteurs ont observé un avantage de l'hémisphère droit, qui disparaissait au cours des essais. Pour eux, la disparition de l'avantage de l'hémisphère droit s'explique par l'augmentation des performances sur les essais présentés dans le champ visuel droit mais non sur les essais présentés dans le champ visuel gauche. Les auteurs ont proposé deux explications. Soit la performance dans le champ visuel droit augmente avec la pratique parce que l'hémisphère gauche apprend à mieux faire des jugements basés sur des catégories « près » et « loin » sur la base des hautes fréquences spatiales visuelles qu'il préfère. Alternativement, la performance dans le champ visuel droit pourrait s'améliorer avec la pratique parce que l'hémisphère gauche apprend à faire une utilisation plus efficace des mêmes informations visuelles qui conduit initialement à un avantage du champ visuel gauche (c'est-à-dire les fréquences basses). Un élément a permis aux auteurs de trancher : l'avantage initial dans

le champ visuel gauche obtenu dans cette expérience a disparu aussi vite avec des stimuli brouillés qu'avec des stimuli normaux. Cet argument va à l'encontre de la possibilité que la performance augmente sur les essais présentés initialement à l'hémisphère gauche *parce que* l'hémisphère gauche apprend à réaliser la tâche en utilisant le type d'information visuelle influencé par le masquage dioptrique (par exemple, des fréquences spatiales relativement hautes). Au contraire, pour les auteurs, les résultats sont plus cohérents avec la possibilité que suffisamment de pratique permet à l'hémisphère gauche d'utiliser plus efficacement la même information qui conduit initialement à un avantage dans l'hémisphère droit, information qui ne semble pas être influencée par le masquage dioptrique.

2.5. Discussion générale et extensions de la dichotomie catégorielle - métrique

Comme nous l'avons montré dans ce chapitre, le traitement de l'information visuelle nécessite d'établir des relations spatiales entre les éléments de l'espace visuel. Kosslyn (Kosslyn, 1987) et ses collaborateurs (Kosslyn & Koenig, 1992 ; Kosslyn et al., 1989) ont considéré que ces relations spatiales sont traitées par deux sous-systèmes distincts. L'existence de ces deux sous-systèmes se justifie par le fait que les relations spatiales entre deux objets peuvent être décrites non seulement en termes catégoriels (par exemple, un objet se situe au-dessus ou à gauche d'un autre) mais également en termes métriques (par exemple, deux objets sont séparés de deux ou de trois centimètres). Ainsi, les relations catégorielles attribuent des positions à une classe d'équivalence sans définir les propriétés métriques exactes, tandis que les relations métriques spécifient une information spatiale en termes de distance précise. Un argument en faveur d'une distinction entre les deux types de représentations repose sur une implication différenciée des deux hémisphères cérébraux. L'hémisphère gauche serait plus spécifiquement engagé dans le traitement catégoriel, tandis que l'hémisphère droit serait plus spécialisé dans le traitement métrique ; ces résultats semblent particulièrement manifestes au niveau du gyrus angulaire (Baciu et al., 1999). Il semble qu'il existe un terrain à la fois logique et empirique pour faire l'hypothèse de l'existence d'une différenciation hémisphérique dans le traitement des relations spatiales catégorielles et métriques. Cette division du travail entre les deux hémisphères pourrait avoir une origine issue de l'évolution. Engagé dans une catégorisation (verbale) depuis le départ, l'hémisphère gauche était prédisposé à une catégorisation spatiale. Parallèlement, son rôle dominant dans la navigation et dans l'orientation attentionnelle a favorisé l'hémisphère droit à effectuer des computations métriques. D'un autre côté, d'autres études ont montré que l'avantage de l'hémisphère gauche dans le traitement catégoriel ne pouvait s'expliquer (seulement) par une spécialisation de cet hémisphère pour le langage. L'étude de Dépy, Fagot, et Vauclair (1998) a montré l'existence de représentations catégorielles des relations spatiales chez le singe, chez lequel les capacités langagières ne sont pas, ou peu, développées. Par ailleurs, Laeng (1994) a réalisé une étude dans laquelle le degré d'atteinte des fonctions langagières (score au test d'aphasie), chez des patients présentant une lésion située dans l'hémisphère gauche, n'était pas corrélé aux performances de la tâche catégorielle. En conséquence, ces études suggèrent que le traitement catégoriel perceptif n'est pas toujours nécessairement accompli par un label verbal.

Les applications du traitement des relations spatiales sont plus larges que celles qui servent le domaine purement visuel, tel que nous venons de le décrire. Une première application concerne la compréhension des performances des actions motrices. En effet, comme nous l'avons déjà précisé, l'information spatiale métrique est très pertinente pour la navigation et pour d'autres activités spatiales (par exemple, pointer vers des objets

ou les attraper). Suivant cette idée, il est logique de considérer d'autres distinctions éminentes dans le traitement spatial : par exemple, la distinction existant entre les référents égocentriques et allocentriques. Milner et Goodale (1995) ont fait la distinction entre le codage égocentrique des localisations (reliant une localisation à une partie du corps) et le codage allocentrique, basé sur un cadre de référence absolu ou sur les relations entre de multiples objets de l'environnement. Comme ce qui distingue en partie les relations métriques et catégorielles, les références égocentriques et allocentriques recruteraient différents circuits neuroanatomiques, c'est-à-dire les voies dorsale et ventrale respectivement (Dijkerman, Milner, & Carey, 1996, 1998 ; Milner, Paulignan, Dijkerman, Michel, & Jeannerod, 1999) impliquant dans ce cas différents sites intrahémisphériques. En effet, il semble important de considérer des différenciations intrahémisphériques dans les traitements catégoriel et métrique. Les décisions catégorielles concernant les relations à l'intérieur d'un même objet, et concernant les localisations liées à des cadres de référence centrés sur les objets pourraient engager la région postérieure ventrale gauche. Des décisions comparables faites envers notre propre corps pourraient activer principalement la région postérieure dorsale gauche. De plus, le traitement métrique de relations existant entre des objets pourrait dépendre principalement des aires ventrales droites, tandis que le traitement métrique de localisations par rapport à nous-mêmes impliquerait la région dorsale droite. Tandis que ces hypothèses ne nous permettent pas de tirer des conclusions sur le mariage hypothétique entre la distinction égocentrique - allocentrique et la dichotomie catégorielle - métrique, elles offrent néanmoins une première indication en faveur d'une modulation intrahémisphérique de cette dernière.

Une deuxième application pourrait permettre de mieux comprendre le traitement des objets. En effet, nous devons identifier les objets sous une grande variété de points de vue : l'éclairage, les positions et les contextes. Principalement deux types de variabilité sont notables. Premièrement, les objets pourraient nous apparaître d'après de multiples points de vue, incluant des orientations non canoniques. Deuxièmement, des objets flexibles (par exemple, vivants) peuvent prendre différentes poses, dans lesquelles les positions précises des parties individuelles des composants sont très altérées (par exemple, lorsque l'on courbe la tête, elle peut être placée entre les genoux), mais où les relations abstraites entre les parties restent fixes (par exemple, la tête reste attachée au tronc). Les deux situations pourraient requérir l'établissement de relations spatiales générales abstraites entre les composants – c'est-à-dire les relations catégorielles – pour un traitement efficace (Laeng et al., 1999). Par extension, un troisième domaine, dans lequel le traitement des relations spatiales pourrait s'avérer pertinent est la reconnaissance d'un objet considéré comme particulier, un outil de description très complexe, le visage. Comme proposé dans certaines études (Kosslyn, 1987 ; Kosslyn et al., 1989 ; Niebauer, 2001), le visage pourrait effectivement permettre de mieux comprendre les processus spatiaux métriques et catégoriels. Le choix de visages humains en tant que stimuli visuels se justifie également par le fait qu'ils offrent des structures bien définies avec des traits distincts organisés. Les deux types de représentations, catégorielles et métriques, semblent notamment se manifester dans le processus de reconnaissance des visages (Christman & Niebauer, 1996 ; Cooper & Wojan, 2000).

Dans ce travail de thèse, nous souhaitons, après avoir étudié les mécanismes catégoriels et métriques avec des stimuli composés d'une barre et d'un point, mesurer leur degré d'implication dans le jugement d'expressions faciales émotionnelles. Tel sera le principal objectif de notre second chapitre théorique. En 1878, Francis Galton (voir Galton, 1879) présentait un article à l'*Anthropological Institute* dans lequel il décrivait ses recherches de portraits composés. En superposant des images de visages humains les unes sur les

autres, il considérait qu'il pouvait arriver à obtenir une seule photographie montrant les caractéristiques typiques des visages en réduisant ou en éliminant des variations peu communes. Galton (1879, 1883) pensait que les portraits composés pouvaient avoir de nombreuses utilisations potentielles. Il a étudié les types de « **physiognomies** » associées à différentes formes de criminalités. Bien que cette idée soit aujourd'hui largement dépassée, il y avait une observation intéressante et astucieuse derrière cette approche : Galton a noté que les visages forment une classe si homogène de stimuli visuels que l'on doit devenir sensible à des variations même mineures pour les différencier. Il l'a exprimé de la manière suivante : « ***the differences in human features must be reckoned great, inasmuch as they enable us to distinguish a single known face among those of thousands of strangers, though they are mostly too minute for measurement. At the same time, they are exceedingly numerous. The general expression of a face is the sum of a multitude of small details, which are viewed in such rapid succession that we seem to perceive them all at a single glance. If any one of them disagrees with the recollected traits of a known face, the eye is quick at observing it, and it dwells upon the difference. One small discordance overweighs a multitude of similarities and suggests a general unlikeness...*** » (Galton, 1883, p.3).

CHAPITRE 2. Étude du traitement des expressions faciales émotionnelles et de l'implication des relations spatiales visuelles dans leur discrimination (cadre théorique)

Les visages humains peuvent être considérés comme un type particulier d'objet complexe. Bien qu'ils semblent assez différents les uns des autres, ils forment en fait une classe de stimuli très homogènes dans la mesure où chaque visage présente les mêmes composants (yeux, nez, bouche, etc.) dans le même arrangement de base. Ainsi, la reconnaissance des visages (Schwaninger, Ryf, & Hofer, 2003) et des expressions faciales (White, 2002) demande de détecter de subtiles différences entre les composants et leurs relations spatiales. Cependant, malgré toutes les déformations que peut prendre un visage, notre système visuel semble avoir peu de difficultés pour identifier ou discriminer les individus et pour percevoir des différences d'expressions faciales. En effet, les visages forment une catégorie pour laquelle nous avons une grande expérience et sont « spéciaux » dans le sens où ils sont l'un des objets les plus communs que l'on rencontre tous les jours (Lê, Raufaste, & Démonet, 2003). De même, nous avons une grande expérience pour discriminer un sourire spontané, franc, d'un sourire forcé, « commercial » même si les différences entre les deux sont minimales (Ekman, 1992a ; Ekman & Davidson, 1993).

Par ailleurs, le visage fournit des informations importantes sur la compréhension des émotions, même s'il ne constitue évidemment que l'un de ses nombreux outils pour les étudier. D'après Campos (cité par Azar, 2000, January, p.44), « ***the face is a component [of emotion] (...). But to make it the center of study of the human being experiencing an emotion is like saying the only thing you need to study in a car is the transmission. Not that the transmission is unimportant, but it's only part of an entire system*** ». Dans notre travail, nous retiendrons principalement des émotions leur expression sur le visage ; « ***elles sont alors une modalité communicative de l'espace extracorporel au sein de l'état central fluctuant*** » (Vincent, 1994, p.339). « ***Il existe une correspondance étroite entre les différents visages des émotions et les signes biologiques de ces dernières. Plutôt que de décider si les uns sont la conséquence des autres, il est préférable de dire qu'ils sont les éléments indissociables d'un état central fluctuant dont ils manifestent le caractère unitaire*** » (p.352). De plus, Tiffany (Azar, 2000, January, p.47) a admis que « ***(...) the face is as good a measure [of emotion] if not better than any other one*** ».

Un des objectifs majeurs de cette seconde partie théorique est de réunir deux approches, qui apparaissent comme dissociées dans le champ de recherche de la reconnaissance de l'expression faciale des émotions (de Bonis, 1999). À travers ces deux approches seront exposées quatre hypothèses. La première approche tend à étudier comment l'extraction des traits et l'extraction des relations spatiales sur un visage peuvent

influencer la perception ou la reconnaissance de son expression émotionnelle. Nous exposerons (i) l'hypothèse de configuration et (ii) l'hypothèse des relations catégorielles et métriques. La seconde approche tend à aborder l'étude des expressions faciales sous un angle assez différent, en étant plus proche du domaine des émotions proprement dit. Dans ce dernier cas, l'expression faciale constitue un moyen d'étudier les émotions, par leur manifestation directe (Darwin, 1872 ; Ekman, 1993). Nous nous focaliserons sur l'hypothèse de l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles en abordant (iii) l'hypothèse d'automatisme et (iv) l'hypothèse d'un codage catégoriel et continu. Nous concluons ce chapitre en proposant que les deux approches sous-tendant l'étude des expressions faciales émotionnelles, consistant en la proposition de l'existence de deux types de mécanismes de traitement distincts, un mécanisme de traitement basé sur l'extraction des relations spatiales et un mécanisme de traitement basé sur l'émotion, pourraient coexister. Une façon de valider cette hypothèse serait de montrer l'existence d'une interaction de ces deux types de mécanismes de traitement, l'un purement visuel, l'autre émotionnel.

1. L'hypothèse de configuration

À la fin du XVIII^e siècle, une « science » inventée par Lavater se proposait de pouvoir dresser le profil psychologique des hommes à partir de leurs visages : il s'agissait de la physiognomie, qui postulait que le caractère pouvait se lire directement à partir des traits du visage. Aristote avait déjà proposé au IV^e siècle avant Jésus-Christ qu'un nez gros comme celui d'un cochon reflétait quelqu'un de stupide, qu'un nez plat comme celui d'un lion reflétait quelqu'un de généreux, etc. Aujourd'hui complètement abandonnée, cette science a laissé sa place à la notion de configuration, qui signifie que l'information faciale n'est pas seulement extraite par rapport aux traits du visage, mais dans sa globalité.

Au sens large, le terme de « configuration » est employé pour désigner à la fois les relations spatiales qui existent entre les traits, leurs interactions, et leurs différentes dimensions. Les yeux, le nez et la bouche, mais également dans une moindre mesure, les cheveux, le front, les joues ou encore le menton sont des candidats évidents pour être des traits des visages. Ces traits diffèrent les uns des autres par de nombreuses dimensions, comme la taille, la couleur, la texture et la forme. La longueur du nez ou la longueur du front ou encore l'ouverture de la bouche font partie des dimensions des traits faciaux. La majorité des auteurs séparent les « dimensions » des « traits » (par exemple, Bartlett & Searcy, 1993, qu'ils considèrent comme deux types de « composants »). Les deux termes se différencient par le nombre de modalités qu'ils peuvent prendre. En effet, un trait peut se définir comme une partie discrète du visage et est donc soit présent soit absent (par exemple, un grain de beauté sur un visage), tandis que les dimensions peuvent exister à deux niveaux voire plus (par exemple, un nez avec une certaine forme et une certaine taille). Les traits sont les constituants indépendants d'un objet. Dans le modèle de reconnaissance des objets à un niveau de base de Biederman (1987), un objet est composé d'un certain nombre de types de composants (« *geons* ») et la classe d'objets est déterminée à la fois par le type de « *geons* » et par les relations spatiales entre les différents « *geons* ». Dans cette théorie, chaque « *geon* » peut être considéré comme un trait local de l'objet. Le traitement des traits pourrait être pertinent pour reconnaître des individus ou des expressions émotionnelles sur la base de certaines de leurs caractéristiques physiques, par exemple, la reconnaissance

de Cyrano de Bergerac parce qu'il a un nez particulier, ou Mona Lisa par son mystérieux sourire enchanteur. Le visage ou l'expression est alors perçu(e) comme la somme de ses parties (c'est-à-dire ses traits) (Garner, 1978). Des catégories particulières de visages pouvant bénéficier de ce type de traitement sont les caricatures et les portraits-robots. Par exemple, en démontrant que le fait de caricaturer une expression augmente son intensité émotionnelle, Calder et al. (2000b) ont montré que l'intensité émotionnelle d'une expression faciale perçue est liée à la saillance des traits caractéristiques de l'expression (par exemple, comment les sourcils sont levés, comment les coins de la bouche sont retournés, etc.). De plus, pour Penry (1971, p.101), l'inventeur des portraits-robots, « **because each facial part is the sum of its individual details and the whole face is the sum of its sections, the total assessment of it requires a careful visual addition** ». Il ajoute (p.14) : « **in an otherwise similar profile the substitution of only one feature greatly alters the whole facial appearance. Whenever there is even a one-feature difference, the eye is tricked into assuming that the entire facial outline is different** ». Ainsi, Penry est un théoricien « **du traitement par traits** », qui admet cependant que le traitement de configuration joue un rôle dans la perception faciale. Par ailleurs, il semble que l'on soit sensible à certains traits, différents d'une expression à une autre, pour les reconnaître. Par exemple, le sourire permet d'identifier une expression de joie, tandis que des yeux écarquillés nous conduisent plutôt à identifier la peur. Morris, de Bonis, et Dolan (2002) ont montré que la reconnaissance de la peur était meilleure quand les visages exprimaient la peur avec les yeux (la bouche étant neutre) que lorsqu'ils exprimaient la peur avec la bouche (les yeux étant neutres). De plus, les auteurs ont observé, grâce à la technique d'IRMf événementielle, une activation de l'amygdale postérieure droite dans les conditions où (i) le visage entier exprimait la peur et (ii) seuls les yeux exprimaient la peur, par rapport aux conditions où (iii) seule la bouche exprimait la peur et (iv) ni les yeux ni la bouche n'exprimaient la peur. Par ailleurs, la reconnaissance de l'expression de peur était la meilleure quand le visage entier exprimait la peur, entraînant, pour cette condition comparée à toutes les autres, une activation de l'amygdale antérieure gauche. Ces résultats suggèrent que l'amygdale est sensible à la fois aux traits spécifiques et aux aspects de configuration des expressions faciales de peur.

Différents paradigmes ont cherché à mettre en évidence l'existence d'une configuration. Bassili (1978) a utilisé la technique inaugurée par Johansson (1973), consistant à disposer de petits spots illuminés sur un visage, ensuite filmé dans le noir. Cette méthode vise à montrer que l'on peut identifier un « visage », mais également différentes émotions à partir d'une configuration de lumières en mouvement, sans avoir d'informations structurales sur les traits faciaux. Par ailleurs, nous pouvons glaner des informations spécifiques sur les visages simplement à partir du pattern de transformations présent, sans faire appel aux informations portant sur la forme du visage, tout comme les marcheurs humains sont identifiés dans le paradigme de Johansson (1973) sans qu'aucun détail sur la forme de leurs membres ne soit donné. L'idée de configuration peut également être illustrée de la manière suivante : si vous prenez l'exemple d'un visage qui serait formé de deux parties, séparées par une ligne horizontale coupant le visage au niveau de la base inférieure des yeux, et appartenant à deux individus différents, tous deux familiers, alors le nouveau visage, formé par les deux parties, apparaît comme *non familier* et il s'avère difficile d'identifier les deux individus à qui appartiennent l'une et l'autre partie. La raison en est qu'une nouvelle configuration a émergé (Young, Hellawell, & Hay, 1987). Cet effet, dit « **l'effet de visages composés** » (« **composite face effect** ») a été ultérieurement adopté et adapté par Calder, Young, Keane, et Dean (2000c) et par White (2000) pour mettre en évidence l'existence d'un traitement de configuration dans la reconnaissance des expressions faciales. Pour cela, Calder et al. (2000c, Expérience 3) et White (2000, Expérience 1) ont présenté des

expressions faciales, dont les parties supérieures et inférieures, séparées au niveau du centre du nez, étaient congruentes (c'est-à-dire exprimaient une même émotion) ou non congruentes (c'est-à-dire exprimaient une émotion différente). De plus, les deux parties étaient présentées soit légèrement décalées selon l'axe horizontal soit dans le même axe. Une différence majeure entre les deux expériences consistait à présenter des expressions faciales appartenant à un même individu (White, 2000, Expérience 1) ou à deux individus différents (Calder et al., 2000c, Expérience 3). Les deux expériences ont montré que, lorsque les deux expressions n'étaient pas congruentes, la reconnaissance était facilitée lorsqu'elles étaient décalées. En revanche, lorsque les deux parties étaient congruentes, les résultats des deux expériences diffèrent. White (2000, Expérience 1) a observé que la reconnaissance de l'expression était facilitée par une présentation selon le même axe, tandis que Calder et al. (2000c, Expérience 3) n'ont mis en évidence aucun effet. Précisons que les tests statistiques utilisés dans les deux expériences pour mesurer l'influence d'une modalité sur l'autre étaient différents (test de Tukey et ANOVA respectivement). Ces recherches ont contribué à mieux comprendre l'effet du traitement de configuration, mais n'ont pas étudié précisément le rôle de chacune des parties du visage. De Bonis, De Boeck, Pérez-Díaz, et Nahas (1999) ont montré que certaines émotions, telle que la joie, semblent être perçues sur la base d'une seule des deux parties du visage (pour la joie, la partie inférieure), tandis que pour d'autres émotions, telle que la peur, la combinaison de la partie inférieure et de la partie supérieure serait nécessaire à leur perception. Ces résultats s'inscrivent dans une théorie probabiliste de la perception des émotions.

L'importance de l'information de configuration dans la perception des visages est largement acceptée. En effet, on peut la voir, par exemple, dans les peintures de visages créées depuis la moitié du XVI^e siècle par des peintres allégoriques tels que Giuseppe Arcimboldo et Utagawa Kuniyoshi (Hulten, 1987 ; Okabe, 1987). Dans ces types de peintures, les traits faciaux individuels peuvent être remplacés par des corps, des animaux, des fleurs, des fruits, ou même des livres ; néanmoins, une configuration faciale est facilement perçue (Kaufmann, 1987). Contrairement à la reconnaissance des visages, il semblerait que la reconnaissance des objets ne soit pas sous-tendue par ce type d'information. En effet, la spéculation la plus commune dans la littérature est que la reconnaissance des visages utilise des représentations de configuration, tandis que la reconnaissance des objets à un niveau de base utilise des représentations de traits. Malheureusement, comme l'ont souligné plusieurs recherches (Bruce & Humphreys, 1994 ; Cooper & Wojan, 2000), cette proposition reste vague. En effet, si l'on admet que l'identification d'un visage utilise des représentations de configuration, alors on peut en conclure que dans l'identification d'un visage, les relations réciproques entre les éléments du visage sont importantes. Cependant, il semble qu'une certaine forme de représentation de configuration est utilisée de la même façon pour la reconnaissance d'un objet à un niveau de base, sinon on devrait être capable de reconnaître des versions des objets lorsque leurs fréquences spatiales sont brouillées aussi bien que lorsqu'elles sont intactes. D'un autre côté, si l'on suppose que les objets à un niveau de base sont reconnus avec des représentations de traits, alors on peut admettre qu'une certaine forme de primitive visuelle est extraite de l'image en tant que partie du processus de reconnaissance. Cependant, une certaine forme de traits est également probablement extraite pendant l'identification des visages, puisque tous les systèmes de reconnaissance des formes doivent utiliser certaines formes de traits primitifs (même s'ils sont de simples pixels). Il est fortement probable que les deux types de représentations, sous-tendant l'information relative aux traits et l'information relative à la configuration, sont utilisés lorsque l'on perçoit et que l'on se souvient de visages. Dans ce cas, la première est souvent considérée moins importante que la seconde (Bartlett

& Searcy, 1993 ; Diamond & Carey, 1986 ; Garner, 1978 ; Rhodes, Brake, & Atkinson, 1993 ; Searcy & Bartlett, 1996).

Le terme de « configuration » a été utilisé indifféremment et il convient d'être plus précis sur la définition de ce terme. En effet, il couvre un large champ de définitions (« ***the many faces of configural processing*** », titre judicieux de l'article de Maurer, Le Grand, & Mondloch, 2002), qui sont parfois difficiles à distinguer les unes des autres de manière conceptuelle ou de manière empirique. Dans la suite de notre exposé, nous présenterons successivement diverses approches utilisant différemment le terme de configuration. Une première approche consiste à distinguer le traitement de configuration lié aux relations de premier ordre et le traitement de configuration lié aux relations de second ordre. Une seconde approche, dérivée de la première, considère un codage dit « relationnel ». Enfin, une troisième approche interprète l'information de configuration comme une information « holistique », alternative extrême. Après avoir décrit ces trois approches, une synthèse nous permettra de les comparer, puis de discuter du mode de traitement utilisé dans la reconnaissance des visages et des expressions faciales. Enfin, nous exposerons des extensions de l'hypothèse de configuration, à travers trois hypothèses supplémentaires, et nous concluons sur l'ensemble des hypothèses.

1.1. Les relations de premier ordre et les relations de second ordre

Théorie de Diamond et Carey (1986)

Diamond et Carey (1986) ont distingué deux types d'information de configuration, les relations de premier ordre et les relations de second ordre. De manière générale, les propriétés relationnelles de premier ordre (« ***first-order relational properties*** ») font référence aux relations spatiales entre les parties d'un stimulus, par exemple, le fait que les yeux sont au-dessus du nez, ou qu'un arbre est à gauche d'un lac. Les auteurs postulent que nous utilisons des propriétés de relations de premier ordre pour reconnaître et discriminer des stimuli ayant des traits similaires mais ne partageant pas la même configuration, par exemple, deux paysages différents. Un exemple de relation de premier ordre dans une scène de paysage serait la distance entre un rocher au premier plan et un arbre au second plan (Diamond & Carey, 1986, p.110). Ainsi, des stimuli qui diffèrent sur l'information de configuration de premier ordre présentent des parties similaires dans des arrangements spatiaux différents, par exemple, deux paysages avec des lacs, des arbres et des montagnes ayant des relations distinctes les uns avec les autres (Rhodes, 1988, p.45). Par opposition aux propriétés relationnelles de premier ordre, les propriétés relationnelles de second ordre (« ***second-order relational properties*** ») correspondent à des relations existant entre des éléments qui partagent une *même* configuration (Diamond & Carey, 1986, p.110). Elles permettent ainsi de distinguer, par exemple, les visages de deux individus différents (ou, par extension, le visage d'un même individu présentant des expressions émotionnelles différentes). En effet, les visages (et, par extension, les expressions faciales émotionnelles) sont un exemple de stimuli qui, ayant le même arrangement de base de leurs parties, diffèrent par des perturbations subtiles de ce pattern. Ces perturbations sont des variations de l'information de configuration de second ordre (Rhodes, 1988, p.45, note de bas de page). Plus précisément, les propriétés relationnelles de second ordre font référence d'une part, à la configuration spatiale entre les parties d'un stimulus, et d'autre part, à la tendance centrale ou configuration spatiale prototypique de ses parties. Ainsi, pour un visage ayant des yeux largement espacés, la déviation de la localisation d'un œil sur ce

visage comparée au visage moyen est un exemple d'une relation spatiale de second ordre (Tanaka & Farah, 1991, p.368).

Une preuve en faveur de la séparation de ces deux aspects de traitement de configuration est que, lorsque les visages sont présentés à l'envers, la reconnaissance de leur identité basée sur la distance entre les traits est difficile alors que la détection des relations de premier ordre (c'est-à-dire percevoir un stimulus comme un visage) reste correcte (Maurer et al., 2002). De plus, de nombreux stimuli qui se différencient par leurs propriétés relationnelles de premier ordre ne sont pas encodés par leurs relations spatiales de second ordre ; la raison en est qu'une configuration prototypique de leurs parties n'existe pas. Les paysages sont un exemple d'une telle classe de stimuli : il n'existe pas de tendance centrale à l'arrangement d'arbres, de collines, et de lacs dans les paysages (Tanaka & Farah, 1991, p.368). Diamond et Carey (1986) ont souligné également que, même si une tendance centrale existe effectivement dans l'arrangement de parties d'une classe de stimuli, l'observateur doit être équipé de connaissances préalables sur la configuration prototypique des parties du stimulus pour qu'il puisse ainsi détecter les relations de second ordre. Diamond et Carey ont suggéré que, de toutes les classes de stimuli dont les structures spatiales permettraient l'encodage des propriétés relationnelles de second ordre, la seule pour laquelle la plupart des gens ont suffisamment d'expertise pour utiliser les propriétés de second ordre est la classe des visages (et, par extension, des expressions faciales émotionnelles). Même si des modèles de reconnaissance des visages basés seulement sur les traits de premier ordre ont été proposés (par exemple, Winograd, 1981), sous des conditions naturelles où il est utile de discriminer des centaines de visages, la reconnaissance des visages (et, par extension, des expressions faciales émotionnelles) requiert l'encodage de l'information sur des variations subtiles de la forme des traits faciaux ou de l'espace existant entre ces traits.

Théorie de Rhodes (1988)

Dans la continuité de la théorie de Diamond et Carey (1986), Rhodes (1988) a proposé que les traits utilisés pour discriminer les visages appartiennent à un continuum allant de traits « isolés » de premier ordre (« **first-order features** ») à des traits relationnels de second ordre (« **second-order features** »). Pour Rhodes, les traits de premier ordre sont verbalisables et correspondent à des traits de catégories discrètes, par exemple, les yeux, la bouche, le menton et le nez. Les traits de second ordre, considérés comme des traits de configuration, caractérisent les relations spatiales entre les traits de premier ordre, la position des traits de premier ordre et l'information sur la forme du visage. Ainsi, le continuum pourrait se diviser en deux parties (les traits relativement isolés ou discrets, et les traits relativement relationnels) auxquelles Rhodes ajoute une troisième catégorie, les traits de haut niveau (« **higher-order features** »), des propriétés émergentes des visages comme l'âge ou le sexe, etc., dont les valeurs seraient une fonction de groupes complexes de traits de plus bas niveau. Par exemple, l'âge pourrait se définir comme une fonction de la couleur des cheveux, de la tension de la peau, de la présence de rides, de la taille du front (qui change à cause des rides), de l'épaisseur des lèvres (la lèvre supérieure disparaît chez de nombreuses personnes âgées), etc. La distinction critique entre les traits de premier ordre, de second ordre et de haut niveau est que les traits de premier ordre peuvent être spécifiés sans référence aux autres traits, tandis que les traits de second ordre doivent être spécifiés par rapport à certains autres traits. Les traits de haut niveau sont une fonction de plusieurs traits de premier ordre et -ou- de second ordre.

Les résultats de l'étude de Rhodes (1988) soutiennent l'idée que les visages pris individuellement sont encodés en termes de leurs traits distincts. Par ailleurs, ils suggèrent qu'il est probable que de tels traits incluent à la fois des traits de premier ordre et de second ordre. Contrairement à Diamond et Carey, Rhodes propose que les traits de second ordre ne sont pas plus importants que les traits de premier ordre dans le processus de reconnaissance.

1.2. L'information relationnelle

L'hypothèse d'un traitement « relationnel » est une hypothèse dérivée du point de vue du traitement de configuration. D'après cette position, le traitement facial est spécial parce qu'il est particulièrement sensible à l'information relationnelle - une sensibilité qui pourrait aussi être perturbée en changeant l'orientation du visage et donc causer l'effet d'inversion des visages (le FIE, «*Face Inversion Effect*»).

Théorie de Baenninger (1994)

Baenninger (1994) a considéré qu'il était pertinent de distinguer deux types importants d'information de configuration utilisés dans la reconnaissance des visages. Ces deux types désignent tous les deux les relations spatiales entre les traits. Le premier type, qu'elle appelle « **the locational configuration** », dépend de la localisation absolue à laquelle les traits faciaux apparaissent dans un visage (par exemple, les yeux aux deux tiers supérieurs du visage, le nez au centre et la bouche au quart inférieur). Le second type, qu'elle appelle « **the relational configuration** », dépend de la localisation des traits les uns par rapport aux autres (par exemple, les yeux au-dessus du nez, lui-même au-dessus de la bouche). Baenninger a montré que le premier type d'information de configuration semble plus important que le second.

Théorie de Leder et Bruce (1998, 2000)

Leder et Bruce (1998) ont utilisé des termes similaires pour faire une distinction un peu différente entre l'information relative aux traits locaux (« **local features** ») et l'information relationnelle (« **relational information** ») des visages. La première information concerne, par exemple, l'épaisseur des sourcils, tandis que la seconde fait référence, par exemple, à la distance entre les yeux (p.451). Les auteurs ont proposé que l'information critique qui est utilisée dans la reconnaissance des visages repose sur les relations entre les traits. Dans une autre étude, Leder et Bruce (2000) se sont particulièrement intéressés à la nature de l'information de configuration ; en particulier, ils avaient pour objectif de trancher entre l'hypothèse relationnelle et l'hypothèse holistique. L'hypothèse holistique considère que les visages sont traités comme des « **Gestalt patterns** » ou des «*templates* ». Une représentation holistique peut se définir comme une représentation dans laquelle les traits (et dans une version plus radicale, les relations spatiales entre les traits) ne sont pas représentés explicitement. Nous reviendrons plus en détail sur la notion de processus holistique dans la partie suivante. Le problème est que, souvent, quand l'information relationnelle est étudiée, elle se trouve confondue avec l'information holistique, et inversement. Leder et Bruce (2000, Expérience 4) avaient pour objectif d'examiner si les relations entre les traits sont (i) encodées directement ou (ii) rappelées seulement par un processus « holistique ». Les visages qu'ils ont utilisés différaient les uns des autres seulement en termes de traits relationnels individuels. Par exemple, un visage différait d'un autre parce que son nez était plus haut ou parce que la distance entre les yeux était réduite.

Les auteurs ont proposé que si la proposition (i) était correcte, alors les participants devraient être capables de reconnaître les visages quand les traits relationnels étaient présentés isolément. D'un autre côté, si la proposition (ii) était correcte, alors le fait de présenter les traits relationnels à l'intérieur d'un visage devrait considérablement aider la reconnaissance. Les auteurs ont trouvé une capacité remarquable à reconnaître l'information relationnelle isolée et n'ont observé aucune augmentation significative des performances quand un contexte de visage (qui encourageait le traitement holistique) était ajouté. Dans toutes les conditions prenant en considération l'information relationnelle critique, les performances étaient élevées. De plus, lorsque les deux éléments qui constituaient le trait relationnel étaient incomplets alors la performance était fortement perturbée bien que le contexte fût toujours disponible. Ces résultats soutiennent le fait que l'information relationnelle traitée de manière locale peut être indépendante. Ceci est en accord avec les résultats de Macho et Leder (1998), qui soutiennent l'idée que ce genre d'information relationnelle (par exemple, la distance entre les yeux) n'interagit pas avec la disponibilité d'autres traits locaux dans une tâche de décision de similarité faciale. Notons que, dans une conférence récente (ESCAP 2003), Carbon affirmait que l'information locale est perçue systématiquement préalablement à l'information globale (Carbon & Leder, 2003).

1.3. L'information holistique

L'hypothèse holistique considère que les deux types d'information nous permettant de nous souvenir des visages, l'information relative aux traits et l'information de configuration, sont perçus comme une même entité, le visage dans sa globalité. Galton (1879) a proposé que l'information holistique serait plus vitale dans la reconnaissance des visages que l'information provenant des traits individuels ; actuellement, des chercheurs continuent d'approfondir cette hypothèse (voir Bruce, 1988, pour une revue détaillée). Cependant, les preuves empiriques pour soutenir une telle affirmation restent équivoques. Un facteur qui a contribué à la difficulté de résoudre cette question est le manque de définitions claires et acceptées des concepts de *traitement holistique* et de *traitement par traits*. L'hypothèse des traits repose sur l'idée que les représentations d'un objet visuel sont organisées de manière hiérarchique, l'objet dans sa globalité étant divisé en portions qui sont explicitement représentées comme des parties (voir Palmer, 1977). Par exemple, une maison serait décomposée par le système visuel en un ensemble de portes, de fenêtres, et d'un toit. La représentation de la maison qui en résulte consisterait en des représentations de ces parties, liées, d'une certaine façon, ensemble. Certains objets seraient décomposés en de nombreuses parties, d'autres en peu de parties ou pas du tout. Dans ce contexte, le fait que les visages soient reconnus de manière holistique signifierait que la représentation d'un visage utile dans la reconnaissance des visages n'est pas composée des représentations des parties des visages, mais plus comme un tout (« *a whole face* »). Bien que l'information visuelle provenant des yeux, du nez, etc. soit bien sûr incluse dans la représentation du visage, cette information ne serait pas contenue dans des « paquets » représentationnels correspondant à la partition du visage en ces traits. En d'autres mots, ces parties ou ces traits ne seraient pas explicitement représentés comme des unités de structure en tant que telles dans la représentation finale du visage. Au contraire, les visages seraient reconnus comme des « *templates* ».

Les principaux auteurs contemporains à défendre l'hypothèse holistique sont Tanaka et Farah. Ils ont proposé (Tanaka & Farah, 1991, 1993) qu'à la fois, l'information spatiale relationnelle et l'information relative aux composants étaient encodées dans une représentation holistique. Les visages à l'endroit seraient encodés comme des ensembles

indivisibles dans lesquels les parties individuelles (c'est-à-dire les composants) n'auraient pas de réalité psychologique. Tanaka et Farah (1993) ont soutenu que « (...) **faces are represented holistically, that is, without explicit representations of the features** » (p.228). Ils ont ajouté : « **by holistic representation we mean one without an internal part structure** » (p.241). De plus, les auteurs ont mis en évidence que l'identification d'un trait était supérieure quand la reconnaissance se faisait dans un visage que lorsqu'il s'agissait de reconnaître une partie isolée du visage. Cette proposition a été vérifiée pour les visages présentés dans une configuration normale, mais non pour les visages dont les fréquences spatiales étaient brouillées, les visages présentés à l'envers et les objets. Cependant, la distinction entre les notions « holistique » et « de traits » ne semble pas dichotomique, puisque les deux types de représentations pourraient être utilisés à différents degrés pour différentes classes d'objets. C'est pourquoi les auteurs ont souhaité reposer la question de savoir si les visages sont reconnus de manière holistique de la façon suivante : « **does face recognition rely on holistic visual representations to a greater degree than do other forms of pattern recognition?** » (Tanaka & Farah, 1993, p.226).

L'hypothèse holistique a deux interprétations possibles concernant la relation existant entre l'information relative aux traits et l'information relative à la configuration (Rakover, 2002) : d'une part, l'interprétation *d'accessibilité*, qui considère que le visage dans sa globalité est plus accessible en mémoire que ses parties, et d'autre part, l'interprétation *de codage*, qui considère que l'information de configuration est plus importante que l'information relative aux traits. Les deux interprétations sont très proches. La première interprétation, assimilée à une hypothèse holistique dite modérée, considère que la reconnaissance des visages est principalement basée sur le traitement de configuration et reconnaît que le traitement par traits joue quand même un rôle. La dernière interprétation, qui peut être assimilée à une théorie holistique plus *extrême*, propose que le traitement par trait joue peu ou pas de rôle, la reconnaissance des visages étant dominée par le traitement de configuration ; dans ce cas, « (...) **the representation of a face used in face recognition is not composed of representations of the face's parts, but more as a whole face** » (Tanaka & Farah, 1993, p.226). Cette interprétation est la plus populaire (Farah, 1992 ; Farah, Tanaka, & Drain, 1995 ; Farah, Wilson, Drain, & Tanaka, 1995 ; Tanaka & Farah, 1993 ; Tanaka & Sengco, 1997). Enfin, certains auteurs (par exemple, Bartlett & Searcy, 1993) parlent de propriétés « *wholistic* », notion très proche de la notion holistique.

1.4. Synthèse

1.4.1. Information de premier et de second ordre, information relationnelle et information holistique

Nous proposons que les traits de second ordre définis par Rhodes (1988) pourraient s'apparenter à l'information de configuration de second ordre proposée par Diamond et Carey (1986). De plus, comme Diamond et Carey, Rhodes, Brake, Taylor, et Tan (1989) considèrent que l'expertise est associée avec une plus grande utilisation de l'information de configuration des visages. Cependant, contrairement à Diamond et Carey, qui ont suggéré que les relations de second ordre sont plus informatives que les relations de premier ordre, Rhodes considère qu'entre les traits de premier et de second ordre, ces derniers ne sont pas plus importants. Par ailleurs, il nous semble que la théorie de Baenniger (1994), définie en termes de position absolue et relative des traits, ne donne pas d'information vraiment pertinente. En effet, tous les êtres humains possèdent des yeux, un nez et une bouche, traits positionnés dans cet ordre sur un visage, de haut en bas ; la configuration relationnelle

correspond à celle de Diamond et Carey. Cette étude n'était utile que pour comparer les performances des adultes et des enfants.

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de consensus sur la terminologie, puisque certains auteurs restreignent le terme « traitement de configuration » à un type de traitement relationnel, tandis que d'autres appliquent le terme sans discrimination aux trois types ou font une distinction entre seulement deux des trois types. Il demeure que l'information de configuration est très importante dans la perception des visages et des expressions faciales. Dans une certaine mesure, elle peut être considérée comme un exemple d'un résultat plus général qui fait que sous certaines conditions, les propriétés globales du stimulus prennent préséance dans la perception visuelle (Martin, 1979 ; Navon, 1977 ; Pomerantz, 1983).

Comment les travaux présentés dans les sections précédentes sont-ils liés à l'idée que la reconnaissance des visages et la reconnaissance des expressions faciales sont particulièrement dépendantes de la « configuration » ? Si, par « représentation de configuration », on entend une représentation dans laquelle les relations spatiales entre les parties d'un visage sont aussi importantes que les parties elles-mêmes (Haig, 1984 ; Hosie, Ellis, & Haig, 1988), alors on peut considérer que les concepts de représentations de configuration et de représentations holistiques sont très similaires, et même peut-être identiques. Dans une perspective extrême, si l'on considère que, dans les représentations de configuration, les relations spatiales entre deux parties du visage (par exemple, entre les deux yeux) sont spécifiées de manière aussi précise que les relations spatiales constituant une partie (par exemple, un œil est constitué d'une pupille centrale et de cils autour), alors il semblerait que les parties ont perdu leur statut spécial qui permettait de les distinguer des représentations holistiques. Probablement, pour cette raison, les termes « *holistique* » et « *configuration* » ont souvent été utilisés de façon interchangeable dans la littérature portant sur la reconnaissance des visages et sur la reconnaissance des expressions faciales. Une illustration est l'utilisation par certains auteurs (par exemple, White, 2000, pp.41-42) de l'expression « configuration holistique ». Dans une seconde perspective, Maurer et al. (2002) ont considéré le traitement holistique comme une sous-composante du traitement de configuration. D'après ces auteurs, trois types de traitement de configuration opèrent dans un certain ordre fonctionnel et neuronal : la détection d'un visage basée sur des relations de premier ordre, puis, le traitement holistique et, enfin, la détection des relations de second ordre. Cela dit, ils n'excluent pas la possibilité que les trois types de traitement de configuration opèrent largement en parallèle, ou que, sous certaines conditions, un plus haut niveau (par exemple, le niveau de la détection des relations de second ordre) puisse opérer de manière experte en l'absence de traitement à un autre niveau (par exemple, au niveau du traitement holistique). Enfin, n'oublions pas que l'origine de l'hypothèse holistique se trouve dans l'hypothèse de configuration. Il y a encore quelques années, jusqu'à la fin des années 1980 ou même le début des années 1990, ces deux hypothèses n'en formaient qu'une. En reprenant l'idée de l'existence d'une gestalt faciale, certains auteurs ont mis en relief l'idée de Galton, que l'on reconnaît les visages comme un tout (« *as a whole* », ou selon sa propre expression « *at a single glance* », voir la fin du chapitre 1), en dehors de toute distinction des termes « configuration » ou « holistique » (par exemple, Carey & Diamond, 1977 ; Diamond & Carey, 1986 ; Sergent, 1984b ; Young et al., 1987).

1.4.2. Information de configuration et information relative aux traits

Bien que l'on soit capable de reconnaître les visages d'après un trait tel qu'un nez original ou une moustache particulière, seuls quelques visages parmi la centaine ou le millier que la plupart d'entre nous peuvent identifier comportent de tels traits distincts. La majorité

des visages partagent tous la même configuration, ayant deux yeux latéralement séparés, alignés avec la partie supérieure d'un nez vertical, une bouche centrée au-dessous du bas du nez, etc. Puisque les visages sont si perceptivement homogènes, c'est une hypothèse raisonnable que d'affirmer que nous les discriminons par leur configuration unique. Aussi, bien que le visage de Philippe présente la même configuration générale que d'autres visages, il est un exemplaire absolument unique au monde. C'est cet exemple que l'on utilise pour le reconnaître et le nommer (Diamond & Carey, 1986 ; Rhodes & Tremewan, 1994). Il reste à déterminer comment les représentations en mémoire utilisées pour ces deux processus (traitement à partir des traits et traitement à partir des relations entre les traits) pourraient différer (voir Bruce, 1988 ; Diamond & Carey, 1986 ; Garner, 1978 ; Rhodes et al., 1993 ; Searcy & Bartlett, 1996 ; Tanaka & Farah, 1993 ; Tanaka & Sengco, 1997).

Pour répondre à la question de savoir si l'on reconnaît les expressions comme des « configurations holistiques » ou si les expressions sont représentées de la même manière que les objets sont reconnus à un niveau de base, c'est-à-dire comme des descriptions basées sur leurs parties, White (2000) a avancé deux arguments intuitifs. D'une part, il semble que les expressions sont effectivement des configurations holistiques dans le sens où les parties du visage, seulement par leur ajustement, interagissent pour créer de nouvelles expressions (Ekman & Friesen, 1975) : par exemple, une expression de tristesse devient une expression de colère quand les sourcils orientés vers le haut deviennent orientés vers le bas. D'autre part, il y a des raisons de penser que les expressions ne sont pas des configurations holistiques dans le sens où, si l'on est contraint d'identifier les visages en tant que configuration à cause du nombre énorme de visages potentiellement identifiables, nous ne sommes pas contraints d'utiliser cette stratégie pour les expressions faciales, à cause du nombre relativement petit d'expressions primaires (six expressions émotionnelles et l'expression neutre par exemple, pour Paul Ekman). Utilisant l'effet de « visages composés » adapté aux expressions faciales, White (2000) a conclu à l'existence d'un traitement de configuration des expressions faciales. Cette conclusion corrobore les résultats d'une étude réalisée peu avant (White, 1999). D'un autre côté, White (2000) a obtenu une absence d'effet d'inversion (l'effet d'inversion est décrit plus bas comme étant un indice de traitement de configuration) dans la reconnaissance des expressions faciales, effet indicateur d'un traitement basé sur les parties. Ainsi, White (2000) a proposé une hypothèse hybride selon laquelle la reconnaissance des expressions est basée à la fois sur un traitement des parties de l'expression et sur un traitement de configuration. Notons que White a défini le traitement de configuration comme le résultat d'un encodage simultané et indissociable (« *as an undecomposed whole* ») de la description de l'expression, ainsi que de la reconnaissance du stimulus présenté en tant que visage. Cette hypothèse est cohérente avec l'idée qu'un changement de l'information basée sur les traits produit inexorablement un changement simultané de configuration générale (et réciproquement). Nous pouvons la rapprocher du lien entre les deux informations de traits et de configuration que Rakover (2002, p.2) a appelé « *intrinsic connection* ». Il s'agit du fait qu'un changement de la distance entre les yeux (un changement de configuration) pourrait être perçu comme un changement au niveau de l'arête du nez (un changement lié à un trait) ; vice-versa, élargir le nez (un changement lié à un trait) pourrait être perçu comme un changement dans les relations spatiales séparant les traits (un changement de configuration). Cette hypothèse de connexion intrinsèque est cohérente avec les résultats obtenus par Seyama et Nagayama (2002). Selon le même principe que celui de White (2000), ces auteurs ont séparé les parties supérieures des parties inférieures d'expressions neutres, de joie et de surprise selon une ligne horizontale passant juste au-dessous des yeux. Ils ont ensuite composé de nouvelles expressions consistant à

coller les parties supérieures (d'expressions neutres, de joie et de surprise) sur certaines parties inférieures (d'expressions de joie et de surprise). La tâche des participants consistait à choisir, entre deux visages ayant des parties supérieures identiques mais des parties inférieures différentes exprimant la joie ou la surprise, lequel présentait l'ouverture des yeux la plus grande. Cette caractéristique, pourtant identique sur les deux visages, était évaluée systématiquement plus importante quand la partie inférieure correspondait à un visage de joie. Les auteurs ont interprété ce résultat comme la manifestation d'un traitement de configuration automatique des expressions faciales, alors que le jugement portait sur un trait spécifique.

Une autre source d'arguments permettant de trancher entre les deux hypothèses, l'hypothèse relative aux traits et l'hypothèse de configuration, serait de démontrer l'existence d'une dissociation dans la nature du support neuronal sous-tendant les deux hypothèses, notamment l'existence d'une spécialisation hémisphérique. Hillger et Koenig (1991), dans une étude de champ visuel divisé, ont utilisé des stimuli schématiques et des tâches dans lesquelles il s'agissait de juger si deux visages étaient identiques ou différents. Dans une première expérience, ils ont observé un avantage de l'hémisphère droit lorsque la réponse « mêmes » était associée à des visages exactement identiques et lorsque la réponse « différents » correspondait à des visages parfaitement différents. Dans une deuxième expérience, ils ont répliqué l'avantage de l'hémisphère droit lorsque la réponse « mêmes » était associée à des visages exactement identiques ; en revanche, ils ont observé un avantage de l'hémisphère gauche lorsque la réponse « différents » était associée à des visages ne différant que sur un seul trait. Dans une troisième expérience, les auteurs ont montré que l'avantage de l'hémisphère droit obtenu lors de la présentation de visages à l'endroit disparaissait quand ces mêmes visages étaient présentés à l'envers. Enfin, dans une quatrième expérience, la réponse « mêmes » était associée à des visages présentant un trait en commun, tandis que la réponse « différents » était associée à des visages parfaitement différents. Les auteurs ont observé un avantage de l'hémisphère gauche dans le premier cas et aucune différence hémisphérique dans le second cas. Ils ont conclu que le traitement des visages engage des mécanismes cognitifs localisés dans les deux hémisphères : l'hémisphère droit présenterait un avantage global dans le traitement des visages (sans être *spécifique* aux visages), tandis que l'hémisphère gauche interviendrait dans des tâches requérant une analyse d'éléments locaux, notamment ceux d'un visage. L'idée que le traitement de configuration des visages est probablement localisé dans l'hémisphère droit est soutenue par d'autres études (Iidaka et al., 2003 ; Leube et al., 2003, localisation plus précisément dans un réseau comprenant le cortex insulaire et le cortex temporal supérieur ; Rossion et al., 1999).

Enfin, l'effet d'inversion a souvent été utilisé comme un moyen de montrer de manière empirique la supériorité du traitement de configuration (qui serait utilisé pour reconnaître des visages à l'endroit) sur le traitement par traits (qui serait utilisé pour reconnaître des visages à l'envers). En effet, de nombreux chercheurs ont affirmé que l'effet d'inversion pourrait être dû à une interruption du traitement de configuration beaucoup plus qu'à une interruption du traitement des composants (par exemple, Barton, Keenan, & Bass, 2001 ; Carey & Diamond, 1977 ; Leder & Bruce, 1998, 2000 ; Leder, Candrian, Huber, & Bruce, 2001 ; Murray, Yong, & Rhodes, 2000 ; Schwaninger & Mast, 1999 ; Searcy & Bartlett, 1996 ; Sergent, 1984a ; Williams, Moss, & Bradshaw, 2004). Ainsi, inverser un visage le rendrait comparable à un objet et ne déclencherait pas, par conséquent, des processus spécifiques aux visages, mais plutôt cette manipulation permettrait la mise en place de processus basés sur les parties. Par ailleurs, il est largement admis que les visages présentés à l'endroit sont mieux reconnus que les visages présentés à l'envers et que la perte liée à l'inversion est

beaucoup plus importante que pour les objets (Yin, 1969). A l'envers, les caractéristiques d'un visage, ainsi que son expression faciale générale (cf. « **The Thatcher illusion** » de Thompson, 1980), semblent difficiles à traiter. Cependant, sous certaines conditions, l'inversion interfère avec le traitement des traits (Le Grand, Mondloch, Maurer, & Brent, 2001) et la reconnaissance d'autres stimuli mono-orientés (par exemple, la reconnaissance de voitures par des novices, Gauthier, Skudlarski, Gore, & Anderson, 2000). Par ailleurs, Hillger et Koenig (1991, Expérience 3) ont montré que l'inversion peut affecter l'encodage des composants des visages entiers. Ainsi, la démonstration d'un effet d'inversion en lui-même ne constitue pas une preuve en faveur d'un type particulier de traitement facial ni une preuve démontrant une différence de traitement pour les visages et les autres objets. En revanche, l'inversion pourrait permettre de rendre compte des effets différenciés des relations spatiales catégorielles et métriques entre les traits d'un visage. Niebauer (2001) a proposé que le fait de présenter un visage à l'envers interromprait les relations catégorielles des traits faciaux, tandis que les relations métriques resteraient préservées. L'hypothèse des relations catégorielles et métriques est exposée dans la section 2 de ce chapitre.

En mettant l'accent sur l'importance de l'information de configuration, de nombreux auteurs ne cherchent pas à dénier que les traits individuels faciaux peuvent aussi être importants. Il n'est pas, par exemple, impossible de voir que les traits dans les visages recomposés sont ceux d'un individu A ou d'un individu B. Cela étant dit, il ne semble pas facile, de prime abord, de voir ces traits en présence d'une nouvelle configuration. L'information de configuration et l'information sur les traits sont, toutes les deux, susceptibles de contribuer à la reconnaissance normale des visages (Bruce & Young, 1986 ; Sergent, 1984a). Une piste de recherche est de spécifier comment les indices de configuration et ceux liés aux traits du visage interagissent dans la reconnaissance des visages familiers et dans la reconnaissance des expressions faciales. Un engagement dans cette voie doit sans doute commencer par définir précisément les termes utilisés et les dichotomies proposées entre : (i) l'information sur les composants (ou sur les traits) et l'information de configuration (Bradshaw & Nettleton, 1981 ; Carey & Diamond, 1977 ; Rakover, 2002 ; Ross-Kossak & Turkewitz, 1984 ; Sergent, 1984a), (ii) l'information de premier ordre et de second ordre (Diamond & Carey, 1986 ; Rhodes, 1988), (iii) l'information sur les relations et sur les attributs (Goldstone, Medin, & Gentner, 1991), (iv) l'information globale et locale (Navon, 1977) et (v) l'information holistique et analytique (Kemler, 1983).

1.5. Extensions de la notion de configuration et conclusion

1.5.1. Extensions de la notion de configuration

Trois hypothèses supplémentaires, considérant l'information de configuration, ont été proposées : « **l'hypothèse basée sur la norme** », quiconçoit l'information de traits et l'information de configuration en termes de déviations par rapport au visage ou à l'expression normalisé(e), « **l'hypothèse de la hiérarchie de schémas** », qui conçoit les deux types d'information comme organisés dans des schémas d'un visage ou d'une expression et de leurs traits et « **l'hypothèse du double codage** », qui propose que l'information relationnelle spatiale et l'information des composants sont encodées à travers des modes de traitement séparés.

L'hypothèse basée sur la norme considère que toute l'information faciale, relative aux traits et à la configuration du visage, est présente dans un système cognitif en tant que déviations par rapport à une norme, ou à une moyenne, ou encore en tant que distances

d'un visage prototypique abstrait. Ces déviations accentuent les qualités des traits ou de la configuration d'un visage donné par rapport à la norme (par exemple, Rhodes et al., 1993 ; Rhodes, Brennan, & Carey, 1987 ; Rhodes, Carey, Byatt, & Proffitt, 1998 ; Valentine, 1991). Les caricatures sont construites sur ce principe (Benson & Perrett, 1991a, 1993 ; Moscovitch, Winocur, & Behrmann, 1997). Dans la littérature, le concept de « **système basé sur la norme** » s'oppose au concept de « **système basé sur l'exemplaire** », dans lequel aucune norme n'existe, les visages étant codés comme des valeurs sur des dimensions individuelles (Rhodes et al., 1987 ; Valentine, 1991, 1995). Dans le domaine de l'expression faciale, les résultats de Calder et al. (2000b) ne vont pas dans le sens d'une représentation des expressions faciales selon un système basé sur une norme particulière. En effet, les résultats de cette étude étaient similaires quelle que soit la norme considérée (un visage neutre, un visage avec une expression moyenne, ou un visage avec une autre expression). Ainsi, le système le plus approprié pour le codage perceptif des expressions faciales semble résider dans un modèle basé sur l'exemplaire (Nosofsky, 1984, 1986), étant lui-même basé sur un espace multidimensionnel continu. Chaque dimension coderait soit les traits locaux soit les traits globaux, et chaque expression faciale nouvellement rencontrée serait catégorisée en termes de sa similarité globale à tous les autres exemplaires stockés. Par exemple, une expression de peur serait catégorisée comme « peur » parce que plus similaire aux exemplaires de peur stockés qu'aux exemplaires de joie, de tristesse, de dégoût, etc. De plus, le fait que certaines configurations d'expressions faciales soient rencontrées plus que d'autres signifierait que des groupes de catégories particulières se formeraient. Contrairement à l'idée d'un espace régulièrement distribué, Calder et al. (2000b) ont proposé que l'espace contiendrait un certain nombre de régions très denses correspondant aux émotions (de base) fréquemment rencontrées (joie, tristesse, colère, peur, dégoût, surprise, etc.), chacune de ces régions étant séparée par des régions de faible densité d'exemplaires. Cela signifierait que ces régions de forte densité auraient un « statut spécial », idée qui n'est pas incohérente avec l'existence de catégories émotionnelles de base. Cette proposition pourrait être interprétée comme une façon de tenter de réconcilier les arguments dimensionnels et catégoriels de l'expérience émotionnelle.

L'hypothèse de la hiérarchie de schémas conçoit l'information relative aux traits et l'information relative à la configuration du visage comme organisées dans des schémas d'un visage et de ses traits. De nombreux stimuli complexes sont traités d'après des schémas existant dans le système cognitif (Goldstein & Chance, 1980 ; Rakover, 1999 ; Rakover & Teucher, 1997 ; Vernon, 1955 ; Wiseman & Neisser, 1974 ; Yuille, 1991). La reconnaissance des visages dépend d'un schéma du visage entier qui contient des schémas de traits. L'un des composants importants du schéma du visage entier est l'ordre spatial des traits faciaux internes : les yeux au-dessus du nez, lui-même au-dessus de la bouche. C'est en partie grâce à l'existence de ces schémas que nous pouvons créer par l'imagination des visages dans la forme des nuages. Il existe également des schémas de traits faciaux comportant des arrangements similaires. Par exemple, le schéma des yeux est basé sur l'ordre « sourcils au-dessus des yeux », les yeux contenant la pupille.

L'hypothèse du double codage considère que le traitement de configuration et le traitement basé sur les traits apportent tous deux une contribution importante à la reconnaissance d'un visage (Bartlett & Searcy, 1993 ; Cabeza & Kato, 2000 ; Carey & Diamond, 1977 ; Sergent, 1984a). Ils sont encodés à travers des modes de traitements *séparés*, un mode étant spécialisé pour l'encodage de l'information relationnelle spatiale, l'autre étant spécialisé pour l'encodage des composants (Searcy & Bartlett, 1996). Cette hypothèse prédit des effets d'inversion négatifs sur l'encodage des relations spatiales, mais de faibles effets d'inversion ou aucun effet d'inversion, ou même des effets d'inversion

positifs sur l'encodage des composants. En effet, Searcy et Bartlett (1996) ont observé que le traitement de l'information concernant les composants n'est pas altéré par l'inversion. Ainsi, il semble que l'inversion affecte le traitement de l'information relationnelle spatiale plus que le, ou au contraire du, traitement de l'information propre aux composants. Il semble donc que l'effet d'inversion permette de s'affranchir de l'hypothèse du double codage. L'étude de Searcy et Bartlett (1996) est une des premières (après celle de Rhodes et al., 1993) à avoir explicitement comparé les effets d'inversion sur le traitement de l'information spatiale relationnelle et de l'information concernant les composants. La plupart des théories s'accordent pour affirmer que l'information spatiale relationnelle d'un type ou d'un autre est critique à la reconnaissance des visages, et que l'encodage d'une telle information est affecté par l'inversion. Reste la question de savoir si l'encodage de l'information spatiale relationnelle est affecté de manière disproportionnée par l'inversion, comparé à l'encodage des composants individuels. L'hypothèse du double codage postule que la réponse est oui, tandis que l'hypothèse holistique affirme que la réponse est non. Ces hypothèses mériteraient d'être testées plus avant.

1.5.2. Conclusion générale

Comme nous venons de l'examiner dans cette première section, une question-phare est de déterminer si l'encodage des visages et l'encodage des expressions faciales impliquent un ou deux mode(s) de traitement, et de spécifier la nature de ce(s) mode(s) de traitement. Depuis les travaux de Galton (1879), il semble effectivement qu'il existe, en plus ou à la place d'un traitement utilisant des traits isolés ou des composants, comme les yeux, le nez et la bouche, un second mode de traitement impliquant les relations spatiales du visage, utilisé pour discriminer des visages et des expressions faciales. Selon les auteurs, il pourrait se définir :

1. comme spécifiant la combinaison particulière ou la conjonction de composants qui constituent les visages individuels (Reinitz, Lammers, & Cochran, 1992 ; Sergent, 1984a) ou traitement ou hypothèse des traits,
2. comme concernant la configuration spatiale formée par le positionnement des composants du visage (Bartlett & Searcy, 1993 ; Diamond & Carey, 1986 ; Young et al., 1987) ou traitement ou hypothèse de configuration,
3. comme concernant la déviation (spatiale) des visages par rapport à la moyenne ou la norme des visages (Benson & Perrett, 1994 ; Rhodes et al., 1987) ou traitement ou hypothèse basée sur la norme,
4. comme ayant son information contenue dans une représentation faciale unitaire (c'est-à-dire une Gestalt faciale) qui ne contient pas de sous-partie correspondant aux traits faciaux (Tanaka & Farah, 1993) ou traitement ou hypothèse holistique.

2. L'hypothèse des relations catégorielles et des relations métriques

Plutôt que de considérer que l'explication, permettant de rendre compte de la dissociation entre le traitement des objets et le traitement des visages, est inhérente au support utilisé (c'est-à-dire les objets et les visages), est-ce qu'il ne serait pas plus pertinent de considérer que l'explication dépend du mécanisme de traitement mis en jeu ? Ainsi, selon le type de

tâche cognitive mise en jeu, les mécanismes de traitement des positions et des relations spatiales différeraient et pourraient chacun se manifester à la fois pour les objets et les visages. Il serait alors intéressant de considérer l'existence de deux types de traitement de relations spatiales dans les processus impliquant soit les objets, soit les visages, qu'il s'agisse dans ce dernier cas des processus de perception ou de reconnaissance, des visages ou des expressions faciales. Ces deux types de traitement seraient catégoriels et métriques.

Théorie de Cooper et Wojan (2000) reprise par White (2002)

Pour Diamond et Carey (1986), puisque tous les visages partagent les mêmes relations de premier ordre, leur reconnaissance requiert l'encodage de l'information portant sur des variations subtiles de la forme des traits faciaux ou de l'espace existant entre ces traits. Suivant le courant de cette idée et s'appuyant sur deux types de théories, les théories structurales et les théories proposant l'existence de relations coordonnées basées sur une référence, Cooper et Wojan (2000) puis White (2002) ont proposé d'opérer une dissociation entre les relations catégorielles et les relations coordonnées, appliquée aux visages. En effet, les auteurs ont tout d'abord considéré les théories de la reconnaissance de la forme (« **structural description theories** ») qui proposent l'existence de relations catégorielles basées sur les primitives de l'objet (« **primitive-to-primitive categorical relations** »), auxquelles ils feront par la suite référence simplement en tant que « **relations catégorielles** » (« **categorical relations** »). D'après ces théories (voir Biederman, 1987 ; Hummel & Biederman, 1992 ; Sutherland, 1968), chaque primitive des relations catégorielles est reliée aux autres primitives dans une représentation utilisant des descripteurs catégoriels directionnels (par exemple, « *au-dessus* », « *au-dessous* », « *à côté de* »). Dans les relations catégorielles d'un visage, les distances entre les primitives ne sont pas spécifiées, seules les directions le sont (par exemple, un œil se situe à côté d'un autre œil). Cooper et Wojan (2000) et White (2002) ont apparenté les relations catégorielles aux relations de premier ordre. Par opposition aux théories structurales, d'autres théories ayant inspiré ces auteurs ont proposé l'existence de relations coordonnées basées sur une référence (« **primitive-to-reference point coordinate relations** »), qu'ils référenceront par la suite simplement en tant que « relations coordonnées » ou « relations métriques » (« **metric or coordinate relations** »). Ces théories (Bülthoff & Edelman, 1992 ; Poggio & Edelman, 1990 ; Ullman, 1989) considèrent que la distance précise de chaque primitive est représentée à partir d'un point ou groupe de points de référence fixes. Les relations coordonnées d'un visage consistent à rendre compte, par exemple, qu'un œil est près, ou à 55 mm, de l'autre œil. Cooper et Wojan (2000) et White (2002) ont apparenté ces relations aux relations de second ordre, et plus généralement aux relations de configuration (voir aussi Calder et al., 2000c ; Cooper & Wojan, 2000 ; Freire, Lee, & Symons, 2000 ; Leder & Bruce, 2000 ; Tanaka & Sengco, 1997). Les relations catégorielles et coordonnées (ou métriques), adaptées aux visages, sont représentées sur la Figure 2.

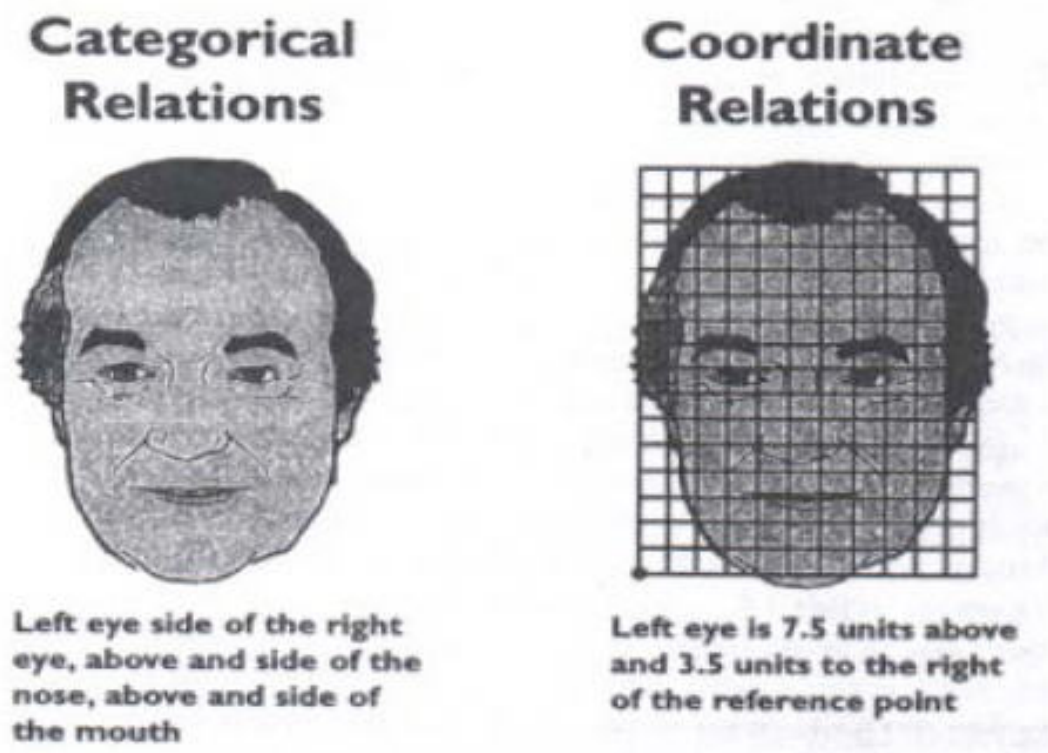


Figure 2. Un exemple de relations catégorielles (à gauche) et de relations coordonnées ou métriques (à droite) représentées sur un visage. Tiré de Cooper et Wojan (2000). *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26 (2), 470-488.

L'utilisation de relations catégorielles présente les avantages (i) de placer rapidement des objets spécifiques différents, présentant de grandes variations dans la position exacte de leurs éléments primitifs, dans la même catégorie de base (par exemple, une même représentation pour toutes les tasses), (ii) d'une plus grande tolérance au bruit (car les distances précises ne sont pas codées) permettant la reconnaissance malgré des points de vue différents. Malheureusement, ces relations sont inadéquates pour rendre compte de la capacité à reconnaître et à distinguer des visages (et par extension, des expressions faciales) différent(e)s. Les relations métriques présentent les avantages (i) d'avoir la capacité à capter de petites variations entre les stimuli qui ne peuvent pas être détectées dans une représentation catégorielle, (ii) de discriminer des visages (et par extension, des expressions faciales). Cependant, à cause de leur sensibilité aux variations inhérentes aux stimuli, ces relations ne peuvent pas regrouper dans une même classe d'objets des stimuli présentant de grandes variations dans leurs traits. Les forces et faiblesses des représentations catégorielles et métriques suggèrent que le type de représentations utilisées pourrait dépendre des exigences spécifiques de la tâche réalisée (Hummel & Stankiewicz, 1996). Spécifiquement, les représentations catégorielles seraient probablement très pertinentes dans la reconnaissance d'un objet à un niveau de base (par exemple, la reconnaissance d'un visage en tant que visage), tâche dans laquelle des stimuli très différents doivent être regroupés dans une même catégorie. Par contre, des représentations métriques permettraient des discriminations à l'intérieur d'une même classe d'objets (par exemple, l'identification d'un visage comme étant celui de Philippe), tâche dans

laquelle des stimuli très ressemblants doivent être discriminés les uns des autres (même si celui de Philippe a quelque chose de vraiment unique).

Dans son étude, White (2002) a utilisé la même technique d'altération des deux types de relations spatiales que celle précédemment élaborée par Cooper et Wojan (1996), avec une base de données différente, celle d'Ekman et Friesen (1976). En 1996, Cooper et Wojan avaient utilisé une série de visages en couleur de personnalités auxquelles ils avaient fait subir des transformations *coordonnées* et des transformations *catégorielles*. Les premières consistaient à surélever la position des deux yeux (ce qui ne perturbe pas les relations catégorielles), tandis que les secondes consistaient à surélever la position d'un seul œil (ce qui perturbe quand même les relations métriques mais dans une moindre mesure que la première modification). Les modifications métriques avaient pour conséquence d'allonger la taille du nez et de raccourcir la taille du front. Ces modifications sont pionnières dans la littérature puisqu'elles permettent de montrer l'existence d'une dichotomie, non plus entre des modifications liées à des relations spatiales et des modifications liées aux composants eux-mêmes, mais entre des modifications inhérentes aux relations spatiales, c'est-à-dire entre les relations spatiales métriques et catégorielles. Dans une tâche de reconnaissance d'un visage, White (2002) a répliqué les résultats de l'expérience de Cooper et Wojan (2000) en montrant que la perturbation des relations coordonnées d'un visage entraînait des temps de réponse plus longs que la perturbation des relations catégorielles d'un visage. Il a conclu que la reconnaissance d'un visage utilise préférentiellement les relations coordonnées. Mais fait plus intéressant, il a mis en évidence, dans une tâche portant sur la discrimination d'expressions faciales, le pattern inverse, c'est-à-dire que la perturbation des relations coordonnées d'un visage entraînait des temps de réponse plus courts que la perturbation des relations catégorielles d'un visage, montrant ainsi, d'après lui, le rôle des relations catégorielles dans la discrimination d'expressions faciales d'un visage. Pour White (2002), il existe quatre raisons de penser que la reconnaissance des expressions faciales est différente de la reconnaissance des visages, et similaire à la reconnaissance des visages à un niveau de base ; ainsi, elle se baserait sur l'utilisation des relations catégorielles plutôt que sur l'utilisation des relations coordonnées. Une première raison est que, si notre capacité à identifier des centaines de visages requiert de l'information de configuration précise, notre capacité plus limitée à reconnaître des expressions (tristesse, joie, peur, colère, dégoût, surprise et peut être une poignée d'autres et des expressions mélangées) pourrait requérir de l'information seulement sur les traits eux-mêmes et sur leurs relations de direction. Par exemple, la tristesse pourrait être reconnue comme une conjonction d'un sourcil retroussé juste à côté d'un autre sourcil retroussé, les deux étant centrés au-dessus d'une bouche retroussée. Une seconde raison est la nature catégorielle de la reconnaissance des expressions, proposition de certains auteurs (par exemple, Calder, Young, Perrett, Etcoff, & Rowland, 1996b ; Etcoff & Magee, 1992), qui sera étudiée plus loin (section 4.2). Une troisième raison est, respectivement, la difficulté et la facilité, avec laquelle les visages et les expressions sont reconnus dans les dessins faits au crayon (Davies, Ellis, & Shepherd, 1978 ; McKelvie, 1973), les dessins dégradant les relations de configuration mais non les relations catégorielles (Leder, 1996). La quatrième raison est la dissociation générale trouvée entre les processus d'identification d'un visage et de reconnaissance de l'expression (Sergent, Ohta, MacDonald, & Zuck, 1994).

Synthèse

Les concepts de Diamond et Carey (1986) de relations de premier ordre et de second ordre comportent certaines similarités avec respectivement les relations catégorielles et

métriques examinées dans l'article de Cooper et Wojan (2000). Bien que Diamond et Carey ne mentionnent jamais exactement la façon dont les relations de premier ordre sont codées dans leur étude, on peut inférer que les relations de premier ordre (comme les relations catégorielles) pourraient être quelque peu moins spécifiques à l'aspect métrique que les relations de second ordre. Diamond et Carey (1986) ont proposé que les relations de premier ordre seraient utilisées pour discriminer des stimuli qui ne partagent pas une configuration, tandis que les relations de second ordre seraient utilisées pour discriminer des stimuli qui partagent une configuration. D'après eux, les différents visages humains partagent tous la même configuration parce que « (...) **corresponding points may be identified on any two faces, and the faces, suitably normalized and digitized, may be averaged. The resulting figure is also recognizable as a face. This property (...) is what is meant by « sharing the same configuration» (p.110)** ». Comme Diamond et Carey l'ont souligné, ces critères pour établir une configuration sont les mêmes que le test de superimposition de Rosch (1978). De manière similaire, les schémas de relations catégorielles (par exemple, Biederman, 1987) postulent que deux stimuli partagent une configuration seulement s'ils partagent les mêmes primitives (par exemple, les « geons » de Biederman, 1987) et si leurs primitives ont les mêmes relations *au-dessus de*, *au-dessous de*, et *à côté d'un autre*. Par extension, de même que deux visages partagent la même configuration de base, il apparaît que deux expressions prototypiques de joie, de peur ou de dégoût, partagent également la même configuration de base.

Les relations de premier ordre et les relations catégorielles diffèrent, cependant, dans le sens où les relations de premier ordre expriment une *distance* entre les primitives dans un stimulus. Au contraire, les théories de relations catégorielles postulent que seule la *direction* (« *au-dessus de* », « *au-dessous de* », et « *à côté de* ») entre les primitives est spécifiée. L'avantage computationnel de spécifier seulement la direction d'une relation spatiale est que, bien que la distance entre les primitives dans la projection rétinienne d'un objet change selon si l'observateur se trouve près ou loin de l'objet, la direction de la relation entre les primitives reste constante. Ainsi, la théorie de Diamond et Carey prédit que des changements dans la distance entre les primitives dans un stimulus rendraient la reconnaissance plus difficile que ne la rendraient des changements dans la direction, tandis que les théories catégorielles font la prédiction inverse.

3. L'hypothèse d'automatisme

L'hypothèse d'automatisme postule que le traitement de l'expression faciale s'opère de manière automatique ou irrépressible. Cette position est replacée dans un cadre théorique issu de la perspective évolutionniste, telle que proposée par Charles Darwin.

Le père de la perspective évolutionniste des émotions et des expressions faciales en particulier est bien sûr Charles Darwin, dont l'apport dans le domaine de la compréhension des émotions est inestimable. Dans *L'expression des émotions*, Darwin (1872) a admis le caractère rapide et automatique du processus d'expression et de reconnaissance des émotions sur un visage : « **si l'on admet que la plupart des mouvements de l'expression ont été acquis graduellement et sont ensuite devenus instinctifs, il semble jusqu'à un certain point probable a priori que la faculté de les reconnaître est devenue instinctive par un mécanisme identique** » (p.385). Il a mis en exergue les ratés du comportement humain qui démentent la toute puissance de la volonté et mettent en

évidence le fait que l'être humain est agi autant qu'il agit. La théorie évolutionniste postule que l'Homme tel qu'il se présente aujourd'hui est le résultat d'une accumulation de petites modifications qui remontent à l'origine des temps. Ce qui est inné aurait donc d'abord été acquis : l'explication du caractère involontaire et inné des expressions du visage doit être recherchée dans les causes de leur apparition. Pour Darwin, loin d'être un reflet de l'âme réservée aux seuls civilisés, les expressions des émotions sont le résultat imprévisible d'un processus évolutif commun à l'ensemble des ressortissants de l'espèce humaine.

Dans une perspective darwinienne, Edwards (1998) a montré que l'on semble être plus sensible aux caractéristiques temporelles d'une émotion, dans les premiers instants de sa formation. La théorie darwinienne est toujours d'actualité. En effet, Esteves (1999) a postulé que notre équipement perceptif a été modulé par l'évolution, au cours de laquelle la capacité à détecter des menaces potentielles dans l'environnement aurait été importante pour la survie. Cette détection pourrait s'opérer par l'expression faciale : **« one of the stimuli that have been studied in the context of an automatic cognitive processing is the human face. (...) facial expressions, particularly threatening faces, also can be processed automatically »** (Esteves, 1999, p.92). Les résultats de l'étude d'Esteves (1999) ont mis en évidence un biais attentionnel dans la détection des visages menaçants. Les stimuli négatifs ont eu la capacité de capter l'attention. Ainsi, un visage exprimant la colère, présenté parmi des visages exprimant la joie a été détecté plus vite et avec moins d'erreurs, qu'un visage exprimant la joie parmi des visages en colère. De plus, pour Fox et al. (2000), il existait un avantage au cours de l'évolution en faveur des espèces qui pouvaient répondre rapidement à la présence d'une menace potentielle dans leur environnement. Si l'animal attendait pour identifier un objet avant de faire l'action, les chances de survie étaient réduites. Ceci est cohérent avec le traitement automatique des expressions faciales. Enfin, la théorie darwinienne peut être interprétée en termes de comportement d'approche ou de retrait (Davidson & Irwin, 1999) : au cours de l'évolution, savoir ce que les autres ressentent a été utile en tant qu'indicateur du comportement qu'ils se préparaient à adopter. Davidson (1995) a proposé une hypothèse « d'activation antérieure asymétrique ». D'après cette hypothèse, la région frontale gauche serait associée aux émotions liées aux comportements d'approche alors que la région frontale droite serait associée aux émotions liées aux comportements d'évitement et de retrait. Une interprétation de cette hypothèse consiste à suggérer que les émotions positives seraient traitées préférentiellement par la région frontale gauche, tandis que les émotions négatives seraient traitées préférentiellement par la région frontale droite. Cependant, il s'avère que la perception de toutes les émotions négatives n'implique pas un comportement d'évitement ou de retrait : ainsi, lorsque l'on voit un bébé pleurer (émotion négative), nous aurons tendance à adopter un comportement d'approche.

Par ailleurs, certaines régions cérébrales traitent les expressions faciales émotionnelles même quand leur perception n'est pas l'objet de la tâche requise. Ce résultat est cohérent avec l'idée que les expressions faciales sont traitées de manière automatique (Blair, Morris, Frith, Perrett, & Dolan, 1999 ; Breiter et al., 1996 ; Dolan et al., 1996 ; Keightley et al., 2003 ; Morris et al., 1996 ; Phillips et al., 1997 ; Vuilleumier, Armony, Driver, & Dolan, 2001). De plus, certaines études ont mis en évidence une dissociation neuroanatomique entre le traitement « explicite » et le traitement « implicite » des expressions faciales. Par exemple, Critchley et al. (2000a) ont montré que le traitement explicite évoquait une activité dans les aires corticales visuelles spécialisées dans la représentation des visages et dans l'hippocampe postérieur, aires nécessaires pour l'expression des connaissances déclaratives et la mémoire. En revanche, le traitement implicite recrutait les aires limbiques et paralimbiques (région de l'amygdale, insula et cortex préfrontal inférieur) impliquées dans l'apprentissage conditionné et la représentation des stimuli saillants du point de vue de la

motivation. Enfin, des études récentes menées avec des potentiels évoqués (Batty & Taylor, 2003 ; Eger, Jedynak, Iwaki, & Skrandies, 2003) ont montré que l'on est capable d'extraire le contenu émotionnel d'une expression faciale en 80-90 ms.

4. L'hypothèse d'un codage catégoriel *versus* continu

Dans cette partie, nous exposerons l'hypothèse d'un codage catégoriel *versus* dimensionnel continu de l'expression faciale. Dans cette optique, le problème se pose en ces termes : **« how do we see emotions in facial expressions? Are they perceived as discrete entities, like islands jutting out of the sea, or are they more continuous, reflecting the structure beneath the surface? »** (Dailey, Cottrell, Padgett, & Adolphs, 2002, p.1158). Ces questions mettent en exergue deux versants de cette hypothèse, souvent présentés comme compétitifs. En effet, certains chercheurs ont suggéré que la reconnaissance des expressions faciales est un exemple de perception catégorielle (**« categorical perception”** ou CP). Ce point de vue considère les catégories d'expressions comme des entités discrètes ayant des frontières précises ; la discrimination des expressions est alors supérieure quand elle est proche de ces frontières. D'autres chercheurs, cependant, ont suggéré que la perception de l'expression faciale est plus graduée et que les expressions faciales peuvent être considérées comme des points dans un espace continu, de faible dimension, où, par exemple, les expressions de surprise font le lien entre les expressions de joie et de peur à cause de leur similarité perceptive. Selon ce point de vue, Bruce et Green (1990 p. 364) ont proposé que **« expressions are never all-or-none, but are graded and blended »**. Imaginons un scénario, **« (...) someone pulls out a gun, aims it at you, squeezes the trigger, and thereby releases a flag on which is written the word « BANG”. Your emotions are likely to swing rapidly through the range from horror and fear to surprise followed by mirth (if you appreciated the joke) or anger (if you didn't). These emotions are likely to be revealed in rapidly changing and blending expressions »**(p. 365).

Après avoir exposé la théorie évolutionniste des émotions, telle que décrite par Charles Darwin, nous examinerons comment cette théorie a permis à Paul Ekman de postuler l'existence d'émotions de base, et de proposer une perception catégorielle des expressions faciales. Puis, nous étudierons l'alternative à l'hypothèse catégorielle, c'est-à-dire la vision de perception continue. Ensuite, nous nous interrogerons sur la nature des représentations sous-tendant la perception catégorielle et sur la nature des représentations sous-tendant la perception continue des expressions faciales émotionnelles, à travers un modèle multidimensionnel. Enfin, nous exposerons la question de l'existence ou non d'un traitement spécifique à chaque émotion particulière, à travers l'étude de leurs corrélats neuronaux. Une synthèse clôturera cette partie.

4.1. La notion d'émotions de base

L'ancêtre de la notion d'émotions de base développée par Paul Ekman dès les années 1960 est sans nul doute à rechercher dans la description d'une exceptionnelle précision que Darwin (1872) a donnée dans *L'expression des émotions*. En effet, dans le cadre de la théorie évolutionniste des émotions, Darwin a adopté un nouveau point de vue en donnant de chaque expression une explication rationnelle et extrêmement précise, qui nous

invitera ensuite à nous interroger sur une possible spécialisation des circuits neuronaux selon les expressions. Il a décrit avec une précision exceptionnelle les différents traits caractéristiques que prennent les muscles du visage et a démontré qu'un froncement de sourcils ne marque pas forcément une expression de colère, que des larmes ne trahissent pas obligatoirement de la tristesse, bref, que les réactions physiologiques que l'on perçoit sur le visage de quelqu'un ne correspondent pas expressément à un certain état d'esprit, mais qu'elles peuvent être dues à un effet de l'habitude, de l'association. Darwin a répertorié les expressions émotionnelles d'énormément d'espèces et a trouvé une certaine cohérence dans les expressions, et c'est aussi pourquoi, en différentes parties du monde, et à travers toutes sortes de cultures, les émotions sont si faciles à reconnaître, même si **« sans nul doute, il y a des expressions variables ainsi que des variations dans la configuration précise des stimuli susceptibles d'induire une émotion selon les cultures et selon les individus »** (Damasio, 1999, p.61). Nous avons rapporté ci-dessous une brève description de la manifestation faciale de certaines émotions (qui deviendront ultérieurement **« les émotions de base »** de Paul Ekman) décrites par Darwin (1872).

1. La tristesse. Dans son ouvrage de 1872, Darwin n'utilisait pas le terme de tristesse mais plutôt de souffrance, dont il a décrit les manifestations (chapitre VII) de la sorte : « la circulation s'alanguit, le visage pâlit, les muscles se détendent, les paupières s'abaissent, la tête se penche sur la poitrine oppressée, les lèvres, les joues et la mâchoire inférieure s'affaissent sous leur propre poids » (p.189).
2. La joie. Pour Darwin (1872, chapitre VIII), « par suite de la rétraction en arrière et de l'élévation des commissures par la contraction du grand zygomatique, et de l'élévation de la lèvre supérieure, les joues sont aussi entraînées vers le haut. Il se forme des plis au-dessous des yeux » (p.218). Il a ajouté (p.219) : « (...) le nez semble se raccourcir ; la peau de sa partie moyenne se couvre de fines rides transversales, et les parties latérales de plis longitudinaux ou obliques ».
3. La colère. Darwin (1872, chapitre X) a décrit la colère de la manière suivante : « sous l'empire d'une colère médiocrement intense, l'action du cœur se surexcite légèrement, le visage se colore et les yeux brillent. Dans une vive colère, les yeux sont farouches, les sourcils sont abaissés et énergiquement froncés, les lèvres sont serrées » (p.263).
4. Le dégoût. Darwin (1872, chapitre XI) l'a défini de la manière suivante : « le mot dégoût, dans son acception la plus simple, s'applique à toute sensation qui offense le sens du goût. Il est curieux de voir combien ce sentiment est provoqué avec facilité par tout ce qui sort de nos habitudes, dans l'aspect, l'odeur, la nature de notre nourriture » (p. 276).
5. La surprise. Darwin (1872, chapitre XII) a décrit la surprise de la manière suivante : « lorsque l'attention est provoquée subitement et vivement, elle se transforme en surprise ; celle-ci passe à l'étonnement, qui conduit lui-même à la stupéfaction et à l'effroi. Ce dernier état d'esprit touche de bien près à la terreur. La surprise se manifeste à la fois et simultanément, par une élévation énergique des sourcils, qui permettent une large ouverture des yeux et une ouverture large de la bouche. (...) L'élévation des sourcils pourrait permettre d'avoir un champ de vision plus large, et l'ouverture de la bouche de respirer tranquillement et silencieusement » (p.298).
6. La peur. Darwin (1872, chapitre XII) a apparenté la peur à la crainte : « le mot fear (frayeur, crainte) paraît dériver étymologiquement des termes qui répondent aux notions de soudaineté et de péril » (pp.310-311) et la rapproche de la surprise : « la crainte est souvent précédée d'étonnement ; elle est d'ailleurs si voisine de ce dernier

sentiment qu'ils éveillent instantanément, l'un comme l'autre, les sens de la vue et de l'ouïe. Dans les deux cas, les yeux et la bouche s'ouvrent largement, et les sourcils se relèvent. L'homme effrayé reste d'abord immobile comme une statue, retenant son souffle, ou bien il se blottit instinctivement comme pour éviter d'être aperçu » (p.311).

Paul Ekman a repris certaines idées de Darwin. Il remarque qu' **« à une époque où triomphaient les théories de l'apprentissage des comportements humains, la thèse darwinienne qui soutenait l'universalité et l'innéité des expressions faciales avait quelque chose d'indécent »** (Ekman, 1980). Ekman (1992b, 1994) a étudié les relations transculturelles et s'est émerveillé plus devant la similitude que devant la différence entre les populations. Bien que certains points de sa théorie aient évolué depuis les années 1960, Ekman reste encore à l'heure actuelle le plus grand défenseur de l'idée que les émotions sont des entités discrètes. Les deux composants cruciaux de sa théorie qui la distinguent des autres approches sont (i) que les émotions sont fondamentalement différentes les unes des autres et (ii) qu'elles évoluent pour aider les organismes à opérer les tâches fondamentales de la vie. D'après ce point de vue, puisque les émotions sont distinctes, et que chaque famille d'émotion (ressentie) s'accompagne par un petit ensemble de signaux distinctifs (les expressions faciales), le comportement des participants à catégoriser les expressions faciales (perçues) devrait se manifester par une catégorisation discrète, des décisions tranchées, non par une catégorisation graduée, floue, régulière. Dans un essai récent, il a dressé les grands traits de sa théorie des émotions de base et leur relation avec les expressions faciales (Ekman, 1999). Pour Ekman, les émotions « de base » sont des familles distinctes d'états affectifs caractérisés par différents signaux physiologiques et par des mécanismes « d'*appraisal* ». En effet, Ekman (1999) a cité plusieurs cas qui ont suggéré que chaque émotion ressentie s'accompagne de changements physiologiques distincts qui préparent un organisme à répondre de manière appropriée, par exemple, le flux sanguin au niveau des mains qui augmente pendant la colère, comme une réponse anticipative au combat. En plus des changements physiologiques, d'après la théorie, l'expérience émotionnelle liée à chaque famille d'émotion de base est également accompagnée par un mécanisme rapide « d'*appraisal* », qui s'applique à des stimuli pertinents et à un ensemble d'événements universels, par exemple, un trouble physique ou psychologique qui conduit normalement à un état de peur, et la perte d'un proche qui conduit normalement à un état de tristesse. En conclusion, et fait plus important, Ekman (1999, p. 47) pense que les émotions évoluent **« (...) to inform conspecifics, without choice or consideration, about what is occurring: inside the person..., what most likely occurred..., and what is most likely to occur next »**. Ainsi, chaque famille d'émotion (ressentie) de base s'accompagne par un signal prototypique distinct, incluant un groupe de mouvements musculaires faciaux et corporels (par exemple, l'approche ou le retrait). Les signaux ne sont pas entièrement automatiques ; ils peuvent être atténués, masqués, ou même simulés dans certaines circonstances. De plus, au sein de certaines familles d'émotions, les différences individuelles et le contexte de situation provoquent des variations, même subtiles parfois, d'expression émotionnelle. Mais entre les familles, les mécanismes « d'*appraisal* », les mécanismes physiologiques, ainsi que les signaux diffèrent fondamentalement. Basé sur ce critère, Ekman a proposé, dans un premier temps, qu'il existe quinze familles d'émotions de base : l'amusement, la colère, le mépris, le contentement, le dégoût, l'embarras, l'excitation, la peur, la culpabilité, l'orgueil dans la réussite, le soulagement, la tristesse ou la détresse, la satisfaction, le plaisir sensoriel et la honte. Puis, avec Friesen, Ekman (Ekman & Friesen, 1976) a proposé l'existence de six (plus une) émotions fondamentales : la joie, la tristesse, la colère, le dégoût, la peur et la surprise (plus l'expression neutre). Bien que l'on puisse supposer que l'universalité des expressions faciales existe à cause du nombre limité de

muscles faciaux, le nombre de combinaisons possibles des mouvements faciaux est en réalité d'une centaine (Ekman, 1984). Seules quelques combinaisons ont valeur de signal émotionnel.

Pour Damasio (1994), les émotions telles qu'il les définit sont proches de celles répertoriées comme « basiques » par Ekman, parce qu'elles sont perçues de façon non ambiguë et universelle sur le visage. Damasio a proposé une distinction entre d'une part, les émotions, c'est-à-dire les états mentaux internes et les sentiments, et d'autre part, leur expression dans le corps (« **emotions - internal mind states and feelings - and their expression in the body** »), et a suggéré une variété de «*feelings*». Quand le corps (qui inclut le visage) bouge conformément à ces profils universels, nous ressentons alors l'émotion.

4.2. L'hypothèse de perception catégorielle («*Categorical Perception*», CP)

Etcoff et Magee (1992) ont été les premiers à soulever la question de savoir si les mécanismes perceptifs responsables de la reconnaissance des expressions faciales sont en réalité voués aux catégories émotionnelles, ou si la perception est continue, avec un membre de la catégorie « (...) **assigned by higher conceptual and linguistic systems but the actual perception would be of continuous variation, with category membership having no real effect at the perceptual level** » (p.229). Etcoff et Magee (1992) ont créé des caricatures (des dessins au trait) des photographies d'Ekman et Friesen (1976) et des expressions par morphing selon dix étapes entre des paires de ces caricatures. Ils ont inclus un continuum de plusieurs expressions et ont trouvé que toutes les expressions, exceptée la surprise, étaient perçues de manière catégorielle. Leurs résultats ont donc posé un sacré défi pour défendre l'idée d'un espace continu d'émotions. L'étude d'Etcoff et Magee (1992) présentait néanmoins certaines limites : premièrement, les stimuli étaient des dessins, non des images de qualité. Deuxièmement, chaque participant était exposé à un seul continuum. Troisièmement, les résultats de la tâche de discrimination étant une tâche séquentielle de type ABX (consistant en la présentation séquentielle de trois stimuli, la tâche portant sur le troisième stimulus), ils pourraient refléter un phénomène de mémoire à court terme plutôt qu'un phénomène perceptif. D'après ces limites, Calder et al. (1996b) ont étendu les premières expériences avec des séquences de photographies de visages issues de morphing de bonne qualité d'image, chaque séquence utilisant un acteur différent ou un même acteur « J.J. », issu de la base de données d'Ekman et Friesen (1976). Dans l'ensemble, les résultats étaient cohérents avec l'hypothèse de perception catégorielle : des frontières de catégories nettes ont été observées et une meilleure discrimination près des frontières, indépendamment du fait qu'il y ait un seul ou plusieurs continua présents dans l'expérience et indépendamment du fait que la tâche de discrimination utilisée était séquentielle ou simultanée. Les expériences de Calder et al. (1996b) ont donc soutenu l'hypothèse de perception catégorielle des expressions faciales, mais les auteurs sont restés méfiants quant à l'interprétation forte d'Etcoff et Magee (1992), selon laquelle l'assignement des expressions faciales à une catégorie est irrépressible : « **People cannot help but see the face as showing one or another kind of emotion; discriminating facial expressions is easier for different emotions because it can be directed by the qualitatively distinct internal category representations** » (Etcoff & Magee, 1992, p.229). Ils ont plutôt proposé que la perception catégorielle serait « (...) **an emergent property of population coding in the nervous system; in other words, (...)**

categorical perception effects arise whenever populations of cells become tuned to distinct categories » (Calder et al., 1996b, p.116).

De plus, Young et al. (1997) ont étudié l'hypothèse de perception catégorielle : ils ont demandé à des participants de catégoriser des photographies de visages en noir et blanc, issus de la base de données d'Ekman et Friesen (1976). Dans une première expérience, ces visages exprimaient les six émotions de base (joie, tristesse, peur, colère, dégoût et surprise) auxquelles l'expression neutre a été ajoutée dans une deuxième expérience. Les auteurs ont construit des continua d'expressions faciales issues d'un morphing, passant par toutes les combinaisons de paires possibles des sept expressions (c'est-à-dire dans l'expérience 1, quinze continua, puis six continua supplémentaires dans l'expérience 2). Cette technique provient de celle utilisée par Calder et al. (1996b) sur la même base de donnée, appliquée à seulement trois continua (joie - tristesse, tristesse - colère, colère - peur) sur les visages de trois individus différents (PF, WF, EM). Les auteurs ont rejeté l'idée d'un modèle à deux dimensions (selon deux polarités agréable - désagréable) dont les prédictions seraient doubles : (i) les transitions entre les expressions devraient être continues (c'est-à-dire des passages non abrupts) et (ii) au moins certaines transitions entre les expressions devraient passer par une expression centrale neutre ou une expression correspondant à une troisième émotion, signifiant que les images au centre de certains continua devraient être identifiées comme une expression autre que les deux expressions présentes aux antipodes. Or, Young et al. (1997) n'ont vérifié aucune de ces deux prédictions. Au contraire, toutes les images issues du morphing ont été identifiées comme des catégories d'expressions appartenant à l'un ou l'autre point du continuum, avec une frontière catégorielle nette au milieu.

Par ailleurs, s'inspirant de la technique de Brennan (1985), Calder et al. (2000b) ont utilisé des caricatures consistant à exagérer les positions des points des traits anatomiques par rapport aux localisations des points correspondants sur la norme d'un visage de référence (Benson & Perrett, 1991a ; Burt & Perrett, 1995 ; Calder, Young, Benson, & Perrett, 1996a ; Perrett, May, & Yoshikawa, 1994 ; Rhodes et al., 1987). L'avantage particulier de cette procédure est qu'elle est très objective. Pour les expressions faciales en particulier, son but principal est d'exagérer les traits distinctifs de l'expression (par exemple, le nez plissé, les sourcils relevés, etc.), tandis que les traits distinctifs du visage d'une personne sont relativement préservés (par exemple, un gros nez, des sourcils épais, etc.). Ainsi, Calder, Young, Rowland, et Perrett (1997) ont exagéré chaque expression faciale par rapport à une photographie de la même personne exprimant une émotion neutre (c'est-à-dire une norme d'expression faciale neutre). Notons que le choix de prendre des visages issus de morphing à partir d'une expression neutre est important et peut influencer la perception de l'expression faciale (Calder et al., 2000b).

D'autres expériences ont montré que les paires de visages, issues d'un morphing dont les expressions se situent près de la frontière catégorielle, sont mieux discriminées que des paires de visages présentant autant de différences physiques dans leurs expressions, mais se situant à l'un ou l'autre bout de la frontière (Calder et al., 1996b). L'ensemble de ces résultats a donc été interprété comme incohérent avec un modèle à deux dimensions.

4.3. Vers un modèle multidimensionnel du codage de l'expression faciale

4.3.1. Une alternative à l'hypothèse de perception catégorielle : une perception continue des expressions faciales

Certaines théories postulent que la relation entre les émotions et les expressions faciales n'est pas si catégorielle, discrète, ou déterministe que la théorie des émotions de base et les arguments en faveur de la perception catégorielle le suggèrent. L'idée que la perception des expressions faciales est discrète est mise au défi par des données, montrant que les jugements de similarité de ces expressions ont une structure continue et graduée, qui permet de rendre compte des représentations conceptuelles et perceptives de l'expression faciale.

La théorie continue a été originellement avancée par Schlosberg (1941, 1952). Elle était basée sur l'observation de son consultant Woodworth (1938), observation selon laquelle les erreurs observées dans la reconnaissance des expressions faciales ont une signification déterministe ; par exemple, les expressions de colère sont plus susceptibles d'être perçues comme du dégoût que comme de la joie ou de la surprise, tandis que les expressions de peur sont plus souvent confondues avec de la surprise qu'avec du dégoût. Schlosberg (1941, 1952) a montré que ces patterns d'erreurs pourraient être incorporés dans un système comprenant deux dimensions continues (agréable – désagréable et attention – rejet) avec l'expression neutre se situant à leur croisement, c'est-à-dire à l'origine ; dans un article publié plus tard, Schlosberg (1954) a ajouté une troisième dimension (endormissement – éveil ou «*arousal*»). Durant des années, un certain nombre de considérations dimensionnelles similaires de la reconnaissance de l'affect facial ont été proposées. La variante moderne la plus largement citée est le « ***circumplex model*** » (Russell, 1980 ; Russell & Bullock, 1985). Ce modèle comporte une structure similaire au système de Schlosberg (1952), dans le sens où les expressions faciales sont codées comme des valeurs sur deux dimensions continues, le côté agréable ou non, et le degré d'éveil. Russell et Bullock (1986) ont proposé que les catégories des émotions devraient être envisagées comme des ensembles flous. Quelques expressions pourraient avoir une qualité de membre de 1.0 (100%) dans une catégorie particulière ; en revanche, d'autres pourraient avoir des degrés intermédiaires de membre dans plus d'une catégorie, degrés qui se traduiraient par le chevauchement de ces catégories floues. Ils ont trouvé que les catégories se chevauchaient effectivement et ont proposé que l'interprétation des expressions faciales impliquait d'abord d'estimer l'expression en termes de plaisir et d'éveil. Ensuite, nous pourrions éventuellement choisir un label pour l'expression. Suivant l'idée de Schlosberg, Russell et Bullock (1986) ont proposé que des jugements plus fins, plus sûrs, requièrent de l'information contextuelle. Ces arguments, mis en commun avec les arguments issus d'autres études (Carroll & Russell, 1996 ; Katsikitis, 1997 ; Russell, 1980 ; Russell, Lewicka, & Niit, 1989) suggèrent qu'il existe un espace perceptif continu, multidimensionnel, sous-tendant la perception de l'expression faciale, dans lequel certaines catégories d'expressions sont plus similaires que d'autres. Russell (1980) a également montré que lorsque les stimuli sont des mots émotionnels, il existe une structure « ***circumplex*** » similaire à celle des expressions faciales. Cela suggérerait que ces modèles à deux dimensions ont une forte base *conceptuelle*. D'un autre côté, certains auteurs ont présenté des arguments qui proposent que des systèmes dimensionnels similaires peuvent aussi rendre compte de la représentation *perceptive* des expressions faciales ; c'est-à-dire, ils ont montré que les dimensions décrivant la *forme physique* des expressions faciales sont corrélées avec des dimensions telles que « ***pleasantry*** » et « ***arousal*** ». Frijda (1969), par exemple, a montré que les estimations des traits faciaux expressifs (lèvre supérieur retournée, coins de la bouche retournés, etc.) sont corrélés avec des dimensions qu'il a identifiées comme sous-tendant la représentation de l'émotion.

En résumé, il existe de nombreux arguments pour suggérer que le « *circumplex model* » de reconnaissance de l'affect facial de Russell pourrait constituer une description valide, à la fois, des représentations conceptuelles et perceptives (forme structurale) de l'expression faciale. Pour vérifier qu'il résiste aux tests empiriques, ce type de modèle à deux dimensions a été testé avec la procédure de morphing, qui offre un bon moyen d'approfondir cette question (Young et al., 1997).

4.3.2. Expériences de Young et al. (1997)

Young et al. (1997) avaient pour objectif de tester plus précisément les prédictions concernant les aspects catégoriels et multidimensionnels de la perception et de la reconnaissance des expressions faciales. Ils ont souligné que les théories structurales à deux dimensions (2-D) prédisent que si la représentation 2-D caractérise de manière adéquate notre perception des expressions faciales émotionnelles, le point central d'une expression obtenue par morphing se situant, par exemple, entre la joie et la peur, devrait être perçu comme une expression de surprise. Des points de vue catégoriels des expressions faciales émotionnelles, d'un autre côté, ne prédisent pas nécessairement une confusion le long des transitions entre les expressions faciales ; soit les transitions entre toutes les paires de catégories seraient nettes, soit elles correspondraient à des régions indéterminées pour lesquelles aucune émotion ne serait perçue. De plus, si le point de vue catégoriel est correct, les participants devraient trouver les expressions faciales difficiles à discriminer quand les paires de stimuli se trouvent dans une même catégorie, et faciles à discriminer quand les paires de stimuli se trouvent proches des frontières catégorielles, comme ce qui a été trouvé dans des études précédentes (Calder et al., 1996b ; Etcoff & Magee, 1992). Pour tester ces prédictions, Young et al. (1997) ont mené quatre expériences et construit des séquences de visages par morphing avec une haute qualité d'image. Dans l'expérience 1, Young et al. ont demandé aux participants d'identifier la catégorie émotionnelle pour des visages contenant des expressions faciales obtenues par morphing avec toutes les paires des six expressions prototypiques d'Ekman et Friesen (1976). Chaque nouvelle expression obtenue contenait un certain pourcentage d'une émotion A (x%) et un certain pourcentage d'une émotion B (100%-x%). Les visages présentaient ainsi 10% de A et 90% de B, 30% de A et 70% de B ou 50% de A et 50% de B. L'expérience 2 contenait en plus l'expression neutre. Dans les deux expériences, pour chaque transition des expressions, la réponse modale des participants aux stimuli changeait de manière abrupte d'une émotion à une autre sans transition. La réponse modale des participants était toujours l'un des points extrêmes de la séquence, jamais une catégorie proche, résultat prédit par les théories catégorielles des expressions faciales. Les temps de réponse des participants, cependant, étaient plus cohérents avec les arguments multidimensionnels ou liés faiblement avec la théorie catégorielle de la perception des expressions faciales : alors que la distance des prototypes augmentait, les temps de réponse augmentaient de manière significative, reflétant une incertitude sur l'appartenance des membres à une catégorie près des frontières catégorielles. Dans l'expérience 3, Young et al. (1997) ont exploré jusqu'où les participants pouvaient discriminer des paires de stimuli selon six transitions. Les participants effectuaient des tâches de discrimination entre deux stimuli proches. Les participants présentaient une meilleure discrimination près des frontières catégorielles (par exemple, entre un visage présentant 70% de A et 30% de B et un visage présentant 50% de A et 50% de B) que près des expressions prototypiques (par exemple, entre un visage présentant 70% de A et 30% de B et un visage présentant 90% de A et 10% de B), une condition nécessaire pour obtenir un effet de perception catégorielle. Ainsi, les résultats de l'expérience 3 sont plus en faveur d'un point de vue catégoriel de la perception des expressions faciales. Enfin, l'objectif

de l'expérience 4 était de déterminer si les participants pouvaient déterminer quelles expressions étaient mélangées à une expression légèrement transformée par morphing. Les participants devaient décider, sur un visage donné, l'émotion la plus apparente, la seconde plus apparente et la troisième (sur un choix de six). Les participants étaient capables de détecter les trois émotions contenues dans les expressions. Ce résultat soutient l'idée d'une perception continue, dimensionnelle, des expressions faciales.

4.3.3. Synthèse

Plutôt que de trancher entre les théories catégorielles et continues de la perception des expressions faciales, les expériences de Young et al. (1997) ont apporté des arguments en faveur des deux types de théories. En effet, les auteurs ont proposé qu'un modèle 2-D de la perception des expressions faciales était incapable de rendre compte de toutes les données, mais ils ont également suggéré que l'idée forte d'une catégorisation irrépressible était, de même, déficiente. Par rapport aux deux points de vue développés plus haut (point de vue catégoriel avec Ekman, point de vue continu avec Schlosberg), les résultats de Calder et al. (2000b) semblent plus cohérents avec l'idée que les expressions faciales sont codées comme des représentations de catégories discrètes. Cette interprétation va dans le sens des interprétations de Ekman et de ses collègues qui ont montré que chaque expression faciale de base est associée avec des patterns distincts des positions des muscles faciaux (Ekman & Friesen, 1978). Cependant, on ne peut pas rejeter l'idée d'un codage dimensionnel continu. En particulier, les études de Calder et al. (2000b) ont montré que les participants étaient très sensibles aux changements des intensités des expressions. Cela signifie que la représentation perceptive des expressions faciales code non seulement la présence ou l'absence de traits particuliers (yeux grands ouverts, nez retroussé, etc.) mais aussi la saillance des traits (la largeur des yeux ouverts, jusqu'à quel point le nez est fripé, etc.). Vue sous cet angle, l'idée d'un codage perceptif continu à un certain niveau ne semble pas complètement inappropriée (Calder et al., 2000b). Un point clé de cette étude est la prise en considération des intensités des expressions faciales, paramètre à partir duquel nous avons choisi dans notre étude de créer un continuum entre deux expressions faciales.

Les modèles computationnels de réseaux de neurones nous semblent un élément important à considérer dans l'étude de la perception et de la discrimination des expressions faciales. Le modèle de Dailey et al. (2002) rend compte de données issues de la psychologie sur la catégorisation, la similarité, les temps de réaction, la discrimination et les difficultés de reconnaissance, à la fois qualitativement et quantitativement. À travers leur modèle computationnel, les auteurs ont expliqué ainsi de nombreux phénomènes psychologiques complexes liés à la perception de l'expression faciale comme des conséquences naturelles des implémentations des tâches dans le cerveau. Nous reviendrons sur les modèles computationnels dans le chapitre suivant.

4.4. Un traitement spécifique à chaque expression particulière ? Étude des corrélats neuronaux des expressions faciales

L'une des approches de notre travail consiste à considérer l'étude des expressions faciales en tant qu'outil pour appréhender l'étude des émotions. Une question d'actualité dans ce champ de recherche est la question de savoir si la perception des émotions, et la perception des expressions faciales en particulier, est organisée dans des modules comportant des circuits neuronaux distincts sous-tendant les différentes émotions (Adolphs, 2002 ; Calder, Lawrence, & Young, 2001b ; Winston, O'Doherty, & Dolan, 2003).

Malgré de nombreuses recherches (voir les méta-analyses récentes de Phan, Wager, Taylor, & Liberzon (2002) et de Wager, Phan, Liberzon, & Taylor (2003)) sur l'étude des émotions dans des travaux de la neuroimagerie cognitive, les régions cérébrales impliquées dans la perception et dans la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles ne sont pas encore clairement identifiées. Cependant, un large réseau d'activations de régions corticales et sous-corticales est généralement obtenu dans la perception générale des visages et dans la perception des stimuli émotionnels, quelle que soit leur valence. Ces régions comprennent principalement le gyrus fusiforme (Critchley et al., 2000a ; Gorno-Tempini et al., 2001 ; Iidaka et al., 2001 ; Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997) mais également le cortex préfrontal ventro-médian, le cortex occipito-temporal, le sulcus temporal supérieur postérieur, l'amygdale et les ganglions de la base (Adolphs et al., 1999 ; Blair & Cipolotti, 2000 ; Blair et al., 1999 ; Hornak, Rolls, & Wade, 1996 ; Morris et al., 1996, 1998 ; Nakamura et al., 1999 ; Phillips et al., 1997 ; Sprengelmeyer et al., 1996 ; Winston et al., 2003 ; Wright, Martis, Shin, Fischer, & Rauch, 2002). Selon Winston et al. (2003), la région préfrontale ventrale jouerait un rôle plus spécifiquement dans la catégorisation des expressions faciales plus que dans leur perception. D'autres auteurs (par exemple, Nomura et al., 2004) ont proposé l'existence d'une association fonctionnelle entre le cortex préfrontal droit et l'amygdale dans l'évaluation des expressions faciales. Précisons également que l'amygdale semble être impliquée dans la perception d'expressions neutres (Phillips et al., 2001) et que son activation n'augmente pas obligatoirement dans la perception d'expressions émotionnelles (Kesler-West et al., 2001), activation qui pourrait être modulée par l'intensité émotionnelle (Canli, Zhao, Brewer, Gabrieli, & Cahill, 2000). De plus, elle semble impliquée dans la perception d'intensités, indépendamment de la valence émotionnelle, dans différentes modalités sensorielles (Anderson et al., 2003b, en modalité gustative ; Small et al., 2003, en modalité olfactive). Par ailleurs, elle semble jouer un rôle dans des jugements de similarité d'expressions faciales (Adolphs, Tranel, Damasio & Damasio, 1994, performances altérées dans des tâches de discrimination incluant le dégoût et la colère et incluant la peur et la surprise) même si ce rôle n'est pas absolu (Hamann & Adolphs, 1999). Enfin, cette structure répondrait préférentiellement à des jugements directs (sur la valence) qu'à des jugements indirects (sur le genre), les premiers impliquant également d'autres régions limbiques (insula, thalamus) et des régions ventrales temporales et préfrontales, tandis que les seconds activeraient préférentiellement des régions dorsales pariétales et préfrontales (Keightley et al., 2003). De manière générale, elle semble répondre extrêmement rapidement (100 ms) à la présentation de visages émotionnels (Streit et al., 2003) et pourrait ainsi être sollicitée dans le traitement de stimuli « motivants », indépendamment de leur valence émotionnelle (Winston et al., 2003). Une hypothèse proche considère l'amygdale comme un détecteur de la pertinence des stimuli (Sander, Grafman, & Zalla, 2003).

Même si nous ressentons constamment une kyrielle d'émotions et rarement une seule émotion isolée, il semble que chaque émotion possède sa propre réponse physiologique et un secteur anatomique spécifique. En effet, même si des émotions différentes provoquent une activation dans plusieurs sites communs, elles semblent néanmoins posséder une configuration qui leur est propre. Des réactions électrophysiologiques différentes ont été perçues lorsque Ekman, Levenson, et Friesen (1983) ont demandé à des acteurs professionnels de représenter six expressions émotionnelles fondamentales : la colère, la peur, la tristesse, la joie, le dégoût et la surprise. La fréquence cardiaque s'est élevée pour les trois premières expressions et a diminué pour les trois dernières ; la température cutanée a permis de différencier la tristesse de la colère, de la peur, et du dégoût. Dans la théorie d'Ekman, au répertoire musculaire des émotions correspondrait un clavier de

modifications humorales et neurovégétatives. De plus, Damasio et al. (1998), dans une étude de TEP, ont montré que la tristesse activait constamment le cortex préfrontal ventro-médian, l'hypothalamus et le tronc cérébral, tandis que la colère ou la peur n'activaient ni le cortex préfrontal ni l'hypothalamus. L'activation du tronc cérébral était observée pour les trois émotions, mais l'activation hypothalamique et préfrontale ventro-médiane semblait spécifique à la tristesse. Par ailleurs, des régions cérébrales différentes semblent sous-tendre les émotions de peur et de dégoût (Calder et al., 2001b, 2003). Enfin, Tcherkassof (1999) a montré qu'il existe bien des profils (ou patterns) de modes de préparation à l'action spécifiques de chaque catégorie d'expressions faciales émotionnelles.

Ainsi, nous pouvons répertorier certaines régions plus susceptibles de traiter certaines émotions particulières :

1. La tristesse. La tristesse active l'amygdale gauche (Blair et al., 1999) et l'amygdale droite (Schneider, Habel, Kessler, Salloum, & Posse, 2000).
2. La joie. L'expression faciale de joie bénéficie du biais de positivité : quand elle est présentée, elle est perçue comme étant l'émotion positive, et toutes les autres, quelle que soit leur nature, sont perçues comme négatives. Adolphs, Damasio, Tranel, et Damasio (1996) ont observé que les patients, quel que soit l'hémisphère lésé, ont reconnu normalement les expressions de joie, mais que certains participants avaient des difficultés dans la reconnaissance d'émotions négatives, particulièrement la peur et la tristesse. Par ailleurs, il semble que tous les visages de joie contiennent des variantes d'un signal stéréotypé : le sourire, qui module l'activité du cortex orbito-frontal médian, répondant à des visages attractifs (O'Doherty et al., 2003). La perception des expressions de joie entraîne, outre une activation au niveau de l'amygdale (Breiter et al., 1996 ; Killgore & Yurgelun-Todd, 2004, en perception non consciente ; Kosaka et al., 2002, étude chez des patients schizophrènes), une activation au niveau du cortex orbito-frontal bilatéral (Gorno-Tempini et al., 2001 ; Gur et al., 2002b). Ce résultat a également été obtenu lors de la présentation d'images agréables (Paradiso et al., 1999). Ajoutons que Mather et al. (2004) ont montré, qu'avec l'âge, l'activation amygdalienne se révélait supérieure lors de la présentation d'images positives que négatives.
3. La colère. L'étude de Fox et al. (2000) a examiné l'efficacité du traitement facial grâce à une tâche de recherche visuelle. Les temps de réponse pour détecter la colère dans des visages de joie étaient inférieurs aux temps de réponse pour détecter la joie dans des visages de colère : il se peut tout simplement que ce soit plus dur de faire une recherche à travers des visages de colère. Un tel mécanisme indique que les visages de colère demandent en effet assez d'attention, mais il ne montre pas que les visages de colère sont détectés plus rapidement en soi. De plus, Hariri, Bookheimer, et Mazziotta (2000) ont montré que l'appariement d'expressions de colère augmentait l'activité bilatérale au niveau de l'amygdale.
4. Le dégoût. Le dégoût semble spécifiquement impliquer les circuits neuronaux de l'insula et des ganglions de la base (Calder, Keane, Manes, Antoun, & Young, 2000a ; Phillips et al., 1997 ; Sprengelmeyer et al. 1996 ; Wang, Hoosain, Yang, Meng, & Wang, 2003). Par ailleurs, Sprengelmeyer et al. (1996, 2003) ont montré que les patients atteints de la maladie de Parkinson présentaient des difficultés particulières dans la reconnaissance de l'expression de dégoût.
5. La surprise. Reisenzein (2000) a étudié la force de l'association entre les quatre composantes du « syndrome » de la surprise : la composante cognitive (le degré d'un éventuel imprévu estimé), la composante d'expérience (la sensation de la surprise),

la composante comportementale (le délai de réaction à la surprise dans une tâche parallèle) et la composante d'expression (l'expression faciale de la surprise). Ces quatre composantes étaient toutes corrélées positivement. De plus, Ekman (1992a) a précisé que la surprise était une émotion « biologiquement fondamentale ». Enfin, un grand nombre de recherches ont montré que le niveau d'attention est l'un des aspects essentiels des émotions et l'évaluation de la nouveauté comme était le premier traitement effectué pour vérifier s'il faut prêter attention au stimulus ou si l'on peut l'ignorer. La surprise semble être fortement associée à cette dimension (Tcherkassof, 1999). Ajoutons que s'il est difficile de trouver dans la littérature un support neuronal de la surprise, c'est que la surprise n'est pas toujours considérée comme une émotion proprement dite, mais souvent plus comme un état émotionnel.

6. La peur. Un résultat robuste dans la littérature considère que l'expression de peur active systématiquement l'amygdale. Un certain nombre d'études cliniques (par exemple, Broks et al., 1998), d'études neuropsychologiques (par exemple, Adolphs et al., 1994) et d'études de neuroimagerie (Adolphs & Tranel, 2003 ; Adolphs et al., 1994 ; Anderson, Christoff, Panitz, De Rosa, & Gabrieli, 2003a ; Breiter et al., 1996 ; Calder et al., 1996c ; Morris et al., 1996, 1998, 2002 ; Phillips et al., 2001, 2004 ; Sprengelmeyer et al., 1999) ont montré que l'amygdale est impliquée dans la reconnaissance des expressions de peur. Ce résultat a été observé chez les adultes, mais n'était pas manifeste chez des enfants testés à l'âge de 11 ans (Thomas et al., 2001).

Peut-on alors conclure de l'ensemble de ces études qu'il existe des réseaux d'activation différents, propres à chaque expression ? Les neurosciences semblent effectivement appuyer l'hypothèse de la spécificité de chaque émotion : **« à émotions différentes, systèmes cérébraux différents. Exactement comme on peut lire la différence sur un visage entre une expression de colère et une expression de joie, exactement comme on peut sentir la différence entre la tristesse ou le bonheur dans sa chair, les neurosciences commencent à nous montrer comment des systèmes cérébraux différents travaillent pour produire, par exemple, colère, tristesse ou bonheur »** (Damasio, 1999, p. 68).

5. Synthèse

Pour Cooper et Wojan (2000), la distinction entre relations catégorielles et relations métriques permettrait de mieux comprendre la dissociation existant entre, respectivement, la reconnaissance des objets à un niveau de base (y compris le fait de dire **« c'est un visage »**) et la reconnaissance des visages. Ainsi, elle permettrait de spécifier comment les représentations en mémoire utilisées pour ces deux supports (objets *versus* visages) pourraient différer. Les auteurs ont effectivement proposé qu'une des différences principales entre l'identification d'un visage et la reconnaissance d'un objet à un niveau de base pourrait être la manière selon laquelle les positions spatiales des primitives visuelles de chaque processus sont codées. Même si elle ne nous semble pas assez poussée, l'hypothèse de Cooper et Wojan a néanmoins le mérite de proposer une nouvelle dissociation entre les processus d'identification des visages et la reconnaissance des objets à un niveau de base, qui permet de mieux comprendre ce qui distingue les représentations utilisées pendant ces deux processus. Pour Cooper et Wojan (2000), des arguments contraires à l'idée selon

laquelle deux systèmes de reconnaissance séparés (catégoriel et métrique) existent et qu'ils ont des façons qualitativement différentes de coder les relations, seraient de proposer que ces deux systèmes reflètent simplement l'opération d'un seul système de reconnaissance. Ce système encoderait l'information différemment selon les exigences de la tâche. D'après Cooper et Wojan, une telle explication semble improbable, étant donné les résultats d'études réalisées avec la technique de TEP (Sergent, Ohta, & MacDonald, 1992), les études de spécialisation hémisphérique (Davidoff, 1982 ; Wyke & Ettlinger, 1961), les observations de doubles dissociations neurologiques (Farah, 1994) et de l'effet d'inversion. Toutes ces recherches postulent l'existence de deux systèmes de reconnaissance neurologiquement distincts : l'un pour les visages et l'autre pour la plupart des objets à un niveau de base.

Nous inscrivant dans le même courant d'idées que celles de Cooper et Wojan, nous proposons l'existence de deux systèmes de traitement distincts, non pas dans le champ de la reconnaissance des visages mais dans celui de la reconnaissance des expressions faciales. Nous suggérons l'existence de deux sous-systèmes de traitement, le sous-système de traitement des relations spatiales catégorielles et le sous-système de traitement des relations spatiales métriques (voir Kosslyn & Koenig, 1995), chacun intervenant plus spécifiquement selon le jugement requis. Cependant, à notre avis, le fait qu'il existe deux sous-systèmes de traitement séparés n'implique pas qu'il existe un sous-système dédié exclusivement à la reconnaissance générale des expressions faciales (tel que le propose White, 2002). Plutôt, nous proposons que les deux sous-systèmes de traitement des relations spatiales visuelles catégorielles et métriques seraient impliqués *tous les deux* dans le traitement des expressions faciales. L'intervention plus spécifique de l'un ou de l'autre sous-système dépendrait du type de tâche requise, c'est-à-dire selon que ce traitement implique les relations spatiales catégorielles ou les relations spatiales métriques. Le sous-système de traitement des relations catégorielles serait plus performant que le sous-système de traitement des relations métriques dans la reconnaissance à un niveau catégoriel (par exemple, pour discriminer la valence positive de la valence négative), alors que le sous-système de traitement des relations métriques serait plus adéquat dans la reconnaissance des expressions faciales à un niveau plus fin (par exemple, discriminer deux expressions faciales d'une *même* émotion différant par leur intensité). Ainsi, le facteur « **intensité** » nous semble primordial pour mettre en évidence la manifestation des représentations des relations spatiales visuelles métriques et l'utilisation d'expressions faciales prototypiques, insuffisante, pour étudier la manifestation d'un traitement de configuration, catégoriel ou encore continu des expressions faciales. Comme nous le verrons dans le chapitre 4, d'autres techniques ont été utilisées, mais la variation du degré d'intensité apparaît très précise (quand elle est contrôlée par une technique de morphing) et clairement plus écologique (puisque la variation d'intensité est naturelle et est rencontrée dans notre quotidien). Par ailleurs, le côté de l'hémisphère cérébral activé, et de l'amygdale en particulier, peut être dépendant du degré de l'intensité d'une expression faciale : Phillips et al. (1997) ont montré, avec l'émotion de peur, que le traitement des expressions faciales intenses démontrait un avantage de l'amygdale de l'hémisphère droit, tandis que le traitement des expressions faciales moins intenses entraînait un avantage de l'amygdale de l'hémisphère gauche. Ajoutons que les deux conceptions (i) d'un traitement selon deux versants catégoriel et métrique et (ii) d'un traitement selon deux versants catégoriel et continu sont relativement proches. Certains auteurs (par exemple, Shibui, Izawa, Harashima, & Shigemasa, 2003) les considèrent comme synonymes.

Par ailleurs, la question de savoir s'il existe un substrat commun à la perception des différentes émotions de base (en particulier, l'amygdale semble être un bon candidat) ou si

des régions cérébrales différentes traitent des expressions faciales différentes est encore ouverte. Cependant, il semble clair qu'un manque de preuves en faveur de l'existence de corrélats neuronaux différents dans le traitement des émotions de base et en particulier des expressions faciales (par exemple, l'amygdale répondant à différentes expressions faciales émotionnelles), ne signifie pas que le traitement des émotions n'est pas catégoriel et serait inévitablement multidimensionnel. En effet, un même substrat neuronal pourrait sous-tendre des émotions différentes (Winston et al., 2003).

6. Vers une interaction du traitement visuel et du traitement émotionnel des expressions faciales ?

En novembre 2001, Rotshtein, Malach, Hadar, Graif, et Hendler ont publié un article dont la première partie du titre peut s'apparenter à une question « *Feeling or Features* », qui soulève le problème de l'interaction des traitements visuel et émotionnel. Inspirée de cette interrogation, une question essentielle de notre travail de thèse a consisté à évaluer dans quelle mesure le traitement émotionnel est modulé par le traitement visuel. Cette question est l'une des plus pertinentes en neuroscience cognitive ; il s'agit en effet de savoir si les attributs émotionnels d'un stimulus interagissent avec son traitement sensori-perceptif (Lane & Nadel, 2000). Par exemple, on peut se demander si, dans la perception des expressions faciales, la spécialisation hémisphérique, en faveur d'un avantage de l'hémisphère droit traditionnellement observé dans la littérature (par exemple, Hillger & Koenig, 1991), est due (i) au traitement lié à la perception des visages de manière générale et au traitement facial émotionnel en particulier ou (ii) au traitement des relations spatiales visuelles. Dans l'étude de Rotshtein et al. (2001), l'hémisphère droit a produit un signal plus fort que l'hémisphère gauche pour certains stimuli, dans le complexe occipital latéral, de même que dans le complexe amygdalien. Les auteurs ont formulé deux interprétations possibles : (i) les résultats renforçaient l'idée que la valence négative est latéralisée à un niveau hémisphérique plutôt qu'à un niveau régional. L'idée que l'hémisphère droit est sensible à la valence négative a été largement soutenue par diverses méthodes telles que psychologiques (Burt & Perrett, 1997), neuropsychologiques (Adolphs, Tranel, Damasio, & Damasio, 1995 ; Aggleton & Young, 2000 ; LaBar, LeDoux, Spencer, & Phelps, 1995 ; Silberman & Weingartner, 1986) et d'imagerie cérébrale (Buchel, Morris, Dolan, & Friston, 1998 ; George et al., 1995 ; Phillips et al., 1997 ; Pizzagalli, Koenig, REGARD, & Lehmann, 1998). Rappelons cependant que certaines études ont trouvé une dominance hémisphérique gauche pour la valence négative, principalement au niveau de l'amygdale (Adolphs et al., 1995 ; Breiter et al., 1996 ; Dolan & Morris, 2000 ; Young, Newcombe, de Haan, Small, & Hay, 1993). (ii) Une autre explication possible des résultats concernait l'idée que l'hémisphère droit est fortement impliqué dans le traitement global et holistique des visages (Iidaka et al., 2003 ; Leube et al., 2003 ; Rossion et al., 1999).

Comme nous l'avons mentionné plus haut, l'une des questions les plus pertinentes en neuroscience cognitive est de savoir si les attributs émotionnels d'un stimulus interagissent avec son traitement sensori-perceptif. En effet, de nombreuses données et de nombreux arguments soutiennent cette idée (Anderson & Phelps, 2001 ; Breiter et al., 1996 ; Critchley, Elliott, Mathias, & Dolan, 2000b ; Dolan & Morris, 2000 ; Emery & Amaral, 2000 ; Kosslyn et al., 1996 ; Lane et al., 1997b ; Lang et al., 1998 ; Reiman et al., 1997 ; Sergent et al., 1994 ; Taylor, Liberzon, & Koeppe, 2000 ; Taylor et al., 1998), tandis que d'autres études

la réfutent (Adolphs et al., 1994, 1995 ; Aggleton & Young, 2000 ; Haxby, Hoffman, & Gobbini, 2000 ; Young et al., 1993). De plus, l'amygdale servirait d'intermédiaire entre les traitements sensoriel et émotionnel (Buchel et al., 1998 ; Davis, 1992 ; LaBar et al., 1995 ; LeDoux, 1996, 2000 ; Rolls, 1999, Royet et al., 2000). Des études chez les primates ont montré une connexion importante entre l'amygdale et le cortex visuel, peut-être en relation avec un état émotionnel de l'animal ou de son « humeur » (Emery & Amaral, 2000). Par ailleurs, la charge émotionnelle des stimuli visuels modulait leur seuil perceptif, produisant des seuils plus hauts pour les stimuli émotionnels (Broadbent & Gregory, 1967). Des études d'imagerie cérébrale réalisées chez des participants sains ont démontré l'existence d'un effet émotionnel dans le cortex visuel (Breiter et al., 1996 ; Critchley et al., 2000a ; George et al., 1995 ; Kosslyn et al., 1996 ; Lane, Chua, & Dolan, 1997a, 1999 ; Lane et al., 1997b ; Lang, Fitzsimmons, Bradley, Cuthbert, & Scott, 1996 ; Lang et al., 1998 ; Morris et al., 1998 ; Reiman et al., 1997 ; Taylor et al., 1998, 2000), de même qu'une association entre les activations de l'amygdale et du cortex visuel pendant une stimulation émotionnelle (Dolan & Morris, 2000). De plus, un réseau neuronal dans les gyri fusiforme postérieur et occipital inférieur pourrait être spécialisé dans l'identification d'indices visuels émotionnellement importants (Geday, Gjedde, Boldsen, & Kupers, 2003).

Au contraire, des études portant sur des lésions chez des êtres humains ont démontré une double dissociation entre la perception visuelle et les processus émotionnels liés (Adolphs et al., 1995 ; Aggleton & Young, 2000 ; Young et al., 1993). Ainsi, la reconnaissance des visages pourrait être perturbée sans être accompagnée d'aucune perturbation dans la capacité à reconnaître l'expression émotionnelle associée, comme c'est le cas chez les patients prosopagnosiques (de Gelder, Pourtois, Vroomen, & Bachoud-Lévi, 2000 ; Sergent & Villemure, 1989 ; Tranel & Damasio, 1988) ou chez un patient blindsight d'un hémichamp visuel (de Gelder, Vroomen, Pourtois, & Weiskrantz, 1999). Suivant la même idée, les déficits émotionnels n'entraînent pas de déficits visuels chez des patients avec des lésions de l'amygdale (Adolphs et al., 1994, 1995 ; Bechara et al., 1995 ; Calder et al., 1996c ; Young, Hellawell, Van de Wal, & Johnson, 1996 ; Young et al., 1995). Enfin, des enregistrements sur des cellules isolées chez les primates ont montré que la magnitude de l'activation neuronale dans le cortex temporal inférieur n'a pas été affectée par la valence associée des stimuli, générée par récompense (Rolls, Judge, & Sanaghere, 1977). De manière similaire, l'imagerie cérébrale fonctionnelle chez des êtres humains a montré que le conditionnement négatif de visages n'a pas produit une activation différente dans le cortex visuel comparé à l'absence de conditionnement (Buchel et al., 1998). Ainsi, le contexte émotionnel seul n'affecterait pas l'activation du cortex visuel.

Une explication possible pour rendre compte des points de vue divergents soulevés ci-dessus est que l'effet émotionnel trouvé dans le système visuel a été confondu avec des variables à caractère non émotionnel, qui ont pu interagir avec la valence émotionnelle des stimuli visuels. Un tel mélange pourrait être lié à l'attention, au degré de reconnaissance, aux traits catégoriels (c'est-à-dire, les visages, les objets) et aux traits visuels (Rotshtein et al., 2001). Ainsi, plusieurs paramètres inhérents aux visages peuvent interagir avec le traitement de la valence émotionnelle des stimuli visuels. Dans notre étude, ces paramètres ont pu être contrôlés, soit en rendant leurs effets nuls, soit en les manipulant pour étudier leur(s) manifestation(s). Les détails de ces contrôles sont donnés dans le chapitre 4. Au préalable, dans le chapitre 3, nous énoncerons les hypothèses qui ont été les fils conducteurs de notre travail doctoral.

CHAPITRE 3. Présentation des hypothèses et introduction aux expériences

Ce chapitre consistera à présenter les hypothèses que nous avons testées, puis à introduire les expériences que nous avons réalisées au cours de notre travail doctoral.

1. Présentation des hypothèses

Notre travail expérimental a permis de tester quatre hypothèses. Elles s'orientent selon deux axes : (i) l'étude des relations spatiales visuelles, dans le domaine de la vision et dans le domaine de l'émotion et (ii) l'étude des expressions faciales émotionnelles.

Notre première hypothèse postule qu'il existe deux sous-systèmes distincts dans le traitement des relations spatiales visuelles, le sous-système de traitement des relations spatiales métriques et le sous-système de traitement des relations spatiales catégorielles (voir Kosslyn, 1987 ; Kosslyn & Koenig, 1992). Cette hypothèse a été testée sous deux conditions de présentation : (i) sous une condition de présentation visuelle devenue classique, comprenant des stimuli composés d'une barre et d'un point (Hellige & Michimata, 1989 ; Kosslyn et al., 1989, Expérience 3), avec l'adoption d'une approche optimale offerte par le paradigme événementiel de l'IRMf, et (ii) sous une condition originale, c'est-à-dire avec des stimuli faciaux présentant une expression émotionnelle. Dans la première condition de présentation, nous avons utilisé le paradigme événementiel provenant de la technique d'IRMf, ce qui, à notre connaissance, n'avait jamais été réalisé auparavant. Dans la seconde condition de présentation, nous avons utilisé un paradigme de champ visuel divisé issu de la psychologie cognitive, puis le paradigme événementiel de la technique d'IRMf. Une asymétrie hémisphérique démontrant un avantage de l'hémisphère droit dans le traitement métrique et un avantage de l'hémisphère gauche dans le traitement catégoriel serait un argument solide en faveur de la validation de notre hypothèse. De plus, une activation au niveau du gyrus angulaire dans la première condition (Baciu et al., 1999) et dans la seconde condition renforcerait fortement cette hypothèse. Notre seconde hypothèse affirme qu'il existe un effet d'apprentissage dans le traitement des relations spatiales visuelles métriques. Cette hypothèse a été testée avec le paradigme événementiel de l'IRMf. Dans une troisième hypothèse, nous proposons l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles. Cette hypothèse (ou « **hypothèse de polarité** ») a été mise à l'épreuve avec le paradigme événementiel de l'IRMf. L'implication de réseaux neuronaux différenciés et -ou- la manifestation d'une asymétrie hémisphérique serait un argument en faveur de notre hypothèse. Enfin, nous posons une quatrième hypothèse selon laquelle le traitement des expressions faciales émotionnelles s'opère de manière automatique ou irrépressible. Cette hypothèse a été testée avec le paradigme d'amorçage issu de la psychologie cognitive.

Hypothèse de l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des relations spatiales visuelles

Il semble exister un fort avantage de l'hémisphère droit quand les participants doivent réaliser une tâche impliquant un jugement métrique. Au contraire, les différences latérales, observées quand les participants réalisent des tâches spatiales catégorielles, sont beaucoup moins prononcées (Kosslyn et al., 1992), la plupart des recherches montrant soit un avantage faible de l'hémisphère gauche (Kosslyn et al., 1989) soit aucun avantage d'un hémisphère sur l'autre (Rybash & Hoyer, 1992 ; Sergent, 1991a). Dans un premier temps, nous avons souhaité répliquer cette asymétrie hémisphérique. Dans un second temps, nous avons souhaité tester cette hypothèse dans une tâche requérant la discrimination d'expressions faciales émotionnelles. Dans une étude récente, White (2002) a observé une implication des relations spatiales catégorielles dans la discrimination d'expressions faciales à un niveau catégoriel. Nous proposons qu'une discrimination plus fine pourrait s'opérer à l'intérieur du traitement des expressions faciales. En effet, selon que la reconnaissance des expressions faciales implique un jugement grossier (par exemple, évaluer si l'expression est positive ou négative) ou plus fin (par exemple, estimer si une expression est plus ou moins intense qu'une autre expression appartenant à une même émotion), le sous-système de traitement des relations catégorielles et le sous-système de traitement des relations métriques, respectivement, seraient préférentiellement requis. Une différenciation hémisphérique pourrait se manifester au niveau des lobes pariétaux, en particulier au niveau du gyri angulaires et des lobules pariétaux inférieurs et supérieurs (Baciu et al., 1999 ; Kosslyn et al., 1998). Nous ne postulons évidemment pas que la seule distinction entre la discrimination d'expressions selon leur valence et la discrimination d'expressions selon leur intensité (appartenant à une même émotion) correspond uniquement à la manière dont laquelle les positions spatiales des primitives et les relations spatiales entre elles sont codées. Néanmoins, ce dernier facteur nous semble non négligeable. Notre hypothèse de l'existence de traitements catégoriel et métrique distincts est proche de l'hypothèse considérant que la perception et la reconnaissance des expressions faciales s'opère de manière catégorielle ou continue. En effet, une différence majeure commune entre les deux visions de perception catégorielle *versus* continue (ou métrique) est le nombre de dimensions ; elles sont binaires pour la première, infinies pour la seconde.

Hypothèse d'un effet d'apprentissage dans le traitement des relations spatiales visuelles

De nombreuses études ont indiqué qu'un avantage initial de l'hémisphère droit dans le traitement des relations spatiales métriques disparaissait après les premiers blocs d'essais (Baciu et al., 1999 ; Kosslyn et al., 1989). Cette diminution de l'implication de l'hémisphère droit était parfois accompagnée d'une augmentation de l'implication de l'hémisphère gauche (Baciu et al., 1999). Deux groupes d'hypothèses ont été proposés pour expliquer la disparition de l'avantage de l'hémisphère droit dans les jugements métriques et -ou- l'apparition concomitante de l'avantage de l'hémisphère gauche avec la pratique : (i) l'hémisphère gauche développerait de nouvelles catégories de positions (Banich & Federmeier, 1999 ; Kosslyn et al., 1989) ou (ii) l'hémisphère gauche deviendrait compétent dans la réalisation de jugements métriques (Cowin & Hellige, 1994 ; Rybash & Hoyer, 1992). L'un de nos objectifs est d'apporter des arguments permettant de trancher entre ces deux groupes d'hypothèses. Par ailleurs, si l'hypothèse de l'existence de sous-systèmes distincts impliqués dans la discrimination d'expressions faciales émotionnelles se révélait

confirmée, nous souhaitons tester l'hypothèse d'un effet d'apprentissage dans l'expérience de discrimination d'expressions faciales, en particulier, dans la tâche de discrimination d'intensités.

Hypothèse de l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles

L'un de nos objectifs est de mettre en évidence une interaction des différentes émotions des expressions faciales et des hémisphères cérébraux. En effet, la mise en évidence d'une asymétrie hémisphérique selon la polarité serait un argument fort en faveur de l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles. Cependant, la question concernant le traitement hémisphérique des expressions faciales émotionnelles n'est pas tranchée. Il semble que des déficits dans la reconnaissance d'expressions faciales négatives sont caractéristiques de patients présentant des lésions de l'hémisphère droit (par exemple, Borod, Kent, Koff, Martin, & Alpert, 1988 ; Bowers, Bauer, Coslett, & Heilman, 1985 ; Charbonneau, Scherzer, Aspirot, & Cohen, 2003 ; Schweinberger, Baird, Blümmler, Kaufmann, & Mohr, 2003) en particulier dans les cortex sensoriels primaires, dans le cortex pariétal inférieur et le cortex occipital droit (Adolphs et al., 1996 ; Adolphs, Damasio, Tranel, Cooper, & Damasio, 2000). De même, une activité de l'amygdale droite a été observée pendant un conditionnement à la peur à la fois chez l'Homme et l'animal (Furmak, Fischer, Wik, Larsson, & Fredrikson, 1997 ; LaBar, Gatenby, Gore, LeDoux, & Phelps, 1998 ; LeDoux, Iwata, Cicchetti, & Reis, 1988 ; Morris, Ohman, & Dolan, 1999). La spécialisation hémisphérique du traitement des expressions positives est davantage sujette à débat (par exemple, Keightley et al., 2003). Par ailleurs, des données d'imagerie, électroencéphalographiques et cliniques ont suggéré que la reconnaissance des émotions positives et négatives pourrait être latéralisée dans les deux hémisphères (Canli, Desmond, Zhao, Glover, & Gabrieli, 1998 ; Davidson, 1995). De plus, au-delà de la spécialisation hémisphérique selon la polarité positive ou négative des expressions faciales émotionnelles, chacune des expressions faciales de base semble impliquer un circuit neuronal bien particulier, même s'il existe un circuit neuronal « de base » comprenant probablement le gyrus fusiforme et l'amygdale. Une hypothèse alternative permettant de mettre en évidence l'existence de sous-systèmes de traitement distincts consiste à considérer que le circuit neuronal de base, s'étendant à l'insula et aux ganglions de la base, varierait dans son degré d'activation, au niveau des différentes structures impliquées dans le circuit. Par ailleurs, nous souhaitons mesurer l'influence de l'intensité sur le traitement émotionnel explicite, en particulier au niveau de l'amygdale (Phillips et al., 1997).

Hypothèse d'automatisme du traitement des expressions faciales émotionnelles

Nous avons pour objectif de tester la mise en œuvre des sous-systèmes de traitement des expressions faciales en étudiant si l'évaluation de l'information émotionnelle qu'elles contiennent s'opère de manière automatique. Cette hypothèse est cohérente avec l'idée que la perception des expressions faciales est considérée comme un processus inné, non verbal, automatique et irréplicable (Darwin, 1872 ; Ohman, 2002).

2. Introduction aux expériences

Notre travail expérimental comportait six expériences conduites chez des participants sains. L'objectif de la première expérience, menée avec un paradigme événementiel issu de l'IRMf, était double. Dans un premier temps, il s'agissait de rechercher les corrélats neuronaux impliqués dans le traitement des relations spatiales visuelles catégorielles et métriques afin de tester l'hypothèse d'une asymétrie hémisphérique, avec un intérêt particulier pour le gyrus angulaire. Dans un second temps, nous souhaitions mieux comprendre l'effet d'apprentissage typiquement observé dans les jugements des relations métriques, par l'identification du substrat anatomique impliqué au cours de ces jugements. Dans une deuxième expérience, réalisée en psychologie cognitive et menée avec le paradigme de champ visuel divisé, nous avons deux objectifs : d'une part, démontrer que les représentations des relations spatiales visuelles sont impliquées dans la discrimination d'expressions faciales émotionnelles et, d'autre part, tester l'hypothèse d'asymétrie hémisphérique du traitement des expressions faciales émotionnelles. Dans une troisième expérience, menée en neuroimagerie cognitive (avec la technique d'IRMf événementielle), nous avons plus spécifiquement cherché à préciser les corrélats neuronaux impliqués dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles, avec des intérêts particuliers pour le gyrus angulaire et les lobules pariétaux inférieur et supérieur (attestant de l'utilisation des relations spatiales visuelles) ainsi que pour l'amygdale et les gyri frontaux inférieur et moyen (attestant d'un jugement émotionnel). Par ailleurs, cette expérience nous a permis de montrer comment ces deux informations ont pu interagir sur des stimuli complexes que sont les visages. Les quatrième, cinquième et sixième expériences, menées avec un paradigme d'amorçage issu de la psychologie cognitive, visaient à montrer que l'extraction de l'information émotionnelle contenue dans les expressions faciales se produit selon un mode automatique. Le paradigme expérimental de cette expérience nous a donné la possibilité de préciser la nature du mécanisme de traitement sous-jacent à cette extraction, dépendant du jugement requis.

CHAPITRE 4. Techniques et méthodes utilisées

En psychologie cognitive, l'étude de la cognition humaine se fonde sur la méthode de chronométrie mentale par l'enregistrement des temps de réponse et des erreurs des participants, qui permet d'inférer des algorithmes mentaux. L'interprétation des données dont l'enregistrement est indirect est à prendre avec précaution. La visualisation plus directe, par les techniques de neuroimagerie, des réseaux d'aires cérébrales impliquées dans une tâche cognitive, est de plus en plus préférée même si, comme nous le verrons dans ce chapitre, l'interprétation des cartes cérébrales reste encore un problème. Par ailleurs, les données cérébrales ne sont interprétables que dans le contexte de théories qui conduisent typiquement à des hypothèses spécifiques. Ainsi, à l'utilisation d'une techniques d'imagerie cérébrale, encore faut-il associer un plan expérimental rigoureux issu de la psychologie cognitive. La neuroimagerie peut apporter des informations sur la façon dont le traitement de l'information donne lieu à une compétence particulière et sur le moment où un tel traitement se manifeste, la difficulté réelle étant de trouver des niveaux de description qui correspondent à la façon dont le cerveau fonctionne. Un échange continu entre des études comportementales et des études de neuroimagerie permet donc d'affiner ces théories.

Dans ce chapitre, nous nous attacherons à justifier la pertinence des techniques que nous avons utilisées et la logique expérimentale que nous avons suivie pour valider nos hypothèses. Ces techniques sont issues de la neuroimagerie cognitive (IRMf événementielle) et de la psychologie cognitive (méthodes d'amorçage et de champ visuel divisé). De plus, une grande partie de ce chapitre est consacrée à la justification des choix des stimuli que nous avons utilisés dans les expériences 2 et 3 et à la description de la manipulation des relations spatiales visuelles appliquée à des expressions faciales émotionnelles.

1. La technique d'IRMf

Notre travail comprend deux expériences menées avec la technique d'IRMf. Nous tenterons de répondre à certaines questions qu'il nous a semblé fondamental de nous poser avant de réaliser nos expériences en IRMf : que mesure-t-on en IRMf ? Pourquoi et comment faire une expérience d'IRMf ? Enfin, nous soulèverons le problème de l'interprétation des cartes d'imagerie cérébrale et fixerons les apports, les limites et les perspectives de cette technique. Au préalable, un bref historique est exposé.

1.1. *Bref historique : la naissance et l'évolution de l'IRMf*

C'est en s'intéressant au cas de M. Leborgne (plus connu dans le monde de la neuropsychologie sous le nom de « tan ») que Paul Broca eut l'idée d'associer la perte d'une fonction cognitive à une lésion cérébrale précise. De sévères troubles du langage

(aphasie) avaient en effet été décrits chez ce patient, consécutivement à la lésion d'une zone spécifique de la partie postérieure du lobe frontal gauche. Cette région sera par la suite baptisée « **aire de Broca** », du nom du chirurgien ayant pratiqué l'autopsie et réalisé ces études en 1861 (voir Berker, Berker, & Smith, 1986). Ces travaux constituent ainsi une première démonstration concrète des liens susceptibles d'être établis entre une fonction cognitive donnée (par exemple, la linguistique) et une localisation particulière du système nerveux central. Ainsi, l'association entre une lésion cérébrale et un déficit cognitif permettrait de comprendre le fonctionnement cognitif normal. Pour la première fois, nous pouvions associer individuellement chacune des zones de notre cerveau aux capacités de voir, d'entendre, de raisonner, ou encore de s'émouvoir qu'elle nous procure, et ceci de manière précise. Mais ce concept doit aujourd'hui être dépassé. Il n'est désormais plus raisonnable de rechercher simplement l'implémentation cérébrale d'une faculté telle que l'a proposé Franz Gall avec la néo-phrénologie (ou organologie), mais il devient beaucoup plus pertinent de partir à la découverte de nos représentations mentales. Même s'il apparaît aujourd'hui que cette origine (une structure – une fonction) est trop restrictive, elle reste historiquement fondée.

Depuis Roy et Sherrington (1890) (voir Lindauer et al., 2001), il est largement admis que les fonctions supérieures du cerveau ont une traduction hémodynamique au plan local, c'est-à-dire qu'il existe un couplage régional entre le niveau d'activité électrique d'une part, et le débit sanguin et la consommation d'énergie, d'autre part. L'IRM a été inventée au début des années 1970 par Paul Lauterbur de l'Université d'Urbana dans l'Illinois (Etats-Unis). Dans les années 1970, les méthodes d'imagerie de la perfusion cérébrale se sont développées par l'utilisation de traceurs du débit sanguin cérébral marqués avec des émetteurs de photons comme le Xenon 133. Dans les années 1980, les méthodes d'imagerie de la perfusion cérébrale ont commencé à utiliser les émetteurs de positons comme la TEP à l'eau marquée à l'oxygène-15. L'augmentation du débit sanguin cérébral (DSCr) mesurée en TEP était au moins dix fois plus importante que l'augmentation de la consommation locale en oxygène engendrée par la stimulation (ce qui fondait le lien entre débit sanguin et consommation d'oxygène) par MarcusRaichle. L'IRMf a été inventée dans les années 1990 par l'équipe de Bruce Rosen au *Massachusetts General Hospital* à Boston (Etats-Unis). Pour les études fonctionnelles, l'IRM a remplacé la TEP vers la fin des années 1990. L'IRM fonctionnelle dite « pondérée en T₂ » ou « T₂* » donne désormais accès à des images fonctionnelles du cerveau humain à la résolution de quelques millimètres et en quelques secondes, et ceci, sans injection de produit. En 1991, dans *Science*, Belliveau et al. du *Massachusetts General Hospital* à Boston (Etats-Unis) ont publié une étude princeps en IRMf à l'aide d'un traceur non radioactif, le gadolinium, sur les variations de volume sanguin cérébral dans le cortex visuel primaire, stimulé par des flashes lumineux. L'année suivante, en 1992, Kwong et la même équipe ont publié une première étude d'IRMf dans sa version actuelle, c'est-à-dire sans injection de traceur mais basée sur l'observation en temps réel des variations d'oxygénation sanguine locale – méthode connue sous le nom de BOLD (*Blood Oxygen Level Dependent*). C'est cette équipe (Kwong et al., 1992) qui, pour la première fois, a obtenu, sans utiliser d'agent radioactif, une carte de l'activation cérébrale.

1.2. Que mesure-t-on en IRMf ?

Il nous semble important de nous interroger sur ce que l'on mesure avec l'IRMf, afin de connaître précisément la nature des interprétations des cartes d'imagerie cérébrale que nous serons ensuite autorisés à formuler. L'IRMf permet l'enregistrement d'une « **réponse hémodynamique** » qui naît suite à une activation neuronale ; elle nous permet d'inférer

la présence d'activations. La réponse hémodynamique résulte de variations dans trois paramètres plus ou moins couplés : le débit sanguin, le volume sanguin et la concentration en désoxyhémoglobine (dHb), qui est le traceur le plus utilisé à l'heure actuelle. Celui-ci modifie le temps de relaxation transversal des protons des molécules d'eau et sa concentration est cartographiée en IRMf.

La réponse hémodynamique se produit de la manière suivante : les processus métaboliques impliqués dans l'activité neuronale consomment de l'oxygène (Vilringer & Dirnagl, 1995). L'augmentation de la consommation d'oxygène lors d'une activation va alors entraîner une diminution de sa concentration locale. Afin de combler cette diminution, le flux sanguin transportant l'oxygène nouvellement apporté va augmenter par la dilatation des artéioles. Finalement, la concentration en oxygène présente va devenir supérieure à l'oxygène consommé, ce qui va créer un surapprovisionnement d'hémoglobine oxygénée dans les compartiments veineux et capillaires (Krugger & von Cramon, 1999). Les changements induits dans la concentration locale de dHb peuvent être facilement mesurés aujourd'hui comme un effet de déphasage dans les images de résonance magnétique. Cet effet appelé « **contraste BOLD** » (Belliveau et al., 1991 ; Kwong et al., 1992) est la méthode la plus populaire en IRMf et est employée comme l'une des méthodes expérimentales majeures pour l'analyse des processus cognitifs chez l'Homme. Le contraste BOLD permet d'inférer la présence d'activations (Rosen, Buckner, & Dale, 1998). Gardons en mémoire que la réponse hémodynamique engendre des signaux qui ne sont pas en relation directe avec les activités synaptiques, mais qui sont indirectement corrélés et couplés. De plus, elle permet d'obtenir une bonne résolution spatiale (de l'ordre de quelques millimètres) fixée au moment de l'acquisition des images, mais une résolution temporelle conditionnée par l'inertie de la réponse vasculaire (de l'ordre de quelques centaines de millisecondes). Par ailleurs, la réponse hémodynamique à un événement impulsionnel perdure pendant un certain temps (de l'ordre d'une vingtaine de secondes) après sa mise en route, avant de revenir à sa position initiale d'équilibre. Quelle que soit la nature de l'excitation (motrice, cognitive ou sensorielle), la réponse hémodynamique impulsionnelle est assez similaire, quelle que soit la région corticale activée. Au final, c'est bien la forme de la réponse hémodynamique qui détermine la résolution temporelle en IRMf.

L'IRMf consiste à observer les tissus biologiques à travers les propriétés magnétiques du noyau d'hydrogène. C'est donc un phénomène physiologique (c'est-à-dire la consommation d'oxygène par les neurones) qui est à l'origine du phénomène physique détecté (variation de susceptibilité magnétique du sang). Plus précisément et à l'instar de toute particule, l'unique proton qui constitue le noyau de l'atome d'hydrogène possède un moment magnétique, une sorte de petit aimant, nommé spin. En l'absence de champ magnétique, les spins des noyaux d'hydrogène des tissus s'orientent de façon aléatoire dans l'espace d'un noyau à l'autre, de sorte que le moment magnétique global est nul. En revanche, lorsqu'on place un sujet dans un champ magnétique, les spins des noyaux d'hydrogène s'orientent préférentiellement dans la direction de ce champ. Il apparaît donc un moment magnétique global. « **Ainsi, tout se passe comme si, en plongeant le sujet dans un champ magnétique, on l'avait aimanté (...)** » (Mazoyer, 2002, p.208).

1.3. Pourquoi faire une expérience d'IRMf ?

L'un des objectifs d'une expérience d'IRMf est d'apporter des arguments afin de répondre à ces questions : comment le traitement de l'information est-il implémenté dans le cerveau ? Comment les systèmes de traitement de l'information sont-ils organisés dans le tissu

neuronal ? Quels processus et quelles structures confèrent des fonctions spécifiques, comme la capacité à reconnaître des objets ou à former des images mentales visuelles ? Reconnaissons que le fait qu'un pattern particulier d'activité cérébrale accompagne la performance de types particuliers de tâches n'est pas en lui-même de grand intérêt : encore faut-il être capable d'attribuer un sens fonctionnel au réseau d'aires activées. Un deuxième objectif d'une expérience d'IRMf est de fournir les bases neurophysiologiques des fonctions cognitives chez l'Homme. Enfin, un troisième objectif est d'apporter des cartes cognitives à haute résolution permettant notamment de mieux comprendre les phénomènes de plasticité et d'apprentissage.

Nous avons réalisé deux expériences d'IRMf afin d'apporter des arguments pour répondre à ces questions : (i) comment les relations spatiales visuelles sont-elles implémentées dans le cerveau ?, (ii) existe-t-il des sous-systèmes distincts (l'existence de sous-systèmes distincts serait mise en évidence par une asymétrie hémisphérique) dans le traitement des relations spatiales visuelles ?, (iii) comment le traitement des relations spatiales visuelles évolue-t-il au cours d'une tâche métrique ? et (iv) existe-t-il des sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles ? Nous avons choisi, comme niveaux de description, les hémisphères cérébraux, en particulier, pour le traitement des relations spatiales visuelles, le gyrus angulaire et les lobules pariétaux inférieur et supérieur, et pour le traitement des expressions faciales émotionnelles, l'amygdale et les gyri frontaux inférieur et moyen.

1.4. Comment faire une expérience d'IRMf ?

Deux paramètres nous semblent particulièrement devoir être définis avec soin dans l'élaboration d'une expérience d'IRMf, le paradigme et la condition de base. Le choix et la préparation des participants sont également des éléments primordiaux.

1.4.1. Le choix du paradigme : paradigme de type bloc et paradigme de type événementiel

Le choix du paradigme en IRMf est fondamental : « ***le cœur d'une étude en imagerie fonctionnelle par résonance magnétique est bien sûr le paradigme dont la finalité est de répondre à une question, d'un point de vue physiologique ou pathologique*** » (Le Bihan, 1997, p.65). Nous distinguerons deux types de paradigmes utilisés en IRMf, les paradigmes de type bloc et les paradigmes de type événementiel.

Les paradigmes de type bloc pour l'IRMf ont été imposés à leurs débuts par analogie avec la TEP. Ils consistent à présenter des stimuli répétitifs à cadence fixe qui requièrent une attention soutenue mais qui se traduisent, à cause d'une habitude à des stimuli de même type, à la somnolence des participants. En conséquence, l'interprétation des cartes cérébrales est limitée, par le comportement des participants, et par l'impossibilité d'observer des phénomènes dynamiques. De plus, le type de tâches demandé aux participants n'est pas écologique : dans sa vie de tous les jours, l'être humain ne réalise pas des tâches identiques par blocs d'une quarantaine de secondes. L'avenir de l'IRMf, en tirant profit des progrès techniques, est donc sans doute voué à abandonner ce type de paradigme bloc, que ce soit au niveau du paradigme qu'au niveau de l'analyse des données et à adopter un paradigme événementiel (Buckner et al., 1996). De plus, l'analyse des résultats s'effectuant par bloc, et non par type d'événements, elle présente davantage de contraintes.

L'approche événementielle consiste à enregistrer la réponse à un stimulus ou plus précisément à un « **événement** » particulier. Le protocole utilisé dans l'IRMf événementielle est identique au protocole utilisé en potentiels évoqués (par exemple, l'EEG, électroencéphalographie), induisant une réponse « évoquée ». La réponse temporelle à chaque stimulus est enregistrée et moyennée sur plusieurs événements. Les protocoles événementiels permettent en principe d'obtenir des informations sur la chronométrie des activations cérébrales. Retenons que l'avantage principal de cette approche tient dans sa flexibilité du choix de comportements observables. En effet, elle permet d'éviter l'anticipation des participants puisque les stimuli leur sont présentés dans un ordre aléatoire contrôlé. Contrairement aux paradigmes de type bloc, l'analyse des résultats s'effectue par type d'événements. C'est ce type de paradigme que nous avons choisi d'utiliser dans nos expériences d'IRMf. Dans le paradigme de notre première expérience, nous avons spécifié trois types d'événements, tandis que dans le paradigme de la seconde expérience, nous en avons spécifié cinq. Plus le nombre d'événements est important, plus l'expérience sera longue.

1.4.2. La condition de base («baseline»)

La condition de base (ou «baseline») peut se définir comme un état de « repos » conscient, qui permet d'identifier les activités cérébrales lorsque l'activité cognitive est réduite, voire « absente ». Cette activité réduite sera ensuite comparée aux activités cérébrales émergeant lors d'une tâche cognitive, pour évaluer les régions *spécifiquement* impliquées lors de cette tâche. La prise en considération d'une condition de base est nécessaire parce que dans un état de repos au réveil, il n'est pas exclu que le cerveau continue à « travailler ». En effet, il reçoit 20% de la consommation totale d'oxygène du corps, bien qu'il ne représente que 2% du poids total du corps. Pourquoi le cerveau consomme-t-il toute cette énergie dans l'état de repos ? Une explication possible provient des observations selon lesquelles jusqu'à 50% de la consommation d'énergie à l'état de repos est dédié aux aspects fonctionnels de la transmission synaptique (Logothetis, Pauls, Augath, Trinath, & Oeltermann, 2001).

Deux types de problèmes sont liés à la condition de base : (i) aucun état de contrôle, aussi basique soit-il, ne correspond à un état « zéro » ; là est tout le problème de choisir un état de repos pertinent, comme le souligne le titre d'un article de Stark et Squire (2001) « ***When zero is not zero: The problem of ambiguous baseline conditions in fMRI*** ». (ii) les changements de l'activité cérébrale locale produisent des changements d'activité globale qui sont souvent trop faibles pour être mesurés (Sokoloff, Mangold, Wechsler, Kennedy, & Kety, 1955). Ainsi, concrètement, quel type de condition de base peut-on utiliser ? De nombreuses études utilisent le repos conscient, matérialisé par la présentation d'un écran blanc, comme condition de base (voir Busse & Woldorff, 2003) et plusieurs auteurs considèrent le repos conscient comme un état de référence fiable en neuroimagerie cognitive (Mazoyer et al., 2001). D'autres études préfèrent utiliser un stimulus simple, par exemple, une croix, un losange ou encore un point d'exclamation. Enfin, selon les études, suite à la présentation des événements correspondant à la condition de base, la pression d'une touche de réponse est exigée ou non.

1.4.3. Le choix et la préparation des participants

La coopération des participants, qui doivent prêter attention et pour certaines tâches, compétence, est un des facteurs essentiels à la réussite d'une étude d'IRMf. Cependant, la coopération est très rarement un problème car les participants ont souvent envie de bien faire. Un des problèmes que l'on peut rencontrer est leur envie de bouger à l'intérieur de la

machine alors qu'ils doivent garder une immobilité absolue pour ne pas créer d'interférences avec le signal dont les variations sont faibles. Dans nos expériences, nous avons prêté un soin absolu à ces étapes de mise en confiance des participants. En effet, chaque participant recevait individuellement des informations générales liées à la technique d'IRMf par l'expérimentatrice conjointement avec une personne experte (c'est-à-dire un chercheur spécialiste de l'IRMf ou un ingénieur de recherche) et les instructions étaient explicitées préalablement à l'entrée dans la machine par l'expérimentatrice. Cette étape préalable durait environ trente minutes. De plus, la motivation des participants, un facteur clé de sélection, a été soigneusement évaluée par rapport aux études qu'ils poursuivaient et par ce que la technique d'IRMf pouvait leur apporter. *A posteriori*, ce critère de sélection semblait justifié puisque les participants ayant le mieux réussi les tâches étaient ceux qui avaient porté un intérêt tout particulier à la technique elle-même (étudiants en école d'ingénieur, étudiants en physique, étudiants en médecine) ou aux hypothèses de notre étude (étudiants en psychologie).

1.5. L'interprétation des cartes d'imagerie cérébrale

1.5.1. Qu'observe-t-on réellement : des augmentations ou des diminutions d'activité ?

Les activations que l'on observe sont mesurées par une carte de différence d'intensités du signal entre un état A et un état B. On peut dès lors s'interroger si ces différences sont dues à une activité neuronale qui a augmenté dans l'état A ou à une activité qui a diminué dans l'état B (Gusnard & Raichle, 2001). Les changements d'activité cérébrale régionale observés lors de la réalisation d'activités cognitives sont souvent apparentés à des *activations* et l'on pense que ces changements représentent des augmentations de l'activité cellulaire locale du cerveau, dont on suggère que celles-ci seraient principalement reliées aux changements de potentiels de champs locaux (Logothetis et al., 2001). D'un autre côté, les chercheurs ont aussi fréquemment rencontré des diminutions d'intensités du signal induites par la tâche dans des expériences d'imagerie fonctionnelle. Elles sont parfois apparentées à des *désactivations*, mais toutes les diminutions d'intensités ne sont pas des désactivations (Gusnard & Raichle, 2001). Les désactivations sont généralement considérées comme des atténuations de l'activité cérébrale régionale qui sont attribuables à des mécanismes physiologiques spécifiques, qui ne sont pas encore à l'heure actuelle entièrement compris. D'un autre côté, les diminutions perçues dans des expériences d'imagerie cérébrale pourraient être expliquées de différentes manières :

1. sur la base de la façon dont les tâches contrôles et les tâches d'intérêt sont manipulées dans la stratégie d'analyse des images, en particulier lorsque les tâches contrôles sont relativement complexes et ne diffèrent que par une seule opération mentale. Selon si l'on effectue la comparaison « condition d'intérêt par rapport à la condition de base » ou la comparaison « condition de base par rapport à la condition d'intérêt », le changement d'activité dans les régions cérébrales concernées par cette différence peut apparaître comme une augmentation ou une diminution d'intensité. Ainsi, cette différence dépend de la façon dont les données sont analysées et n'implique clairement pas des concepts spécifiques de physiologie cérébrale.
2. sur la base de concepts issus de la physiologie cérébrale, liés aux signaux hémodynamiques cérébraux. L'augmentation de flux sanguin local dans le cerveau peut s'accompagner d'une diminution au niveau d'aires adjacentes simplement à

cause d'un besoin de propager un flux sanguin et ainsi de combler les besoins du tissu activé. Cette explication est cependant peu probable au niveau de l'imagerie fonctionnelle car les changements sont minces, si minces qu'ils ne peuvent être mesurés durant l'activité cognitive (Sokoloff et al., 1955).

3. sur la base de concepts issus de la physiologie cérébrale, liés à leur signification fonctionnelle. Les diminutions observées pourraient refléter la suppression du traitement de l'information dans des aires qui ne sont pas engagées dans la réalisation de la tâche.

Afin de s'assurer que les résultats impliquant la comparaison entre deux conditions « **A par rapport à B** » ne puissent pas s'expliquer simplement sur la base d'une diminution d'activation induite par une plus grande activité dans la condition B que dans la condition A (comme le suggère la proposition (i)), provoquant des « faux positifs », nous avons systématiquement réalisé un masquage inclusif. En effet, la comparaison « A par rapport à B » était systématiquement masquée par la comparaison « **A par rapport à la condition de base** ».

1.5.2. L'activation d'une structure est-elle nécessaire pour conclure à son implication dans un traitement cognitif ?

Une proposition commune est d'affirmer que l'augmentation de l'activation d'une structure traduit une forte activité de cette structure, qui met en place des ressources importantes, nécessaires afin d'effectuer un traitement cognitif. Ainsi, plus une structure serait impliquée dans la réalisation d'une tâche, plus son activation devrait être forte. Une alternative consiste à considérer qu'une structure très compétente pour effectuer un certain traitement cognitif n'a pas besoin de beaucoup de ressources car elle est entraînée à effectuer ce traitement. Par conséquent, sa sollicitation dans le traitement ne produira pas une activation *nécessairement* importante.

1.5.3. L'activation d'une structure est-elle suffisante pour conclure à son implication dans un traitement cognitif ?

Il est courant dans les sections de discussion d'études de neuroimagerie de voir des interprétations post-hoc de traitement basées sur un ensemble de régions trouvées activées. Dans le cas idéal, si l'on a une hypothèse *a priori* sur une structure qui implémente un processus particulier, alors on peut affirmer qu'une activation de cette structure, tandis que les participants réalisent une tâche particulière, est un argument fort pour affirmer que ce processus a été réquisitionné pendant la tâche. Si l'on considère qu'un processus particulier a été identifié avec un lieu neuroanatomique particulier, cette logique d'inférence est défendable. Par ailleurs, faire varier un jugement par des modifications mineures peut altérer la stratégie que les participants utilisent, auquel cas deux jugements légèrement différents impliqueraient différents processus, provoquant l'activation de régions cérébrales différentes. Même un tout petit changement dans la localisation d'une aire activée pourrait refléter des différences dans le processus précisément utilisé (voir par exemple, Wilson, Scalaidhe, & Goldman-Rakic, 1993). Cependant, la plupart des structures cérébrales ne sont pas *dédiées* à l'implémentation d'un seul processus, mais implémentent souvent plus d'un processus. Ainsi, un problème avec la logique d'inférer un traitement à partir d'une activation est que l'activation d'une région cérébrale donnée n'implique pas nécessairement un processus spécifique, dont on a préalablement montré qu'il activait cette structure ; en réalité, d'autres processus pourraient intervenir. Ainsi, la présence d'une activation au niveau d'une structure particulière pendant une tâche particulière peut être considérée

comme soit (i) la base pour l'hypothèse qu'un processus spécifique est requis ou (ii) un élément pour effectuer une inférence. Cette position rejoint l'idée selon laquelle les fonctions cognitives sont sous-tendues par l'activation de réseaux de neurones largement distribués, qui ne seraient pas spécifiés fonctionnellement. Ainsi, certains réseaux de neurones pourraient intervenir indifféremment dans plusieurs activités cognitives. De plus, quand un processus donné se trouve concerné dans différentes combinaisons d'autres processus, le locus précis de l'activation, qui reflète l'utilisation d'une structure ou d'un processus, peut changer en fonction de la façon dont les autres structures ou processus sont utilisés au même moment (voir l'épilogue de Kosslyn & Koenig, 1995).

1.5.4. Les précautions à prendre préalablement à l'interprétation des cartes d'imagerie cérébrale

En raison des différents processus qui peuvent intervenir lors de la réalisation d'un traitement cognitif, certaines précautions sont à prendre dans l'interprétation des images fonctionnelles d'imagerie cérébrale. Précisons qu'elles concernent la façon dont on peut utiliser non seulement des patterns d'activation pour inférer que des processus spécifiques ont été invoqués (voir ci-dessous de (i) à (v)) mais également des *variations* d'activations pour prédire une performance sur la façon dont le traitement change dans certaines circonstances. Par ailleurs, il faut rester prudent sur la relation temporelle entre le moment de l'activation et la mise en place d'une stratégie cognitive. C'est pourquoi il est fondamental de conserver en mémoire que des effets de pratique, de fatigue ou encore de contexte peuvent altérer les performances. (voir ci-dessous de (vi) à (vii)).

1. Il est préférable d'avoir une théorie qui fait une prédiction très spécifique et de considérer par anticipation les théories alternatives, en s'assurant qu'elles ne font pas les mêmes prédictions.
2. Il est important de noter que le simple résultat qui montre qu'une région est activée, même ayant des propriétés très caractéristiques, ne suffit pas pour inférer que les propriétés de cette région contribuent aux performances.
3. Il faut reconsidérer le processus dans son contexte. Chaque processus dépend des autres par ses inputs, et, en retour, il envoie ses outputs à d'autres processus.
4. Chaque combinaison de structures et de processus correspond à une stratégie différente. La solution est de montrer que différentes stratégies produisent différents patterns d'activation.
5. Les résultats fonctionnels doivent être corrélés avec les résultats comportementaux (taux de bonnes réponses, temps de réponse). Les personnes réalisant une tâche de manière moins performante que d'autres pourraient utiliser une stratégie différente, moins efficace que celles qui obtiennent de bonnes performances. De plus, si les individus diffèrent largement dans leurs niveaux de compétences, les corrélations pourraient même être difficiles à interpréter : des valeurs faibles de voxels activés pour certaines personnes pourraient indiquer que le processus n'est pas bien réalisé, mais de faibles valeurs pour d'autres personnes pourraient indiquer qu'elles sont si expertes que seulement un traitement minimal est requis.
6. Il faut évaluer comment le traitement change avec la pratique. En effet, avec la pratique, de nouvelles régions peuvent se mettre à fonctionner, pour même devenir meilleures dans la réalisation de la tâche, et des régions initialement activées peuvent diminuer leur activité au-dessous du seuil de détection. Des observations sur les changements d'activation au cours de tâches peuvent conduire à des hypothèses sur la nature des processus ou des structures implémentés dans des régions spécifiques,

et ces hypothèses peuvent en retour être examinées par rapport aux activations observées. Ce «golden feedback loop» est plus enrichissant si l'on s'arme d'une série de questions dès le début, basées sur la théorie, que si l'on réalise seulement des investigations de neuroimagerie sans hypothèse préalable et que l'on fait des interprétations post hoc.

7. Il est nécessaire d'évaluer comment le traitement change avec le contexte. Il faut prendre en considération le fait que ce que les participants ont fait avant de venir au laboratoire peut avoir une incidence sur leurs performances. De plus, donner les instructions de manière identique à tous les participants est primordial : de légères différences dans la façon dont une tâche est décrite ou comment les instructions sont formulées pourraient avoir des effets importants sur la façon dont les participants appréhendent la tâche.

1.5.5. Les analyses individuelles

Les études réalisées en IRMf présentent souvent des résultats considérant des activations moyennées par groupe, en vue d'une généralisation à la population, mais une analyse de données chez chaque individu doit systématiquement être menée, préalablement. En effet, l'un des apports de l'IRMf (par rapport à la TEP) est la possibilité de collecter suffisamment de données chez le même individu pour permettre une analyse de cas unique, ce qui présente évidemment un grand intérêt aussi bien dans le champ de recherche de la neuroscience cognitive que dans celui de la psychologie ou encore que dans celui de la neuropsychologie. De plus, la sensibilité intrinsèque à l'IRMf justifie qu'une analyse de données obtenues chez chaque individu soit systématiquement menée. Par ailleurs, regarder les cartes individuelles est fondamental en raison des variations anatomiques (il n'existe pas de référent neuroanatomique valable pour tous les participants de l'échantillon mais seulement un atlas neuroanatomique probabiliste) et fonctionnelles (pouvant résulter en une différence dans le poids des activités cérébrales) individuelles. Enfin, la même tâche exécutée à un même niveau de performance peut donner lieu à l'activation de réseaux neuraux différents entre individus sans que ces différences soient explicables par la seule variabilité de position de leurs structures cérébrales. Une activation observée en moyenne sur un groupe de participants peut en effet correspondre à une activation réellement présente chez tous les individus à des degrés divers, soit n'être présente que chez certains d'entre eux, mais être détectée comme significative par la simple arithmétique du calcul de la moyenne. C'est pourquoi il est fondamental de réaliser des analyses de second niveau grâce à un modèle dit « à effets aléatoires » prenant en considération les activations *communes* et non plus seulement les activations *moyennes*.

1.6. Les apports, les limites et les perspectives de l'IRMf

1.6.1. Les apports de l'IRMf

Cette technique est non invasive, la résolution spatiale est inégalée, le rapport signal/bruit est excellent, permettant d'analyser indépendamment les données de chaque participant, et elle présente la possibilité de suivre l'évolution temporelle grossière des activations à l'échelle de quelques secondes. Toutes ces caractéristiques font de cette technique un outil extrêmement puissant pour les sciences cognitives. Peut-être que l'apport le plus fondamental est d'avoir montré que les fonctions cognitives les plus simples sont sous-

tendues par des réseaux de régions distribués sur le cortex dans sa totalité, ces régions étant en interaction.

1.6.2. Les limites de l'IRMf

Une première limite est la précision de la technique, qui tient à sa jeunesse. La question de sa précision reste encore posée, comme le montre ce titre d'un article paru récemment : « ***how accurate is magnetic resonance imaging of brain function?*** » (Ugurbil, Toth, & Kim, 2003). Une autre limite est qu'il faut garder en tête que d'utiliser cette technique sans un plan expérimental précis répondant à une question précise est sans intérêt et pire, peut conduire à des interprétations erronées de résultats construits sur des hypothèses posées *a posteriori*. Il est donc utile et nécessaire de se poser la question de ce que va nous apporter une étude d'IRMf *avant* de la conduire. Comme le suggère le titre d'un article de Kosslyn (Kosslyn, 1999) : « ***if neuroimaging is the answer, what is the question?*** ».

1.6.3. Les perspectives de l'IRMf

La perspective première que l'on se doit d'évoquer lorsque l'on parle d'imagerie cérébrale tient dans son évolution technique. Cette dernière concerne aussi bien la machine elle-même (par exemple, Krasnow et al., 2003, pour une comparaison entre des activations provenant de machines de 1.5 T et de 3 T) que les logiciels d'analyse qui deviennent plus performants, permettant ainsi d'affiner la lecture des cartes et, donc, de proposer une localisation plus précise des structures anatomiques activées. Depuis quelque temps déjà, la notion de « localisationnisme » a laissé place à l'idée presque unanime qu'il existe plusieurs réseaux neuronaux distribués dans le cerveau qui sous-tendent une même fonction cognitive. La révolution de l'imagerie nous a poussé à être plus ambitieux, en recherchant à travers les activations cérébrales l'accès à un voxel particulier, c'est-à-dire à l'unité de base de la mesure de l'activation.

Une seconde perspective est la possibilité de coupler les techniques hémodynamiques et les techniques électromagnétiques. Dans *Nature*, l'équipe de Logothetis et al. (2001) a été la première au monde à être allée encore plus loin, c'est-à-dire à avoir couplé l'IRMf et des potentiels de champ local (enregistrements intra-corticaux). Les mesures ont été effectuées dans le cortex visuel de singes.

2. Les paradigmes de champ visuel divisé et d'amorçage

Dans nos expériences comportementales, nous avons utilisé deux types de paradigmes expérimentaux issus de la psychologie cognitive, le champ visuel divisé et l'amorçage. Le premier type de paradigme a été choisi afin de mettre en évidence l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des relations spatiales visuelles et dans le traitement des expressions faciales émotionnelles, tandis que le second type de paradigme a été choisi afin de montrer le caractère automatique des sous-systèmes de traitement des expressions faciales émotionnelles. « (...) ***il s'agit de confirmer par des données empiriques l'existence des sous-systèmes postulés. Le type de données recherché est caractéristique de la discipline concernée. En psychologie cognitive, des arguments en faveur de l'existence de tel ou tel sous-système sont recherchés*** »

dans des études comportementales chez le sujet sain en faisant appel à certains paradigmes expérimentaux » (Koenig, 1997, p.128).

La méthode de champ visuel divisé appelée aussi « **méthode de projection tachistoscopique de stimuli par hémichamp** » consiste à présenter un stimulus dans l'un des deux champs visuels. Le postulat sur lequel repose la présentation en champ visuel divisé considère qu'un stimulus présenté dans un hémichamp visuel est traité de manière plus précoce par l'hémisphère controlatéral. Elle a été décrite par Seron (1994, p.45) de la manière suivante : « **dans le système visuel, la moitié gauche de chaque rétine se projette dans l'hémisphère gauche et la moitié droite de chaque rétine dans l'hémisphère droit. Un tel dispositif (joint à l'inversion de l'image sur la rétine) a pour effet que lorsque le sujet fixe un point, les stimuli situés à gauche de ce point se projettent dans l'hémisphère droit et ceux situés à droite dans l'hémisphère gauche. On peut ainsi présenter des stimuli visuels à l'un ou l'autre hémisphère. Cependant, du fait que les yeux sont toujours en mouvement, cette situation exige que le sujet regarde bien le point de fixation au moment de la présentation du stimulus et que celui-ci soit exposé pendant une durée brève, inférieure au temps nécessaire pour accomplir une saccade oculaire** ». L'avantage d'un champ visuel (d'un hémisphère) sur l'autre est généralement validé par la précision des réponses et -ou- par l'enregistrement des temps de réponse. Précisons qu'une saccade oculaire dure environ 180 ms ; ainsi, le temps de présentation des stimuli ne doit pas excéder 180 ms.

Dans nos expériences, la méthode d'amorçage a été appliquée à des stimuli consistant en des visages variant par leurs expressions faciales. Elle consistait à présenter un premier visage ayant une certaine expression faciale, suivi d'un second visage ayant une expression identique à, ou différente de, l'expression du premier visage. La tâche des participants était de détecter la coloration, rouge ou verte, appliquée au second visage. Par définition, les tâches proposées dans des expériences utilisant la méthode d'amorçage sont indépendantes du critère sur lequel on souhaite mettre en évidence un effet de traitement automatique (dans nos expériences, l'expression faciale). Si un traitement de l'expression faciale se réalise, alors la rapidité et -ou- la précision des réponses des participants devrai(en)t être différente(s) selon que les expressions faciales sont identiques ou différentes.

3. Les techniques de transformations des images

Afin de mettre en évidence l'existence de sous-systèmes distincts des relations spatiales métriques et catégorielles dans la discrimination d'expressions faciales émotionnelles (Expériences 2 et 3), nous avons choisi de modifier les relations spatiales visuelles par des variations morphologiques permettant de créer des variations d'intensités entre différentes expressions faciales, à l'intérieur d'une même émotion et entre deux émotions différentes. Avant de justifier plus précisément le choix que nous avons opéré, nous allons exposer différentes techniques provoquant des modifications faciales liées aux relations spatiales. D'après notre point de vue, ces techniques pourraient permettre de mieux comprendre la manifestation (si elle existe) d'un traitement des relations spatiales dans la perception et la reconnaissance des expressions faciales, mais aussi dans la perception et la reconnaissance des visages. C'est la raison pour laquelle nous les exposerons ici. Précisons cependant que cette partie a pour objectif principal de montrer différentes

techniques que l'on peut utiliser pour étudier les relations spatiales sur un visage, non de décrire les résultats obtenus dans les différentes études.

3.1. Les techniques de transformation des relations spatiales dans la perception et la reconnaissance des visages et dans la perception et la reconnaissance des expressions faciales : brève revue de littérature

C'est dans le domaine de la perception des visages que Susan Brennan (1985) a développé des visages de synthèse à travers un « **générateur de caricatures informatisées** » (« **computer-implemented caricature generator** ») représentés par 37 lignes majeures, elles-mêmes basées sur un nombre fixe de 169 points. Cette procédure a été réutilisée par la suite dans certaines études (par exemple, Calder et al., 2000b ; Rhodes et al., 1987). La modification consistant à faire varier la distance entre les deux yeux a également été utilisée de nombreuses fois (par exemple, Barton et al., 2001 ; Leder & Bruce, 1998 ; Leder et al., 2001 ; Searcy & Bartlett, 1996). Afin de déterminer la nature des traits et des relations spatiales pertinents dans la discrimination de genre, des études de modélisation ont utilisé un certain nombre de points de référence issus de photographies de visages d'hommes et de femmes (Brunelli & Poggio, 1993 ; Burton, Bruce, & Dench, 1993 ; Fellous, 1997 ; Scheuchnpflug, 1999 ; Wilson, Loffler, & Wilkinson, 2002). D'autres études ont utilisé une tâche de familiarité (Cooper & Wojan, 2000, avec des photographies en couleur de personnalités ; Leder & Bruce, 2000, avec des dessins au trait ; Rhodes et al., 1993, avec des photographies en noir et blanc), dans laquelle les modifications des relations spatiales entre les traits étaient assurées par des variations dans la distance entre les traits internes du visage.

Dans le domaine des expressions faciales, des transformations d'expressions ont été opérées dans des modélisations informatiques et dans des expériences appliquées, en psychologie cognitive. Plusieurs études dans le domaine informatique ont utilisé des expressions de synthèse dynamiques, animées en 3D (Bui, Heylen, Poel, & Nijholt, 2001, chez un agent inanimé ; Gur et al., 2002a, avec des photographies d'acteurs et d'actrices professionnelles ; Wehrle, Kaiser, Schmidt, & Scherer, 2000, avec des images photographiques schématiques). Les études de Bui et al. (2001) et de Wehrle et al. (2000) se sont inspirées des descripteurs objectifs fournis par le système FACS (*Facial Action Coding System*, Ekman & Friesen, 1978) pour étudier les mouvements des muscles faciaux. De plus, des modèles multidimensionnels du codage de l'expression faciale ont été proposés par Calder et ses collaborateurs (Calder et al., 2000b ; Calder, Burton, Miller, Young, & Akamatsu, 2001a) et par Dailey et al. (2002). Calder et al. (2000b) ont suggéré que les émotions seraient reconnues d'après l'interaction d'une constellation de traits, selon plusieurs dimensions, chaque trait pris individuellement étant codé selon une seule dimension continue. Une alternative consisterait à considérer que les configurations de traits qui se produisent fréquemment en même temps (par exemple, les sourcils soulevés, les yeux ouverts et le front plissé) sont codées sur la même dimension. Dans les deux cas, cependant, les résultats de Calder et al. (2000b) ont suggéré que le nombre de dimensions de l'espace sous-tendu nécessiterait d'être plus grand que deux, puisque le problème principal que présente un modèle à deux dimensions pour rendre compte des données de Calder et al. (2000b, Expérience 4) est son nombre limité de dimensions. Le système employé par Calder et al. (2001a) consistait d'abord à encoder les positions des traits faciaux par rapport à un visage moyen puis à déformer chaque visage par rapport

au visage moyen (en préservant ainsi la texture, mais en enlevant les variations relatives à la forme individuelle des visages). Plus récemment, Dailey et al. (2002) ont construit un modèle computationnel, plus plausible biologiquement, qui imite certaines des fonctions importantes du système visuel. Ce modèle a non seulement démontré plus de similarité avec les performances humaines à choix forcé, mais il a également rendu compte des données soutenant à la fois des théories catégorielles et multidimensionnelles de la perception et de la reconnaissance des expressions faciales. Dailey et al. (2002) ont trouvé que leur modèle de reconnaissance des expressions faciales *suffit* pour expliquer de nombreux aspects des performances humaines dans des tâches comportementales, mais ils n'ont pas de preuves de la *nécessité* des décisions particulières implémentées.

Ajoutons que ces études (en particulier, Bui et al., 2001 ; Calder et al., 2001a ; Dailey et al., 2002 ; Martinez, 2003, avec un modèle feedforward) ont porté une attention spéciale à ce que l'implémentation informatique soit fidèle aux patterns décrits dans des études de psychologie expérimentale portant sur les expressions faciales humaines, incluant des règles liées à la combinaison d'expressions. En particulier, ils ont veillé à la façon dont les changements morphologiques pouvaient être représentés de façon continue. En psychologie cognitive, et avec la technique du morphing, Calder et al. (1997) ont exagéré chaque expression faciale par rapport à une photographie de la même personne exprimant une émotion neutre (c'est-à-dire une norme d'expression faciale neutre). Les visages provenaient de la base de données de visages en couleur de Matsumoto et Ekman (1988). Par ailleurs, White (2002) a utilisé quatre photographies de visages féminins issus de la base de données de visages en noir et blanc d'Ekman et Friesen (1976). Chacun de ces visages exprimait deux émotions différentes (parmi la joie, la colère, la peur et la tristesse). Il a construit des déformations d'ordre métrique et catégoriel, identiques à celles opérées par Cooper et Wojan (1996, 2000). Rappelons que les déformations métriques consistaient à surélever la position des deux yeux, tandis que les déformations catégorielles consistaient à surélever la position d'un seul œil. Les modifications métriques avaient pour conséquence d'allonger la taille du nez et de raccourcir la taille du front. Dans l'étude de White (2002), l'utilisation des déformations avait pour but, outre celui de répliquer les résultats relatifs à l'identité de Cooper et Wojan, de mieux comprendre le traitement des expressions faciales.

3.2. Description et justification de notre choix : le morphing d'intensités d'expressions faciales émotionnelles

Dans nos expériences 2 et 3, nous avons un objectif commun à celui de Cooper et Wojan (1996, 2000) et de White (2002), c'est-à-dire étudier la manifestation supposée des relations spatiales visuelles métriques et catégorielles, grâce à un outil particulier : le visage. Cependant, il nous semble que la technique utilisée par ces auteurs ne soit pas très écologique : en effet, dans la vie quotidienne, on ne perçoit pas un visage ayant des yeux décalés l'un par rapport à l'autre (suite à une déformation d'ordre catégoriel) ou comportant un nez et un front disproportionnés (suite à une déformation d'ordre métrique). Ainsi, nous avons choisi d'adopter une technique identique à celle utilisée par Calder et al. (1996b) puis par Young et al. (1997). Cette technique consiste à utiliser des intensités d'expressions faciales créées et modifiées avec la technique du morphing, et variant selon un continuum. Outre le fait d'être plus écologique, cette technique nous semble plus précise, dans la mesure où un contrôle extrêmement fin a été opéré par les concepteurs de cette technique, en faisant varier très précisément l'intensité de différentes expressions faciales à l'intérieur même d'une émotion.

Dans leur étude réalisée en 1997, Young et al. ont demandé à des participants de catégoriser des photographies de visages en noir et blanc créés par Ekman et Friesen (1976), exprimant les six émotions de base (Expérience 1) auxquelles ensuite a été jointe l'expression neutre (Expérience 2). La technique utilisée par les auteurs a été appliquée au visage d'un seul individu (JJ), pour créer, à partir des six expressions de base, les quinze continua possibles (Expérience 1) puis six continua supplémentaires (Expérience 2). Cette technique provient de celle utilisée par Calder et al. (1996b) sur la même base de donnée, appliquée à seulement trois continua (joie - tristesse, tristesse - colère, colère - peur) sur les visages de trois individus différents (PF, WF, EM). Issue de Benson et Perrett (1991b), elle consiste en trois étapes. (i) La délinéation consiste à poser 186 points manuellement sur les photographies de visages. Les localisations de ces points ont été spécifiées en termes de frontières anatomiques, chaque trait facial étant représenté par un certain nombre de points (par exemple, la bouche a été représentée par 22 points et chaque sourcil par 8 points). Ces points ont ensuite été joints pour produire une représentation délinée comprenant 50 contours de traits. (ii) La deuxième étape est l'interpolation de la forme. Un continuum de formes d'expressions a été généré à partir de deux formes appartenant à deux expressions prototypiques délinées (par exemple, la joie et la tristesse). Une différence de vecteur pour chaque frontière a été calculée. Ce processus a été répété pour les 186 points pour générer cinq types d'expressions émotionnelles, considérées par les auteurs comme comportant 10% d'une émotion A et 90% d'une émotion B, 30% de A et 70% de B, 50% de A et 50% de B, 70% de A et 30% de B, 90% de A et 10% de B. (iii) Produire une image de bonne qualité pour chacune de ces expressions interpolées est la dernière étape. Elle consiste à prendre les deux expressions prototypiques (c'est-à-dire contenant 100% d'émotion) des deux émotions entre lesquelles on désire créer un continuum, à déformer ces deux expressions afin d'obtenir une forme commune, cette forme commune résultant d'un alignement entre tous les points représentant un même trait sur les deux expressions. Puis, on a accordé aux deux expressions un poids approprié au degré d'émotion que l'on souhaite obtenir. Par exemple, pour un visage contenant 90% de joie et 10% de tristesse, les intensités des pixels ont déformé l'expression prototypique de joie de 10% vers le visage de tristesse et l'expression prototypique de tristesse de 90% vers le visage de joie. Les niveaux de gris dans ces deux images ont alors été homogénéisés en prenant en considération le rapport de neuf parts provenant de l'expression prototypique de joie et d'une part provenant de l'expression prototypique de tristesse. Cependant, une différence majeure entre notre étude et celles de Calder et al. (1996b) et de Young et al. (1997, Expérience 1) est que, dans notre étude, le passage d'une émotion à une autre a été assuré par l'expression neutre (comme par exemple, Calder et al., 2000b ; Young et al., 1997, Expérience 2).

Comme nous l'avons énoncé dans le chapitre 2, plusieurs paramètres inhérents aux visages se situant hors de nos objectifs peuvent interagir avec le traitement de la valence émotionnelle des stimuli visuels. Ces paramètres pourraient être liés au degré de reconnaissance des visages (Bar et al., 2001 ; Grill-Spector, Kushnir, Hendler, & Malach, 2000), à l'intensité émotionnelle (Critchley et al., 2000b ; Lane et al., 1999 ; Taylor et al., 2000), aux traits catégoriels (c'est-à-dire les visages, les objets, Ishai, Ungerleider, Martin, Maisog, & Haxby, 1997 ; Kanwisher et al., 1997) et aux traits visuels (Lerner, Hendler, Ben-Baashat, Harel, & Malach, 2001 ; Malach et al., 1995). Dans notre étude, nous avons contrôlé tous ces facteurs, soit en rendant leurs effets nuls, soit en les manipulant pour étudier leur(s) manifestation(s). Nous avons rendu nulle l'influence possible des traits catégoriels et du degré de reconnaissance des visages par l'utilisation d'un seul type de stimulus (le visage) correspondant à celui d'un seul individu (la photographie du visage d'une femme, MM, extraite de la base de données de Young, Perrett, Calder, Sprengelmeyer, &

Ekman, 2002). Afin de contrôler les traits visuels, certaines études ont manipulé l'expression faciale (Breiter et al., 1996 ; Critchley et al., 2000a ; Dolan & Morris, 2000). C'est aussi le choix que nous avons opéré de manière encore plus fine puisque le contrôle des traits visuels est assuré dans deux de nos études par des variations d'expressions faciales émotionnelles selon différents degrés, à l'intérieur d'une même émotion. Les expressions émotionnelles que nous avons sélectionnées varient dans leurs intensités et chacune diffère de sa voisine directe par une augmentation ou une diminution de 10% d'émotion.

CHAPITRE 5. Étude des relations spatiales visuelles (cadre expérimental)

Expérience 1. Expérience réalisée en IRMf

1. Objectifs

Cette expérience avait deux objectifs principaux. Dans un premier temps, il s'agissait de montrer l'existence d'une asymétrie hémisphérique dans le traitement des relations spatiales visuelles catégorielles et métriques, qui apporterait des arguments en faveur de l'existence de sous-systèmes de traitement distincts. Dans un second temps, nous souhaitions mieux comprendre l'effet de pratique se manifestant au cours de la tâche métrique et se traduisant par une diminution de l'activation de l'hémisphère droit. Une structure clé était au cœur de notre étude : le gyrus angulaire. Précisons que le protocole utilisé dans cette expérience, proche de celui de Baciú et al. (1999), a été prétesté dans des études antérieures (voir Vernier, 2000).

2. Méthode

Participants

Quatorze participants masculins droitiers ont été testés. Les données de deux d'entre eux n'ont cependant pas pu être analysées, à cause des mouvements répétés de ces participants lors de l'acquisition des images IRMf. Les douze participants restants avaient une moyenne d'âge de 23 ans. Leur vue était normale ou corrigée à l'aide de lentilles et leur score moyen au test de latéralité d'Edinburgh (Oldfield, 1971) était de 0.87. Les participants étaient volontaires pour participer à l'expérience qui était rémunérée 200 F. Aucun d'entre eux ne connaissait les hypothèses expérimentales.

Expérience

L'expérience était composée de deux sessions expérimentales, durant lesquelles les participants étaient testés individuellement. La première session avait pour but de récolter les données fonctionnelles et comportementales, suite à la réalisation d'un jugement métrique. La seconde session avait pour but de récolter les données fonctionnelles et comportementales, suite à la réalisation d'un jugement catégoriel. Tous les participants réalisaient les deux sessions dans cet ordre en raison de notre hypothèse relative à l'effet de pratique.

Dispositif expérimental

Les stimuli étaient présentés visuellement par l'intermédiaire du logiciel Psyscope 1.2.5 (Cohen, MacWhinney, Flatt, & Provost, 1993) sur l'écran d'un Power Macintosh 9600, version Mac OS 9. Les stimuli étaient vus par les participants par le biais d'un vidéo-

projecteur (Eiki LC 6000), d'un écran de projection placé à l'arrière de l'IRM du côté de la tête du participant et d'un système de miroirs. Ainsi, les participants voyaient les stimuli dans un petit miroir situé au-dessus de leur tête, dans le tunnel de l'IRM. Ils disposaient dans la main droite d'un boîtier, muni de deux touches de réponses, relié à l'ordinateur par un réseau de fibres optiques. De plus, ils étaient libres de sortir de la machine à tous moments en nous l'indiquant grâce à une « poire » qu'ils tenaient dans la main gauche. La machine d'IRM était une machine de 1.5 Tesla. Pour atténuer le bruit produit par l'IRM, les participants étaient munis de « boules quies ». L'ordinateur enregistrait les réponses et les temps de réponse.

Stimuli

Les stimuli utilisés dans la tâche métrique et dans la tâche catégorielle ont été construits de telle sorte que les angles visuels pour lesquels ils étaient observés soient les mêmes que ceux des stimuli utilisés dans des études précédentes (Baciu et al., 1999 ; Koenig et al., 1990 ; Kosslyn et al., 1989, Expérience 3). Les mêmes stimuli ont été utilisés pour les deux tâches. Ils étaient présentés en noir sur fond blanc et étaient composés d'une barre horizontale projetée au centre de l'écran et d'un point (en forme de carré) situé soit au-dessus soit au-dessous de cette barre. Les points étaient centrés horizontalement par rapport à l'écran de projection. La barre horizontale mesurait 39 mm de long sur l'écran de projection, ce qui correspondait à 1.14° d'angle visuel (vue à une distance de 196 cm) et une largeur représentant 0.1° d'angle visuel. Le côté du carré représentait aussi 0.1° d'angle visuel. Par rapport à l'étude de Baciu et al. (1999), quatre positions ont été ajoutées ; le carré pouvait ainsi occuper seize positions. Chaque carré se situait au-dessus ou au-dessous de la barre, à l'intérieur ou à l'extérieur d'une distance de référence, représentant une distance de 34 mm à partir de la barre horizontale (c'est-à-dire 1° au-dessus ou au-dessous de la barre horizontale) et était considéré comme facile ou difficile à juger (c'est-à-dire se situait respectivement loin ou près de la distance de référence). La distance séparant les points les plus éloignés de la barre horizontale était de 61 mm sur l'écran, ce qui correspondait à un angle visuel de 1.78° . Chaque position différait de la position la plus proche par environ 0.06° d'angle visuel (du centre d'un carré au centre du carré suivant, sauf pour la première position où cette distance correspondait à la distance entre le bord de la barre et le bord du carré le plus proche).¹ Ainsi, par rapport aux études précédentes, la distance de référence a été modifiée et correspondait à 1° degré d'angle visuel. Pour contrôler la réponse motrice, les stimuli étaient parfois remplacés par un point d'exclamation pour lequel les participants répondaient de manière aléatoire, soit avec une touche soit avec l'autre. La Figure 3, sur laquelle se trouve l'ensemble des positions possibles que pouvaient prendre les stimuli, est représentée avec une échelle d'environ x 1.5.

¹ Chaque stimulus représentait un carré de sept pixels sur sept pixels. Chaque carré était décalé du carré précédent de quatre pixels et partageait avec lui trois pixels communs. La barre centrale représentait soixante-trois pixels sur sept et la distance de référence soixante-trois pixels sur un. Les deux carrés les plus proches de la distance de référence en étaient séparés de trois pixels ; les deux carrés les plus proches de la barre centrale en étaient séparés de quatre pixels.

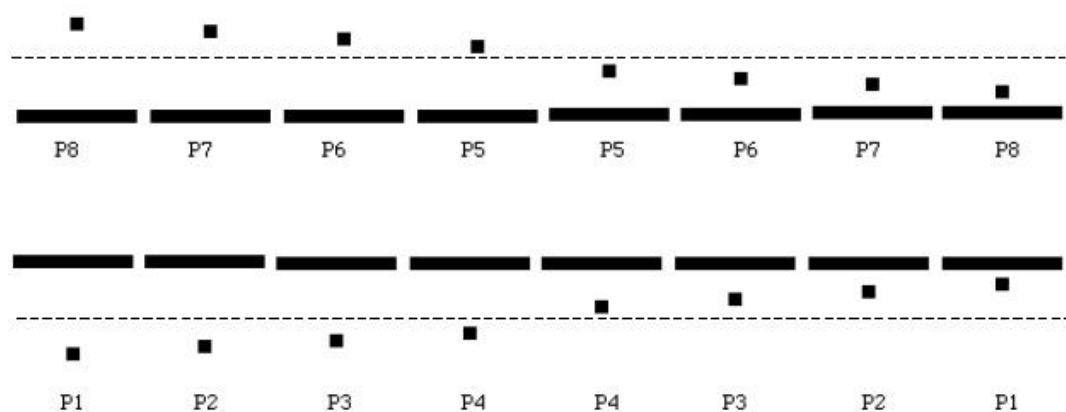


Figure 3. Représentation des seize positions présentées dans les tâches catégorielle et métrique. Les points P1, P2, P3 et P4 correspondent aux points se situant « au-dessous » de la barre et les points P5, P6, P7 et P8 correspondent aux points se situant « au-dessus » de la barre. Les points P1, P2, P7 et P8 correspondent aux stimuli « faciles » et les points P3, P4, P5 et P6 correspondent aux stimuli « difficiles ». En pointillé est représentée la distance de référence. Rappelons qu'à chaque essai, un seul couple point-barre était présenté.

Procédure

Chaque participant était testé individuellement au cours de deux sessions expérimentales décrites ci-dessus, entre lesquelles il sortait de la machine. Les participants restaient environ vingt-cinq minutes dans la machine pour chaque condition, et bénéficiaient d'une pause d'environ trente minutes entre les deux sessions. Chaque session était composée de trois parties. Une première partie durant environ dix minutes consistait à (i) corriger les inhomogénéités du champ magnétique modifié par la présence d'un individu dans l'IRM, (ii) ajuster la puissance radiofréquence, (iii) établir un scan anatomique consistant à effectuer des repérages anatomiques grossiers par rapport au plan antérieur-postérieur en vue de l'acquisition fonctionnelle. Une deuxième partie correspondait à la phase expérimentale fonctionnelle en elle-même, pendant laquelle les instructions, puis les stimuli étaient projetés. Cette partie durait environ six minutes. Enfin, une troisième partie durant environ dix minutes permettait d'effectuer un nouveau scan anatomique des participants. Ici, il s'agissait du scan anatomique proprement dit où un repérage anatomique du cerveau en entier était effectué ; les contrastes étaient optimisés avec la prise en considération d'une bonne résolution spatiale en vue de réaliser des analyses de groupe.

Avant chaque examen, les participants recevaient brièvement des informations quant aux conditions générales de l'IRMf puis ils recevaient les instructions relatives spécifiquement aux tâches, une première fois à l'oral en détail de manière à ce qu'ils soient opérationnels avant d'entrer dans la machine. Ils remplissaient une feuille de consentement, un test de latéralité d'Edinburgh (Oldfield, 1971), et un questionnaire assurant qu'ils ne présentaient pas de contre-indications à l'IRM, ce qui était confirmé par une brève visite auprès d'un médecin de l'hôpital, qui examinait les participants avant leur entrée dans la machine. Enfin, un formulaire détaillé du principe général de l'IRMf leur était fourni.

Phase expérimentale

Une fois dans l'IRM et au début de chaque examen, les participants lisaient les instructions sur le miroir placé au-dessus de leur tête. Ces instructions énonçaient en détail le déroulement de l'expérience, les tâches et le type de stimuli que les participants auraient à traiter. Simultanément, le scan anatomique s'opérait. La phase fonctionnelle démarrait dès que les participants avaient terminé de lire les instructions et dès que le scan anatomique était terminé. Durant les deux examens, un carré et une barre étaient présentés à chaque essai. La tâche métrique consistait à estimer si la distance séparant le carré et la barre horizontale était à l'intérieur d'une distance de référence. Cette distance de référence avait été présentée pendant les instructions, précédant immédiatement l'examen fonctionnel métrique. La tâche catégorielle consistait à estimer si le carré était au-dessus ou au-dessous de la barre, indépendamment de la distance séparant le point de la barre. Les participants, dans cette expérience, n'ont pas bénéficié d'essais de pratique, parce que les différences de champ visuel trouvées dans des études antérieures utilisant ces stimuli ont été atténuées ou ont disparues même avec peu de pratique.

Les facteurs intra-individuels, c'est-à-dire les facteurs pour lesquels tous les participants passaient toutes les conditions, étaient au nombre de trois. En effet, dans la moitié des essais, le point était considéré comme facile et dans l'autre comme difficile. De plus, dans la moitié des essais, le point se situait à l'intérieur de la distance de référence, dans l'autre à l'extérieur. Enfin, dans la moitié des essais, le point se situait au-dessus de la barre, dans l'autre au-dessous de la barre. Nous avons utilisé seize positions différentes (voir Figure 3), deux positions différentes remplissant une même condition expérimentale : par exemple, deux points différents pouvaient être à la fois faciles à juger, à l'intérieur de la distance de référence et au-dessus de la barre centrale. Comme le montre la répartition des stimuli présentée dans le tableau 1, chaque condition expérimentale était présentée treize fois ; ainsi, certains stimuli étaient présentés six fois, d'autres sept fois.

Tableau 1. Présentation de la répartition des stimuli. La deuxième ligne représente le degré de difficulté du point par rapport à la distance de référence. La troisième ligne représente la position du point par rapport à la distance de référence (réponse attendue dans la tâche métrique, moins ou plus). La quatrième ligne représente la position du point par rapport à la barre centrale (réponse attendue dans la tâche catégorielle, au-dessus ou au-dessous). Est indiqué entre parenthèses le nombre de stimuli pour chaque condition.

Stimuli (104)							
Degré de difficulté : facile (52)				Degré de difficulté : difficile (52)			
Distance de référence : moins (26)		Distance de référence : plus (26)		Distance de référence : moins (26)		Distance de référence : plus (26)	
Au-dessus (13)	Au-dessous (13)	Au-dessus (13)	Au-dessous (13)	Au-dessus (13)	Au-dessous (13)	Au-dessus (13)	Au-dessous (13)

Chaque participant effectuait une décision sur cent soixante-dix-huit stimuli, c'est-à-dire sur cent quatre stimuli, présentés dans le tableau 1, et sur soixante-quatorze stimuli composés d'un point d'exclamation. Ils répondaient avec l'index et le majeur. Pour la moitié des participants, une réponse particulière était transmise par l'index, pour l'autre moitié des participants, cette réponse était transmise par le majeur, et réciproquement. La touche correspondant à « plus » dans la tâche métrique correspondait à « au-dessus » dans la tâche catégorielle et la touche correspondant à « moins » dans la tâche métrique correspondait à « au-dessous » dans la tâche catégorielle.

L'expérience comprenait une phase d'entraînement afin que les participants se familiarisent avec les touches du clavier correspondant à la tâche à effectuer. Durant cette phase, ils voyaient apparaître au centre de l'écran, pour la tâche métrique, le mot « plus » ou le mot « moins », tandis que pour la tâche catégorielle, ils voyaient apparaître le mot « au-dessus » ou le mot « au-dessous ». La durée d'apparition des mots au centre de l'écran n'était pas contrainte par le temps ; cela dit, les participants recevaient comme instruction de répondre le plus justement et le plus rapidement possible. En cas de réponse erronée, une barre grisée apparaissait pendant 50 ms dans la partie supérieure du champ visuel du participant. La présence de ce feedback au cours de la phase de familiarisation avec les touches de réponse permettait de mettre les participants dans les mêmes conditions que lors de la phase expérimentale.

Paradigme

L'ordre de succession des essais a été généré grâce à l'élaboration d'un compromis entre les contraintes liées aux expériences réalisées en Psychologie expérimentale et les contraintes liées à la technique d'IRMf événementielle, afin d'obtenir le meilleur rapport signal sur bruit possible. Les différents types de stimuli étaient présentés de façon entrelacée, avec un SOA (Stimulus Onset Asynchrony = l'intervalle séparant deux stimuli *de même type*, c'est-à-dire l'intervalle séparant deux stimuli « faciles » ou deux stimuli « difficiles ») variant aléatoirement autour d'une valeur moyenne d'un multiple de 2 secondes. Le SOA était égal à 6240 ms de moyenne (variant de 2000 ms à 24000 ms) pour les stimuli « faciles » et à 5760 ms de moyenne (variant de 2000 ms à 18000 ms) pour les stimuli « difficiles ». Dans ces conditions, les réponses fonctionnelles à l'un ou à l'autre type de stimuli ont pu être identifiées, malgré le recouvrement des réponses hémodynamiques à des stimuli présentés successivement. De plus, afin de satisfaire les contraintes imposées par la méthode expérimentale, pas plus de trois stimuli expérimentaux ayant les mêmes caractéristiques (qu'ils soient au-dessus ou au-dessous de la barre ou qu'ils soient à l'intérieur ou à l'extérieur de la distance de référence) n'apparaissaient successivement. Le paradigme a été prétesté sur un participant expert, dont les données n'ont pas été conservées. Le paradigme utilisé, de type événementiel rapide (voir Buckner et al., 1998), durait environ six minutes. Chaque essai était constitué de la barre qui apparaissait seule pendant 1000 ms et qui permettait aux participants de fixer le centre de l'écran, puis apparaissait de nouveau la barre accompagnée du carré pendant également 1000 ms, durée pendant laquelle les participants pouvaient répondre. A l'expiration des 1000 ms, l'essai suivant débutait, de sorte que la barre restait constamment à l'écran durant toute la durée de l'expérience (sauf lorsque les points d'exclamation apparaissaient). La durée d'apparition des points (1000 ms) a été choisie en fonction de la durée utilisée dans l'expérience de Baciú et al. (1999), et un scan fonctionnel étant effectué toutes les 2000 ms, nous avons fixé la durée d'apparition de la barre seule à 1000 ms. En cas de réponse erronée, une barre grisée apparaissait pendant 50 ms dans la partie supérieure du champ visuel du participant. La présence d'un signal d'erreur devait permettre aux participants de « réactualiser » si nécessaire la distance critique à juger. Ce facteur nous semble essentiel afin de contrôler que les erreurs commises ne puissent pas être attribuées à une évaluation erronée de la distance critique, mais plutôt à une réelle erreur d'estimation de la distance séparant le carré de la barre.

Acquisition des données IRMf

Les mesures des activations ont été réalisées par un imageur clinique de 1.5 T (Philips ACS II). 23 coupes fonctionnelles d'une épaisseur de 5 mm jointives, transverses et parallèles

à l'axe commissure antérieure (CA) - commissure postérieure (CP) ont été acquises. Une séquence EPI (« **echo-planar imaging** ») en écho de gradient a été utilisée avec les paramètres suivants : TR = 2000 ms, TE = 45 ms, angle de basculement = 90°, champ de vision = 256x256 mm, matrice d'acquisition = 64x64, matrice de reconstruction = 128x128. Après le scan fonctionnel, l'acquisition d'un scan anatomique a été effectuée, pendant laquelle ont été exécutées 150 coupes anatomiques transverses et jointives d'1 mm d'épaisseur chacune et centrées sur le même axe que les coupes fonctionnelles.

Prétraitements des données IRMf et analyses statistiques IRMf

Les prétraitements (le « **slice timing** », le réaligement, la normalisation spatiale et le lissage) ont été réalisés à l'aide du logiciel SPM (« **Statistical Parametric Mapping** ») (voir Friston et al., 1995 ; Josephs, Turner, & Friston, 1997). Les analyses statistiques ont été conduites en utilisant le modèle linéaire général pour les analyses de données d'IRMf événementielle avec SPM99. La réponse hémodynamique évoquée suite à la présentation des différents types d'événements a été modélisée à l'aide d'une combinaison linéaire de la fonction canonique de réponse hémodynamique (« **hemodynamic response function, hrf** ») et de sa dérivée temporelle (Friston et al., 1998). Les coordonnées des structures cérébrales identifiées avec SPM99 ont été comparées aux coordonnées, correspondant à l'atlas de Talairach (Talairach & Tournoux, 1988).

Les analyses statistiques ont été d'abord réalisées individuellement pour chaque participant et ont été ensuite intégrées dans une analyse de groupe réalisée avec un « **modèle à effets fixes** » (« **FFX model** »). A cause de son meilleur pouvoir de généralisation à la population étudiée dans cette expérience, une analyse de groupe a été réalisée avec un « modèle à effets aléatoires » (« **RFX model** ») (Hamann & Mao, 2002). Mais avec un tel modèle, les effets sont plus difficiles à mettre en évidence et cette analyse livre des résultats avec des seuils statistiques P non corrigés. C'est la raison pour laquelle, dans ce cas, nos hypothèses n'ont été validées que si les gyri angulaires, structures sur lesquelles nous avons une hypothèse forte, étaient activés. Dans les modèles FFX, nous avons considéré les voxels répondant à un seuil d'intensité $P=.05$; dans les modèles RFX, nous avons considéré les voxels survivant à un seuil $P=.001$. Des tests t ont été appliqués pour les analyses mesurant les effets simples, tandis que des tests F ont été utilisés pour les analyses mesurant les effets différentiels.

Afin d'évaluer la manifestation supposée d'un effet de pratique dans la tâche métrique, lors de l'analyse des données fonctionnelles, le scan a été divisé en deux parties de façon contrôlée : chaque partie comprenait autant de stimuli de type 1 (stimuli faciles) que de type 2 (stimuli difficiles). Les analyses ont alors été effectuées pour les deux parties, indépendamment l'une de l'autre. Dans ces analyses, seules les données métriques ont été considérées dans l'élaboration du modèle. Des analyses individuelles ont d'abord été réalisées dans chacune des deux parties. Des analyses de groupe ont alors été conduites sur la base des images de contraste individuelles en utilisant un modèle RFX. Nous avons ensuite réalisé des analyses de variance (ANOVA) en considérant comme facteurs d'intérêt la difficulté des points (faciles ou difficiles), la partie de la tâche (bloc 1 et bloc 2), et la région cérébrale.

3. Résultats

Conversion des images au format Analyze

Les images provenant de l'imageur Philips ont été transformées au format ANALYZE pour être lues avec SPM99. Après l'acquisition des images fonctionnelles, cette étape a permis leur reconstruction.

Résultats des analyses comportementales

Des analyses de variance séparées ont été conduites systématiquement sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses. Lors de l'analyse des temps de réponse, seules les bonnes réponses ont été considérées. Ainsi, dans la tâche métrique, l'analyse des temps de réponse portait sur 92.2% des réponses, tandis que dans la tâche catégorielle, l'analyse des temps de réponse portait sur 96.6% des réponses. En raison de ce dernier fort pourcentage de réussite, aucune analyse portant sur le nombre de bonnes réponses n'a été conduite dans la tâche catégorielle. De plus, un élagage (« trimming ») a été effectué sur les données : préalablement au calcul des moyennes par sujet et par cellule (définie par le croisement des différents facteurs), les temps de réponse excédant 2.0 fois la moyenne de la cellule ont été remplacés par la moyenne de cette même cellule. Nous avons choisi de conserver ce seuil pour l'ensemble des analyses de variance effectuées dans cette expérience et pour l'ensemble des expériences. Dans cette expérience, avec ce seuil, moins d'1% des réponses et des temps de réponse a été remplacé dans la tâche métrique, ainsi que dans la tâche catégorielle. Par ailleurs, nous avons vérifié qu'il n'existait pas d'influence du facteur « **doigts de réponse** ». Nous présenterons ci-dessous les résultats significatifs. Certains résultats non significatifs sont présentés pour les besoins de la discussion.

Tâche métrique

Une analyse de variance a été conduite, incluant les facteurs intrasujets « **position par rapport à la barre horizontale** », « **position par rapport à la distance de référence** », « difficulté » et « bloc ». Pour étudier l'influence de ce dernier facteur, nous avons séparé le paradigme en deux parties, chaque partie comprenant exactement le même nombre de stimuli expérimentaux (c'est-à-dire cinquante-deux stimuli incluant des stimuli à la fois faciles et difficiles dans le bloc 1 et dans le bloc 2). Cette analyse a été menée sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses.

Analyse des temps de réponse

L'analyse de variance a révélé un effet du facteur « difficulté », en faveur de temps de réponse plus rapides pour les stimuli faciles (597 ms) que pour les stimuli difficiles (642 ms), $F(1,11)=94.4$, $p<.001$. De plus, elle a révélé un effet du facteur « bloc ». Les participants ont répondu plus lentement dans le premier bloc d'essais (633 ms) que dans le second (605 ms), $F(1,11)=7$, $p<.05$. En revanche, elle n'a pas révélé d'interaction des facteurs « bloc » et « difficulté », $p>.2$.

Analyse du nombre de bonnes réponses

L'analyse de variance n'a pas révélé d'effet du facteur « difficulté », $p>.08$. En revanche, elle a mis en évidence un effet du facteur « bloc » : les participants ont été moins précis dans le premier bloc (47 bonnes réponses) que dans le second bloc (49 bonnes réponses), $F(1,11)=10.6$, $p<.01$. De plus, l'analyse de variance a montré une interaction des facteurs « difficulté » et « bloc », $F(1,11)=689$, $p<.001$. Les participants étaient plus précis dans le premier bloc que dans le second pour les stimuli faciles, $F(1,11)=212$, $p<.001$ (respectivement 27 et 22 bonnes réponses), mais moins précis dans le premier bloc que dans le second pour les stimuli difficiles $F(1,11)=508$, $p<.001$ (respectivement 20 et 27 bonnes réponses). Dans le premier bloc, les stimuli étaient évalués plus précisément quand ils étaient faciles que lorsqu'ils étaient difficiles, $F(1,11)=521$, $p<.001$ (respectivement 27

et 20 bonnes réponses), tandis que dans le second bloc, les stimuli étaient évalués plus précisément quand ils étaient difficiles que lorsqu'ils étaient faciles, $F(1,11)=204$, $p<.001$ (respectivement 27 et 22 bonnes réponses). L'interaction est représentée sur la Figure 4. Enfin, un effet du facteur « position par rapport à la barre », $F(1,11)=7.1$, $p<.05$ a été observé, en faveur d'un plus grand nombre de bonnes réponses lorsque le point était au-dessous de la barre que lorsqu'il était au-dessus (respectivement 49 et 47 bonnes réponses).

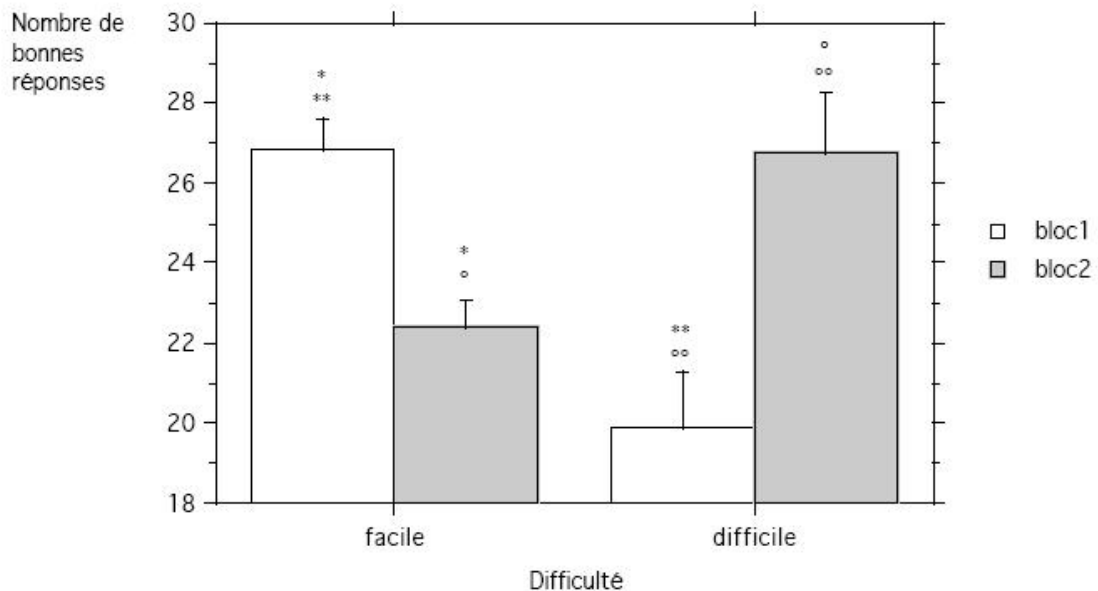


Figure 4. Représentation du nombre de bonnes réponses en fonction des facteurs « bloc » (bloc 1 versus bloc 2) et « difficulté » (stimuli faciles versus stimuli difficiles) dans la tâche métrique (*, **, ° et °° $p<.001$).

Tâche catégorielle

Une analyse de variance a été conduite, incluant les facteurs intrasujets « **position par rapport à la barre horizontale** », « **position par rapport à la distance de référence** » et « bloc ». Pour étudier l'influence de ce dernier facteur, nous avons séparé le paradigme en deux parties, comme pour la tâche métrique. L'analyse a été menée sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses.

Analyse des temps de réponse

L'analyse de variance a révélé un effet du facteur « **position par rapport à la barre** », en faveur de temps de réponse plus rapides pour les stimuli situés au-dessous de la barre horizontale (480 ms) que pour les stimuli situés au-dessus de la barre (499 ms), $F(1,11)=7.3$, $p<.05$. De plus, elle a révélé une tendance en faveur d'un effet du facteur « **position par rapport à la distance de référence** » : les participants répondaient plus rapidement lorsque les points étaient situés au-delà de la distance de référence (c'est-à-dire loin de la barre horizontale) que lorsqu'ils étaient situés à l'intérieur de la distance de référence (c'est-à-dire près de la barre horizontale), $F(1,11)=4.1$, $p<.07$. Leurs temps de réponse étaient respectivement de 484 ms et de 494 ms. Aucun effet simple du facteur « bloc » n'a été mis en évidence, $p>.1$.

Analyse du nombre de bonnes réponses

Elle n'a pas été menée en raison du très fort taux (96.6%) de bonnes réponses.

Tâches métrique et catégorielle

Une analyse de variance a été réalisée, incluant le facteur « tâche ». Cette analyse a été menée sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses.

Analyse des temps de réponse et analyse du nombre de bonnes réponses

Les participants ont réalisé les jugements catégoriels plus rapidement que les jugements métriques (respectivement 489 ms et 619 ms), $F(1,11)=80.3$, $p<.001$ et plus précisément (respectivement 100 et 96 bonnes réponses), $F(1,11)=6.6$, $p<.05$.

Résultats des analyses fonctionnelles

Les analyses statistiques des données IRMf ont été réalisées avec SPM99 en conformité avec les méthodes d'analyse d'études ayant utilisé cet outil (voir Blakemore et al., 2001, 2003 ; Hopfinger, Buchel, Holmes, & Friston, 2000 ; Josephs & Henson, 1999).

Toutes les images fonctionnelles ont été contrastées par rapport à la condition de base. Toutes les analyses de groupe, conduites avec un modèle FFX, ont été corrigées au seuil de voxel $P<.05$ ou non corrigées au seuil $P<.001$. Les analyses RFX présentées sont toutes non corrigées au seuil du voxel $P<.001$. C'est la raison pour laquelle seuls les gyri angulaires ont été considérés dans ce cas, en raison de nos hypothèses spécifiques.

Résultats dans les tâches catégorielles et métriques - analyses FFX

Dans la tâche catégorielle, une activation au niveau du putamen gauche ($x, y, z = -24, -4, -4$) a été observée. Dans la tâche métrique, une activation a été observée dans le gyrus angulaire droit ($x, y, z = 40, -72, 31$), dans le gyrus temporal moyen droit ($x, y, z = 48, -65, 22$) dans le précuneus droit ($x, y, z = 16, -56, 53$) et dans le cuneus gauche ($x, y, z = -8, -89, 14$). Ces activations sont représentées sur la Figure 5 (voir tableau 2 pour les coordonnées de Talairach). Dans la condition « difficile », une activation a été observée dans les mêmes régions que pour la tâche métrique globale (voir tableau 2 et Figure 6) : dans le gyrus angulaire droit ($x, y, z = 40, -72, 27$), dans le gyrus temporal moyen droit ($x, y, z = 48, -65, 22$) dans le précuneus droit ($x, y, z = 16, -56, 53$) et dans le cuneus gauche ($x, y, z = -8, -89, 14$). Dans la condition « facile », aucune activation significative n'a été observée. Une activation non corrigée a été observée dans le gyrus angulaire droit ($x, y, z = 40, -72, 31$) (voir Figure 6).

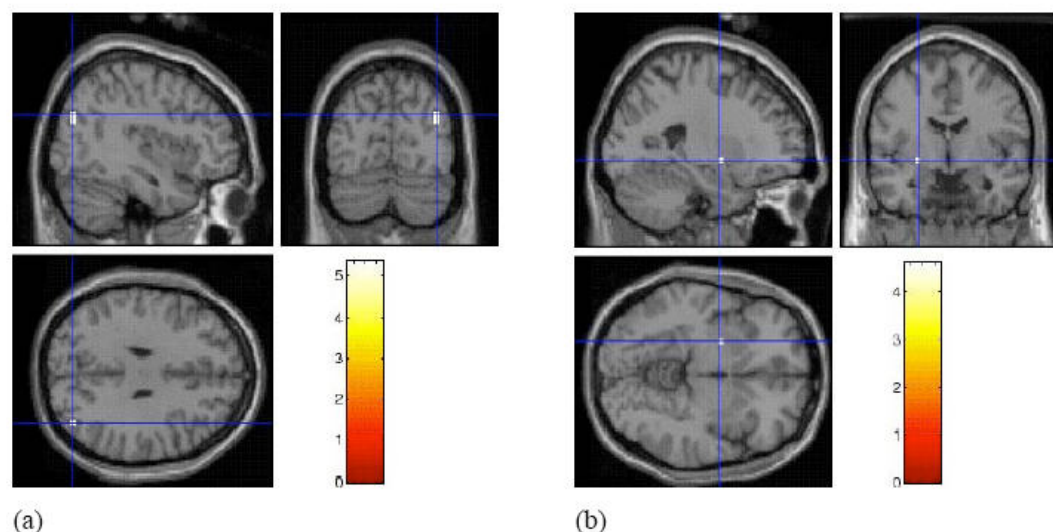


Figure 5. Activation cérébrale dans (a) le gyrus angulaire droit durant le jugement métrique et dans (b) le putamen gauche durant le jugement catégoriel (analyses FFX, activations corrigées, $P < .05$).

Tableau 2. Régions cérébrales activées dans la tâche métrique, dans la tâche catégorielle et dans les conditions difficile et facile de la tâche métrique. Chacune de ces conditions est contrastée par rapport à la condition contrôle.

Région cérébrale		Coordonnées AB (mm) x y z				Z max	kE	P	Coordonnées AB (mm) x y z				Z max	kE	P
Métrique - Contrôle									Catégorielle – Contrôle						
Gyrus angulaire	HD	40	-72	31		5.25	2	.002	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus temporal moyen	HD	48	-65	22		5.17	5	.003	-	-	-	-	-	-	-
Précuneus	HD	16	-56	53		4.77	1	.020	-	-	-	-	-	-	-
Cuneus	HG	-8	-89	14	18	5.00	1	.007	-	-	-	-	-	-	-
Putamen	HG	-	-	-	-	-	-	-	-24	-4	-4		4.58	1	.043
Difficile - Contrôle									Facile – Contrôle						
Gyrus angulaire	HD	40	-72	27	39	5.31	8	.002	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus temporal moyen	HD	48	-65	22		4.89	8	.012	-	-	-	-	-	-	-
Précuneus	HD	16	-56	53		4.63	1	.036	-	-	-	-	-	-	-
Cuneus	HG	-8	-89	14	18	5.27	3	.002	-	-	-	-	-	-	-

Note. Les analyses de groupe ont été réalisées avec un modèle FFX. Pour chaque région cérébrale, sont donnés : les coordonnées Talairach, l'aire de Brodmann (AB) correspondante, les scores Z maximum, le nombre de voxels activés dans la région (kE) et le niveau de significativité au niveau du voxel ($P < .05$).

HG = hémisphère gauche, HD = hémisphère droit.

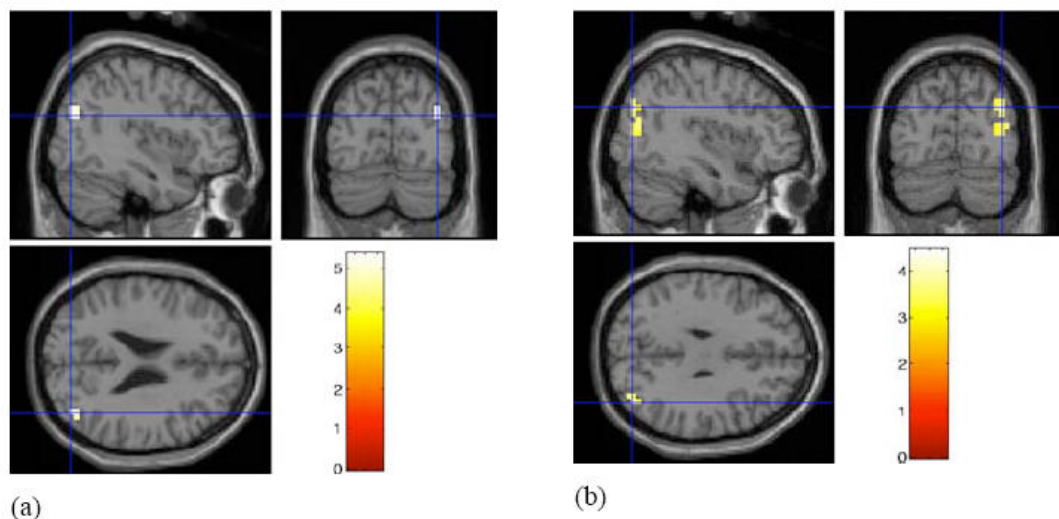


Figure 6. Activation cérébrale dans le gyrus angulaire droit, durant le jugement métrique : (a) dans la condition « difficile » (analyse FFX, activation corrigée, $P < .05$) et (b) dans la condition « facile » (analyse FFX, activation non corrigée, $P < .001$).

Résultats dans la tâche métrique dans la première et dans la seconde partie du scan - analyses RFX

Dans la première partie du scan, le modèle RFX a mis en évidence une forte activation au niveau du gyrus angulaire droit. Les analyses séparées des modalités « faciles » et « difficiles » du facteur « difficulté » ont montré une activation au niveau du gyrus angulaire droit dans les deux cas (voir Figure 7). Ces activations présentaient, au niveau du voxel, les scores Z maximum et au niveau du cluster, le nombre maximum de voxels activés (kE). Des analyses individuelles ont montré une activation du gyrus angulaire droit chez cinq participants. Dans la seconde partie, le modèle RFX n'a pas mis en évidence d'activation du gyrus angulaire droit quelle que soit la modalité de difficulté (voir Figure 8).

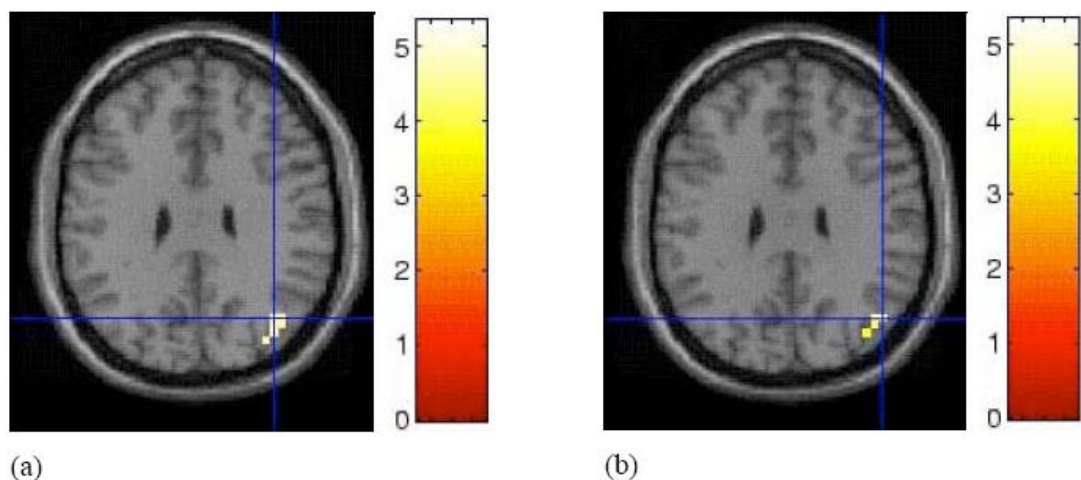


Figure 7. Activation cérébrale dans le gyrus angulaire droit, durant le jugement métrique de la première partie du scan : (a) dans la condition « difficile » et (b) dans la condition « facile » (analyses RFX, activations non corrigées, $P < .001$). Les activations sont superposées sur des coupes axiales [(a) $z = 31$, condition « difficile » et (b) $z = 31$, condition « facile »] provenant de l'atlas de Talairach (Talairach & Tournoux, 1988).

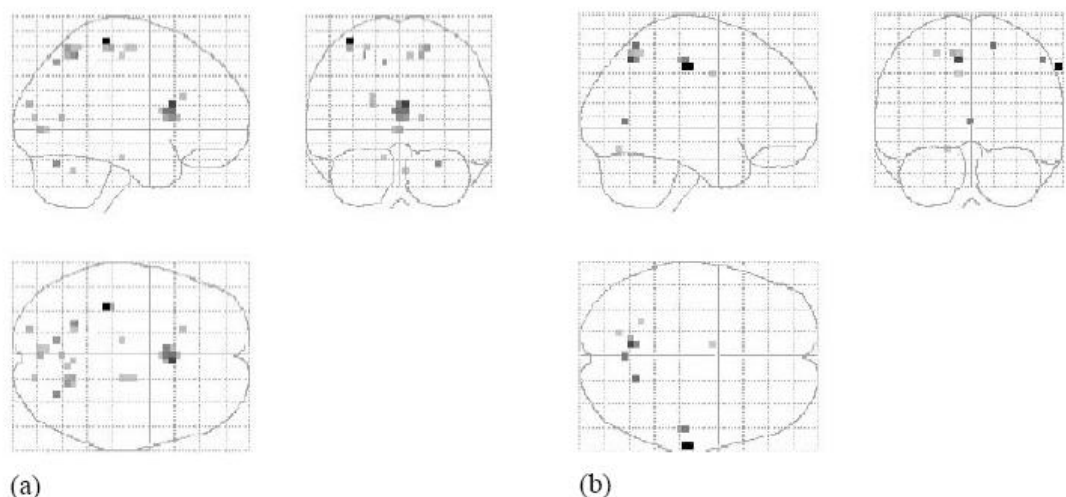


Figure 8. Activations cérébrales durant le jugement métrique de la seconde partie du scan (a) dans la condition « difficile » et (b) dans la condition « facile » (analyses RFX, activations non corrigées, $P < .001$).

Dans les analyses individuelles de la seconde partie, le gyrus angulaire droit était activé chez seulement un participant. Puisque nous avons une hypothèse forte sur l'activation de cette structure, nous avons réalisé une analyse de variance, considérant comme facteur le bloc. Cette analyse a été effectuée sur le nombre de voxels activés au niveau du cluster (voir Figure 9). Puisque l'activation au niveau du gyrus angulaire gauche n'a pas été observée dans l'analyse de groupe et chez seulement un participant dans les analyses individuelles, l'analyse de variance n'a été conduite que sur le gyrus angulaire droit. Cette analyse a montré une tendance en faveur d'un nombre plus important de voxels activés dans la première partie que dans la seconde (respectivement 3 et 0 voxels), $F(1,11) = 3.9$, $p < .08$.

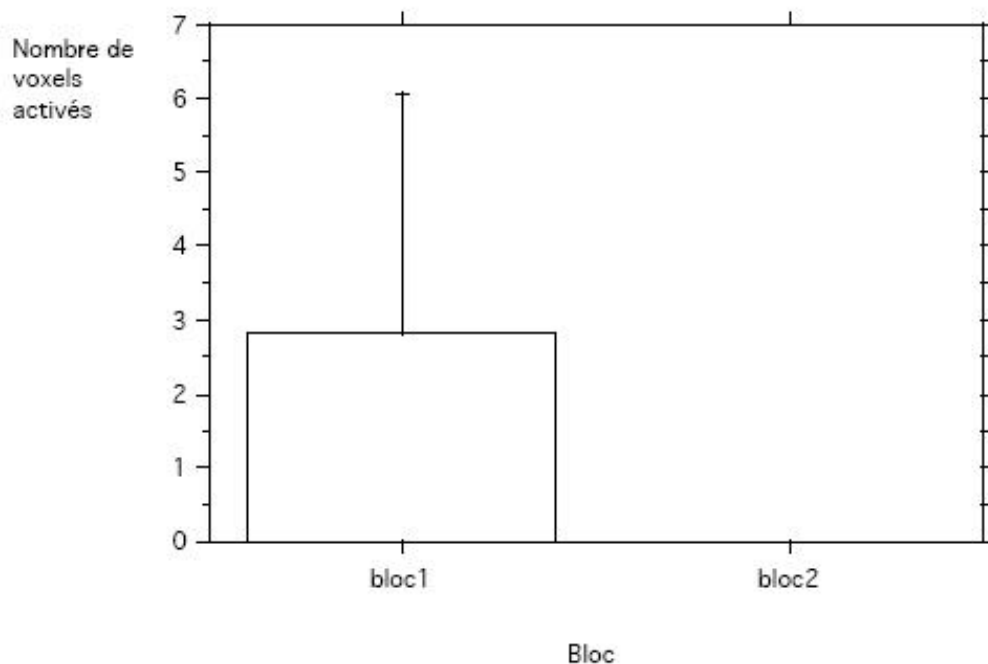


Figure 9. Nombre moyen de voxels (kE) activés dans le gyrus angulaire droit, dans le premier bloc et dans le second bloc du scan métrique.

4. Discussion

Notre première étude d'IRMf avait deux objectifs majeurs. Le premier objectif était de mettre en évidence l'existence de sous-systèmes distincts impliqués dans le traitement des relations spatiales métriques et catégorielles en testant l'hypothèse d'asymétrie hémisphérique. Celle-ci postule l'existence d'un avantage relatif de l'hémisphère gauche dans le jugement catégoriel et d'un avantage relatif de l'hémisphère droit dans le jugement métrique (Kosslyn, 1987 ; Kosslyn et al., 1989). Il s'agissait de tester cette hypothèse en répliquant des résultats observés dans de nombreuses études réalisées en champ visuel divisé (par exemple, Christman, 2002 ; Koenig et al., 1990 ; Kosslyn et al., 1989 ; Niebauer, 2001 ; Okubo & Michimata, 2002) et dans des études de neuroimagerie (Baciu et al., 1999 ; Kosslyn et al., 1998 ; Trojano et al., 2002). Dans la tâche métrique, nous avons observé une

activation du gyrus angulaire droit et du précuneus droit. Rappelons que le gyrus angulaire droit était l'une des structures cérébrales principales activées dans les études d'IRMf de Baciú et al. (1999) et de Trojano et al. (2002). Par ailleurs, cette structure est très impliquée dans d'autres tâches dans lesquelles de l'information métrique précise est requise (Laeng, 1994 ; Michimata, 1997). L'activation obtenue dans le précuneus, bien que non attendue, n'était pas surprenante, puisque cette structure semble jouer un rôle dans la computation de l'information spatiale métrique (Kosslyn et al., 1998) et dans les processus attentionnels (Corbetta, Miezen, Schulman, & Petersen, 1993 ; Posner & Petersen, 1990). En revanche, l'activation au niveau du cuneus gauche était plus surprenante, sauf si l'on considère cette structure comme une partie du cortex visuel associatif (BM 18, 19) dont l'activation a été révélée dans l'étude de Baciú et al. (1999). Dans la tâche catégorielle, nous avons observé une activation du putamen gauche. Bien que cette activation fût localisée au niveau de l'hémisphère gauche, confirmant l'existence d'une asymétrie hémisphérique, la région du putamen n'était pas attendue. En effet, cette région n'a pas été répertoriée comme jouant un rôle dans les jugements spatiaux dans des recherches de neuroimagerie (Baciú et al., 1999 ; Kosslyn et al., 1998). Cependant, ces recherches ont rapporté des activations au niveau de structures variées dans les tâches catégorielles. Par ailleurs, il faut bien admettre que les études de neuroimagerie testant l'existence d'une asymétrie hémisphérique sont encore trop rares pour atteindre un consensus sur la nature des structures cérébrales (de l'hémisphère gauche) activées durant les jugements catégoriels. Néanmoins, nos résultats ont confirmé l'hypothèse d'une asymétrie hémisphérique dans le traitement visuospatial catégoriel et métrique dans les hémisphères gauche et droit respectivement.

Le second objectif de notre recherche était d'examiner l'hypothèse d'un effet de pratique dans la tâche métrique, postulant une diminution de l'activation dans l'hémisphère droit au cours de cette tâche, en particulier au niveau du gyrus angulaire. Dans les analyses comportementales, un effet du facteur « bloc » a été observé à la fois au niveau des temps de réponse et du nombre de bonnes réponses. De plus, une interaction des facteurs « bloc » et « difficulté » a été mise en évidence au niveau des bonnes réponses. Les stimuli estimés comme les plus difficiles (attestés comme plus difficiles par les temps de réponse des participants) semblent être devenus plus faciles dans le second bloc, révélant un effet d'apprentissage. De plus, dans le bloc 1, les participants présentaient de meilleures performances dans le traitement des stimuli faciles que dans le traitement des stimuli difficiles, tandis que dans le bloc 2, les stimuli que nous considérions comme les plus difficiles semblent être devenus les plus faciles, confirmant l'existence d'un effet d'apprentissage pour les stimuli difficiles et montrant peut-être un effet de fatigue pour les stimuli faciles. Dans la tâche catégorielle, aucun effet de bloc n'a été observé ; cette absence d'effet est cohérente avec les études réalisées antérieurement (excepté le cas rare de l'étude de Michimata, 1997). De plus, dans les analyses fonctionnelles, l'analyse de variance conduite dans la tâche métrique au niveau du gyrus angulaire a mis en évidence une diminution de l'activation du gyrus angulaire droit, mais sans augmentation de l'activation du gyrus angulaire gauche. Nous avons ainsi partiellement répliqué les résultats d'IRMf de Baciú et al. (1999) obtenus avec un paradigme bloc.

L'utilisation d'un paradigme événementiel nous a permis de manipuler le facteur « difficulté » et ainsi, d'aller plus loin dans la compréhension du traitement des relations spatiales métriques. Contrairement à un paradigme de type bloc, la présentation des stimuli était relativement écologique, et non contrainte par l'envoi par blocs de stimuli uniquement faciles ou uniquement difficiles. Au contraire, les stimuli étaient présentés de façon entrelacée. Ainsi, le paradigme de type événementiel a permis de coder le facteur « difficulté » en tant que type d'événement particulier afin d'obtenir une carte

d'activation spécifique aux stimuli faciles et une carte d'activation spécifique aux stimuli difficiles. L'analyse des données fonctionnelles obtenues suite au jugement métrique a montré une activation au niveau du gyrus angulaire de l'hémisphère droit plus apparente dans la condition « difficile » (activation corrigée) que dans la condition « facile » (activation non corrigée). Ce résultat se doit d'être utilisé avec précaution dans la mesure où une comparaison directe entre les cartes de stimuli difficiles *versus* faciles n'a pas fait ressortir d'activation du gyrus angulaire droit, reflétant probablement une différence d'activation trop faible. Par ailleurs, nous avons observé une disparition de l'activation du gyrus angulaire de l'hémisphère droit au cours du jugement métrique. Nous proposons deux interprétations à cette observation : premièrement, l'absence d'activation du gyrus angulaire de l'hémisphère droit dans la seconde partie de l'expérience ne signifie pas nécessairement qu'il ne participe plus à la computation de l'information métrique. Étant devenu expert au cours de l'expérience, comme l'attestent la diminution des temps de réponse et l'augmentation du nombre de bonnes réponses observées au cours du temps, le gyrus angulaire droit aurait besoin de moins de ressources pour continuer à effectuer ces computations. Précisons cependant que cette hypothèse pourrait s'appliquer à toutes les expériences utilisant des techniques de neuroimagerie et pourrait nous amener à conclure, dans une perspective extrême, que les structures activées correspondraient aux structures les moins compétentes à effectuer les jugements requis : elles fourniraient alors un effort supplémentaire par rapport aux structures les plus expertes. Nous ne pouvons réfuter cette hypothèse même si elle reste peu probable. Ajoutons néanmoins que des études de champ visuel divisé (Banich & Federmeier, 1999 ; Cowin & Hellige, 1994 ; Hoyer & Rybash, 1992 ; Koenig et al., 1990 ; Kosslyn et al., 1989 ; Michimata, 1997 ; Rybash & Hoyer, 1992) ont apporté des arguments démontrant une disparition de l'avantage de l'hémisphère droit dans des jugements métriques, réfutant l'hypothèse précédente. En effet, la présentation en champ visuel divisé permet d'observer l'implication différenciée de chacun des deux hémisphères cérébraux. Pour les cas où un hémisphère participe plus que l'autre au traitement d'une information, un effet du champ visuel contralatéral sera observé par des indices comportementaux.

Notre deuxième interprétation considère que la diminution de l'activation du gyrus angulaire droit pourrait être le miroir d'un changement dans la stratégie utilisée pour réaliser les jugements métriques. Nous postulons que ce changement vers une stratégie plus optimale pourrait se manifester par le développement de nouvelles catégories. Un indice en faveur de cette interprétation provient des activations différenciées observées pour les stimuli difficiles et pour les stimuli faciles, statistiquement plus robustes pour les stimuli difficiles (obtenues avec un seuil statistique corrigé) que pour les stimuli faciles (obtenues avec un seuil statistique non corrigé). Il apparaît raisonnable de considérer que si une stratégie de catégorisation de l'information métrique s'opère (en termes de catégories « près » et « loin »), elle se mettrait en place plus rapidement avec des stimuli faciles à évaluer qu'avec des stimuli difficiles. Rappelons néanmoins que les différences d'activations n'étaient apparentes qu'avec des effets simples, une comparaison directe entre les activations liées aux deux types d'événements n'ayant pas conduit à une activation plus importante pour les stimuli difficiles. Par ailleurs, cette expérience n'a pas permis de révéler d'augmentation de l'activation de l'hémisphère gauche au cours de la tâche, ce qui aurait pu constituer un indice supplémentaire à la mise en place d'une stratégie catégorielle (Banich & Federmeier, 1999 ; Kosslyn et al., 1989).

Par conséquent, notre expérience ne permet pas de trancher sur l'existence d'un changement de stratégie au cours du traitement métrique, ni, si ce changement s'opère, sur la nature des stratégies élaborées au cours du temps. Néanmoins, nous considérons

que les prises en compte (i) d'un paradigme événementiel et (ii) de la notion de difficulté permettront de mieux comprendre la disparition de l'avantage de l'hémisphère droit au cours du traitement métrique.

CHAPITRE 6. Étude de l'implication des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles (cadre expérimental)

Les expériences 2 (réalisée en champ visuel divisé) et 3 (effectuée en IRMf) comportaient deux objectifs majeurs. Le premier objectif consistait à démontrer l'implication des relations spatiales visuelles métriques et catégorielles dans, respectivement, la discrimination de l'intensité et de la valence d'expressions faciales émotionnelles. Ainsi, nous postulions l'existence d'une asymétrie hémisphérique dans le traitement des expressions faciales émotionnelles, en faveur d'un avantage de l'hémisphère droit dans la discrimination des intensités faciales émotionnelles et d'un avantage de l'hémisphère gauche dans la discrimination de la valence faciale émotionnelle. De plus, nous nous attendions à l'existence d'un effet de pratique dans le jugement de l'intensité, se manifestant par la disparition de l'avantage de l'hémisphère droit. Par ailleurs, nous souhaitions tester l'hypothèse de perception catégorielle des expressions faciales. Le second objectif était de tester l'hypothèse de polarité par la mise en évidence de l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles, qui pourrait se révéler par une asymétrie hémisphérique au niveau de l'amygdale. Nous souhaitions également mesurer l'influence de l'intensité dans le traitement des expressions faciales émotionnelles.

Expérience 2. Expérience préliminaire à l'IRMf, réalisée en champ visuel divisé

1. Objectifs

Dans l'expérience 2, nous avons deux objectifs majeurs, énumérés plus haut. Précisons que cette expérience, étant réalisée avec la méthode de champ visuel divisé, ne pouvait permettre d'obtenir que des indices hémisphériques. Ainsi, les effets hémisphériques susceptibles d'être obtenus suite à la manifestation des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles (objectif 1) et les effets hémisphériques susceptibles d'être observés suite à la manifestation d'un traitement émotionnel des expressions faciales (objectif 2), pouvaient s'annuler. Par ailleurs, ajoutons que si une préférence hémisphérique apparaissait, il pourrait s'avérer difficile d'attribuer avec certitude à quel mécanisme, visuel ou émotionnel, cet effet est dû.

Ainsi, l'expérience 2 a été conçue afin d'obtenir des indices (et non des preuves) en faveur de la manifestation de ces différents mécanismes de traitement, et également

de tester la faisabilité des jugements d'intensité et de valence, qui pouvaient paraître complexes.

2. Méthode

Participants

Vingt-six volontaires de sexe masculin ont participé à l'expérience. Les résultats de deux d'entre eux ont été éliminés sur les critères suivants : les temps de réponse, le nombre de bonnes réponses et le coefficient de latéralité. Les vingt-quatre participants dont les résultats ont été retenus étaient tous étudiants à l'Université Lumière Lyon 2, âgés de dix-huit à vingt-neuf ans (moyenne d'âge de vingt-deux ans), et étaient droitiers, comme l'attestait leur index de latéralité de 0.81 au test d'Edinburgh (Oldfield, 1971). De plus, leur vision était normale ou corrigée. Aucun d'entre eux n'avait participé à l'expérience précédente.

Expérience

L'expérience était composée de deux sessions expérimentales, durant lesquelles les participants étaient testés individuellement. L'une des deux sessions avait pour but d'identifier les réponses et les temps de réponse suite à la réalisation d'un jugement portant sur l'intensité d'expressions faciales émotionnelles, tandis que l'autre session avait pour but d'identifier les réponses et les temps de réponse suite à la réalisation d'un jugement portant sur la valence d'expressions faciales émotionnelles. L'ordre de passation des deux sessions était contrebalancé entre les participants.

Dispositif expérimental

Les visages étaient présentés sur fond blanc, avec le logiciel Psyscope 1.2.5. sur un écran Formac ProNitron 17/500 relié à un ordinateur Macintosh (6100/200). L'écran était réglé en milliers de couleurs, sa résolution était de 1024 x 768.75 Hz et la fréquence de balayage était de 75 Hz. Les réponses et les temps de réponse ont été enregistrés par le logiciel Psyscope 1.2.5 à partir des touches de réponse. L'activation de l'une des touches arrêtait l'horloge interne de l'ordinateur et déterminait un temps de réponse, qui était enregistré directement par l'ordinateur.

Stimuli

Les stimuli provenaient de la base de données de Young et al. (2002), réalisée par morphing des visages issus de la base de données originelle d'Ekman et Friesen (1976). Les visages étaient en noir et blanc. Dans notre étude, nous avons utilisé un échantillon de cette base de données ; il comprenait le visage d'un seul individu, de sexe féminin. Un seul visage a été choisi de telle sorte que le traitement relatif à l'identification du visage ne puisse pas être sollicité. Ce visage comportait des expressions faciales émotionnelles qui variaient selon dix-neuf expressions différentes. L'ensemble de ces expressions est représenté selon un continuum sur la Figure 10. Il a pour origine une émotion positive intense de joie et se termine par une émotion négative intense de peur. Une émotion neutre représente le passage de l'une à l'autre.

La réalisation du morphing opéré par Young et al. (2002) a été décrite dans le chapitre 4. Ajoutons que le modèle que nous avons choisi de prendre correspond à celui d'une femme, MM. Chacune des expressions présentées contenait un certain pourcentage

d'émotion neutre et un certain pourcentage soit d'émotion positive, soit d'émotion négative ; par ailleurs, chaque expression variait de sa voisine la plus proche par 10% d'intensité différente. Dans notre expérience, chaque photographie de visage couvrait une surface de 40 mm de large (ce qui correspondait à 4° d'angle visuel, étant donné la distance de 57 cm séparant les participants de l'écran) et de 56.1 mm de hauteur (ce qui correspondait à 5.61° d'angle visuel). Rappelons que lorsque les participants sont placés à 57 cm de l'écran (comme cela est le cas dans les expériences de psychologie expérimentale, avec la méthode de champ visuel divisé, par exemple), une variation d'un centimètre sur l'écran correspond à un degré d'angle visuel. Selon les essais, les stimuli étaient présentés soit dans l'hémichamp droit, soit dans l'hémichamp gauche. Le centre de chaque photographie était placé à 35 mm (ce qui représentait 3.5 degrés d'angle visuel) du centre de l'écran matérialisé par un point de fixation. Ce point de fixation était composé d'une croix, « + », inscrite dans un cercle de 3 mm de diamètre (0.3° d'angle visuel) et le signal d'attention consistait en un losange noir de 10 mm (1° d'angle visuel) de côté.

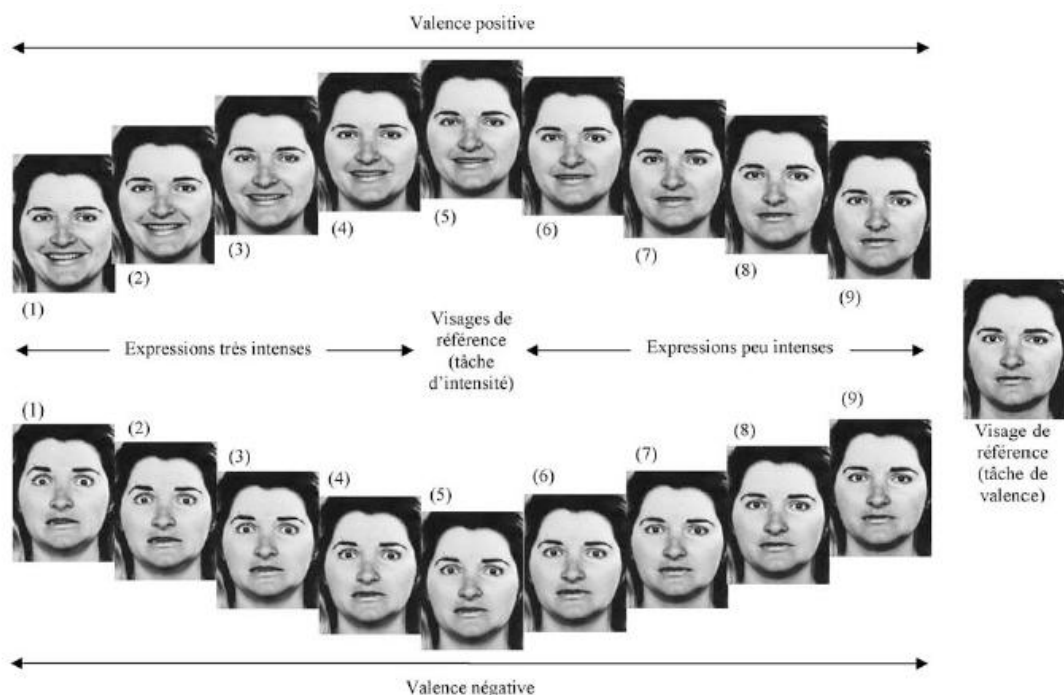


Figure 10 : Représentation du continuum d'expressions faciales utilisées dans les expériences 2 et 3. Les 8 expressions supérieures sont des expressions

positives de joie, les huit expressions inférieures sont des expressions négatives de peur. Les 8 expressions de gauche sont considérées comme très intenses, les 8 expressions de droite sont considérées comme peu intenses. Les visages (5) et le visage neutre constituaient des visages de référence utilisés dans les tâches d'intensité et de valence respectivement. A chaque essai, un seul visage était présenté.

Procédure

Les participants, installés confortablement dans une salle insonorisée, étaient testés individuellement. L'expérimentatrice restait avec eux tout au long de l'expérience. En premier lieu, ils remplissaient une feuille de consentement et un test de latéralité. Puis, ils s'installaient face à l'écran de l'ordinateur de manière à ce que leur visage repose de façon stable sur une mentonnière et que leurs yeux soient situés à cinquante-sept centimètres de l'écran. Rappelons qu'à cette distance, une variation d'un centimètre sur l'écran correspond à un degré d'angle visuel. Nos hypothèses ont été testées avec un paradigme de champ visuel divisé, décrit précédemment (voir chapitre 4).

Entraînement

Une fois que le participant avait pris connaissance de la première série d'instructions, l'invitant à apprendre à répondre le plus justement et le plus rapidement possible, la phase d'entraînement débutait. Celle-ci avait pour but de familiariser les participants avec les touches de réponses du clavier et de leur apprendre à associer à chaque touche la réponse correspondante. Elle comportait trente essais. Durant les deux sessions expérimentales, des mots apparaissaient au centre de l'écran dans un ordre aléatoire contrôlé : pendant l'une des deux sessions expérimentales (tâche intensité), il s'agissait des mots « plus » ou « moins », tandis que dans l'autre session expérimentale (tâche de valence), il s'agissait des mots « positif » ou « négatif ». Le contrôle consistait à s'assurer que le même mot ne soit jamais présenté plus de trois fois consécutivement. Chaque essai était composé des étapes suivantes : un signal visuel d'attention au centre de l'écran apparaissait 100 ms, suivi d'un écran blanc durant 200 ms, suivi soit du mot « plus » (respectivement « positif ») ou « moins » (respectivement « négatif »). Les mots restaient à l'écran jusqu'à la réponse du participant. Enfin, un écran blanc de 500 ms terminait l'essai. Le participant avait pour tâche d'appuyer le plus justement et le plus rapidement possible sur la touche correspondant au mot apparaissant au centre de l'écran. La main et les doigts utilisés correspondaient à ceux que le participant devait utiliser ultérieurement durant la phase expérimentale. En cas de réponse incorrecte, une barre grisée apparaissait pendant 50 ms en haut de l'écran.

Phase de familiarisation avec les visages de référence

Une fois que la phase d'entraînement était terminée, une phase de familiarisation avec des visages dits « de référence » commençait. Comme les participants devaient effectuer leurs jugements par rapport à des visages de référence, une phase de familiarisation avec ces visages devait s'opérer afin qu'ils soient mémorisés. Ils étaient présentés préalablement à l'expérience : les participants disposaient d'une durée illimitée pour les observer, d'autant plus qu'on les informait qu'ils ne seraient plus présentés par la suite. Rappelons que l'expérience était composée de deux sessions expérimentales. Durant l'une des deux sessions, les participants devaient se familiariser avec les expressions émotionnelles de deux visages, l'un exprimant une émotion positive, l'autre exprimant une émotion négative. Ces deux visages étalons présentaient une expression émotionnelle moyenne pour chaque émotion donnée (50% neutre, 50% avec une expression positive ou négative, voir la Figure

10) et étaient présentés simultanément, l'un à côté de l'autre. Durant l'autre session, les participants devaient se familiariser avec l'expression neutre d'un visage (100% neutre).

Phase expérimentale

Une fois la phase de familiarisation effectuée, la phase expérimentale commençait. La seconde série d'instructions, invitant les participants à prendre connaissance des tâches expérimentales, apparaissait sur l'écran et était simultanément lue par l'expérimentatrice. Durant l'une des deux sessions, les participants devaient estimer si l'expression émotionnelle faciale présentée était plus intense ou moins intense que l'expression émotionnelle des deux visages de référence. Les expressions émotionnelles que les participants devaient évaluer comme « plus intenses » correspondaient à celles qui étaient soit plus intenses que l'expression émotionnelle du visage de référence de valence positive soit plus intenses que l'expression émotionnelle du visage de référence de valence négative. Les expressions émotionnelles que les participants devaient évaluer comme « moins intenses » correspondaient aux expressions intermédiaires entre les deux expressions émotionnelles, positive et négative (Figure 10). Durant l'autre session, les participants devaient estimer si l'expression émotionnelle faciale présentait une valence positive ou négative, indépendamment de son intensité. Les expressions émotionnelles positives correspondaient aux expressions de joie, tandis que les expressions émotionnelles négatives correspondaient aux expressions de peur.

L'examen du tableau 3 nous permet de considérer certains facteurs utilisés dans les deux sessions expérimentales, les facteurs « valence », « intensité » et « champ visuel », et un facteur, le facteur « difficulté », pertinent seulement dans la tâche d'intensité. Ainsi, chaque stimulus facial présentait une valence positive (de joie) ou négative (de peur), une expression plus ou moins intense que celles, positive et négative, des deux visages de référence. De plus, lors de la tâche d'intensité, le jugement était facile ou difficile à opérer : l'expression faciale émotionnelle présentée était très différente (facile à juger) ou relativement proche (difficile à juger) de celle des visages de référence. Enfin, chacun des stimuli était présenté soit dans le champ visuel gauche soit dans le champ visuel droit (accompagné systématiquement du point de fixation central). Ainsi, chacun des stimuli représentés sur la Figure 10 était présenté deux fois au cours du même bloc, une fois dans chaque champ visuel.

Tableau 3. Présentation de la répartition des stimuli pour un bloc. La deuxième ligne représente les deux modalités du facteur « valence », positive ou négative (réponse pour le jugement de la valence). La troisième ligne représente les deux modalités du facteur « intensité », plus intense ou moins intense (réponse pour le jugement de l'intensité). La quatrième ligne représente les deux modalités du facteur « difficulté », stimuli faciles quand l'expression du visage présenté est loin du visage étalon ou stimuli difficiles quand l'expression du visage présenté est proche du visage étalon (pour les jugements portant sur l'intensité uniquement). La cinquième ligne représente les deux modalités du facteur « champ visuel » (CVG : champ visuel gauche, CVD : champ visuel droit). Est indiqué entre parenthèses le nombre de stimuli pour chaque condition, dans un bloc.

Stimuli faciaux (32)															
Expression positive (16)								Expression négative (16)							
Expression plus intense (8)				Expression moins intense (8)				Expression plus intense (8)				Expression moins intense (8)			
Stimuli faciles » (4)		Stimuli difficiles (4)		Stimuli faciles » (4)		Stimuli difficiles (4)		Stimuli faciles » (4)		Stimuli difficiles (4)		Stimuli faciles » (4)		Stimuli difficiles (4)	
CVG (2)	CVD (2)	CVG (2)	CVD (2)	CVG (2)	CVD (2)	CVG (2)	CVD (2)	CVG (2)	CVD (2)	CVG (2)	CVD (2)	CVG (2)	CVD (2)	CVG (2)	CVD (2)

Tous les facteurs décrits ci-dessus sont intra-sujets, chaque participant étant confronté à toutes les conditions. Le tableau 4, présenté ci-dessous, permet, quant à lui, d'exposer les facteurs inter-sujets : les facteurs « ordre », « main de réponse » et « doigt de réponse ». La moitié des participants devait effectuer la tâche d'intensité avant la tâche de valence, tandis que l'autre moitié des participants effectuait d'abord la tâche de valence. De plus, la moitié des participants répondait avec la main droite (c'est-à-dire la main dominante puisque tous les participants étaient droitiers) et l'autre moitié avec la main gauche. Le contrôle du facteur « doigt de réponse » imposait également qu'il y ait autant de participants répondant « plus » intense (et « positif ») avec l'index et « moins » intense (et « négatif ») avec le majeur que de participants répondant « plus » intense (et « positif ») avec le majeur et « moins » intense (et « négatif ») avec l'index. Pour s'assurer que la tête du participant restait centrée par rapport à l'écran lorsqu'il répondait, l'expérimentatrice demandait aux participants répondant avec la main gauche d'utiliser les touches « a » et « z » (situées à gauche) du clavier et aux participants répondant avec la main droite d'utiliser les touches « o » et « p » (situées à droite) du clavier.

La répartition des participants est présentée dans le tableau 4.

Tableau 4. Présentation de la répartition des participants. La deuxième ligne indique les deux modalités du facteur « ordre ». La troisième ligne indique les deux modalités du facteur « main de réponse ». La quatrième ligne indique les deux modalités du facteur « doigt de réponse », index ou majeur pour les réponses « plus » (et « positif ») ou « moins » (et « négatif »). Est indiqué entre parenthèses le nombre de participants pour chaque condition.

Participants (24)			
Intensité-Valence (12)		Valence-Intensité (12)	
Gauche (6)	Droite (6)	Gauche (6)	Droite (6)
Index=plus et index=positif (3)	Index=moins et index=négatif (3)	Index=plus et index=positif (3)	Index=moins et index=négatif (3)

Aucun essai de pratique avec les stimuli expérimentaux n'était proposé parce que les différences liées à la présentation en champ visuel divisé et observées dans des expériences préalables ont été réduites ou ont disparu avec même peu de pratique. Le continuum complet, comprenant les seize stimuli tests (voir Figure 10), n'était pas présenté avant le début des deux tâches ; les participants les découvraient au cours de l'expérience. Cependant, la rapidité de présentation des stimuli dans un paradigme de champ visuel divisé peut s'avérer surprenante pour des participants naïfs ; c'est pourquoi quelques essais leur étaient proposés à la fin des instructions (avec des stimuli issus de la base de données n'apparaissant pas dans l'expérience).

Comme indiquée dans le tableau 3, la combinaison des différents facteurs intra-sujets a permis la création de trente-deux essais différents sur lesquels chaque participant effectuait une décision. Chacun de ces trente-deux essais était présenté trois fois au cours de l'expérience organisée en trois blocs, chacun des visages étant présenté une et une seule fois au cours de chacun des trois blocs. Les blocs étaient séparés par une pause dont la durée était délimitée par le participant. L'ordre de présentation des trente-deux stimuli variait d'un bloc à l'autre, mais demeurait constant d'un participant à un autre. Il était identique dans les deux tâches. Les trente-deux stimuli étaient présentés selon un ordre pseudo-aléatoire, généré de telle sorte que ne soient pas présentés plus de trois fois à la suite des essais de même valence, des essais comportant des expressions émotionnelles plus intenses ou comportant des expressions émotionnelles moins intenses que les expressions de référence, et des essais comportant des expressions émotionnelles dont l'intensité était facile ou comportant des expressions émotionnelles dont l'intensité était difficile à évaluer et, enfin, des essais présentés dans le même champ visuel.

Chaque essai était composé d'un signal d'attention, présenté au centre de l'écran pendant 1000 ms, suivi d'un écran blanc présenté pendant 200 ms. Puis apparaissait un point de fixation au centre de l'écran pendant 500 ms, suivi de l'un des seize visages du continuum présenté dans le champ visuel gauche ou dans le champ visuel droit pendant 150 ms. Le point de fixation restait à l'écran. Le couple point de fixation - visage était suivi d'un écran blanc dont le temps d'apparition était déterminé par le temps de réponse des participants. Un dernier écran blanc de 1000 ms permettait de faire la transition entre deux essais. En cas de réponse incorrecte, une barre grisée apparaissait pendant 50 ms en haut de l'écran, dès la réponse des participants. Ce signal d'erreur a été créé pour permettre aux participants de vérifier et de corriger leur représentation des deux visages étalons pour la tâche portant sur l'estimation de l'intensité et du visage neutre pour la tâche portant sur l'estimation de la valence. Cette précaution expérimentale permettait de s'assurer que les erreurs ne provenaient pas d'une mauvaise évaluation initiale des intensités des visages préalablement présentés, mais plutôt d'une réelle erreur d'estimation des intensités entre d'une part, le visage étalon ou le visage neutre et d'autre part, le visage présenté dans la phase test. L'expérience durait environ trente minutes.

3. Résultats

Des analyses de variance séparées ont été conduites systématiquement sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses. Lors de l'analyse des temps de réponse, seules les bonnes réponses ont été considérées. Ainsi, dans la tâche d'intensité, l'analyse des temps de réponse portait sur 83.8% des réponses, tandis que dans la tâche de valence, l'analyse des temps de réponse portait sur 84.5% des réponses. De plus, un élagage similaire à l'expérience précédente a été effectué. Dans cette expérience, avec ce seuil, 3% des réponses et des temps de réponse ont été remplacés dans la tâche d'intensité et 2% dans la tâche de valence. Par ailleurs, nous avons vérifié qu'il n'existait pas d'influence des facteurs contrôlés intersujets « main de réponse » et « doigts de réponse » ; le facteur « ordre » sera présenté indépendamment, en raison de nos hypothèses spécifiques. Les résultats présentés sont ceux pour lesquels les résultats étaient significatifs. Certains résultats non significatifs sont présentés pour les besoins de la discussion.

Tâche d'intensité

Deux analyses de variance ont été conduites. La première analyse de variance incluait les facteurs intrasujets « champ visuel », « valence », « intensité », « difficulté » et « bloc ». La seconde analyse de variance incluait le facteur « numéro » correspondant au numéro de chaque expression faciale et considérant chaque expression indépendamment (voir Figure 10 pour le codage des stimuli utilisé dans cette partie). Ces deux analyses ont été menées sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses.

Analyse des temps de réponse

La première analyse de variance n'a pas révélé d'effet du facteur « champ visuel », $p > .1$. En raison de notre hypothèse portant sur un avantage de l'hémisphère droit dans la tâche d'intensité suivant le bloc, une analyse de variance a été réalisée, avec le facteur « bloc ». De plus, étant donné l'importance de l'ordre de passation des deux tâches et son influence possible sur la manifestation d'un traitement métrique, le facteur « ordre » a également été considéré. Une tendance en faveur d'une interaction des facteurs « champ visuel », « bloc » et « ordre » a été observée, $F(2,44)=2.9$, $p < .07$. Lorsque la tâche d'intensité a été effectuée avant la tâche de valence, une tendance a été observée en faveur de temps de réponse plus rapides dans le champ visuel gauche que dans le champ visuel droit (respectivement 953 ms et 1023 ms), $F(2,22)=3.9$, $p < .07$ dans le bloc 1, et une tendance en faveur de temps de réponse plus rapides dans le champ visuel droit que dans le champ visuel gauche (respectivement 838 ms et 906 ms), $F(2,22)=3.8$, $p < .07$ dans le bloc 2. Aucune différence de temps de réponse au niveau des champs visuels n'a été mise en évidence dans le bloc 3, $p > .3$. De plus, l'analyse de variance n'a pas mis en évidence d'interaction des facteurs « champ visuel » et « valence », $F < 1$, ni d'interaction des facteurs « champ visuel » et « intensité », $F < 1$. En revanche, elle a révélé un effet du facteur « valence ». En effet, les participants ont répondu plus rapidement pour les stimuli positifs que pour les stimuli négatifs (respectivement 876 ms et 980 ms), $F(1,23)=16.3$, $p < .001$. Par ailleurs, nous avons observé un effet simple du facteur « intensité » (réponse) en faveur d'une plus grande rapidité quand les stimuli présentaient une forte intensité (878 ms) qu'une faible intensité (1017 ms), $F(1,23)=6$, $p < .05$. Une interaction significative des facteurs « valence » et « intensité », $F(1,23)=30$, $p < .001$, a montré que cet avantage des stimuli positifs sur les stimuli négatifs était présent lorsque les stimuli étaient très intenses (respectivement 776 ms et 981 ms), $F(1,23)=48.5$, $p < .001$ et que l'avantage des stimuli très intenses sur les stimuli peu intenses était effectif lorsque les stimuli étaient positifs (respectivement 776 ms et 1029 ms), $F(1,23)=73.5$, $p < .001$. L'analyse de variance a également révélé un effet simple du facteur « difficulté » : les participants ont répondu plus rapidement pour les stimuli codés « faciles » que pour les stimuli codés « difficiles » (respectivement 902 ms et 954 ms), $F(1,23)=4.6$, $p < .05$. Enfin, l'analyse de variance a révélé un effet du facteur « bloc », $F(2,46)=8.5$, $p < .001$: les participants ont répondu plus lentement lors du premier bloc que lors du deuxième bloc (respectivement 1015 ms et 921 ms, $F(2,46)=4.4$, $p < .05$) et plus lentement lors du deuxième bloc que lors du troisième bloc (respectivement 921 ms et 831 ms, $F(2,46)=4.1$, $p < .05$).

La seconde analyse de variance incluant le facteur « numéro » a révélé un effet du numéro, $F(7,161)=4.3$, $p < .001$. Les analyses de contrastes effectuées **entre deux stimuli successifs** ont révélé que cet effet n'était observé qu'entre les stimuli six et sept (respectivement 963 ms et 853 ms, $F(7,161)=5.4$, $p < .05$) (voir Figure 11).

Analyse du nombre de bonnes réponses

La première analyse de variance n'a pas révélé d'effet du facteur « champ visuel », $p > .1$ ni d'interaction des facteurs « champ visuel » et « valence », $F < 1$, ni d'interaction des facteurs « champ visuel » et « intensité », $F < 1$. Elle a révélé un effet du facteur « valence ». En effet, les participants ont répondu plus précisément pour les stimuli positifs (42 bonnes réponses) que pour les stimuli négatifs (39 bonnes réponses), $F(1,23)=11.6$, $p < .01$. Aucun effet du facteur « intensité » (réponse), n'a été observé, $F < 1$. Une interaction significative des facteurs « valence » et « intensité », $F(1,23)=8.8$, $p < .01$, a montré que l'avantage des stimuli positifs sur les stimuli négatifs était présent lorsque les stimuli étaient très intenses (respectivement 23 et 18 bonnes réponses, $F(1,23)=10.7$, $p < .01$) et que l'avantage des stimuli très intenses sur les stimuli peu intenses se manifestait lorsque les stimuli étaient positifs (respectivement 23 et 19 bonnes réponses), $F(1,23)=6.8$, $p < .05$. De plus, l'analyse de variance a révélé un effet du facteur « difficulté » : les participants ont répondu plus précisément pour les stimuli codés « faciles » (43 bonnes réponses) que pour les stimuli codés « difficiles » (37 bonnes réponses), $F(1,23)=73$, $p < .001$. Enfin, aucun effet simple du facteur « bloc » n'a pas été observé, $F < 1$ ni aucune interaction significative des facteurs « bloc », « champ visuel » et « ordre », $F < 1$.

La seconde analyse de variance a révélé un effet du numéro au niveau de la précision des réponses, $F(7,161)=13.3$, $p < .001$. Les analyses de contrastes effectuées au niveau de la précision des réponses et **entre deux stimuli successifs** ont révélé que cet effet était présent entre des stimuli relativement difficiles, c'est-à-dire entre les stimuli deux et trois (respectivement 11 et 10 bonnes réponses, $F(7,161)=5.5$, $p < .05$), entre les stimuli trois et quatre (respectivement 10 et 8 bonnes réponses, $F(7,161)=16.5$, $p < .001$), entre les stimuli quatre et six (respectivement 8 et 9 bonnes réponses, $F(7,161)=5.5$, $p < .05$) et entre les stimuli six et sept (respectivement 9 et 11 bonnes réponses, $F(7,161)=14.2$, $p < .001$). La Figure 12 montre la dispersion des bonnes réponses selon chaque expression faciale présentée, indépendamment de la valence.

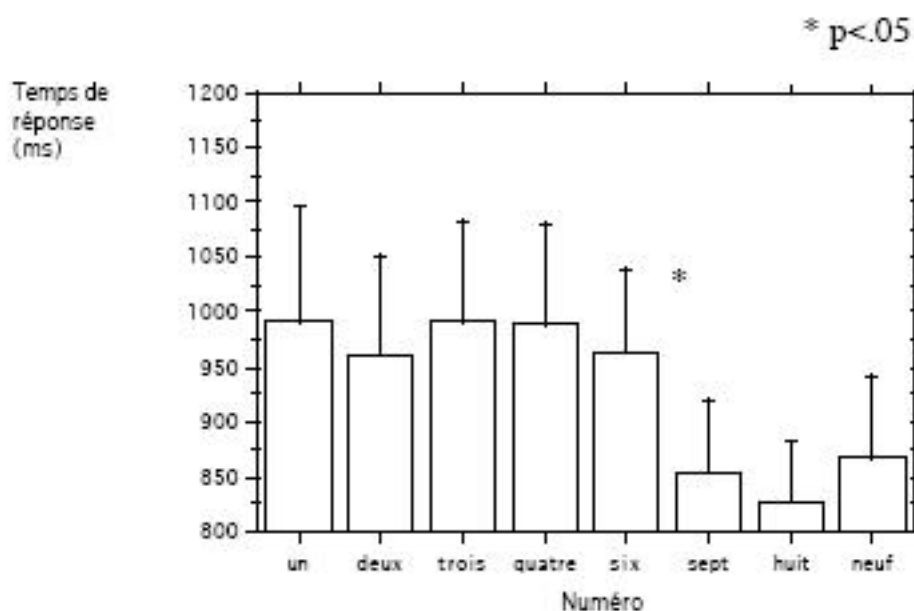


Figure 11 : Représentation des temps de réponse moyens suite à un jugement d'intensité selon chaque expression faciale présentée, indépendamment de la valence.

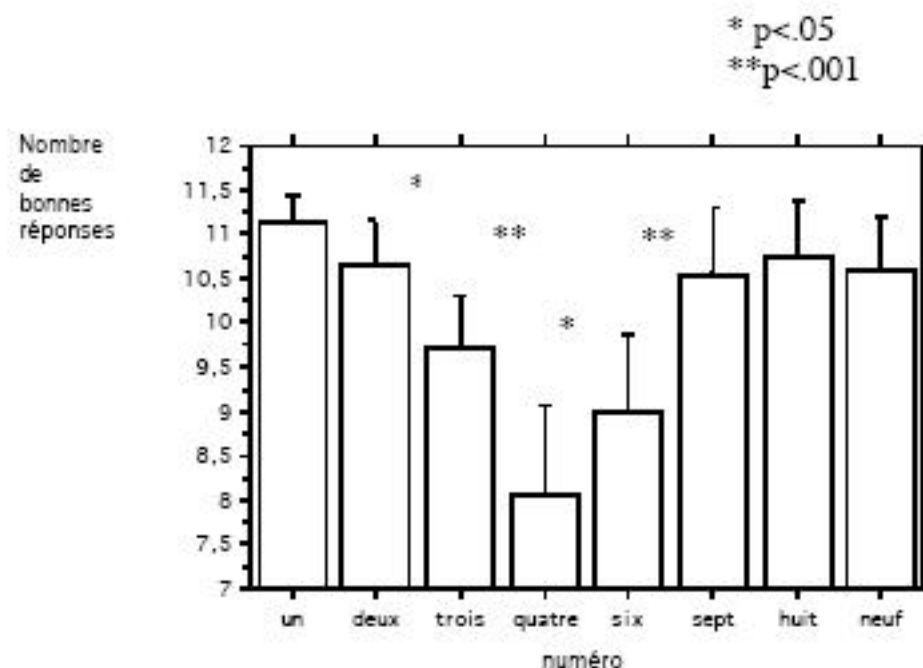


Figure 12 : Représentation du nombre moyen de bonnes réponses suite à un jugement d'intensité selon chaque expression faciale présentée, indépendamment de la valence.

Tâche de valence

Deux analyses de variance ont été conduites. La première analyse de variance incluait les facteurs intrasujets « champ visuel », « valence », « intensité » et « bloc ». La seconde analyse de variance incluait le facteur « numéro » correspondant au numéro de chaque expression faciale et considérant chaque expression indépendamment (voir Figure 10 pour le codage des stimuli utilisé dans cette partie). Ces deux analyses ont été menées sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses.

Analyse des temps de réponse

La première analyse de variance a révélé un effet du facteur « champ visuel », en faveur d'un avantage du champ visuel gauche (734 ms) sur le champ visuel droit (769 ms), $F(1,23)=14.9$, $p<.001$. Elle n'a pas révélé d'interaction des facteurs « champ visuel » et « valence », $F<1$ ni d'interaction des facteurs « champ visuel » et « intensité », $F=1$. De plus, aucun effet du facteur « valence » (réponse) n'a été mis en évidence, $F<1$, ni entre les facteurs « champ visuel », « bloc » et « ordre », $F<1$. Une interaction des facteurs « valence » et « intensité » a été observée, $F(1,23)=19.3$, $p<.001$. Elle a montré un avantage des stimuli négatifs sur les stimuli positifs lorsque les stimuli étaient peu intenses (respectivement 789 ms et 868 ms, $F(1,23)=11.3$, $p<.01$) et au contraire, un avantage des stimuli positifs sur les stimuli négatifs quand les stimuli étaient très intenses (respectivement 641 ms et 708 ms, $F(1,23)=8.2$, $p<.01$). De plus, l'analyse de variance a révélé un effet simple du facteur « intensité » : les participants répondaient plus rapidement lorsque les stimuli étaient très intenses (674 ms) que peu intenses (829 ms), $F(1,23)=94.7$, $p<.001$. Aucun effet du facteur « bloc » n'a été observé, $F<1$.

La seconde analyse de variance réalisée sur le facteur « numéro » a révélé un effet de ce facteur, $F(7,161)=52.5$, $p<.001$. Les analyses de contrastes effectuées **entre deux stimuli successifs** ont révélé que cet effet était effectif pour les stimuli les moins intenses, c'est-à-dire entre les stimuli un et deux (respectivement 1007 ms et 854 ms, $F(7,161)=42.6$, $p<.001$) et entre les stimuli deux et trois (respectivement 854 ms et 745 ms, $F(7,161)=21.6$, $p<.001$) (voir Figure 13).

Analyse du nombre de bonnes réponses

La première analyse de variance n'a révélé aucun effet du facteur « champ visuel » au niveau de la précision des réponses, $p>.1$. Aucun effet n'a été mis en évidence entre les facteurs « champ visuel » et « valence », $p>.1$ ni entre les facteurs « champ visuel » et « intensité », $F<1$, ni entre les facteurs « champ visuel », « bloc » et « ordre », $F<1$. L'analyse de variance a révélé un effet de la valence (réponse). En effet, les participants ont répondu plus précisément pour les stimuli négatifs (42 bonnes réponses) que pour les stimuli positifs (39 bonnes réponses), $F(1,23)=6.2$, $p<.05$. Une interaction significative des facteurs « valence » et « intensité », $F(1,23)=4.5$, $p<.05$, a montré que l'avantage des stimuli négatifs se manifestait lorsque les stimuli étaient peu intenses (respectivement 19 et 16 bonnes réponses), $F(1,23)=10.9$, $p<.01$. L'analyse de variance a également révélé un effet simple du facteur « intensité » : les participants répondaient plus précisément quand les stimuli étaient très intenses (46 bonnes réponses) que lorsqu'ils étaient peu intenses (35 bonnes réponses), $F(1,23)=198.4$, $p<.001$. Aucun effet des blocs n'a été observé, $F<1$.

La seconde analyse de variance a révélé un effet du numéro, $F(7,161)=54.4$, $p<.001$. Les analyses de contrastes effectuées entre deux stimuli successifs ont révélé que cet effet était présent entre les stimuli les moins intenses, c'est-à-dire entre les stimuli un et deux (respectivement 7 et 9 bonnes réponses, $F(7,161)=38.6$, $p<.001$), entre les stimuli trois et quatre (respectivement 9 et 10 bonnes réponses, $F(7,161)=5.2$, $p<.05$) et entre les stimuli quatre et six (respectivement 10 et 12 bonnes réponses, $F(7,161)=20.6$, $p<.001$) (voir Figure 14).

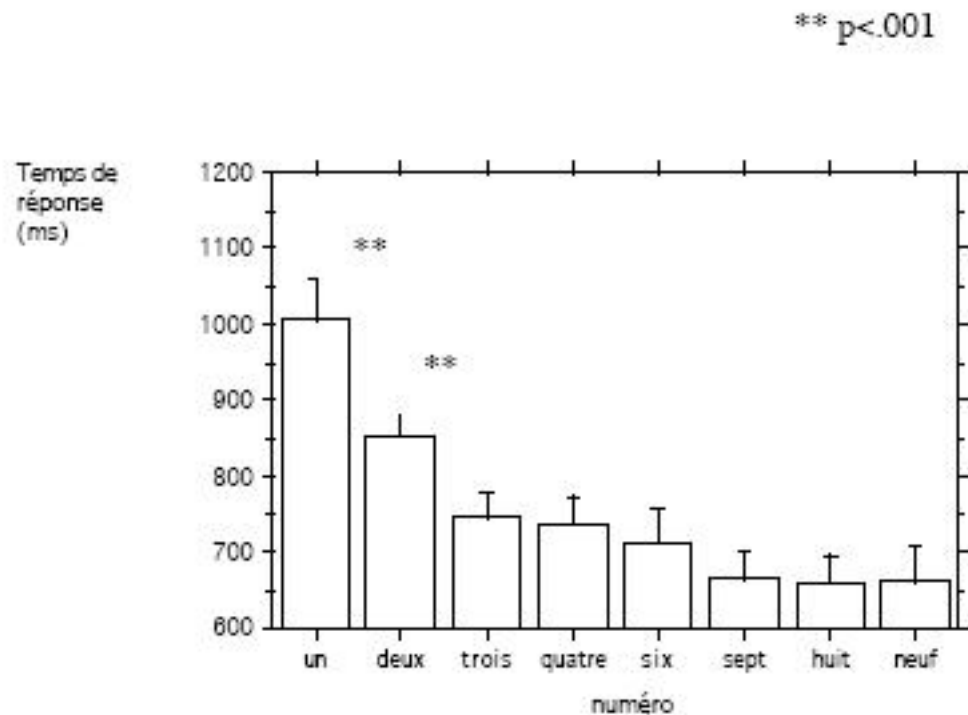


Figure 13 : Représentation des temps de réponse moyens suite à un jugement de valence selon chaque expression faciale présentée, indépendamment de la valence.

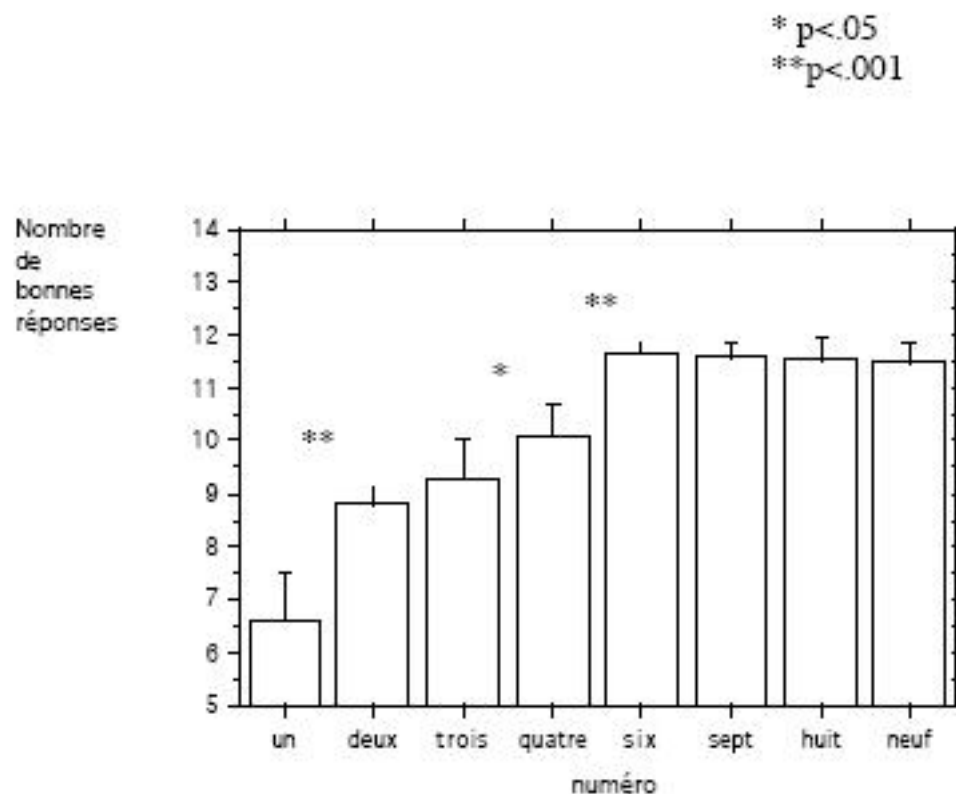


Figure 14 : Représentation du nombre moyen de bonnes réponses suite à un jugement de valence selon chaque expression faciale présentée, indépendamment de la valence.

Tâches d'intensité et de valence

Deux analyses de variance ont été conduites. Une première analyse de variance a été réalisée, incluant les facteurs « tâche », « champ visuel », « valence », « intensité » et « bloc ». Une seconde analyse incluait les facteurs « tâche », « valence » et « numéro » (voir Figure 10 pour le codage des stimuli utilisé dans cette partie). Ces deux analyses ont été menées sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses. Seuls les effets incluant le facteur « tâche » seront rapportés ici.

Analyse des temps de réponse

Dans la première analyse de variance, un effet du facteur « tâche » a été mis en évidence, $F(1,23)=11.7$, $p < .01$. En effet, un avantage pour la tâche de valence (752 ms) a été observé, comparativement à la tâche d'intensité (948 ms). De plus, une interaction des facteurs « tâche » et « valence » a été observée, $F(1,23)=10.6$, $p < .01$. Elle a révélé que dans la tâche d'intensité, les participants répondaient plus rapidement pour les stimuli positifs (902 ms) que pour les stimuli négatifs (993 ms), $F(1,23)=18.7$, $p < .001$.

Afin de tester l'hypothèse de perception catégorielle des expressions faciales, postulant qu'il existe une meilleure discrimination des expressions faciales près des frontières catégorielles que loin de celles-ci, nous avons réalisé une seconde analyse de variance, révélant une interaction significative des facteurs « tâche », « valence » et « numéro »,

$F(7,161)=3, p<.01$. Une première analyse de contraste réalisée entre les stimuli négatifs 3, 4, 6 et 7 de la tâche d'intensité et les stimuli 1 et 2, négatifs et positifs, de la tâche de valence a révélé un avantage des seconds (931 ms) sur les premiers (1008 ms), $F(7,161)=13.5, p<.001$. Une seconde analyse de contrastes réalisée entre les stimuli positifs 3, 4, 6 et 7 de la tâche d'intensité et les stimuli 1 et 2, négatifs et positifs, de la tâche de valence a révélé une tendance en faveur d'un avantage des premiers (891 ms) sur les seconds (931 ms), $F(7,161)=3.6, p<.06$. Enfin, une troisième analyse de contrastes réalisée entre les stimuli 3, 4, 6 et 7, négatifs et positifs, de la tâche d'intensité et les stimuli 1 et 2, négatifs et positifs, de la tâche de valence n'a pas révélé d'effet, $p>.3$.

Analyse du nombre de bonnes réponses

Dans la première analyse de variance, aucun effet du facteur « tâche » n'a été mis en évidence, $F<1$. Une interaction des facteurs « tâche » et « valence » a été observée, $F(1,23)=13.6, p<.01$. Elle a révélé que lorsque les stimuli étaient positifs, les participants répondaient plus précisément dans la tâche d'intensité que dans la tâche de valence (respectivement 42 et 39 bonnes réponses, $F(1,23)=5.3, p<.05$) ; lorsque les stimuli étaient négatifs, les participants répondaient plus précisément dans la tâche de valence que dans la tâche d'intensité (respectivement 42 et 39 bonnes réponses, $F(1,23)=8.5, p<.01$). De plus, dans la tâche d'intensité, les participants présentaient un plus grand nombre de bonnes réponses pour les stimuli positifs (42 bonnes réponses) que pour les stimuli négatifs (39 bonnes réponses), $F(1,23)=8.3, p<.01$ alors que dans la tâche de valence, les participants présentaient un plus grand nombre de bonnes réponses pour les stimuli négatifs (42 bonnes réponses) que pour les stimuli positifs (39 bonnes réponses), $F(1,23)=5.5, p<.05$.

Afin de tester l'hypothèse de perception catégorielle des expressions faciales, postulant qu'il existe une meilleure discrimination des expressions faciales près des frontières catégorielles que loin de celles-ci, nous avons réalisé une seconde analyse de variance, révélant une interaction significative des facteurs « tâche », « valence » et « numéro », $F(7,161)=3.9, p<.001$. Une première analyse de contraste réalisée entre les stimuli négatifs 3, 4, 6 et 7 de la tâche d'intensité et les stimuli 1 et 2, négatifs et positifs, de la tâche de valence a révélé un avantage des premiers (18 bonnes réponses) sur les seconds (15 bonnes réponses), $F(7,161)=18.3, p<.001$. Une seconde analyse de contrastes réalisée entre les stimuli positifs 3, 4, 6 et 7 de la tâche d'intensité et les stimuli 1 et 2, négatifs et positifs, de la tâche de valence a également révélé un avantage des premiers (19 bonnes réponses) sur les seconds (15 bonnes réponses), $F(7,161)=41.1, p<.001$. Enfin, une troisième analyse de contrastes réalisée entre les stimuli 3, 4, 6 et 7, négatifs et positifs, de la tâche d'intensité et les stimuli 1 et 2, négatifs et positifs, de la tâche de valence a confirmé l'avantage des premiers (37 bonnes réponses) sur les seconds (31 bonnes réponses), $F(7,161)=38.1, p<.001$.

4. Discussion

L'expérience 2 avait deux objectifs majeurs. Le premier objectif était de mettre en évidence une implication des relations spatiales visuelles métriques et catégorielles dans, respectivement, la discrimination de l'intensité et de la valence des expressions faciales émotionnelles. Par ailleurs, nous souhaitions également tester l'hypothèse de perception catégorielle des expressions faciales. Le second objectif était de mettre en évidence l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles, en testant l'hypothèse de polarité, qui pourrait se manifester par l'existence

d'une asymétrie hémisphérique du traitement des expressions faciales émotionnelles selon leur valence, positive ou négative.

Hypothèse de l'implication des relations spatiales visuelles dans le traitement des expressions faciales émotionnelles

L'implication des relations spatiales métriques se manifestant par un avantage de l'hémisphère droit sur l'hémisphère gauche (voir la méta-analyse de Jager & Postma, 2003), nous avons fait l'hypothèse que l'implication des relations spatiales métriques dans le traitement de la discrimination de l'intensité d'expressions se manifesterait également par un avantage de l'hémisphère droit sur l'hémisphère gauche. Précisons néanmoins que l'avantage de l'hémisphère droit dans le traitement des expressions faciales a souvent été mis en évidence et que, par conséquent, un tel avantage ne nous permettrait pas de conclure de manière absolue sur l'implication des relations spatiales métriques. Dans le jugement portant sur la discrimination de l'intensité, nos résultats n'ont pas montré un avantage d'un hémisphère cérébral sur l'autre. Par ailleurs, nous postulons l'implication du sous-système des relations spatiales catégorielles dans le traitement de valences positives et négatives d'expressions faciales, variant autour de la joie et de la peur. Il se manifesterait par un avantage de l'hémisphère gauche sur l'hémisphère droit. Nous avons observé, au niveau des temps de réponse, un avantage de l'hémisphère droit sur l'hémisphère gauche. L'absence d'un avantage de l'hémisphère droit dans le traitement de l'intensité des expressions faciales ne nous permet pas de conclure sur l'absence d'une implication de représentations des relations spatiales métriques au cours de ce traitement. De même, l'avantage de l'hémisphère droit sur l'hémisphère gauche observé dans le traitement de la valence ne nous permet pas de conclure sur l'absence d'une implication de représentations des relations spatiales catégorielles, voire sur une implication de représentations des relations spatiales métriques au cours de ce traitement. En effet, ces résultats pourraient s'expliquer par la présence conjuguée de différents paramètres, notamment celui de la valence et celui de l'intensité. L'avantage de l'hémisphère droit dans la tâche de valence, même si non attendu, peut s'expliquer au regard des nombreuses études de la littérature qui ont rapporté un avantage de l'hémisphère droit dans la perception et le traitement des expressions faciales émotionnelles, quelle que soit la tâche (voir la méta-analyse de Wager et al., 2003). Concernant l'influence du facteur « intensité », il semble que l'hémisphère cérébral activé peut être dépendant du degré de l'intensité d'une expression faciale : par exemple, Phillips et al. (1997) ont montré, avec l'expression de peur, un avantage de l'amygdale droite dans le traitement d'expressions intenses et un avantage de l'amygdale gauche dans le traitement d'expressions peu intenses.

De plus, au cours du traitement des relations spatiales visuelles métriques, certaines études ont observé un effet d'apprentissage, se concrétisant par une disparition de l'avantage de l'hémisphère droit (par exemple, Baciú et al., 1999 ; Kosslyn et al., 1989) ; la disparition de l'avantage de l'hémisphère droit était parfois accompagnée d'une augmentation de l'avantage de l'hémisphère gauche (par exemple, Baciú et al., 1999). Ces études n'ont pas mis en évidence de semblables effets au cours des traitements catégoriels. Nous avons fait l'hypothèse que l'observation d'un tel phénomène hémisphérique dynamique dans la tâche d'intensité pourrait être un argument supplémentaire en faveur de la manifestation de l'utilisation des relations spatiales métriques dans la discrimination des intensités faciales émotionnelles. Dans la tâche de discrimination de l'intensité de notre expérience, un effet d'apprentissage a été observé (au niveau des temps de réponse), alors qu'un tel effet n'a pas été observé dans la tâche de valence. Par ailleurs, nous avons révélé une tendance d'une disparition de l'avantage de l'hémisphère droit en faveur d'une

apparition de l'avantage de l'hémisphère gauche, répliquant ainsi des résultats portant sur des travaux réalisés avec des stimuli visuels simples (par exemple, un point et une barre, voir Hellige & Michimata, 1989). Ainsi, nos présents résultats semblent fournir des éléments en faveur de l'hypothèse postulant l'implication des représentations de relations spatiales métriques dans la discrimination d'intensités. Précisons que le résultat montrant une tendance d'une disparition de l'avantage de l'hémisphère droit en faveur d'une apparition de l'avantage de l'hémisphère gauche, au cours du jugement de l'intensité, n'a été révélé que chez les participants ayant passé la session de l'intensité avant la session de la valence. Plusieurs études ayant testé dans une même expérience les deux sessions expérimentales, métrique et catégorielle, et ayant des hypothèses précises sur l'existence d'un effet de pratique ont pris comme précaution de présenter les deux sessions dans cet ordre. Cette précaution permet de s'assurer que les participants n'ont pas formé de catégories avant d'effectuer le jugement métrique. Dans le cas contraire, l'effet de pratique peut ne pas se manifester. Ainsi, une interprétation possible à ce résultat est que, non seulement une tendance en faveur d'un avantage de l'hémisphère droit dans le jugement (métrique) de l'intensité existe, et disparaît au cours de la tâche, mais également, puisque cet effet se produit seulement si le jugement d'intensité est effectué en premier, alors l'avantage de l'hémisphère gauche pourrait être dû, au cours de ce traitement, au développement de nouvelles catégories. Cette interprétation est conforme à celle formulée dans des études antérieures dans le domaine spatial visuel (Baciu et al., 1999 ; Banich & Federmeier, 1999 ; Kosslyn et al., 1989).

Hypothèse d'une perception catégorielle des expressions faciales émotionnelles

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 2, l'hypothèse des relations spatiales visuelles catégorielles *versus* métriques est relativement proche de l'hypothèse de perception catégorielle *versus* continue des expressions faciales. La nature catégorielle de la reconnaissance des expressions a largement été mise en évidence par des études antérieures (par exemple, Calder et al., 1996b ; Etcoff & Magee, 1992 ; White, 2002 ; Young et al., 1997). L'interprétation en faveur d'une perception catégorielle prédit une meilleure discrimination entre des paires de stimuli se situant loin des prototypes qu'entre des paires de stimuli proches des prototypes. Rappelons que, pour ces auteurs, un visage prototypique contient 100% de l'émotion pour laquelle il est considéré comme prototypique (par exemple, un visage prototypique de « joie » contient 100% d'émotion de joie, tandis qu'un visage prototypique neutre contient 100% d'expression neutre).

Deux indices permettent d'apporter des arguments en faveur de la nature catégorielle ou continue de la perception des expressions faciales. Un premier indice consiste à comparer les performances quand la discrimination porte entre d'une part, dans la tâche de valence, le visage de référence (100% neutre) et les visages proches de ce visage (contenant entre 10% et 20% d'émotion) et, d'autre part, dans la tâche d'intensité, les visages de référence (50% neutre, 50% joie ou peur) et les visages proches de chacun de ces deux visages (contenant entre 30% et 70% d'émotion). Nous avons observé une meilleure discrimination (seulement au niveau des bonnes réponses) dans la tâche d'intensité que dans la tâche de valence. Précisons que Young et al. (1997, p.298) n'avaient considéré que les bonnes réponses comme indice dans les tâches de discrimination, n'utilisant les temps de réponse que pour vérifier qu'il n'y avait pas de compromis vitesse - précision. Il y a deux façons d'interpréter les résultats de notre étude, dans l'optique de tester l'hypothèse de perception catégorielle des expressions faciales.

(i) Si l'on considère que les participants ont perçu les expressions faciales comme un

continuum allant d'une certaine émotion à une deuxième émotion (positive et négative) sans transition par une expression neutre, alors la tâche d'intensité pourrait s'apparenter à une tâche nécessitant une discrimination intra-catégorielle (puisque la discrimination se réalise à l'intérieur d'une émotion, variant de 10% à 90%) et la tâche de valence à une tâche nécessitant une discrimination inter-catégorielle (puisque qu'elle se réalise entre deux émotions différentes). Dans ce cas, les résultats nous conduisent à conclure que la discrimination intra-catégorielle est meilleure que la discrimination inter-catégorielle, d'où une interprétation concluant à une absence d'effet de perception catégorielle. (ii) En revanche, si l'on considère que les visages peu intenses ont été considérés comme des visages neutres, alors les représentations émotionnelles des participants consistaient en trois catégories (positive, neutre, négative). Dans ce cas, la tâche d'intensité pourrait s'apparenter à une tâche nécessitant une discrimination inter-catégorielle (puisque les visages de référence contiennent autant d'émotion positive ou négative que neutre, 50%) et la tâche de valence à une tâche nécessitant une discrimination intra-catégorielle (car le visage de référence contient 100% d'expression neutre). Cette dernière interprétation serait conforme à l'hypothèse de perception catégorielle des expressions faciales (Calder et al., 1996b ; Etcoff & Magee, 1992 ; Young et al., 1997).

Un deuxième indice, permettant d'apporter des arguments en faveur de la nature catégorielle ou continue de la perception des expressions faciales, est l'observation, au niveau des bonnes réponses et des temps de réponse de la tâche d'intensité, des changements des résultats autour des visages de référence de manière symétrique c'est-à-dire à la fois vers les visages les plus et les moins (émotionnellement) intenses. Pour les bonnes réponses, ce changement est relativement brutal, tandis que pour les temps de réponse, ce changement est plus continu (voir Figures 12 et 11 respectivement). Ces résultats, symétriques pour les visages contenant plus de 50% d'émotion et pour ceux contenant moins de 50% d'émotion, suggèrent que les expressions neutres pourraient apparaître comme une véritable catégorie et que ces expressions peu émotionnelles ne seraient pas considérées comme « rien », mais au contraire, elles perdraient leur valeur de signal de manière abrupte à un certain point, pour devenir un état « neutre » qui est une catégorie propre. Considérer l'expression neutre comme une catégorie nous permet de poser l'hypothèse selon laquelle la tâche d'intensité pourrait être traitée comme une tâche nécessitant une discrimination inter-catégorielle, les visages de référence se situant à mi-chemin entre deux catégories, la joie ou la peur et le neutre, et la tâche de valence comme une tâche nécessitant une discrimination intra-catégorielle, le visage de référence étant alors perçu comme un visage prototypique neutre. Nous proposons qu'une façon d'apporter des arguments dans le débat vision catégorielle - continue serait de proposer une expérience dans laquelle dans la tâche de valence, la réponse « neutre » serait un choix supplémentaire possible, avec les réponses « positif » et « négatif ». En forçant la détection explicite de l'expression neutre, nous pourrions observer dans quelle mesure cette expression est perçue comme effectivement neutre.

Nos données rejettent cependant l'hypothèse de perception catégorielle dans sa forme la plus forte, qui postule que les différences à l'intérieur d'une catégorie peuvent ne pas être perçues du tout. En effet, le nombre de bonnes réponses et les temps de réponse des participants dans la tâche de valence pour les expressions de peur et de joie étaient plus cohérents avec des arguments multidimensionnels ou liés faiblement avec la vision catégorielle de la perception des expressions faciales : alors que la distance avec le prototype neutre augmente, le nombre de bonnes réponses diminue et les temps de réponse augmentent de manière significative, reflétant une incertitude sur l'appartenance des membres à une catégorie près des frontières catégorielles. En revanche, loin des

frontières catégorielles, les temps de réponse et dans une moindre mesure, le nombre de bonnes réponses, ne varient plus de manière significative (Figures 13 et 14). En poussant notre interprétation plus loin, nous pouvons proposer la notion de catégories à l'intérieur de catégories ; en particulier, nous pouvons conclure que la présence de plusieurs sauts observés relativement près des frontières catégorielles pourrait suggérer la présence de catégories à l'intérieur de la catégorie « neutre ».

Le résultat montrant une meilleure discrimination entre des stimuli loin des prototypes que proche, et généralement observé même si les membres de paires proches des prototypes et ceux de paires loin des prototypes sont séparés d'un même nombre de pas dans le continuum, a préalablement été trouvé à la fois pour des tâches de discrimination séquentielle (ABX) et simultanée (Young et al., 1997). Notre expérience apporte donc de nouveaux arguments en faveur d'une perception catégorielle des expressions faciales, avec une tâche de discrimination différée.

Hypothèse de polarité dans le traitement des expressions faciales émotionnelles

Notre étude n'a pas mis en évidence d'avantage hémisphérique polarité-dépendant, ni intensité-dépendant. En revanche, nous avons observé un avantage hémisphérique de l'hémisphère droit dans la tâche de valence. Il n'existe pas de consensus dans la littérature sur l'existence d'une prépondérance de l'avantage de l'hémisphère droit ou d'une asymétrie hémisphérique dans le traitement des expressions faciales. Étant donné nos différents centres d'intérêt au niveau de structures pariétales, frontales et sous-corticales, notre expérience comportementale apparaît insuffisante pour conclure sur l'existence ou non de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales. C'est la raison pour laquelle nous avons adapté cette expérience en IRMf.

Expérience 3. Expérience réalisée en IRMf

1. Objectifs

Dans l'expérience 3, nous avons deux objectifs majeurs. Le premier objectif consistait à démontrer l'implication des relations spatiales visuelles métriques et catégorielles dans, respectivement, la discrimination d'intensités et de valences d'expressions faciales émotionnelles. Cette implication devrait se révéler par l'activation de structures pariétales postérieures, en particulier, le gyrus angulaire et les lobules pariétaux inférieur et supérieur. Plus précisément, nous postulons l'existence d'une asymétrie hémisphérique, en faveur d'une activation de ces structures pariétales dans l'hémisphère droit dans le traitement des intensités faciales émotionnelles, et d'une activation de ces structures dans l'hémisphère gauche dans le traitement de la valence faciale émotionnelle. Par ailleurs, nous nous attendions à l'existence d'un effet de pratique dans le jugement de l'intensité, se manifestant par la disparition de l'avantage des structures pariétales droites. Le second objectif était de mettre en évidence l'existence de sous-systèmes distincts dans le traitement des expressions faciales émotionnelles, en testant l'hypothèse d'asymétrie hémisphérique au niveau de l'amygdale et des gyri frontaux inférieur et moyen. Nous souhaitions également mesurer l'influence du facteur « intensité » sur le traitement de la valence faciale

émotionnelle au niveau de l'amygdale, et établir dans quelle mesure l'intensité peut, au niveau de cette structure, moduler l'asymétrie hémisphérique.

2. Méthode

Participants

Dix-neuf participants masculins droitiers ont été testés. Les données de sept d'entre eux n'ont cependant pas été analysées pour les raisons suivantes : un participant a mal compris les instructions et les données de six participants récoltées à l'issue de la phase d'acquisition n'ont pu être récupérées. Les douze participants restants étaient âgés de vingt-et-un à vingt-huit ans (moyenne d'âge de vingt-quatre ans). Leur vue était normale ou corrigée à l'aide de lentilles et leur score moyen au test de latéralité d'Edinburgh (Oldfield, 1971) était de 0.82. Les participants étaient volontaires pour participer à l'expérience qui était rémunérée 30 €. Aucun d'entre eux ne connaissait les hypothèses expérimentales et aucun n'avait passé ni l'expérience comportementale ni la première expérience d'IRMf.

Expérience

Les deux sessions expérimentales étaient identiques aux deux sessions de l'expérience comportementale : elles consistaient en un jugement portant sur l'intensité d'expressions faciales émotionnelles et en un jugement portant sur la valence d'expressions faciales émotionnelles. Dans cette expérience d'IRMf, la première session avait pour but de récolter les données fonctionnelles et comportementales suite à la réalisation d'un jugement d'intensité. La seconde session avait pour but de récolter les données fonctionnelles et comportementales suite à la réalisation d'un jugement de valence. De même que lors de l'expérience comportementale, l'ordre de passation des deux sessions était contrebalancé à travers les participants.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était le même que celui de l'expérience 1 à deux différences près. La première différence était la machine utilisée : les expériences ont eu lieu avec une machine d'IRM de 3 Tesla, dédiée à la recherche, et la seconde était le système d'exploitation de l'ordinateur Macintosh : l'expérience tournait sous la version Mac OS X.2.6.

Stimuli

Les stimuli utilisés étaient les mêmes que ceux utilisés dans l'expérience comportementale. Par contre, n'étant pas contraint par le choix d'une taille réduite de stimuli (comme c'est le cas dans les paradigmes de champ visuel divisé), chaque photographie de visage couvrait une surface plus grande, correspondant à 6° d'angle visuel de large et 8.4° angle visuel de hauteur, en champ visuel central. Un signal d'attention était présenté avant chaque visage, consistant en un point d'exclamation de 0.8° d'angle visuel de hauteur. Afin de contrôler la réponse motrice, les visages étaient parfois remplacés par un losange noir de 1° d'angle visuel de côté pour lequel les participants répondaient soit avec un doigt soit avec l'autre, ce doigt de réponse ayant été imposé dans les instructions.

Procédure

Chaque participant passait deux sessions expérimentales décrites ci-dessus durant chacune environ quarante minutes. Entre les deux sessions, il sortait de la machine pour se reposer environ quarante minutes. Chaque session était composée de trois parties, identiques à celles décrites précédemment dans la première expérience d'IRMf.

Avant chaque examen, les participants recevaient brièvement des informations quant aux conditions générales de l'IRMf puis ils recevaient les instructions relatives spécifiquement aux tâches puis une feuille de consentement, un test de latéralité d'Edinburgh (Oldfield, 1971), et un questionnaire assurant qu'ils ne présentaient pas de contre-indications à l'IRM complété par une visite d'un médecin du CHU. Enfin, un formulaire détaillé du principe général de l'IRMf leur était fourni.

Phase expérimentale

Une fois dans l'IRM et au début de chaque examen, les participants lisaient les instructions sur le miroir placé au-dessus de leur tête. Ces instructions énonçaient en détail le déroulement de l'expérience, les tâches et le type de stimuli que les participants percevraient. Nous renvoyons le lecteur à l'expérience comportementale où les instructions étaient les mêmes. La phase fonctionnelle démarrait dès que les participants avaient terminé de lire les instructions. Durant les deux examens, un visage était présenté à chaque essai. Les deux tâches expérimentales étaient également identiques à l'expérience de champ visuel divisé hormis qu'une seule expression négative a été conservée : l'expression de peur.

L'examen du tableau 5 nous permet de considérer les facteurs intra-individuels utilisés dans les deux sessions expérimentales, les facteurs « valence », « intensité », et « difficulté ».

Tableau 5. Présentation de la répartition des stimuli. La deuxième ligne représente les deux modalités du facteur « valence », positive ou négative (réponse pour le jugement de la valence). La troisième ligne représente les deux modalités du facteur « intensité », plus intense ou moins intense (réponse pour le jugement de l'intensité). La quatrième ligne représente les deux modalités du facteur « difficulté », stimuli faciles quand l'expression du visage présenté est loin du visage étalon ou stimuli difficiles quand l'expression du visage présenté est proche du visage étalon (pour les jugements portant sur l'intensité uniquement). Est indiqué entre parenthèses le nombre de stimuli pour chaque condition.

Stimuli faciaux (160)							
Expression positive (80)				Expression négative (80)			
Expression plus intense (40)		Expression moins intense (40)		Expression plus intense (40)		Expression moins intense (40)	
Stimuli faciles (20)	Stimuli difficiles (20)	Stimuli faciles (20)	Stimuli difficiles (20)	Stimuli faciles (20)	Stimuli difficiles (20)	Stimuli faciles (20)	Stimuli difficiles (20)

Chaque participant effectuait une décision sur deux cents stimuli, c'est-à-dire sur cent soixante stimuli présentés dans le tableau 5 et sur quarante stimuli composés d'un losange. Les facteurs inter-participants étaient les suivants : « ordre » de passation des tâches d'intensité et de valence, « doigt de réponse », avec l'index pour la réponse « plus » intense (et « positif ») et avec le majeur pour la réponse « moins » intense (et « négatif ») ou « plus » intense (et « positif ») avec le majeur et « moins » intense (et « négatif ») avec l'index et enfin « doigt de réponse pour la condition de base ». Ce critère a été considéré afin de ne pas favoriser la réponse d'un doigt sur l'autre pendant la condition de base, l'index ou le majeur.

Une phase d'entraînement avec les touches était également proposée ici, identique à celle qui a été décrite plus haut pour l'expérience comportementale, à la différence qu'elle était un peu plus longue en comportant cinquante essais. En cas de réponse erronée, une barre grisée apparaissait pendant 50 ms dans la partie supérieure du champ visuel du participant. De même, la durée d'apparition des mots au centre de l'écran n'était pas contrainte par le temps ; cela dit, les participants recevaient comme instruction de répondre le plus justement et le plus rapidement possible. La phase de familiarisation avec les visages de référence était parfaitement identique.

Paradigme

L'ordre de succession des essais a été généré grâce à l'élaboration d'un compromis entre les contraintes liées aux expériences réalisées en Psychologie expérimentale et les contraintes liées à la technique d'IRMf événementielle, afin d'obtenir le meilleur rapport signal sur bruit possible. Les différents types de stimuli étaient présentés de façon entrelacée, avec un SOA variant aléatoirement autour d'une valeur moyenne d'un multiple de 3 secondes. Le paradigme était plus complexe que celui utilisé dans la première expérience d'IRMf. En effet, il comprenait quatre types de stimuli, choisis en fonction de leur pertinence pour chaque type de tâche. Ainsi, pour la tâche d'intensité, le premier type de stimuli correspondait à des stimuli positifs faciles, le deuxième type à des stimuli positifs difficiles, le troisième type à des stimuli négatifs faciles et le quatrième type à des stimuli négatifs difficiles. Pour la tâche de valence, le premier type de stimuli correspondait à des stimuli positifs peu intenses, le deuxième type à des stimuli positifs très intenses, le troisième type à des stimuli négatifs peu intenses et le quatrième type à des stimuli négatifs très intenses. Le SOA était égal à 12923 ms de moyenne (variant de 3000 ms à 48000 ms) pour les stimuli « positifs faciles » et à 14000 ms de moyenne (variant de 3000 ms à 48000 ms) pour les stimuli « positifs difficiles » et à 14462 ms de moyenne (variant de 3000 ms à 54000 ms) pour les stimuli « négatifs faciles » et à 13385 ms de moyenne (variant de 3000 ms à 48000 ms) pour les stimuli « négatifs difficiles ». Ainsi, pour ce paradigme, les contraintes imposées par la méthode expérimentale ont été moins fines que celles imposées pour le premier paradigme. D'un autre côté, ce paradigme permettait d'obtenir, en fonction des facteurs optimaux, de meilleures images fonctionnelles *à la fois* pour la tâche d'intensité (c'est-à-dire la valence et la difficulté) et la tâche de valence (c'est-à-dire la valence et l'intensité). Ce paradigme a été pré-testé auprès du participant LK non naïf, dont les données n'ont pas été conservées. De type événementiel rapide, le paradigme élaboré dans cette expérience durait exactement dix minutes. Cette période comprenait deux cents essais. Chaque essai était constitué d'un signal d'attention représenté par un point d'exclamation qui apparaissait pendant 500 ms et qui permettait aux participants de fixer le centre de l'écran, puis apparaissait un visage pendant 2500 ms, durée pendant laquelle les participants pouvaient répondre. A l'expiration des 2500 ms, l'essai suivant débutait. Parfois, le visage était remplacé par un losange qui apparaissait également pendant 2500 ms. En cas de réponse erronée, une barre grisée apparaissait pendant 50 ms dans la partie supérieure du champ visuel du participant. La présence d'un signal d'erreur devait permettre aux participants de « réactualiser » le visage de référence.

Acquisition des données IRMf

Les mesures des activations ont été réalisées par un imageur de 3 T (Bruker) dédié à la recherche. 35 coupes fonctionnelles d'une épaisseur de 5 mm jointives, transverses et parallèles à l'axe commissure antérieure (CA) - commissure postérieure (CP) ont été

acquises. Une séquence EPI en écho de gradient a été utilisée avec les paramètres suivants TR = 3000 ms, TE = 35 ms, angle de basculement = 90°.

Prétraitements des données IRMf et analyses statistiques IRMf

Comme dans l'expérience 1, les prétraitements (le « slice timing », le réaligement, la normalisation spatiale et le lissage) ont été réalisés à l'aide du logiciel SPM. Les analyses statistiques ont été conduites en utilisant le modèle linéaire général pour les analyses de données d'IRMf événementielle avec SPM2. La réponse hémodynamique évoquée suite à la présentation des différents types d'événements a été modélisée par une combinaison linéaire d'une fonction canonique de réponse hémodynamique et de sa dérivée temporelle. Les coordonnées des structurales cérébrales identifiées avec SPM2 ont été comparées aux coordonnées, correspondant à l'atlas de Talairach (Talairach & Tournoux, 1988).

Comme lors de la première expérience d'IRMf, dans cette expérience, les analyses statistiques ont été d'abord réalisées individuellement pour chaque participant et ont été ensuite intégrées dans une analyse de groupe réalisée avec un modèle FFX. À cause de son meilleur pouvoir de généralisation à la population étudiée dans cette expérience, une analyse de groupe a été réalisée avec un modèle RFX. Les seuils statistiques P non corrigés utilisés avec un tel modèle nous ont autorisés à conclure uniquement sur l'activation des structures sur lesquelles nous avons une hypothèse a priori, c'est-à-dire le gyrus angulaire, les lobules pariétaux inférieur et supérieur, l'amygdale et les gyri frontaux inférieur et moyen. Dans les modèles FFX, nous avons considéré les voxels répondant à un seuil d'intensité $P=.05$; dans les modèles RFX, nous avons considéré les voxels survivant à un seuil $P=.001$. Des tests t ont été appliqués pour les analyses impliquant un seul facteur, tandis que des tests F ont été utilisés pour les analyses mesurant des interactions.

Afin d'évaluer la manifestation supposée d'un effet de pratique dans la tâche d'intensité, le scan a été divisé en deux parties. Les analyses ont alors été effectuées pour les deux parties, indépendamment l'une de l'autre. Des analyses individuelles ont d'abord été réalisées dans chacune des deux parties. Des analyses de groupe ont alors été conduites sur la base des images de contraste individuelles en utilisant un modèle RFX. Nous avons ensuite réalisé des analyses de variance (ANOVA) en considérant comme facteurs d'intérêt la partie de la tâche (bloc 1 et bloc 2) et la région cérébrale.

3. Résultats

Conversion des images au format Analyze

Les images provenant de l'imageur Bruker ont été transformées au format ANALYZE pour être lues avec SPM2. Après l'acquisition des images fonctionnelles, cette étape a permis leur reconstruction.

Analyse des données comportementales

Des analyses de variance séparées ont été conduites systématiquement sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses. Lors de l'analyse des temps de réponse, seules les bonnes réponses ont été considérées. Ainsi, dans la tâche d'intensité, l'analyse des temps de réponse portait sur 92.8% des réponses, tandis que dans la tâche de valence, l'analyse des temps de réponse portait sur 89% des réponses. De plus, un élagage (« *trimming* ») a été effectué sur les données : préalablement au calcul des moyennes par

participant et par cellule (définie par le croisement des différents facteurs), les temps de réponse excédant 2.0 fois la moyenne de la cellule ont été remplacés par la moyenne de cette même cellule. Ainsi, moins de 2% des réponses et des temps de réponse ont été remplacés dans la tâche d'intensité et moins d'1% dans la tâche de valence. Par ailleurs, nous avons vérifié qu'il n'existait pas d'influence des facteurs contrôlés intersujets « doigts de réponse » et « doigt de réponse pour la condition de base » ; le facteur « ordre » sera présenté indépendamment, en raison de notre hypothèse spécifique concernant l'observation d'un effet de pratique au cours des tâches métriques lorsque celles-ci sont effectuées préalablement aux tâches catégorielles. Les résultats présentés sont ceux pour lesquels les résultats étaient significatifs. Certains résultats non significatifs sont présentés pour les besoins de la discussion.

Tâche d'intensité

Des analyses de variance ont été conduites sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses. Elles incluaient les facteurs intrasujets « valence », « intensité », « difficulté » et « bloc ». Pour étudier l'influence de ce dernier facteur, nous avons séparé le paradigme en deux parties, chaque partie comprenant quatre-vingts essais.

Analyse des temps de réponse

L'analyse de variance menée sur les temps de réponse n'a pas révélé d'effet de la valence, $p > .1$ ni d'effet de l'intensité (réponse), $p > .1$. En revanche, elle a révélé une interaction des facteurs « valence » et « intensité », $F(1,11)=14.8$, $p < .01$. L'analyse de contrastes a révélé un avantage des stimuli positifs très intenses sur les stimuli positifs peu intenses (respectivement 919 ms et 1032 ms, $F(1,11)=24.8$, $p < .001$) et un avantage des stimuli négatifs sur les stimuli positifs (respectivement 942 ms et 1032 ms) quand ils étaient peu intenses, $F(1,11)=15.6$, $p < .01$. L'analyse de variance a également révélé un effet simple du facteur « difficulté ». En effet, les participants ont répondu plus rapidement pour les stimuli codés « faciles » que pour les stimuli codés « difficiles » (respectivement 901 ms et 1022 ms), $F(1,11)=27$, $p < .001$. De plus, elle a révélé une interaction des facteurs « valence » et « difficulté », $F(1,11)=12$, $p < .01$. Outre un avantage des stimuli « faciles » sur les stimuli « difficiles », à la fois pour les stimuli positifs (respectivement 891 ms et 1060 ms, $F(1,11)=74.9$, $p < .001$) et pour les stimuli négatifs (respectivement 911 ms et 984 ms, $F(1,11)=14.1$, $p < .01$), l'analyse de contrastes a montré un avantage des stimuli négatifs sur les stimuli positifs quand les stimuli étaient difficiles à juger (respectivement 984 ms et 1060 ms), $F(1,11)=15.1$, $p < .01$. Enfin, l'analyse de variance a révélé un effet du facteur « bloc », $F(1,11)=9.6$, $p < .05$: les participants ont répondu plus lentement lors du premier bloc que lors du deuxième bloc (respectivement 1019 ms et 908 ms).

Analyse du nombre de bonnes réponses

L'analyse de variance menée sur le nombre de bonnes réponses n'a pas révélé d'effet du facteur « valence », $F < 1$ ni du facteur « intensité », $F < 1$. En revanche, elle a révélé un effet du facteur « difficulté » : les participants ont répondu plus précisément pour les stimuli codés « faciles » (59 bonnes réponses) que pour les stimuli codés « difficiles » (53 bonnes réponses), $F(1,11)=39.8$, $p < .001$. Aucun effet du facteur « bloc » n'a été observé, $p > .2$.

Tâche de valence

Des analyses de variance ont été conduites sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses. Elles incluaient les facteurs intrasujets « valence », « intensité » et « bloc ».

Analyse des temps de réponse

L'analyse de variance menée sur les temps de réponse a révélé un effet du facteur « intensité », en faveur d'un avantage des stimuli très intenses (773 ms) sur les stimuli peu intenses (1043 ms), $F(1,11)=117.1$, $p<.001$. En revanche, aucun effet de la valence (réponse), $p>.2$, ni aucune interaction des facteurs « valence » et « intensité », $p<.06$, n'ont été observés. Enfin, aucun effet du facteur « bloc », $F<1$, n'a été révélé.

Analyse du nombre de bonnes réponses

L'analyse de variance menée sur le nombre de bonnes réponses n'a pas révélé d'effet du facteur « valence », $F<1$. Elle a révélé un effet du facteur « intensité » : les participants répondaient plus précisément quand les stimuli étaient très intenses (79 bonnes réponses) que lorsqu'ils étaient peu intenses (64 bonnes réponses), $F(1,11)=150.3$, $p<.001$. De plus, aucun effet du facteur « bloc » n'a été observé, $F<1$.

Tâches d'intensité et de valence

Des analyses de variance ont été conduites sur les temps de réponse et sur le nombre de bonnes réponses. Elles incluaient les facteurs intrasujets « tâche », « valence », « intensité » et « bloc ». Seuls les effets incluant le facteur « tâche » seront rapportés ici.

Analyse des temps de réponse

L'analyse menée sur les temps de réponse n'a révélé aucun effet du facteur « tâche », $p>.2$. En revanche, une interaction des facteurs « tâche » et « intensité » a été observée, $F(1,11)=22.1$, $p<.001$; elle a révélé que lorsque les stimuli étaient très intenses, les participants répondaient plus rapidement dans la tâche de valence que dans la tâche d'intensité (respectivement 773 ms et 923 ms, $F(1,11)=22.3$, $p<.001$).

Analyse du nombre de bonnes réponses

Un effet du facteur « tâche » a été mis en évidence dans l'analyse de variance menée sur le nombre de bonnes réponses. En effet, un avantage pour la tâche d'intensité (148 bonnes réponses) a été observé, comparativement à la tâche de valence (142 bonnes réponses), $F(1,11)=9.9$, $p<.01$. De plus, une interaction des facteurs « tâche » et « intensité » a été observée, $F(1,11)=44$, $p<.001$. Elle a révélé que lorsque les stimuli étaient peu intenses, les participants répondaient plus précisément dans la tâche d'intensité que dans la tâche de valence (respectivement 74 et 64 bonnes réponses, $F(1,11)=44$, $p<.001$), et lorsque les stimuli étaient très intenses, les participants répondaient plus précisément dans la tâche de valence que dans la tâche d'intensité (respectivement 79 et 75 bonnes réponses, $F(1,11)=7.6$, $p<.05$).

Résultats des analyses fonctionnelles

Pour les effets principaux, les images fonctionnelles ont été contrastées par rapport à la condition de base pendant laquelle un événement nul était présenté, tandis que pour les effets différentiels, les images fonctionnelles ont été contrastées entre elles. Dans les

modèles FFX, les effets différentiels ont été masqués inclusivement par l'effet principal. Toutes les analyses de groupe, conduites avec un modèle FFX, ont été corrigées au seuil de voxel $P < .05$. Les analyses RFX présentées sont non corrigées au seuil du voxel $P < .001$. C'est la raison pour laquelle seuls le gyrus angulaire, les lobules pariétaux inférieur et supérieur, l'amygdale et les gyri frontaux inférieur et moyen ont été considérés dans ce cas, en raison de nos hypothèses spécifiques. Par la suite, nous précisons systématiquement avec quel type de modèle les activations ont été obtenues. Cette information ne sera pas indiquée pour les cas où les activations sont obtenues avec l'un et l'autre modèle (modèle FFX, activations corrigées, $P < .05$ et modèle RFX, activations non corrigées, $P < .001$). Dans ce cas, les coordonnées correspondent aux coordonnées obtenues avec le modèle FFX.

Les réponses fonctionnelles évoquées dans la tâche d'intensité ont été identifiées suite à la présentation de quatre types d'événements, « positifs », « négatifs », « difficiles » et « faciles » (voir tableau 6). Les effets principaux de ces quatre types d'événements ont notamment révélé une activation de l'amygdale droite pour les expressions de peur ($x, y, z = 27, -3, -10$). Aucune activation de l'amygdale n'a été mise en évidence pour les expressions de joie. De plus, une activation amygdalienne bilatérale a été observée pour les expressions faciles à juger (gauche, $x, y, z = -27, -1, -10$, modèle RFX ; droite, $x, y, z = 27, -3, -10$, modèle FFX). Pour les expressions difficiles à évaluer, une activation de l'amygdale droite ($x, y, z = 21, -6, -12$, modèle RFX) a été mise en évidence.

Les réponses fonctionnelles évoquées dans la tâche de valence ont été identifiées suite à la présentation de quatre types d'événements, « positifs », « négatifs », « peu intenses » et « très intenses » (voir tableau 7). Les effets principaux de ces quatre types d'événements ont révélé, pour les expressions de joie, une activation bilatérale de l'amygdale (gauche, $x, y, z = -24, -6, -7$, modèle FFX ; droite, $x, y, z = 24, -6, -7$, modèle FFX), une activation bilatérale au niveau du gyrus frontal inférieur (gauche, $x, y, z = -48, 41, 6$; droit, $x, y, z = 42, 20, -6$) et une activation du gyrus frontal moyen gauche ($x, y, z = -53, 14, 38$, modèle FFX). Pour les expressions de peur, nous avons observé une activation bilatérale de l'amygdale droite (gauche, $x, y, z = -21, -9, -7$, modèle FFX, $P = .056$; droite, $x, y, z = 21, -6, -10$, modèle FFX, $P = .055$), du gyrus frontal inférieur bilatérale (gauche, $x, y, z = -48, 41, 12$; droit, $x, y, z = 42, 23, -9$), et du gyrus frontal moyen bilatérale (gauche, $x, y, z = -56, 11, 35$; droit, $x, y, z = 56, 19, 29$). Les activations observées dans les conditions de présentation d'expressions faciales positives et négatives au niveau de l'amygdale sont représentées sur la Figure 15.

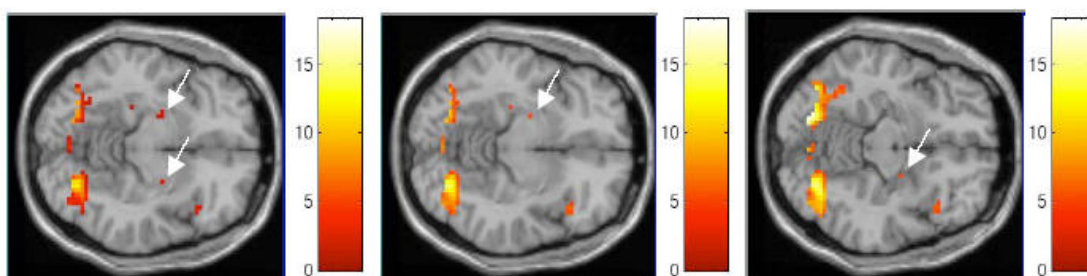


Figure 15 : Activation de l'amygdale dans la tâche de valence. A gauche, activation bilatérale dans la condition « positive » ($z = -7$, $P < .05$) ; au centre et à droite, activation dans la condition négative (respectivement, activation gauche, $z = -7$, $P = .056$; activation droite, $z = -10$, $P = .055$). Les cartes d'activations présentées sont corrigées et ont été effectuées avec un modèle FFX. Les coordonnées sont précisées dans l'espace Talairach.

Une activation amygdalienne a également été observée pour les expressions peu intenses, dans l'hémisphère gauche ($x, y, z = -21, -9, -7$), et pour les expressions très intenses, dans l'hémisphère droit ($x, y, z = 24, -6, -7$, modèle FFX, voir Figure 16).

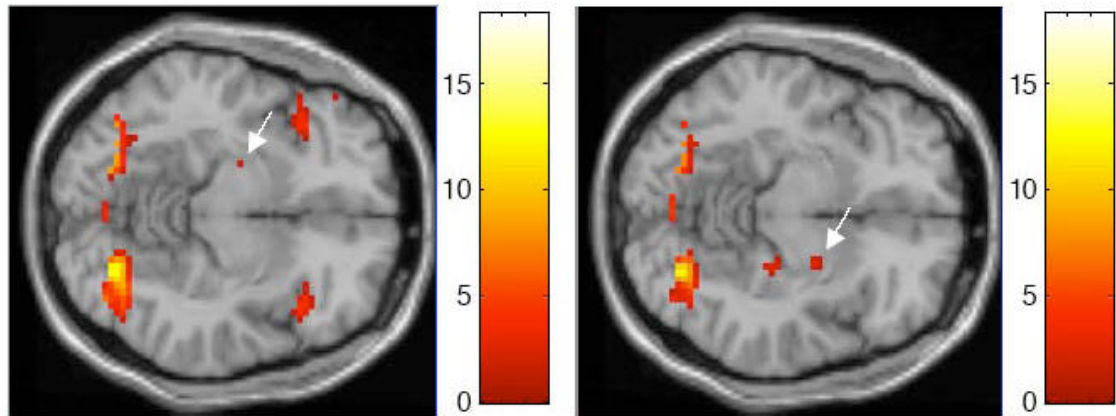


Figure 16 : Activation de l'amygdale dans la tâche de valence. A gauche, activation gauche dans la condition « peu intense » ($z = -7, P < .05$) ; à droite, activation droite dans la condition « très intense » ($z = -7, P < .05$). Les cartes d'activation présentées sont corrigées et ont été effectuées avec un modèle FFX. Les coordonnées sont précisées dans l'espace Talairach.

Tableau 6. Régions cérébrales activées dans la tâche d'intensité pour les conditions de valence positive, de valence négative, difficile et facile ; chacune de ces conditions est contrastée par rapport à la condition contrôle.

CHAPITRE 6. Étude de l'implication des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles (cadre expérimental)

Région cérébrale		CoordonnéesAB (mm) x y z				Z max	kE	P	CoordonnéesAB (mm) x y z				Z max	kE	P
		Positif - Contrôle							Négatif – Contrôle						
Amygdale	HD	-	-	-	-	-	-	-	27	-3	-10		5.26	2	.004
Gyrus parahippocampique	HG	-15	-44	2		5.48	49	0*	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus frontal supérieur	HG	-3	14	49	6	5.23	4	.004	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus précentral	HD	36	-29	59	4	4.8	1	.037	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus fusiforme	HD	39	-47	-13		6	7	0*	39	-47	-13		6.57	15	0
Cuneus	HG	-	-	-	-	-	-	-	-21	-75	9		4.82	1	.034
Gyrus lingual	HG	-21	-70	-9	18	Inf	1420	0	-21	-70	-9	18	Inf	1630	0
Gyrus occipital moyen	HG	-21	-84	15		Inf	24	0	-	-	-	-	-	-	-
		Difficile – Contrôle							Facile – Contrôle						
Amygdale	HG	-	-	-	-	-	-	-	-27	-1	-10		3.28	1	.001**
	HD	21	-6	-12		3.5	5	0**	27	-3	-10		5.15	2	.006*
Insula	HD	45	6	11		5.23	5	.004	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus parahippocampique	HG	-15	-43	5		5.11	4	.008	-	-	-	-	-	-	-
Cingulaire postérieur	HG	-6	-55	6		5.37	4	.002	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus frontal inférieur	HG	-33	26	1		5.41	4	.001	-	-	-	-	-	-	-
	HD	39	23	2	47	4.98	13	.015*	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus frontal moyen	HG	-50	30	18	46	7.37	40	0*	-	-	-	-	-	-	-
	HD	45	47	6		5.78	10	0	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus frontal médian	HG	-3	28	35	6	5.08	1	.009*	-	-	-	-	-	-	-
	HD	9	-15	48		4.88	1	.025	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus frontal supérieur	HG	-3	14	49	6	Inf	92	0	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus précentral	HG	-50	-13	31		5.18	4	.005*	-	-	-	-	-	-	-
	HD	33	-29	59	4	5.49	68	.001	-	-	-	-	-	-	-
Lobule pariétal supérieur	HG	-	-	-	-	-	-	-	-24	-52	61	7	3.12	1	.001**
Précuneus	HG	-21	-75	23	31	3.79	4	0**	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus fusiforme	HD	39	-47	-13		6.98	17	0*	39	-47	-13		5.46	5	.001*
Gyrus lingual	HG	-21	-70	-9	18	Inf	1559	0	-21	-70	-9	18	Inf	1510	0
Gyrus occipital moyen	HG	-21	-84	15		Inf	1559	0*	-30	-81	15		Inf	20	0*

Note. Les analyses de groupe ont été réalisées à la fois avec un modèle FFX et avec un modèle RFX. Les activations communes aux deux analyses sont rapportées avec le modèle FFX. Les activations de certaines structures obtenues seulement avec un modèle RFX (**) et définies *a priori* sont rapportées (* activations obtenues seulement avec le modèle FFX). Pour chaque région cérébrale, sont donnés : les coordonnées Talairach, l'aire de Brodmann (AB) correspondante, les scores Z maximum, le nombre de voxels activés dans la région (kE) et le niveau de significativité au niveau du voxel ($P < .05$ avec le modèle FFX, $P < .001$ avec le modèle RFX). HG = hémisphère gauche, HD = hémisphère droit.

Tableau 7. Régions cérébrales activées dans la tâche de valence pour les conditions de valence positive, de valence négative, de faible et de forte intensité ; chacune de ces conditions est contrastée par rapport à la condition contrôle.

CHAPITRE 6. Étude de l'implication des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles (cadre expérimental)

Région cérébrale		CoordonnéesAB (mm) x y z				Z max	kE	P	CoordonnéesAB (mm) x y z				Z max	kE	P
		Positif - Contrôle							Négatif - Contrôle						
Amygdale	HG	-24	-6	-7		5.043		.011*	-	-	-	-	-	-	-
	HD	24	-6	-7		5.232		.004*	-	-	-	-	-	-	-
Insula	HD	42	12	5		4.8	1	.039*	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus cingulaire	HG	-6	17	41		6.3	54	0	-6	17	41		5.8231		0*
Gyrus frontal inférieur	HG	-48	41	6	46	5.9916		0	-48	41	12	46	5.2	7	.005
	HD	42	20	-6		5.9213		0	42	23	-9		6.1519		0
Gyrus frontal moyen	HG	-53	14	38	8	5.779		0*	-56	11	35	9	5.412		.002*
	HD	-	-	-	-	-	-	-	56	19	29	9	5.352		.002
Gyrus frontal supérieur	HD	-	-	-	-	-	-	-	3	12	60		5.2331		.004*
Lobule pariétal inférieur	HD	48	-32	54	40	3.4	1	0**	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus fusiforme	HG	-33	-68	-14		Inf	352	0	-	-	-	-	-	-	-
	HD	33	-68	-12		Inf	509	0	42	-44	-13		5.963		0
Cuneus	HG	-12	-69	15	18	Inf	509	0*	-	-	-	-	-	-	-
	HD	-	-	-	-	-	-	-	12	-81	7	17	Inf	564	0*
Gyrus lingual	HG	-21	-76	-9	18	Inf	352	0	-18	-76	-9	18	Inf	379	0
Gyrus occipital moyen	HG	-27	-81	12		6.925		0*	-36	-70	-9		Inf	379	0*
	HD	-	-	-	-	-	-	-	27	-81	18		5.361		.002*
Corps genouillé latéral	HD	24	-26	-1		7.1417		0*	-	-	-	-	-	-	-
		Peu intense – Contrôle							Très intense – Contrôle						
Amygdale	HG	-21	-9	-7		4.861		.028	-	-	-	-	-	-	-
	HD	-	-	-	-	-	-	-	24	-6	-7		5.576		.001*
Insula	HG	-39	17	-1	13	Inf	475	0	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus parahippocampique	HG	-	-	-	-	-	-	-	-27	-18	-14		4.966		.017
Gyrus cingulaire	HG	-6	17	41		Inf	337	0	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus frontal inférieur	HG	-48	41	12	46	Inf	475	0	-	-	-	-	-	-	-
	HD	42	20	-4		Inf	181	0	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus frontal moyen	HG	-56	11	35	9	Inf	475	0	-	-	-	-	-	-	-
	HD	56	19	29	9	6.1633		0	-	-	-	-	-	-	-
Gyrus frontal médian	HG	-	-	-	-	-	-	-	-9	67	-3	10	4.751		.049
	HD	-	-	-	-	-	-	-	6	53	19	9	6.2418		0
Gyrus frontal supérieur	HD	39	50	14		5.064		.01*	18	23	57	6	5.192		.005
Gyrus fusiforme	HD	33	-71	-12	19	Inf	540	0	33	-68	-12		Inf	514	0
Cuneus	HG	-12	-69	15	18	Inf	52	0*	-21	-81	12		5	1	.014*
	HD	-	-	-	-	-	-	-	12	-81	7	17	Inf	514	0*
Gyrus lingual	HG	-21	-73	-9	18	Inf	421	0	-18	-76	-9	18	Inf	329	0
Gyrus occipital moyen	HG	-36	-70	-9		Inf	421	0	-36	-70	-9		Inf	329	0*
	HD	27	-76	4		Inf	540	0	-	-	-	-	-	-	-
Corps genouillé latéral	HD	24	-26	-1		5.986		0*	-	-	-	-	-	-	-

Note. Les analyses de groupe ont été réalisées à la fois avec un modèle FFX et avec un modèle RFX. Les activations communes aux deux analyses sont rapportées avec le modèle FFX. Les activations de certaines structures obtenues seulement avec un modèle RFX (**) et définies *a priori* sont rapportées (* activations obtenues seulement avec le modèle FFX). Pour chaque région cérébrale, sont donnés : les coordonnées Talairach, l'aire de Brodmann (AB) correspondante, les scores Z maximum, le nombre de voxels activés dans la région (kE) et le niveau de significativité au niveau du voxel ($P < .05$ avec le modèle FFX, $P < .001$ avec le modèle RFX). HG = hémisphère gauche, HD = hémisphère droit.

Test de l'hypothèse d'une implication des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles

Afin de tester si les relations spatiales visuelles sont impliquées dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles, nous avons effectué, dans la tâche d'intensité et dans la tâche de valence, une analyse, en considérant l'effet principal de la tâche. Aucune activation n'a été mise en évidence dans les aires pariétales définies *a priori*. Afin d'étudier si de telles activations étaient plus spécifiques aux événements difficiles à traiter, nous avons comparé directement les réponses aux événements liés à la condition « difficile » aux réponses aux événements liés à la condition « facile » dans la tâche d'intensité et dans la tâche de valence. Précisons que, dans la tâche de valence, les stimuli les plus difficiles correspondent aux stimuli les moins intenses, tandis que les stimuli les plus faciles correspondent aux stimuli les plus intenses, comme l'ont attesté les temps de réponse et le nombre de bonnes réponses rapportés dans les analyses comportementales. Dans la tâche d'intensité, l'effet différentiel a révélé des activations au niveau du lobule pariétal inférieur gauche ($x, y, z = -42, -59, 44$) et du lobule pariétal supérieur droit ($x, y, z = 33, -56, 53$). Dans la tâche de valence, l'effet différentiel a révélé des activations au niveau du lobule pariétal inférieur gauche ($x, y, z = -36, -50, 41$) et du lobule pariétal supérieur bilatéral (gauche, $x, y, z = -36, -59, 50$; droit, $x, y, z = 39, -62, 50$). Les activations pariétales observées dans les tâches d'intensité et de valence sont représentées sur les Figures 17 et 18 respectivement.

Afin de déterminer dans les deux tâches si les activations pariétales observées dans la condition « difficile » par rapport à la condition « facile » étaient plus spécifiques aux expressions positives ou aux expressions négatives, nous avons mesuré l'interaction des facteurs « difficulté » et « valence ». Cette interaction n'a révélé aucune activation au niveau des aires d'intérêt définies *a priori*.

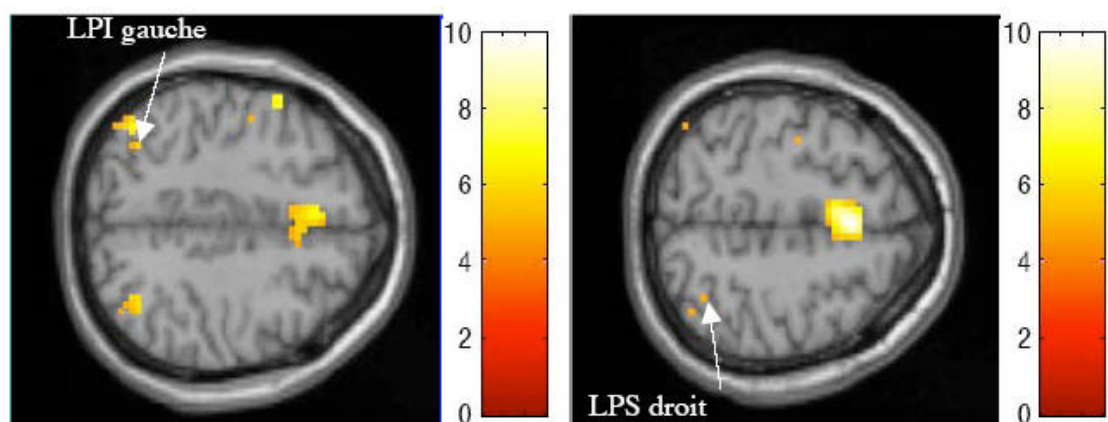


Figure 17 : Activation des lobules pariétaux inférieur (LPI) et supérieur (LPS) dans la condition « difficile > facile » de la tâche d'intensité. A gauche, activation du LPI gauche ($z = 44$, $P < .05$) ; à droite, activation du LPS droit ($z = 53$, $P < .05$). Les cartes d'activations présentées sont corrigées et ont été effectuées avec un modèle FFX. Les coordonnées sont précisées dans l'espace Talairach.

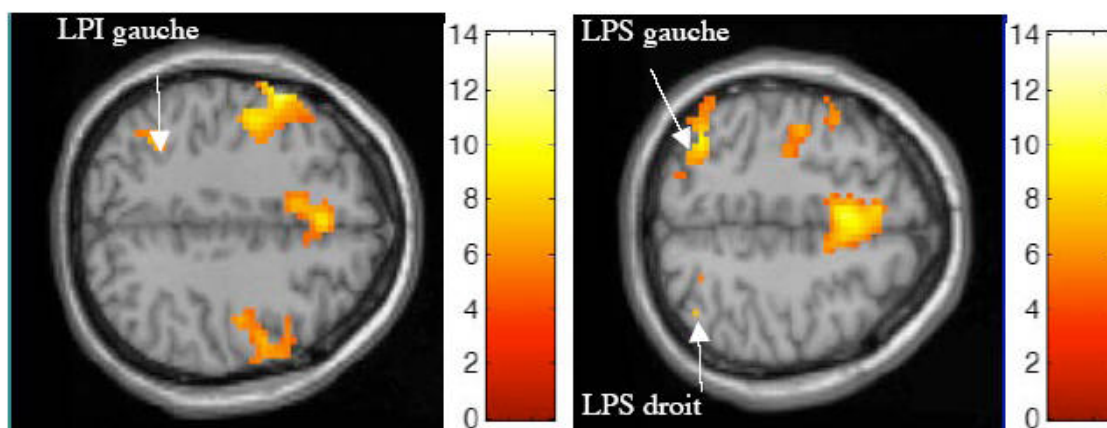


Figure 18 : Activation des lobules pariétaux inférieurs (LPI) et supérieur (LPS) dans la condition « difficile > facile » (« peu intense > très intense ») de la tâche de valence. A gauche, activation du LPI gauche ($z = 41$, $P < .05$) ; à droite, activation du LPS bilatéral ($z = 50$, $P < .05$). Les cartes d'activations présentées sont corrigées et ont été effectuées avec un modèle FFX. Les coordonnées sont précisées dans l'espace Talairach.

Test de l'hypothèse de polarité

Afin de tester l'hypothèse de l'existence de sous-systèmes distincts mis en œuvre dans le traitement des expressions faciales positives et négatives, nous avons effectué une analyse comparant directement les réponses liées aux stimuli « positifs » et « négatifs » dans la tâche d'intensité et dans la tâche de valence. Aucune activation dans l'amygdale n'a été observée.

Afin de déterminer si, dans les conditions positive et négative du traitement explicite de la valence, l'amygdale était plus activée dans l'hémisphère gauche ou dans l'hémisphère droit, nous avons réalisé une ANOVA sur le nombre de voxels activés dans cette structure, chez chaque participant, en considérant les facteurs « hémisphère » et « valence ». Pour cela, nous avons appliqué aux valeurs de voxels activés de l'amygdale une SVC (Small Volume Correction, correction sur petit volume) en traçant une sphère de 8 mm de rayon autour de cette structure (voir par exemple, Morris, de Gelder, Weiskrantz, & Dolan, 2001). Les coordonnées que nous avons définies comme le centre de la sphère ($x, y, z = \pm 20, -8, -13$, coordonnées Talairach) étaient celles utilisées par Phillips et al. (2001). L'ANOVA n'a pas révélé d'interaction des facteurs « valence » et « hémisphère », $F < 1$. Par ailleurs, nous avons testé le modèle d'activation asymétrique proposé par Davidson (1995). Ainsi nous avons effectué une ANOVA au niveau des gyri frontaux inférieur et moyen avec « hémisphère » et « valence » comme facteurs. Pour chaque participant, nous nous sommes assurés que l'ensemble des activations présentes à un seuil d'intensité du voxel de $P < .005$ non corrigé, et à un seuil d'étendue spatiale de 4 voxels contigus, était bien à l'intérieur des gyri frontaux inférieur et moyen, notamment au niveau des clusters. Aucun effet significatif n'a été observé, $F < 1$.

Afin de mesurer la manifestation, si elle existe, d'un traitement automatique de l'intensité dans la tâche de valence, nous avons mesuré l'interaction des facteurs « intensité » et « valence ». Cette interaction n'a révélé aucune activation au niveau de l'amygdale, définie comme aire d'intérêt *a priori* (voir Phillips et al., 2001). Cependant, étant donné notre hypothèse d'une modulation du traitement de la valence par l'intensité, nous avons effectué des analyses prenant en considération les valences positive et négative dans les conditions d'intensités faible et forte. Dans la condition de faible intensité, aucune activation de l'amygdale n'a été révélée, quelle que soit la valence. En revanche, dans la condition de forte intensité, nous avons observé une activation de l'amygdale droite ($x, y, z = 24, -6, -7$, modèle FFX) pour les stimuli positifs et une activation bilatérale de l'amygdale (gauche, $x, y, z = -27, -1, -10$, modèle RFX ; droite, $x, y, z = 21, -3, -7$) pour les stimuli négatifs.

Test de l'hypothèse d'un effet de pratique dans la tâche d'intensité

Étant donné nos prédictions sur l'existence d'un effet de pratique dans la tâche d'intensité, nous avons effectué des contrastes comparant le nombre de voxels activés dans la première partie du scan comparativement à la seconde partie, dans les deux tâches. Cet effet différentiel a révélé, dans la tâche d'intensité, qu'un plus grand nombre de voxels a été activé dans le lobule pariétal inférieur droit ($x, y, z = 45, -58, 52$, modèle FFX) dans la première partie comparativement à la seconde partie. Aucune activation au niveau des aires d'intérêt n'a été observée dans la tâche de valence.

4. Discussion

L'expérience 3 avait deux objectifs majeurs. Le premier objectif était de tester l'hypothèse d'une implication des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles. Le second objectif était de tester l'hypothèse de polarité du traitement des expressions faciales émotionnelles, qui pourrait se révéler par l'existence d'une asymétrie hémisphérique dans le jugement de la valence des expressions positives et négatives. Par ailleurs, nous souhaitions mesurer l'influence de l'intensité au cours de ce jugement.

Évaluation émotionnelle selon la valence et selon l'intensité

Un large réseau d'activations de régions corticales et sous-corticales a été obtenu à la fois dans la reconnaissance explicite des expressions faciales de joie et de peur, et dans la discrimination de leurs intensités. Ce réseau, typiquement mis en évidence dans de nombreuses études antérieures dans les processus émotionnels faciaux, pourrait former un réseau « émotionnel », incluant à la fois des régions limbiques (principalement l'amygdale) et des régions préfrontales (les gyri inférieur et moyen), de même que des aires impliquées dans l'analyse visuelle (principalement le gyrus occipital moyen, le gyrus lingual, le cuneus et le gyrus fusiforme). Keightley et al. (2003), qui ont observé un réseau comparable, ont proposé que les régions préfrontales pourraient moduler les régions limbiques. L'activation du gyrus fusiforme, observée principalement dans l'hémisphère droit, était fortement attendue. Cette activation corrobore les résultats obtenus dans de nombreuses études qui ont démontré que cette région était impliquée dans le traitement perceptif des visages (Kanwisher et al., 1997 ; Sergent et al., 1992), que son activation pouvait être modulée par les contraintes de la tâche (Gorno-Tempini et al., 2001) et être liée à la nature même des stimuli (Gauthier et al., 2000).

Un résultat important de notre étude est la révélation de réponses de l'amygdale tâche-indépendante. En effet, l'activation au niveau de l'amygdale a été révélée dans les deux tâches, d'intensité et de valence. L'activation au niveau de l'amygdale dans l'évaluation des expressions faciales positives et négatives selon leur valence était bilatérale. Le jugement d'intensités négatives a conduit à l'activation de l'amygdale de l'hémisphère droit ; nous n'avons pas observé d'activation de l'amygdale dans le jugement d'intensités positives. Enfin, précisons que la reconnaissance explicite des expressions de joie n'a pas entraîné une activation au niveau du cortex orbito-frontal bilatéral (Gorno-Tempini et al., 2001 ; Gur et al., 2002b) mais une activation du gyrus frontal inférieur, dans une portion frontale plus supérieure au cortex orbito-frontal.

Hypothèse de l'implication des relations spatiales dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles

Pour tester cette hypothèse, nous nous sommes focalisés sur des structures pariétales identifiées comme aires d'intérêt, c'est-à-dire le gyrus angulaire et les lobules pariétaux inférieur et supérieur. Précisons que la définition de ces aires d'intérêt *a priori* est rare dans des études portant sur des jugements d'expressions faciales émotionnelles, qu'il s'agisse de jugements de la valence ou de l'intensité. En effet, même si des activations de certaines de ces structures ont déjà été révélées dans certaines études antérieures (par exemple, Iidaka et al., 2001), elles restent isolées ; dans notre étude, ces structures faisaient partie d'un réseau d'activations comprenant les lobules pariétaux inférieur et supérieur. Par ailleurs, ces structures étaient activées *spécifiquement* lors de la présentation d'expressions faciales émotionnelles difficiles à juger, c'est-à-dire proches, dans les tâches d'intensité et de valence (condition correspondant aux expressions peu intenses dans le cas de la tâche de valence). Ce résultat n'est pas surprenant si l'on considère que notre hypothèse postulant une implication des relations spatiales se basait en partie sur des résultats obtenus lors de notre première étude réalisée en IRMf (Expérience 1) ayant mis en évidence l'implication des relations spatiales visuelles dans une condition requérant une discrimination de distance relativement fine (c'est-à-dire les essais les plus difficiles, situés près de la distance de référence). Nous expliquons l'observation d'activations de ces structures pariétales, spécifiques aux conditions d'évaluation d'intensité et de valence les plus difficiles, comme la manifestation d'un traitement s'opérant lorsque la reconnaissance de la valence ou de l'intensité émotionnelle requiert un traitement fin et précis. Winston et al. (2003, p.92) ont proposé que la présentation d'expressions faciales de faible intensité pourrait requérir un traitement cognitif plus important afin de reconnaître ces expressions faciales correctement. Nous proposons que ce traitement et la discrimination en général des expressions faciales ayant des intensités proches seraient de nature spatiale et nécessiteraient l'intervention des relations spatiales visuelles métriques. Celles-ci ne seraient pas dédiées exclusivement à la discrimination explicite des intensités dans une même émotion, mais elles seraient également requises pour discriminer deux émotions différentes, proches dans leurs intensités de l'expression neutre. Notons que le réseau d'activations pariétales obtenu était bilatéral, et non spécifique à l'hémisphère droit, comme nous le proposons d'après l'étude de Baciou et al. (1999). Cependant, cette étude avait spécifiquement mis en évidence une activation au niveau du gyrus angulaire. Dans notre expérience 3 d'IRMf, les structures pariétales activées étaient les lobules pariétaux inférieur et supérieur, structures spécifiquement activées dans l'étude de Kosslyn et al. (1998), de manière bilatérale.

Par ailleurs, nous postulons l'implication des relations spatiales visuelles catégorielles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles. L'existence d'un sous-

système dédié au traitement catégoriel n'a pas été démontrée dans notre expérience. Suite aux résultats de son étude dont l'une des tâches portait sur la discrimination d'expressions faciales, White (2002) a conclu au rôle des relations catégorielles dans la discrimination des expressions émotionnelles d'un visage. White présentait des photographies issues de la base de données d'Ekman et Friesen (1976) et n'a ainsi, en raison du caractère prototypique des expressions, pas pu considérer des modifications subtiles d'intensités. Sa conclusion du rôle des relations catégorielles dans la discrimination des expressions faciales doit donc être relativisée. Ainsi, nous proposons plutôt que la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles prototypiques, ou la discrimination entre deux expressions n'exigeant pas une discrimination fine, par exemple entre deux expressions différentes ayant de fortes intensités, seraient perçues de manière catégorielle, selon la proposition de certains auteurs (Calder et al., 1996b ; Young et al., 1997). Cependant, les résultats obtenus dans notre expérience 2 (voir la discussion sur l'hypothèse CP) et notre proposition très spécifique ci-dessus, nous conduisent à rejeter l'hypothèse forte d'Etcoff et Magee (1992) selon laquelle l'assignement des expressions faciales à une catégorie est irrépressible.

De plus, dans la tâche spatiale métrique de notre expérience 1, nous avons observé une disparition, avec la pratique, d'un avantage de l'hémisphère droit au niveau du gyrus angulaire, zone pariétale définie comme aire d'intérêt. Ainsi, nous avons suggéré que l'observation d'une disparition avec la pratique d'un avantage d'une des structures cérébrales pariétales, définies comme aire d'intérêt (le gyrus angulaire, les lobules pariétaux inférieur et supérieur), constituerait un indice supplémentaire nous permettant d'apporter des arguments en faveur de l'implication des relations spatiales métriques dans la discrimination des expressions faciales. Nos résultats ont mis en évidence, dans la tâche d'intensité, une disparition avec la pratique d'un avantage du lobule pariétal inférieur droit. Nous interprétons l'activation au niveau de cette structure, observée dans le premier bloc d'essais du jugement d'intensité, comme un argument en faveur de l'implication des relations spatiales métriques dans la discrimination d'intensités. Ce résultat est d'autant plus robuste qu'il considère cette région comme spécifiquement activée dans le premier bloc *comparativement* au second bloc. Un tel résultat n'a pas été observé dans la discrimination de la valence.

Hypothèse de polarité dans le traitement des expressions faciales émotionnelles

Une validation de l'hypothèse de polarité consisterait à mettre en évidence des circuits neuronaux différents (soit des structures différentes soit une asymétrie hémisphérique au sein d'une même structure) impliqués dans le traitement explicite des expressions positives et négatives. Nous avons choisi de tester l'hypothèse d'asymétrie hémisphérique avec des expressions de joie et de peur, au niveau de l'amygdale et des gyri frontaux inférieur et moyen. L'activation de l'amygdale pendant l'évaluation de la peur était attendue. Il s'agit d'un résultat robuste dans la littérature (par exemple, Adolphs et al., 1994, étude neuropsychologique ; Adolphs & Tranel, 2003 ; Adolphs et al., 1994 ; Anderson et al., 2003a ; Breiter et al., 1996 ; Calder et al., 1996c ; Morris et al., 1996, 1998, 2002 ; Phillips et al., 2001 ; Sprengelmeyer et al., 1999, études de neuroimagerie). La latéralité hémisphérique de l'amygdale dans le traitement explicite des expressions négatives est sujette à débat. Notre étude n'a pas révélé d'activation significativement plus importante au niveau de l'amygdale dans un hémisphère ou dans un autre. Même si l'implication de l'amygdale (bilatérale) dans les jugements positifs est plus controversée, ce résultat a déjà été obtenu : une activation bilatérale de l'amygdale a été observée dans plusieurs études (par exemple, Breiter et al., 1996 ; Killgore & Yurgelun-Todd, 2004, en perception

non consciente). Par ailleurs, nous avons également testé le modèle de Davidson (1995) postulant une asymétrie hémisphérique dans le traitement de stimuli émotionnels inspirant un comportement d'approche et de retrait, au niveau du cortex préfrontal. Nous avons obtenu une activation bilatérale des gyri frontaux inférieur et moyen.

Par ailleurs, le fait que nous ayons observé, à la fois dans l'évaluation d'expressions faciales de joie et de peur, une activation au niveau de l'amygdale bilatérale nous permet de conclure que l'amygdale n'est pas *spécifique* au traitement de stimuli négatifs. Ainsi, même si l'amygdale semble constituer un élément fondamental et privilégié dans le support neuronal de la peur, elle ne lui est pas exclusivement dédiée (pour une discussion, voir Morris et al., 1998). Pour expliquer l'activation privilégiée de l'amygdale dans la reconnaissance de la peur, certains auteurs (Rapcsak et al., 2000) ont proposé que l'association observée entre les déficits de la reconnaissance de la peur chez des patients présentant des lésions de l'amygdale pourrait être liée à la nature intrinsèque de la peur à être une émotion particulièrement difficile à reconnaître. Nos résultats de l'étude d'IRMf n'ont pas démontré de différences dans la rapidité et la précision du traitement explicite de la peur. L'expérience comportementale a même montré une plus grande précision des réponses pour la peur que pour la joie. Ainsi, même si nous n'avons pas obtenu de biais de traitement de la peur, nos résultats ne vont pas à l'encontre de la proposition de Rapcask et al. (2000), l'amygdale, dans notre étude, n'ayant pas été activée seulement dans la reconnaissance de la peur, mais aussi dans la reconnaissance explicite de la joie.

De plus, l'observation selon laquelle certaines structures répondent à la fois aux expressions de joie et de peur ne nous permet pas de rejeter l'hypothèse de perception catégorielle des expressions faciales émotionnelles. Nous suggérons qu'il pourrait exister des différences dans le traitement des expressions de joie et de peur, mais qu'un même substrat neuronal (principalement l'amygdale et les gyri frontaux inférieur et moyen, mais aussi le gyrus fusiforme, le gyrus cingulaire et le cortex extrastrié) pourrait sous-tendre le traitement explicite de ces deux expressions faciales. Ainsi, nous postulons que ces expressions faciales émotionnelles, quand aucun traitement fin de leurs intensités n'est requis, seraient perçues de manière catégorielle comme énoncé plus haut (Calder et al., 1996b ; Young et al., 1997).

Une interaction des mécanismes visuels et des mécanismes émotionnels ?

Une question liée à l'hypothèse de la manifestation d'un traitement spatial visuel qui s'opèrerait conjointement au traitement du contenu émotionnel des stimuli est posée. Des études de neuroimagerie ont été réalisées pour identifier les régions cérébrales associées au traitement visuel des stimuli émotionnels. Certaines études ont mis en évidence une interaction des processus visuels et émotionnels (par exemple, Morris et al., 1998, influence de l'activité de l'amygdale sur le traitement visuel précoce de visages émotionnels au niveau du cortex extrastrié). Cependant, à notre connaissance, notre étude est la première à rechercher dans quelle mesure la perception de modifications morphologiques visuelles dans une expression faciale, conduisant à la perception de différentes intensités, pourrait influencer la reconnaissance de cette expression faciale ou de son intensité. Nous considérons en effet, comme certains auteurs (Calder et al., 2000b), qu'une intensité émotionnelle d'une expression faciale est liée à la saillance des traits caractéristiques de l'expression (par exemple, la hauteur des sourcils quand ils sont relevés, l'étirement des coins de la bouche, etc.). Ainsi, plus ces traits seront exagérés, plus l'expression apparaîtra intense. Pour aller plus loin, et suite aux résultats de notre étude, nous émettons l'hypothèse qu'un traitement de nature spatiale, c'est-à-dire impliquant les *relations spatiales* existant

entre les différents traits d'une expression faciale, s'effectuant dans le lobe pariétal, pourrait moduler le traitement émotionnel facial au niveau de l'amygdale. Un indice en faveur de cette hypothèse repose sur l'observation d'une activation différenciée de l'amygdale selon que le jugement requis exige une détection plus ou moins précise de la position et des relations entre les traits visuels. Cette notion de précision a été contrôlée par la présentation d'expressions faciales ayant une intensité plus ou moins proche. Dans le cas où les expressions étaient proches, la condition était évaluée comme plus difficile que lorsque les expressions étaient relativement différentes, condition estimée comme plus facile par les temps de réponse et la précision des réponses recueillis *a posteriori*. Nos résultats fonctionnels ont montré, indépendamment de l'expression présentée, une activation de l'amygdale droite dans les conditions difficiles et une activation de l'amygdale bilatérale dans les conditions plus faciles. Ce résultat peut être rapproché de celui obtenu par Morris et al. (2002) dans une tâche de reconnaissance de genre de visages exprimant la peur, soit entièrement, soit partiellement par les yeux ou la bouche uniquement (la bouche et les yeux étant respectivement neutres). Ils ont mis en évidence une activation de l'amygdale gauche lors de la présentation de visages dont tous les traits exprimaient la peur et une activation de l'amygdale droite lors de la présentation de visages dont seuls les yeux exprimaient la peur. Ainsi, une explication possible à notre résultat est que l'activation de l'amygdale droite dans la condition difficile serait le reflet de l'extraction de l'information spatiale contenue dans les traits (et donc dans les relations spatiales entre ces traits) pertinents pour la reconnaissance de l'expression faciale (c'est-à-dire les yeux pour la peur, et probablement la bouche pour la joie). Par ailleurs, l'activation de l'amygdale bilatérale dans la condition facile serait le reflet d'un traitement de configuration ou holistique de l'expression faciale.

Influence de l'intensité dans le traitement des expressions faciales émotionnelles

Un intérêt supplémentaire de notre étude d'IRMf était de mesurer l'influence de l'intensité sur le traitement des expressions faciales émotionnelles, de joie et de peur, au niveau de l'amygdale. L'interaction de la valence et de l'intensité n'a pas conduit à l'activation de l'amygdale. Cependant, nous avons observé une activation de l'amygdale seulement lorsque les expressions de joie étaient très intenses, alors que l'amygdale était activée à la fois pour les expressions négatives peu et fortement intenses. Ainsi, nous proposons que les études ayant échoué à révéler une activation de l'amygdale pour les expressions de joie (i) n'ont pas contrôlé le degré d'intensité et présenté des émotions positives indépendamment de leur intensité ou (ii) présenté des émotions trop peu intenses. Par ailleurs, nous avons observé une activation de l'amygdale indépendamment de la valence. Ce résultat rejoint celui observé par Small et al. (2003), qui ont montré, avec des stimuli gustatifs, que l'activité de l'amygdale pourrait dépendre de l'intensité, indépendamment de la valence. Notre étude a mis en évidence une activation de l'amygdale gauche dans l'évaluation d'expressions faciales peu intenses, tandis que l'évaluation d'expressions faciales très intenses a conduit à une activation de l'amygdale droite. Ce résultat, joint à celui de Small et al. (2003), va donc à l'encontre de l'idée que l'amygdale répond préférentiellement aux stimuli négatifs. Notons, cependant, que nous n'avons pas observé d'activation plus forte lors de la présentation d'expressions émotionnelles très intenses *comparativement* à la présentation d'expressions émotionnelles peu intenses et inversement. Ce résultat, en effet simple, avait déjà été mis en évidence par Phillips et al. (1997) dans une tâche de genre, avec l'expression de peur. L'intensité, un composant intrinsèque des émotions apparaît donc comme un facteur essentiel à considérer dans les recherches étudiant la perception et la reconnaissance des émotions en général et des expressions faciales en particulier.

Pourtant, de manière surprenante et comme l'ont déjà souligné certains auteurs (Calder et al., 2000b, p. 143), l'intensité émotionnelle n'est pas ou peu pris en considération en tant que facteur expérimental dans des études portant sur la reconnaissance des expressions faciales. Il ne fait pas de doute que cela soit dû en partie au fait qu'il est difficile de manipuler l'intensité des expressions faciales naturelles (ou posées) de manière contrôlée.

Influence de la tâche : tâche explicite versus tâche implicite

Même s'il ne s'agissait pas de l'un de nos objectifs principaux, les expériences 2 et 3 nous ont permis d'identifier les corrélats neuronaux de la joie et de la peur suite à un jugement d'intensité au cours duquel aucun traitement de la valence n'était explicitement demandé. Ainsi, la tâche d'intensité nous a permis d'évaluer si une réponse de l'amygdale se déclenche lors de la présentation de stimuli émotionnels ou seulement lorsque le contenu émotionnel est pertinent pour la tâche. Nos résultats ont révélé une activation de l'amygdale dans la tâche d'évaluation de l'intensité des expressions faciales négatives. Nous proposons deux interprétations à ce résultat. Premièrement, l'activation de l'amygdale pourrait se produire car un besoin irrépressible de traiter le contenu émotionnel est nécessaire pour évaluer à laquelle des deux expressions faciales, de joie ou de peur, de référence il est utile de comparer l'expression faciale présentée. Cette explication semble peu plausible étant donné qu'une activation de l'amygdale dans la tâche d'intensité n'a été observée que lors de la présentation de stimuli négatifs, mais non lors de la présentation de stimuli positifs. Si le traitement du contenu émotionnel des expressions faciales s'avérait utile pour le choix du visage de référence, alors le contenu émotionnel serait extrait à la fois pour les stimuli positifs et négatifs ; l'activation correspondante serait probablement sous-tendue par une activation au niveau de l'amygdale. Notre deuxième interprétation postule qu'il est plus pertinent d'extraire de manière automatique le contenu émotionnel des visages lors de la présentation d'expressions de peur que lors de la présentation d'expressions de joie. Cette conclusion nous semble plus réelle. De nombreuses études ont proposé que l'amygdale aurait une capacité particulière à répondre de manière automatique ou conditionnée aux stimuli émotionnels négatifs (Keightley et al., 2003 ; LeDoux, 1995 ; Morris et al., 1998 ; Sander et al., 2003 ; Whalen et al., 1998). Cette structure pourrait être particulièrement importante pour traiter automatiquement les indices sociaux provenant des visages (Critchley et al., 2000a).

CHAPITRE 7. Mise en œuvre des sous-systèmes de traitement de l'expression faciale émotionnelle (cadre expérimental)

Les expériences 4, 5 et 6 ont été directement motivées par une expérience antérieure réalisée par Loiselot et Koenig (1998). Ces auteurs ont utilisé le paradigme d'amorçage par l'expression faciale afin de déterminer s'il existe un traitement parallèle de l'expression faciale et de la familiarité (voir le modèle de Bruce & Young, 1986). Dans une première phase, dite d'étude, les participants devaient juger des caractéristiques sémantiques des visages, comme, par exemple, déterminer l'âge ou le sport que pourraient pratiquer les individus sur la base de leur visage. Leurs expressions faciales étaient neutres. Dans la phase test, les participants devaient estimer si le visage présenté en cible correspondait au visage d'un individu qu'ils avaient rencontré dans la phase d'étude, ou s'il s'agissait du visage d'un nouvel individu. Le visage cible était précédé d'un visage amorce inconnu ayant une même expression ou une expression différente de celle du visage cible. Les auteurs ont observé que la reconnaissance des visages était plus rapide lorsque les deux expressions étaient identiques comparativement à la condition où les deux expressions étaient différentes, concluant à l'existence d'un traitement automatique de l'expression faciale.

Les expériences 4, 5 et 6, réalisées avec un paradigme d'amorçage, avaient pour objectif d'étudier la mise en œuvre des sous-systèmes de traitement des expressions faciales en testant l'hypothèse d'automatisme, selon laquelle les expressions faciales sont traitées selon un mode automatique. Notre démarche est très originale dans la mesure où nous avons souhaité tester cette hypothèse lorsque le jugement requis porte sur un aspect perceptif visuel des visages.

Expérience 4. Expérience réalisée avec un paradigme d'amorçage (SOA=600ms)

1. Objectif

Dans l'expérience 4, nous avons comme objectif principal de tester l'hypothèse d'automatisme.

2. Méthode

Participants

Soixante-six participants ont réalisé cette l'expérience. Seuls les résultats de quarante-huit d'entre eux ont été conservés. En effet, nous avons fixé arbitrairement un critère de rapidité de réponse nous permettant d'éliminer (et de remplacer) tout participant dont la moyenne excédait 700 ms. Nous avons également fixé un critère arbitraire de précision nous autorisant à éliminer (et à remplacer) tout participant commettant plus de quatre erreurs sur l'ensemble des quarante-huit essais de l'expérience. Ces deux critères nous ont conduits à remplacer dix-huit participants. Les quarante-huit participants restants étaient tous étudiants à l'Université Lumière Lyon 2, âgés de dix-huit à vingt-huit ans (moyenne d'âge de vingt-deux ans), et comprenaient vingt-quatre individus de sexe féminin et vingt-quatre individus de sexe masculin. Ils étaient tous droitiers et volontaires. L'expérience était non rémunérée. La vision des participants était normale ou corrigée.

Dispositif expérimental

Les stimuli étaient présentés visuellement sur un fond noir grâce au logiciel MacLab, sur un écran Formac ProNitron 17/500 relié à un ordinateur Macintosh (6100/200). L'écran était réglé en millions de couleurs, sa résolution était de 832 x 624.75 Hz et la fréquence de balayage était de 75 Hz. La lumière principale de la salle restait allumée tout au long de l'expérience. Enfin, les temps de réponse ont été enregistrés par le logiciel MacLab à partir de deux touches du clavier « b » et « n », recouvertes de pastilles de couleur spécifique. L'activation de l'une des deux touches arrêta l'horloge interne de l'ordinateur et déterminait un temps de réponse, qui était enregistré directement par l'ordinateur.

Stimuli

Nous avons utilisé quatre-vingt seize stimuli composés de visages d'hommes exprimant la colère, le dégoût, la joie ou la surprise. L'ensemble des visages ont été organisés en couple amorce-cible. Ils provenaient de l'étude menée par Loiselot et Koenig (1998).² Chaque visage couvrait une surface d'environ 8.75 cm sur 6 cm (représentant 8.75° sur 6° d'angle visuel, les participants étant à 57 cm du centre de l'écran), entourée par un cadre.

Pour répondre aux exigences du paradigme d'amorçage, il a été choisi d'attribuer soit une même expression en amorce et en cible, soit une expression différente. De plus, pour opérationnaliser l'hypothèse d'un traitement irrépressible de l'expression faciale, une coloration rouge ou verte a été appliquée aux visages cibles avec le logiciel Adobe Photoshop. Le degré de coloration choisie était de cinquante sur une échelle de zéro à cent. Nous n'avons pas appliqué de coloration aux quarante-huit visages amorces. Ainsi, les colorations rouge et verte ont été attribuées aux visages correspondant aux cibles de l'expérience de Loiselot et Koenig (1998) c'est-à-dire aux visages sur lesquels portait la

² Au départ, cent cinq personnes de sexe masculin d'une moyenne d'âge de 25 ans ont été photographiées. Les expérimentateurs se sont assurés que deux visages différents avec la même expression ne partageaient pas plus de caractéristiques communes que deux visages différents avec une expression différente. Chacun des individus devait exprimer les émotions de joie, de colère, de dégoût, de surprise et de neutralité à partir d'histoires lues. Chacune des trois cents photographies retenues a été traitée sur le logiciel Adobe Photoshop 3.0.5 de façon à limiter la perception des visages au contour des cheveux et à centrer les visages sur l'écran. Vingt juges ont été conviés à regarder ces photographies. Ils devaient appuyer sur des touches du clavier pour déterminer un choix parmi les cinq proposées. Les photographies conservées ont eu l'accord d'au moins 80 % des juges. C'est ainsi qu'ont été obtenues les quatre-vingt seize photographies de visages différents, que l'on peut classer en quatre groupes : vingt-quatre exprimant la joie, vingt-quatre la colère, vingt-quatre le dégoût et vingt-quatre la surprise. Contrairement à l'expérience de Loiselot et Koenig (1998), les visages neutres n'ont pas été utilisés dans cette expérience.

décision de familiarité. Nous avons choisi arbitrairement de remplacer les visages qui étaient à estimer comme familiers par une coloration rouge, et ceux qui étaient à estimer comme non familiers par une coloration verte, de façon à rendre ces deux expériences les plus comparables possibles.

Procédure

Les participants, installés confortablement dans une salle insonorisée, calme, étaient testés individuellement. L'expérimentatrice restait avec eux. En premier lieu, ils remplissaient la feuille de consentement. Puis, ils s'installaient face à l'écran de l'ordinateur de manière à ce que leur visage repose de façon stable sur une mentonnière et que leurs yeux soient situés à cinquante-sept centimètres de l'écran. Rappelons qu'à cette distance, une variation d'un centimètre sur l'écran correspond à un degré d'angle visuel. Les instructions apparaissaient sur l'écran et étaient simultanément lues par l'expérimentatrice qui demandait aux participants de regarder l'ensemble des visages, même si la décision de coloration ne portait que sur le deuxième visage de chaque couple. En particulier, elle insistait sur la remise d'un questionnaire à la fin de l'expérience portant sur tous les visages. C'était une bonne façon de s'assurer que les participants regardaient effectivement le premier visage sur lequel ils n'avaient aucune décision à formuler.

Avant de commencer l'expérience, les participants effectuaient une phase d'entraînement avec les touches du clavier correspondant aux pastilles. L'expérimentatrice nommait rapidement et indifféremment les deux colorations et les participants appuyaient en conséquence sur les touches, le plus rapidement possible. Cette phase durait environ vingt secondes. Ensuite, l'expérience débutait.

Phase expérimentale

Dans la moitié des essais, le couple de visages amorce-cible avait la même expression, dans l'autre une expression différente. De plus, dans la moitié des essais, la cible était colorée en rouge, dans l'autre en vert. La répartition des stimuli est présentée dans le tableau 8.

Tableau 8. Présentation de la répartition des stimuli. La deuxième ligne représente le type d'essai même ou différent. La troisième ligne représente le type d'expression, respectivement le type d'expression de l'amorce et le type d'expression de la cible (C : colère, D : dégoût, J : joie, S : surprise). La quatrième ligne représente la coloration de la cible (R : rouge, V : verte). Est indiqué entre parenthèses le nombre de stimuli pour chaque condition.

Couples de stimuli (48)											
Type d'essai : même (24)								Type d'essai : différent (24)			
C C (6)	D D (6)	J J (6)	S S (6)	C D J S (2) (2) (2) (2)	D C J S (2) (2) (2) (2)	J C D S (2) (2) (2) (2)	S C D J (2) (2) (2) (2)				
R(3) V(3)	R(3) V(3)	R(3) V(3)	R(3) V(3)	R(1) V(1)	R(1) V(1)	R(1) V(1)	R(1) V(1)	R(1) V(1)	R(1) V(1)	R(1) V(1)	R(1) V(1)

Chaque participant effectuait une décision sur les quarante-huit couples. Les participants étaient répartis en deux groupes de vingt-quatre individus différenciés selon le critère de la coloration appliquée aux visages. En effet, les colorations rouge et verte appliquées aux visages présentés au premier groupe correspondaient respectivement aux colorations verte et rouge des visages présentés au second groupe. De plus, l'ordre de présentation des visages pour le premier groupe correspondait à l'ordre de présentation inverse du second groupe.

Ensuite, deux sous-groupes d'individus étaient répartis selon la position des pastilles sur les touches du clavier : les pastilles rouge et verte étaient placées soit sur la touche « v » soit sur la touche « n » du clavier. Sur chacune des deux pastilles, les participants devaient placer leurs index. Les participants étaient donc répartis de la manière suivante présentée dans le tableau 9.

Tableau 9. Présentation de la répartition des participants. La deuxième ligne indique que les participants étaient répartis en deux groupes : les visages présentés au groupe 1 avec une coloration rouge (respectivement verte) étaient présentés au groupe 2 avec une coloration verte (respectivement rouge). La troisième ligne représente la position des pastilles sur les touches du clavier. La quatrième ligne représente le sexe des participants (F : féminin, M : masculin). Est indiqué entre parenthèses le nombre de stimuli pour chaque condition.

Participants (48)							
Groupe 1				Groupe 2			
v=rouge / n=verte (12)		v=verte / n=rouge (12)		v=rouge / n=verte (12)		v=verte / n=rouge (12)	
F (6)	M (6)	F (6)	M (6)	F (6)	M (6)	F (6)	M (6)

L'ordre de succession des essais a été généré en respectant deux contraintes : tout d'abord, il n'y avait pas plus de trois fois à la suite les conditions « **expression du couple (amorce-cible) = identique** » ou « **expression du couple (amorce-cible) = différente** » ; de plus, il n'y avait pas plus de trois fois à la suite les conditions « **coloration de la cible = rouge** » ou « **coloration de la cible = verte** ».

Un essai était constitué d'un point de fixation de 500 ms, suivi d'un écran blanc de 200 ms, puis apparaissait le premier visage sans coloration pendant 150 ms, suivi d'un écran blanc de 450 ms puis apparaissait le second visage avec une coloration rouge ou verte pendant 150 ms, puis un écran blanc dont le temps d'apparition était déterminé par le temps de réponse du participant. Un dernier écran blanc permettait de faire la transition entre deux essais. Un exemple d'un essai est représenté sur la Figure 19. Ajoutons que seulement deux des quatre conditions expérimentales possibles sont présentées sur la Figure 19. En effet, l'expression était soit la même soit différente entre les deux visages, et la coloration de la cible était soit rouge soit verte.

Un carton était placé sous l'écran de l'ordinateur où étaient rappelées les couleurs de chaque touche, pour que les participants évitent de regarder les pastilles pendant l'expérience. L'expérience durait entre dix et quinze minutes ; elle était composée de deux blocs de vingt-quatre essais séparés d'une pause proposée aux participants, qui faisaient redémarrer l'expérience en appuyant sur l'une des deux pastilles. L'expérience se clôturait par une série de questions.

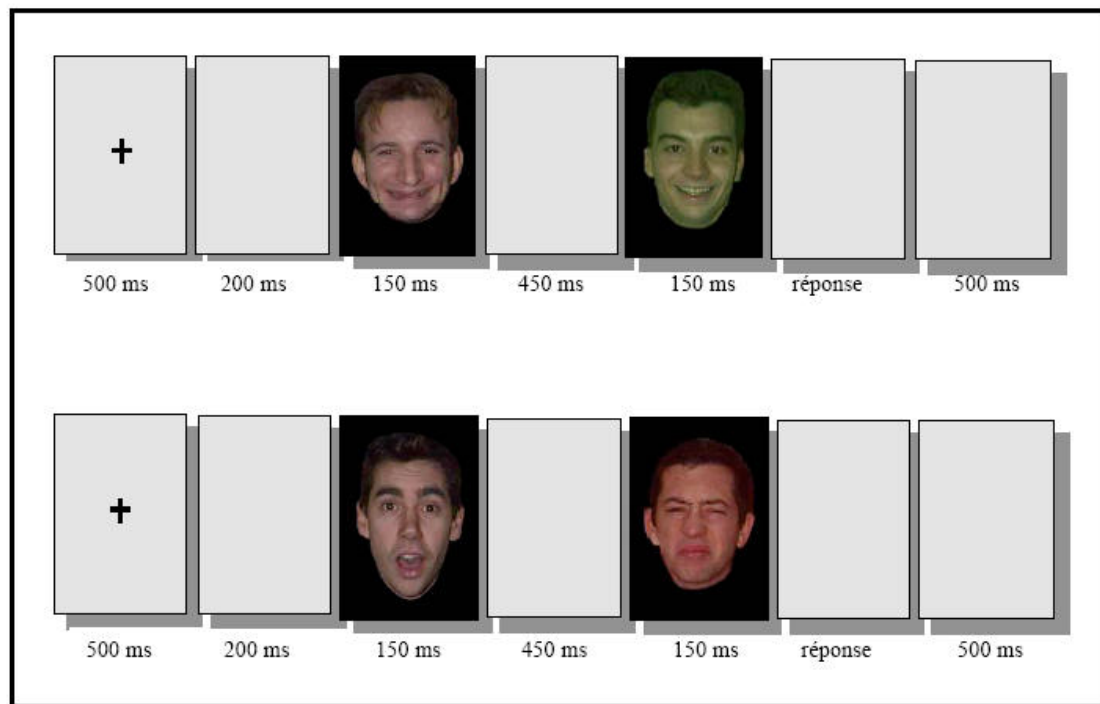


Figure 19. Représentation de deux exemples d'essais correspondant à deux des quatre conditions expérimentales. En haut, est représenté un exemple correspondant à la condition « même expression » avec une cible de coloration « verte » ; en bas, est représenté un exemple correspondant à la condition « expression différente » avec une cible de coloration « rouge ». Est mentionnée sous chaque stimulus sa durée de présentation.

3. Résultats

Le nombre d'erreurs extrêmement faible (inférieur à 2%) ne nous a pas permis de réaliser d'analyse sur les bonnes réponses. Ainsi, une analyse de variance a été effectuée uniquement sur les temps de réponse, après avoir éliminé les temps de réponse liés à des réponses erronées ; l'analyse des temps de réponse portait alors sur 98% des réponses. De plus, un élagage (« *trimming* ») a été effectué sur les données : préalablement au calcul des moyennes par participant et par cellule (définie par le croisement des différents facteurs), les temps de réponse excédant 2.0 fois la moyenne de la cellule ont été remplacés par

la moyenne de cette même cellule. Avec ce seuil, 6.3% des réponses et des temps de réponse ont été remplacés. Par ailleurs, nous avons vérifié qu'il n'existait pas d'influence des facteurs intersujets « groupe-couleur » (cible rouge/cible verte versus cible verte/cible rouge), « groupe-touche » (rouge/touche « n », vert/touche « v » versus rouge/touche « v », vert/touche « n ») et « sexe ». Les résultats présentés sont ceux pour lesquels les résultats étaient significatifs. Certains résultats non significatifs sont présentés pour les besoins de la discussion.

Les temps de réponse des participants ont été considérés dans une analyse de variance incluant les facteurs « type d'essai » (même expression versus expression différente), « type d'expression de l'amorce » (colère versus dégoût versus joie versus surprise) « type d'expression de la cible » (colère versus dégoût versus joie versus surprise) et « réponse » (rouge versus vert).

Analyse des temps de réponse

L'analyse de variance n'a pas révélé d'effet du facteur « type d'essai », $F < 1$. De plus, elle n'a pas révélé d'interaction du facteur « type d'essai » et du facteur « type d'expression de la cible », $F < 1$, ni d'interaction du facteur « type d'essai » et du facteur « type d'expression de l'amorce », $F < 1$. Enfin, une dominance de la couleur verte (347 ms) sur la couleur rouge (364 ms) a été observée, $F(1,46)=10.9$, $p < .01$.

4. Discussion

L'analyse des temps de réponse n'a pas permis de valider notre hypothèse postulant l'existence d'un traitement automatique de l'expression faciale. Pour expliquer ce résultat, nous postulons que la trop longue latence séparant la présentation des deux stimuli était responsable de l'absence de traitement automatique de l'expression. L'effet de dominance de la coloration verte sur la coloration rouge peut s'expliquer par une possible interférence avec l'absence de coloration de l'amorce (rose).

L'expérience suivante a été conduite pour tenter de valider l'hypothèse darwinienne d'un traitement automatique et rapide de l'expression faciale. Nous formulons l'hypothèse qu'aucun traitement automatique de l'expression faciale n'a été observé dans l'expérience précédente, car s'il s'était produit, il aurait été nécessairement rapide. Or, le délai séparant la présentation de l'amorce de la présentation de la cible, le SOA, était trop long pour qu'un tel traitement puisse se produire. C'est pourquoi dans l'expérience 5, nous avons raccourci le SOA.

Expérience 5. Expérience réalisée avec un paradigme d'amorçage (SOA=200ms)

1. Objectif

L'objectif principal de cette expérience 5 est identique à celui de l'expérience 4, c'est-à-dire de mettre en évidence l'existence d'un effet automatique du traitement de l'expression

faciale dans une tâche perceptive d'identification d'une couleur, et d'étudier, si cet effet se produit, pour quelle(s) expression(s) il se manifeste.

2. Méthode

Participants

Soixante-sept participants se sont portés volontaires pour participer à cette expérience. Le critère de rapidité de réponse était identique à celui fixé dans l'expérience précédente : il nous a ainsi permis d'éliminer (et de remplacer) tout participant dont la moyenne excédait 700 ms, ainsi que tout participant commettant plus de quatre erreurs sur l'ensemble des quarante-huit essais de l'expérience. Ces deux critères nous ont conduits à remplacer dix-neuf participants. Les quarante-huit participants restants étaient tous étudiants à l'Université Lumière Lyon 2, âgés de dix-huit à vingt-sept ans (moyenne d'âge de vingt-deux ans) et comprenaient vingt-quatre individus de sexe féminin et vingt-quatre individus de sexe masculin. Ils étaient tous droitiers. L'expérience était non rémunérée. La vision des participants était normale ou corrigée. Aucun des participants à cette expérience ne faisait partie des participants de l'expérience précédente.

Dispositif expérimental et stimuli

Le dispositif expérimental et les stimuli étaient identiques à ceux utilisés dans l'expérience 4.

Procédure

La procédure était la même que celle utilisée dans l'expérience 4, exceptée la durée du SOA. Elle était ici de 200 ms, et non plus de 600 ms. Cette modification a été effectuée en raccourcissant la durée de l'écran blanc séparant la présentation des deux stimuli, c'est-à-dire l'intervalle inter-stimuli (IIS), de 400 ms.

Phase expérimentale

Elle était identique à celle mise en place dans l'expérience 4.

3. Résultats

Le nombre d'erreurs extrêmement faible (inférieur à 3%) ne nous a pas permis de réaliser d'analyse sur les bonnes réponses. Ainsi, comme dans l'expérience 4, une analyse de variance a été effectuée uniquement sur les temps de réponse, après avoir éliminé les temps de réponse liés à des réponses erronées ; l'analyse des temps de réponse portait alors sur 97% des réponses. De plus, un élagage (« *trimming* ») a été effectué sur les données : préalablement au calcul des moyennes par participant et par cellule (définie par le croisement des différents facteurs), les temps de réponse excédant 2.0 fois la moyenne de la cellule ont été remplacés par la moyenne de cette même cellule. Avec ce seuil, 7% des réponses et des temps de réponse ont été remplacés. Par ailleurs, nous avons vérifié qu'il n'existait pas d'influence des facteurs intersujets « groupe-couleur » (cible rouge/cible verte versus cible verte/cible rouge), « groupe-touche » (rouge/touche « n », vert/touche « v » versus rouge/touche « v », vert/touche « n ») et « sexe ». Les résultats présentés sont ceux pour lesquels les résultats étaient significatifs. Certains résultats non significatifs sont présentés pour les besoins de la discussion.

Les temps de réponse des participants ont été considérés dans une analyse de variance incluant les facteurs « type d'essai » (même expression versus expression différente), « type d'expression de l'amorce » (colère versus dégoût versus joie versus surprise) « type d'expression de la cible » (colère versus dégoût versus joie versus surprise) et « réponse » (rouge versus vert).

Analyse des temps de réponse

L'analyse de variance a révélé un effet du facteur « type d'essai ». En effet, les participants étaient moins rapides pour estimer la coloration du visage quand l'expression était la même entre l'amorce et la cible (390 ms) que lorsqu'elle était différente (377 ms), $F(1,46)=4.7$, $p<.05$. Cet effet est illustré sur la Figure 20.

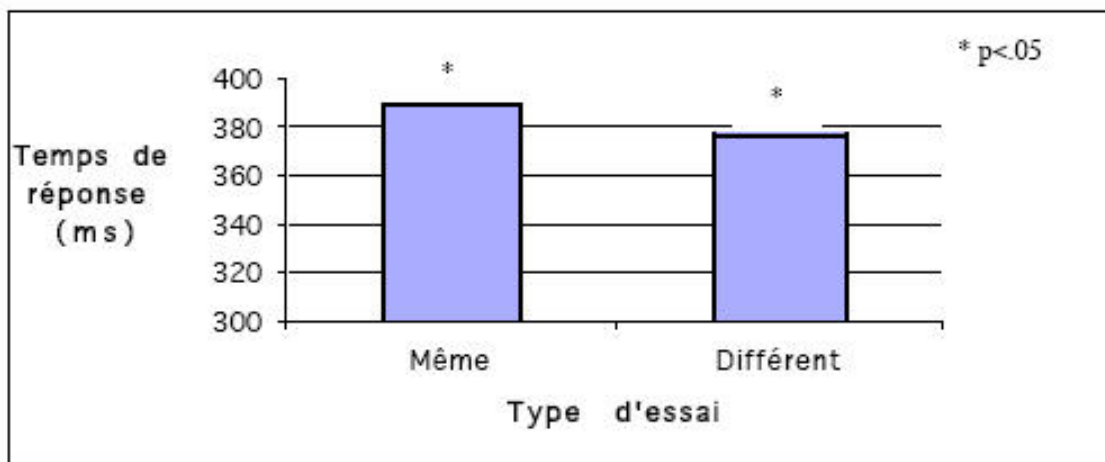


Figure 20. Représentations des temps de réponse moyens suite à un jugement de coloration selon le type d'essai présenté (même expression versus expression différente).

L'analyse de variance n'a pas révélé d'interaction du facteur « **type d'essai** » et du facteur « **type d'expression de la cible** », mais une très forte tendance, $F(3,138)=2.6$, $p<.06$. Étant donné notre hypothèse sur l'existence de sous-systèmes de traitement distincts, une analyse de contraste a été effectuée. Elle a montré l'existence d'une interaction du type d'essai et du type d'expression de la cible pour l'expression de la joie. Dans ce cas, les temps de réponse étaient plus longs quand l'expression était la même entre les deux visages (383 ms) que lorsqu'elle était différente (355 ms), $F(1,46)=8.2$, $p<.01$. Par ailleurs, l'analyse de variance n'a pas révélé d'interaction du facteur « **type d'essai** » et du facteur « **type d'expression de l'amorce** », $F<1.3$. Enfin, elle a révélé un effet du facteur « **réponse** » : les temps de réponse étaient plus courts quand la couleur de la cible était verte (375 ms) que lorsque la couleur était rouge (390 ms), $F(1,46)=6$, $p<.05$.

4. Discussion

Conformément à notre hypothèse, nous avons observé un traitement automatique de l'expression faciale. La rapidité de présentation successive des deux visages semble être un facteur clé de l'effet d'amorçage de l'expression faciale. La présentation successive de deux expressions faciales identiques a conduit à un traitement de la couleur plus lent que la présentation successive de deux expressions faciales différentes. Nous concluons donc sur l'existence d'un amorçage inhibiteur *relatif*, l'absence d'une condition contrôle

ne nous permettant pas de conclure sur l'existence d'un effet inhibiteur *absolu*. Pour expliquer l'existence d'un effet négatif, nous faisons l'hypothèse que la tâche de détection de la coloration entraîne un traitement impliquant les traits visuels du visage. Or, deux visages présentant une même expression partagent plus de caractéristiques visuelles que deux visages présentant des expressions faciales différentes. Ces caractéristiques visuelles communes semblent posséder la capacité à capter l'attention et ainsi ralentiraient le traitement de la couleur de la cible. Le traitement irrépressible des expressions faciales dans la perception des visages ne nous permet pas de conclure quant à la nature spécifique du traitement réalisé sur l'expression de l'amorce. En effet, la décision n'étant à effectuer que sur la cible, il est possible que les participants n'aient pas extrait l'information émotionnelle contenue dans l'expression de l'amorce, mais qu'ils l'aient seulement détectée grâce à la position des traits et de leurs relations, présentes dans l'expression. C'est pourquoi une sixième expérience a été conduite dans laquelle un traitement explicite sur l'amorce, en plus du traitement sur la cible, devait être effectué. Nous postulons qu'un traitement irrépressible de l'expression faciale se réalisera, et que par sa nature « émotionnelle » (dénommer l'expression faciale), le traitement explicite à réaliser sur l'amorce entraînera un traitement plus rapide de la couleur lorsque les deux émotions sont identiques.

Expérience 6. Expérience réalisée avec un paradigme d'amorçage (double tâche)

1. Objectif

L'objectif de cette sixième expérience était de mettre en évidence un traitement automatique de l'expression faciale. Par ailleurs, cette expérience devrait nous permettre de spécifier le traitement opéré sur le visage amorce de l'expérience précédente.

2. Méthode

Participants

Cinquante-deux participants ont réalisé cette expérience. Le critère de rapidité que nous nous étions fixés nous a permis d'éliminer (et de remplacer) tout participant dont la moyenne excédait 2500 ms. Ce critère de rapidité était moins exigeant que pour les deux autres expériences, en raison d'une difficulté plus grande que présente la double tâche. Le critère arbitraire de précision nous autorisait à éliminer (et à remplacer) tout participant commettant plus de dix erreurs sur l'ensemble des quarante-huit essais de l'expérience. Enfin, le critère du nombre de bonnes réponses à donner à l'oral nous permettait d'éliminer (et de remplacer) tout participant dont le nombre de bonnes réponses était inférieur à treize. En effet, treize réponses sur les quarante-huit attendues représentent une majorité relative de bonne réponse (27%) parmi quatre possibles, preuve de réponse non aléatoire. Ces trois critères nous ont conduits à remplacer quatre participants. Les 48 participants dont les résultats ont été conservés étaient tous étudiants à l'Université Lumière Lyon 2, âgés de dix-huit à vingt-neuf ans (moyenne d'âge de vingt-et-un ans) et comprenaient vingt-quatre individus de sexe féminin et vingt-quatre individus de sexe masculin. Ils étaient tous droitiers et volontaires. L'expérience était non rémunérée. La vision des participants était normale ou

corrigée. Aucun des participants à cette expérience ne faisait partie des participants des deux expériences précédentes.

Dispositif expérimental et stimuli

Le dispositif expérimental et les stimuli étaient identiques à ceux utilisés dans les expériences 4 et 5.

Procédure

La procédure était identique à celle utilisée dans les expériences 4 et 5, à l'exception de quatre critères : tout d'abord, après la phase d'entraînement avec les touches du clavier, les participants subissaient une phase d'entraînement composée de quatre essais identiques à l'expérience. Cette phase d'entraînement était réalisée en raison de la double tâche qu'ils devaient effectuer. En effet, après avoir répondu sur la coloration du visage cible, les participants devaient dénommer l'expression faciale du visage amorce. Les deux réponses étaient toujours données dans cet ordre, et après la présentation du visage cible. Seule la réponse concernant la coloration était enregistrée par l'ordinateur, selon la même procédure que pour les expériences 4 et 5. Le type d'expression de l'amorce était donné oralement pour des raisons de simplicité méthodologique pour les participants. L'expérience durait environ quinze minutes. Enfin, le SOA de cette expérience était identique à celui utilisé dans l'expérience 5, c'est-à-dire qu'il durait 200 ms. Le reste de la procédure était identique à celle des deux expériences précédentes.

Phase expérimentale

Elle était identique à celle mise en place dans les expériences 4 et 5.

3. Résultats

Le nombre d'erreurs, égal à 7% nous a permis de réaliser une analyse sur les bonnes réponses. Dans cette expérience, quatre types d'analyses de variances ont été considérées ; elles ont porté sur les temps de réponses en général, sur la précision des réponses, sur les temps de réponse en fonction des bonnes réponses données oralement, et sur la précision des réponses données oralement. De plus, un élagage (« *trimming* ») a été effectué, identique à celui des deux autres expériences, permettant le remplacement de 8.6% des réponses et des temps de réponse dans l'analyse générale.

Par ailleurs, nous avons vérifié qu'il n'existait pas d'influence des facteurs intersujets « groupe-couleur » (cible rouge/cible verte versus cible verte/cible rouge), « groupe-touche » (rouge/touche « n », vert/touche « v » versus rouge/touche « v », vert/touche « n ») et « sexe ». Les résultats présentés sont ceux pour lesquels les résultats étaient significatifs. Certains résultats non significatifs sont présentés pour les besoins de la discussion.

Les temps de réponses et la précision des réponses sur la coloration de la cible, et la précision des réponses données oralement sur l'expression de la cible ont été considérés dans des analyses de variance incluant les facteurs « type d'essai » (même expression versus expression différente), « type d'expression de l'amorce » (colère versus dégoût versus joie versus surprise) « type d'expression de la cible » (colère versus dégoût versus joie versus surprise) et « réponse » (rouge versus vert).

Analyse des temps de réponse

L'analyse de variance effectuée sur les temps de réponse portait sur 93% des réponses. Elle a révélé un effet du facteur « type d'essai ». En effet, les participants étaient plus rapides pour estimer la coloration du visage quand l'expression était la même entre l'amorce et la cible (965 ms) que lorsqu'elle était différente (1015 ms), $F(1,46)=6.6$, $p<.05$. La moyenne des temps de réponse en fonction du type d'essai est illustrée sur la Figure 21.

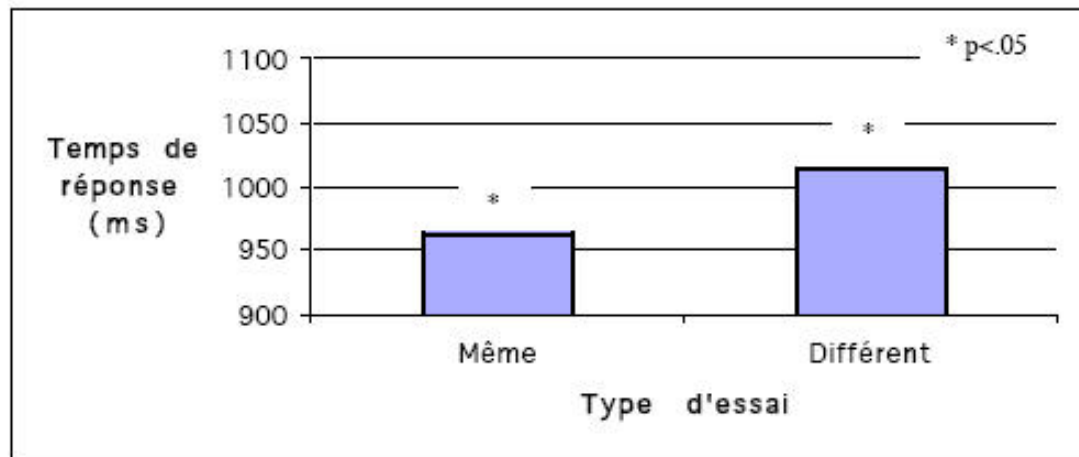


Figure 21. Représentations des temps de réponse moyens suite à un jugement de coloration selon le type d'essai présenté (même expression versus expression différente).

De plus, l'analyse de variance n'a pas révélé d'interaction du facteur « type d'essai » et du facteur « type d'expression de la cible », $p>.3$ ni d'interaction du facteur « type d'essai » et du facteur « type d'expression de l'amorce », $p>.1$.

Analyse du nombre de bonnes réponses

L'analyse de variance effectuée sur le nombre de bonnes réponses portait sur 93% des réponses. Elle n'a pas révélé d'effet du facteur « type d'essai », $F<1$ ni d'interaction du facteur « type d'essai » et du facteur « type d'expression de la cible », $F<1$, ni d'interaction du facteur « type d'essai » et du facteur « type d'expression de l'amorce », $F<1$.

Analyse des réponses données oralement

La double tâche exigeait de formuler une première réponse sur la coloration de la cible, puis de dénommer l'expression de l'amorce. Notre objectif qui a motivé l'analyse sur les réponses données oralement était de montrer que la décision effectuée sur la coloration de la cible impliquait une détection du contenu émotionnel de l'expression de la cible. C'est la raison pour laquelle nous postulions que la réponse qui était formulée sur le type d'expression de l'amorce était influencée par le type d'expression de la cible. En particulier, nous avons souhaité déterminer si (i) la présentation répétée d'une même expression faciale facilitait sa reconnaissance, et (ii) dans quelle mesure la présentation d'une expression faciale différente pouvait interférer sur l'identification d'une expression faciale.

Les réponses données ont été répertoriées pour chaque participant. Puis, des moyennes générales ont été effectuées en regroupant tous les participants en fonction de chaque couple d'expression présenté. Les participants ont donné cinq types de réponses, malgré les instructions : colère, dégoût, joie, surprise et NR (non réponse). Le nombre de NR était cependant extrêmement faible (0.01%). Tous les participants présentaient un taux

de bonnes réponses strictement supérieur au facteur chance de 25% (c'est-à-dire treize bonnes réponses) et quarante-deux des quarante-huit participants présentaient un taux strictement supérieur à 50% (c'est-à-dire au minimum vingt-cinq bonnes réponses).

En raison de notre hypothèse portant sur l'impact du traitement de la cible sur le traitement de l'amorce, nous avons réalisé une analyse faisant intervenir le test du chi-carré pour comparer les bonnes réponses pour d'une part, la condition « même expression » et d'autre part, pour la condition « expression différente », toutes expressions confondues. Les résultats obtenus ont montré un plus grand nombre de bonnes réponses pour dénommer l'amorce quand l'amorce et la cible étaient identiques que lorsqu'elles étaient différentes ($\chi^2=16.24$; ddl=1 ; $p=.0001$). La Figure 22 représente la répartition des mauvaises réponses par expression et selon chaque type de condition. Le test du chi-carré a montré que pour chaque couple amorce-cible d'expressions présentées, l'identification de l'expression de l'amorce a été supérieure lorsque la cible était identique à l'amorce pour les expressions de colère ($\chi^2=9.25$; ddl=1 ; $p=.0001$) et de joie ($\chi^2=13.03$; ddl=1 ; $p=.00001$). Ce résultat n'a pas été observé pour les expressions de dégoût ($\chi^2=2.98$; ddl=1 ; $p=.1$) ni de surprise ($\chi^2=.04$; ddl=1 ; $p=.9$). En raison de l'effet facilitateur général que l'on a observé pour l'expression de joie dans les expériences précédentes, une analyse a été conduite en considérant la répartition des mauvaises réponses, c'est-à-dire le nombre de fois où les différentes expressions ont été citées, alors qu'elles ne correspondaient pas à la bonne réponse. Le test du chi-carré a révélé que l'expression la moins citée était la joie, ($\chi^2=44.66$; ddl=3 ; $p=.00001$).

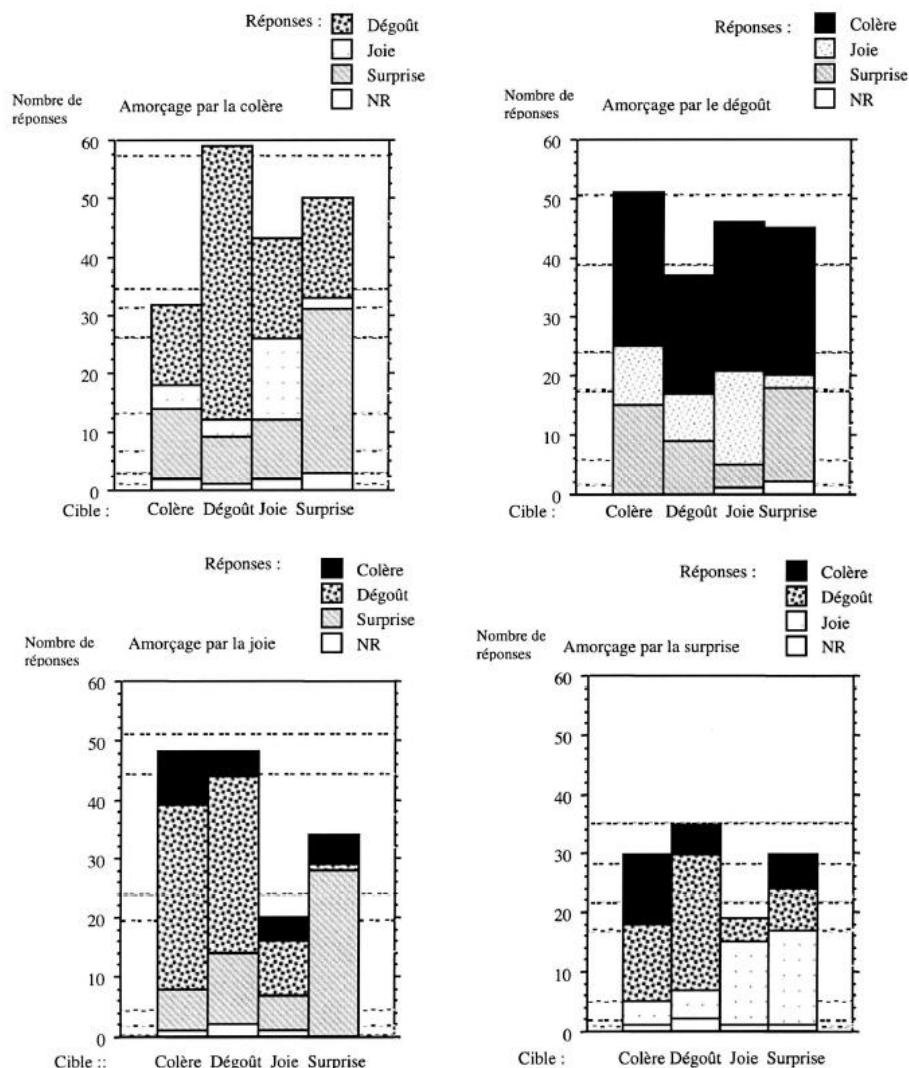


Figure 22. Représentation de la répartition des mauvaises réponses suite au jugement de l'expression de l'amorce. De gauche à droite et de haut en bas : amorçage par la colère, le dégoût, la joie et la surprise. Par exemple, lors de l'amorçage par la colère, la bonne réponse était « colère ». Ainsi, sont représentées les réponses « dégoût », « joie », « surprise » et « NR = non réponse ».

4. Discussion

Notre hypothèse principale a été validée : lorsqu'un traitement explicite, verbal, de l'expression de l'amorce est requis, il existe un traitement automatique de l'expression faciale de la cible, en faveur d'un traitement plus rapide lorsque les deux expressions faciales sont identiques. Nous concluons donc sur l'existence d'un amorçage facilitateur *relatif* ; en revanche, comme dans l'expérience précédente, l'absence d'une condition contrôle ne nous permet de conclure sur l'existence d'un effet facilitateur *absolu*.

L'analyse des réponses données à l'oral a permis de montrer que les participants ont réalisé très correctement la tâche proposée, qui pouvait paraître complexe. Le test du chi-

carré sur les bonnes réponses globales a mis en évidence une meilleure reconnaissance de l'expression de l'amorce quand l'expression de la cible était identique à l'expression de l'amorce. L'analyse par expression a montré une différence d'impact selon l'expression. En effet, il semble que la présentation répétée des expressions de joie et de colère ait facilité la reconnaissance de ces expressions, ce qui n'a pas été le cas pour les expressions de dégoût et de surprise. Nous proposons que la colère et la joie sont des expressions pour lesquelles les traits sont facilement reconnus, peut-être pour la raison que ces expressions incitent à l'approche, tandis que la surprise, et surtout le dégoût, sont des expressions qui incitent à un comportement de retrait (voir Davidson, 1995). Par ailleurs, la surprise présente des caractéristiques particulières (Reisenzein, 2000) : en effet, la présentation répétée de l'expression de la surprise s'oppose à la définition même de la surprise, qui constitue une expression fugitive. Il est possible que dans le cas de la surprise, une inhibition du traitement explicite émotionnel ait eu lieu. Notre expérience ne nous permet pas de conclure sur ce point.

5. Discussion générale sur les expériences 4, 5 et 6

L'objectif général que l'on s'était fixé dans cette série d'expériences était de mettre en évidence l'existence d'un traitement automatique de l'expression faciale, grâce au paradigme d'amorçage. Cette hypothèse a été confirmée. Puisqu'il n'apparaissait pas dans l'expérience 4, ce traitement semble se réaliser rapidement, comme le proposent les théories évolutionnistes (Darwin, 1872). L'amorçage négatif observé dans l'expérience 5 peut être interprété comme résultant d'un traitement des expressions faciales au cours duquel les caractéristiques des traits faciaux sont extraites. Deux expressions faciales identiques partageant plus de caractéristiques visuelles que deux expressions faciales différentes, l'attention portée aux expressions serait plus longue quand la proximité perceptive visuelle est plus importante. Même si deux visages appartenant à deux individus différents exprimant la même expression ne mettent pas en jeu les parties du visage de manière semblable, des traits perceptifs globaux et universels nous permettent de les comparer et de les catégoriser (Etcoff & Magee, 1992), au-delà des différences interindividuelles. L'amorçage facilitateur observé dans l'expérience 6, dans laquelle un traitement explicite de l'information émotionnelle était requis, est un résultat en faveur de l'hypothèse de l'existence d'un traitement purement visuel dans l'expérience 5. Loiselot et Koenig (1998) avaient obtenu un amorçage facilitateur de l'expression faciale avec une tâche de familiarité. Pour réaliser cette tâche, un traitement perceptif visuel n'étant pas suffisant (White, 1999), nous postulons qu'un traitement nécessitant l'extraction de l'information émotionnelle avait été probablement requis.

Le traitement de l'expression de joie a entraîné un traitement particulièrement rapide de la couleur et semble être à l'origine de l'amorçage négatif. Cet effet peut s'expliquer par le « biais de positivité » : il semble que tous les visages de joie contiennent des variantes d'un signal stéréotypé : le sourire (Adolphs et al., 1996). En raison de l'utilisation de visages non familiers, ce résultat ne peut toutefois pas être expliqué en termes d'une association congruente entre un état affectif positif (la joie) et l'utilisation de visages affectifs (familiers), comme c'est le cas d'autres expériences (Loiselot & Koenig, 1998). Par ailleurs, la colère a également été détectée rapidement. Ce résultat indique que la colère semble attirer l'attention, mais il ne prouve pas que c'est l'expression de colère en elle-même qui est détectée plus rapidement (Fox et al., 2000). D'après Darwin (1872), les émotions peuvent être distinguées en deux catégories : celles qui excitent et celles qui dépriment. Lorsque toutes les fonctions du corps et de l'esprit, - mouvement volontaire et involontaire,

perception, sensation, pensée, etc., - s'accomplissent avec plus d'énergie et de rapidité qu'à l'état normal, on peut dire de l'Homme ou de l'animal qu'il est excité ; dans le cas contraire, on peut dire qu'il est déprimé. Darwin (1872) a cité comme exemples d'émotions excitantes la colère et la joie, et comme exemples d'émotions dépressives la frayeur, le désespoir, et la tristesse. Ainsi, la colère et la joie seraient caractérisées par des traits visuels qui auraient une capacité particulière à capter l'attention ; la théorie de Darwin (1872) est proche de la théorie de Davidson (1995) postulant l'existence de comportements d'approche et de retrait. Une autre explication possible consiste à considérer la fréquence à laquelle dans la vie quotidienne nous sommes confrontés à certaines émotions par rapport à d'autres. Ainsi, ces différences d'occurrences peuvent conduire à un traitement plus rapide, comme c'est le cas pour la joie ou la colère, par rapport à la surprise ou au dégoût.

Enfin, un autre indice soutenant l'intervention d'un mécanisme de traitement basé sur les traits des expressions pour accéder à leur reconnaissance est la répartition des mauvaises réponses orales, représentées sur les graphiques de la Figure 22. En effet, elle montre que les erreurs commises ne sont pas réparties au hasard : la colère a été fréquemment confondue avec le dégoût (deux émotions négatives) et inversement, et la joie avec la surprise (dans ce cas, il est possible que la surprise ait été perçue positivement par opposition aux deux autres expressions), et inversement. Force est de constater, par exemple, que les traits caractéristiques des expressions de dégoût sont plus proches physiquement des traits appartenant aux expressions de colère (par exemple, les sourcils sont retroussés) que des traits caractéristiques des expressions de joie (dans le premier cas, les sourcils sont retroussés et la bouche est fermée, tandis que dans le second cas, les sourcils ne sont pas retroussés et la bouche est souvent ouverte). Dans ce cas, nous suggérons que les expressions ont été identifiées grâce à l'extraction des traits du visage : les expressions faciales n'étaient plus traitées comme une configuration globale, un traitement basé sur les traits constitutifs de ces expressions faciales ayant pris le relais (White, 1999). Ces résultats ne sont pas incompatibles avec l'idée de l'existence d'une configuration globale dans le traitement normal du visage. Il semble simplement que le traitement basé sur les traits faciaux devienne parfois le traitement le plus efficace. Le traitement requis pourrait dépendre des exigences de la tâche.

DISCUSSION GENERALE

Notre travail doctoral avait pour objectif principal d'apporter des arguments théoriques et expérimentaux afin de mieux comprendre (i) les mécanismes de traitement des relations spatiales visuelles et (ii) les mécanismes de traitement des expressions faciales émotionnelles, et de préciser, si elle existe, (iii) la nature de l'interaction des deux mécanismes de traitement.

Étude des mécanismes de traitement des relations spatiales visuelles

Le premier objectif de notre travail doctoral était d'étudier les mécanismes de traitement des relations spatiales visuelles sous deux conditions de présentation : (i) sous une condition classique, avec des stimuli visuels simples composés d'un point et d'une barre et (ii) sous une condition originale, avec des expressions faciales émotionnelles. La première condition de présentation nous a permis de tester l'hypothèse de sous-systèmes distincts impliqués dans le traitement des relations spatiales visuelles ; dans la seconde condition de présentation, nous avons recherché dans quelle mesure les relations spatiales visuelles étaient impliquées dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles.

Test de l'hypothèse de sous-systèmes distincts impliqués dans le traitement des relations spatiales visuelles

Nous avons souhaité montrer l'existence de sous-systèmes de traitement distincts impliqués dans des jugements requérant l'utilisation de relations spatiales métriques et dans des jugements nécessitant l'utilisation de relations spatiales catégorielles. Les premiers consistaient à estimer numériquement la distance séparant un point d'une barre, tandis que les seconds consistaient à évaluer la position spatiale d'un point par rapport à une barre à l'aide de labels verbaux. Nous avons démontré l'existence de sous-systèmes de traitement distincts dans les jugements de ces deux types de relations spatiales, se révélant par une asymétrie hémisphérique, en faveur d'un avantage de l'hémisphère droit dans les jugements métriques et d'un avantage de l'hémisphère gauche dans les jugements catégoriels. Par ailleurs, nous avons démontré l'implication d'une structure particulièrement sollicitée dans les jugements métriques : le gyrus angulaire droit. L'implication spécifique de cette structure tendait à disparaître au cours des jugements métriques, révélant un possible changement de stratégie au cours des computations de l'information métrique. Même si notre étude ne nous permet pas de conclure de manière absolue, nous suggérons qu'une stratégie plus

optimale, utilisant les relations spatiales catégorielles se mettrait en place au cours des jugements métriques.

Test de l'hypothèse de l'implication des relations spatiales visuelles dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles

Un deuxième intérêt lié à notre premier objectif était de rechercher dans quelle mesure les relations spatiales visuelles sont requises pour discriminer des expressions faciales émotionnelles, d'intensité ou -et- de valence différente. Cette investigation reposait sur l'hypothèse selon laquelle nous percevons des variations d'intensités d'une même expression faciale en partie à partir d'une perception des relations spatiales à l'intérieur, et entre, les traits constituant cette expression. Nous postulons que, par exemple, notre système cognitif interprète l'intensité d'une expression de joie comme étant d'autant plus intense que la largeur de la bouche est grande et l'intensité d'une expression de peur comme étant d'autant plus intense que la hauteur des yeux est grande. Ces modifications spatiales à l'intérieur de certains traits entraînent inexorablement des modifications entre les différents traits : en effet, par exemple, le fait d'ouvrir la bouche dans sa largeur entraîne fatalement une diminution de la distance entre la base du nez et les lèvres supérieures. Ainsi, le facteur « intensité » nous est apparu comme un outil précieux pour tester l'utilisation des relations *métriques* entre les différents traits du visage pour discriminer des expressions faciales variant subtilement autour d'intensités différentes d'une même émotion, positive (de joie) ou négative (de peur). Par ailleurs, pour les jugements pour lesquels il ne s'avère pas nécessaire de discriminer les expressions faciales de manière précise, par exemple, lorsqu'il s'agit simplement d'estimer qu'une expression est positive ou négative, nous postulons que l'utilisation de relations *catégorielles* serait suffisante. Une manière de conclure sur l'implication des relations spatiales dans les jugements d'intensités et de valence consistait à montrer une activation des structures (pariétales) spécifiquement impliquées dans les jugements spatiaux. Ainsi, l'activation du gyrus angulaire et -ou- des lobules pariétaux inférieur et supérieur pourrait se révéler un marqueur empirique pour déterminer si la discrimination des expressions faciales requiert l'utilisation des relations spatiales visuelles. Les résultats de notre étude ont mis en évidence une activation au niveau des lobules pariétaux inférieur et supérieur dans des conditions nécessitant un jugement précis de l'intensité des expressions, démontrant, selon nous, l'implication des relations spatiales métriques. En revanche, dans des jugements n'impliquant pas une discrimination fine, nous n'avons pu conclure sur l'implication des relations spatiales catégorielles. Dans ce cas, des indices comportementaux nous ont plutôt incité à proposer l'existence d'une perception catégorielle des expressions faciales, basée sur une perception d'une configuration des expressions faciales.

Étude des mécanismes de traitement des expressions faciales émotionnelles

Le second objectif de notre travail doctoral était d'étudier les mécanismes sous-tendant la perception et la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles. L'utilisation des expressions faciales nous a permis de tester deux hypothèses majeures dans notre travail : (i) l'hypothèse de polarité dans le traitement des expressions faciales positives et négatives et (ii) l'hypothèse d'un traitement automatique du contenu émotionnel des expressions faciales. Par ailleurs, elle nous a permis de préciser l'influence de l'intensité émotionnelle.

Les expressions faciales sont souvent considérées comme un composant saillant du comportement émotionnel, et les visages comme des stimuli optimaux pour mener des études de neuroimagerie. En effet, ils peuvent fournir plusieurs émotions et plusieurs intensités d'une même émotion sans changer les caractéristiques physiques du stimulus comme la couleur, la complexité ou la luminosité. Par ailleurs, les expressions faciales sont des stimuli visuels biologiquement importants auxquels les neurones de l'amygdale répondent particulièrement. Par conséquent, il nous a semblé que les visages représentaient des stimuli adéquats pour étudier l'influence supposée des processus visuels des relations spatiales sur les processus émotionnels faciaux.

Test de l'hypothèse de polarité dans le traitement des expressions faciales émotionnelles

Nous avons testé l'hypothèse de polarité au niveau de l'amygdale et des gyri frontaux inférieur et moyen. Nous n'avons pas montré d'asymétrie hémisphérique, ni dans l'évaluation d'expressions positives de joie ni dans l'estimation d'expressions négatives de peur. Ces résultats, replacés dans le contexte des nombreuses études ayant cherché à mettre en évidence les substrats neuronaux impliqués dans le traitement émotionnel facial, indiquent que le traitement des expressions faciales est plus complexe que ne le stipule le simple modèle d'une dominance de l'hémisphère droit. La nature précise du jugement requis, la nature des stimuli utilisés, le nombre de stimuli différents utilisés, mais également le paradigme expérimental, bloc ou événementiel, pourraient être des éléments cruciaux pour déterminer (i) jusqu'à quel point chaque hémisphère est engagé, et (ii) les réponses de systèmes neuronaux différents. Face à ces constatations, une conclusion pessimiste nous inciterait à postuler qu'il semble difficile, voire vain, de trouver un consensus sur l'existence d'une spécialisation hémisphérique selon la polarité positive ou négative des expressions faciales, certaines différences méthodologiques pouvant suffire à expliquer certaines différences de lieux d'activation. Une conclusion plus optimiste consisterait à suggérer que le degré de granularité approprié des processus étudiés n'est peut-être pas encore atteint.

Par ailleurs, nous proposons que le facteur « intensité » a pu influencer la latéralisation hémisphérique de certaines structures, l'amygdale en particulier. En effet, nous avons mis en évidence un avantage de l'amygdale de l'hémisphère droit lorsque les expressions faciales étaient très intenses et un avantage de l'amygdale de l'hémisphère gauche lorsque les expressions faciales étaient moins intenses. Ce facteur devrait donc être un élément à prendre en considération dans les études cherchant à explorer la nature du traitement des expressions faciales émotionnelles.

Test de l'hypothèse d'automaticité du traitement des expressions faciales émotionnelles

Nous avons montré qu'il existe un traitement automatique ou irrépressible des expressions faciales. Nous avons testé cette hypothèse grâce au paradigme d'amorçage, permettant de présenter successivement des expressions faciales identiques ou différentes. La comparaison des temps de réponse entre ces deux conditions a permis d'observer des effets d'amorçage facilitateurs ou inhibiteurs. La nature de ces effets, facilitatrice ou inhibitrice, pourrait constituer un indicateur du type de traitement effectué, c'est-à-dire un traitement de configuration des expressions faciales, aboutissant à l'extraction du contenu émotionnel des expressions faciales, ou un traitement impliquant les traits et les relations spatiales entre les traits constituant les expressions faciales, conduisant à un traitement purement visuel des expressions faciales.

Nous avons également montré que l'amygdale était sollicitée même lorsque l'extraction du contenu émotionnel n'était pas indispensable pour effectuer la tâche ; cet effet a été observé lorsque les expressions faciales présentées étaient des expressions négatives de peur. L'identification automatique des expressions négatives, de la peur en particulier, pourrait constituer un avantage biologique important, qui a pu se développer au cours de l'évolution et constituer un véritable avantage adaptatif.

Étude de l'interaction des mécanismes de traitement des relations spatiales visuelles et des mécanismes de traitement des expressions faciales émotionnelles

Un intérêt supplémentaire de notre travail doctoral était d'étudier l'interaction, si elle existe, des mécanismes impliqués dans le traitement des relations spatiales visuelles et de ceux engagés dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles. Nous avons observé une activation différenciée de l'amygdale dans l'évaluation d'intensités, indépendamment du degré de l'intensité des expressions présentées. En effet, cette observation a révélé une activation de l'amygdale droite lorsque les jugements portaient sur une comparaison entre deux intensités proches et une activation bilatérale de l'amygdale lorsque les jugements portaient sur une comparaison entre deux intensités relativement différentes. Nous interprétons ce résultat comme un reflet de la mise en évidence d'un traitement des relations entre les traits *visuels* des expressions faciales afin d'en extraire l'intensité, qui a interagi avec un traitement au niveau de l'amygdale, impliquant des mécanismes de traitement de nature plus émotionnelle.

RÉFÉRENCES

- Adolphs, R. (2002). Neural systems for recognizing emotion. *Current Opinion in Neurobiology*, 12, 169-177.
- Adolphs, R., Damasio, H., Tranel, D., Cooper, G., & Damasio, A. R. (2000). A role for somatosensory cortices in the visual recognition of emotion as revealed by three-dimensional lesion mapping. *The Journal of Neuroscience*, 20, 2683-2690.

- Adolphs, R., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1996). Cortical systems for the recognition of emotion in facial expressions. *The Journal of Neuroscience*, 16 (23), 7678-7687.
- Adolphs, R., & Tranel, D. (2003). Amygdala damage impairs emotion recognition from scenes only when they contain facial expressions. *Neuropsychologia*, 41, 1281-1289.
- Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H., & Damasio, A. R. (1994). Impaired recognition of emotion in facial expressions following bilateral damage to the human amygdala. *Nature*, 372 (6507), 669-672.
- Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H., & Damasio, A. R. (1995). Fear and the human amygdala. *Journal of Neuroscience*, 15, 5879-5891.
- Adolphs, R., Tranel, D., Hamann, S., Young, A. W., Calder, A. J., Phelps, E. A., Anderson, A., Lee, G. P., & Damasio, A. R. (1999). Recognition of facial emotion in nine individuals with bilateral amygdala damage. *Neuropsychologia*, 37, 1111-1117.
- Aggleton, J. P., & Young, A. W. (2000). The enigma of the amygdala: On its contribution to human emotion. In R. D. Lane & L. Nadel (Eds.), *Cognitive Neuroscience of Emotion* (pp. 106-128). New York: Oxford University Press.
- Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (1999). Topographical disorientation: A synthesis and taxonomy. *Brain*, 122, 1613-1628.
- Anderson, A. K., Christoff, K., Panitz, D., De Rosa, E., & Gabrieli, J. D. E. (2003a). Neural correlates of the automatic processing of threat facial signals. *Journal of Neuroscience*, 23 (13), 5627-5633.
- Anderson, A. K., Christoff, K., Stappen, I., Panitz, D., Ghahremani, D. G., Glover, G., Gabrieli, J. D. E., & Sobel, N. (2003b). Dissociated neural representations of intensity and valence in human olfaction. *Nature Neuroscience*, 6 (2), 196-202.
- Anderson, A. K., & Phelps, E. A. (2001). Lesions of the human amygdala impair enhanced perception of emotionally salient events. *Nature*, 411, 305-309.
- Azar, B. (2000, January). What's in a face? *Monitor on Psychology*, pp. 44-49.
- Baciu, M., Koenig, O., Vernier, M.-P., Bedoin, N., Rubin, C., & Segebarth, C. (1999). Categorical and coordinate spatial relations: fMRI evidence for hemispheric specialization. *NeuroReport*, 10 (6), 1373-1378.
- Baenninger, M. (1994). The development of face recognition: Featural or configurational processing? *Journal of Experimental Child Psychology*, 57, 377-396.
- Baker, D. P., Chabris, C. F., & Kosslyn, S. M. (1999). Encoding categorical and coordinate spatial relations without input-output correlations: New simulation models. *Cognitive Science*, 23 (1), 35-51.
- Balint, R. (1909). Seelenlahmung des 'Schauens', optische Ataxie, raumliche Störung der Aufmerksamkeit. *Monatschrift für Psychiatrie und Neurologie*, 25, 5-81.
- Banich, M. T., & Federmeier, K. D. (1999). Categorical and metric spatial processes distinguished by task demands and practice. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11 (2), 153-166.
- Bar, M., Tootell, R. B. H., Schacter, D. L., Greve, D. N., Fischl, B., Anders, J. D., & Dale, M. (2001). Cortical mechanisms specific to explicit visual object recognition. *Neuron*, 29, 529-535.

- Bartlett, J. C., & Searcy, J. (1993). Inversion and configuration of faces. *Cognitive Psychology*, 25 (3), 281-316.
- Barton, J. J. S., Keenan, J. P., & Bass, T. (2001). Discrimination of spatial relations and features in faces: Effects of inversion and viewing duration. *British Journal of Psychology*, 92 (Pt 3), 527-549.
- Bassili, J. N. (1978). Facial motion in the perception of faces and of emotional expression. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 373-379.
- Batty, M., & Taylor, M. J. (2003). Early processing of the six basic facial emotional expressions. *Cognitive Brain Research*, 17, 613-620.
- Beaumont, J. G. (1982). *Divided visual field studies of cerebral organization*. New York: Academic Press.
- Bechara, A., Tranel, D., Damasio, H., Adolphs, R., Rockland, C., & Damasio, A. R. (1995). Double dissociation of conditioned fear and declarative knowledge relative to the amygdala and hippocampus in humans. *Science*, 269, 1115-1118.
- Belliveau, J. W., Kennedy, D. N. Jr., McKinstry, R. C., Buchbinder, B. R., Weisskoff, R. M., Cohen, M. S., Vevea, J. M., Brady, T. J., & Rosen, B.R. (1991). Functional mapping of the human visual cortex by magnetic resonance imaging. *Science*, 254 (5032), 716-719.
- Benson, P. J., & Perrett, D. I. (1991a). Perception and recognition of photographic quality facial caricatures: Implications for the recognition of natural images. *European Journal of Cognitive Psychology*, 3, 105-135.
- Benson, P. J., & Perrett, D. I. (1991b). Synthesising continuous-tone caricatures. *Image and Vision Computing*, 9, 123-129.
- Benson, P. J., & Perrett, D. I. (1993). Extracting prototypical facial images from exemplars. *Perception*, 22, 257-262.
- Benson, P. J., & Perrett, D. I. (1994). Visual processing of facial distinctiveness. *Perception*, 23, 75-93.
- Berker, E. A., Berker, A. H., & Smith, A. (1986). Translation of Broca's 1865 report. Localization of speech in the third left frontal convolution. *Archives of Neurology*, 43 (10), 1065-1072.
- Bernstein, L. J., & Robertson, L. C. (1998). Independence between illusory conjunctions of color and motion with shape following bilateral parietal lesions. *Psychological Science*, 9, 167-175.
- Beyn, E. S., & Knyazeva, G. R. (1962). The problem of prosopagnosia. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 25, 154-158.
- Biederman, I. (1987). Recognition-by-components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94, 115-147.
- Blair, R. J. R., & Cipolotti, L. (2000). Impaired social response reversal. A case of «acquired sociopathy». *Brain*, 123, 1122-1141.
- Blair, R. J. R., Morris, J. S., Frith, C. D., Perrett, D. I., & Dolan, R. J. (1999). Dissociable neural responses to facial expressions of sadness and anger. *Brain*, 122, 883-893.

- Blakemore, S. J., Boyer P., Pachot-Clouard, M., Meltzoff, A. N., Segebarth, C., & Decety, J. (2003). The detection of contingency and animacy from simple animations in the human brain. *Cerebral Cortex*, 13, 837-844.
- Blakemore, S. J., Fonlupt, P., Pachot-Clouard, M., Darmon, C., Boyer P., Meltzoff, A. N., Segebarth, C., & Decety, J. (2001). How the brain perceives causality: An event-related fMRI study. *NeuroReport*, 12 (17), 3741-3746.
- Borod, J. C., Kent, J., Koff, E., Martin, C., & Alpert, M. (1988). Facial asymmetry while posing positive and negative emotions: Support for the right hemisphere hypothesis. *Neuropsychologia*, 26, 759-764.
- Bower, G. H., & Clapper, J. P. (1989). Experimental Methods in Cognitive Science. In M. I. Posner (Eds.), *Foundations of Cognitive Science* (pp. 245-300). Cambridge: MIT Press.
- Bowers, D., Bauer, R. M., Coslett, H. B., & Heilman, K. M. (1985). Processing of faces by patients with unilateral lesions: 1. Dissociation between judgments of facial affect and facial identity. *Brain and Cognition*, 4, 258-272.
- Bradshaw, J. L., & Nettleton, N. C. (1981). The nature of hemispheric specialization in man. *The Behavioral and Brain Sciences*, 4, 51-94.
- Breiter, H. C., Etcoff, N. L., Whalen, P. J., Kennedy, W. A., Rauch, S. L., Buckner, R. L., Strauss, M. M., Hyman, S. E., & Rosen, B. R. (1996). Response and habituation of human amygdala during visual processing of facial expression. *Neuron*, 17, 875-887.
- Brennan, S. E. (1985). The caricature generator. *Leonardo*, 18, 170-178.
- Broadbent, D. F., & Gregory, M. (1967). Perception of emotionally toned words. *Nature*, 215, 581-584.
- Broks, P., Young, A. W., Maratos, E. J., Coffey, P. J., Calder, A. J., Isaac, C. L., Mayes, A. R., Hodges, J. R., Montaldi, D., Cezayirli, E., Roberts, N., & Hadley, D. (1998). Face processing impairments after encephalitis: Amygdala damage and recognition of fear. *Neuropsychologia*, 36 (1), 59-70.
- Bruce, V. (1988). *Recognizing faces*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bruce, V., & Green, P. R. (1990). Perception of the social world. In V. Bruce, & P. R. Green, *Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology* (pp. 343-374). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bruce, V., & Humphreys, G. (1994). Recognizing objects and faces. *Visual Cognition*, 1, 141-180.
- Bruce, V., & Young, A. W. (1986). Understanding face recognition. *British Journal of Psychology*, 77, 305-327.
- Brunelli, R., & Poggio, T. (1993). Caricatural effects in automated face perception. *Biological Cybernetics*, 69, 235-241.
- Bruyer, R., Scailquin, J.-C., & Coibion, P. (1997). Dissociation between categorical and coordinate spatial computations: Modulation by cerebral hemispheres, task properties, mode of response, and age. *Brain and Cognition*, 33, 245-277.
- Bryden, M. P. (1982). *Laterality. Functional asymmetry in the intact brain*. New York: Academic Press.

- Buchel, C., Morris, J., Dolan, R. J., & Friston, K. J. (1998). Brain systems mediate aversive conditioning: An event-related fMRI study. *Neuron*, 20, 947-957.
- Buckner, R. L., Bandettini, P. A., O'Craven, K. M., Savoy, R. L., Petersen, S. E., Raichle, M. E., & Rosen, B. R. (1996). Detection of cortical activation during averaged single trials of a cognitive task using functional magnetic resonance imaging. *Proceedings - National Academy of Sciences*, 93 (25), 14878-14883.
- Buckner, R. L., Goodman, J., Burock, M., Rotte, M., Koutstaal, W., Schacter, D., Rosen, B., & Dale, A. M. (1998). Functional-anatomic correlates of object priming in humans revealed by rapid presentation event-related fMRI. *Neuron*, 20, 285-296.
- Bui, T. D., Heylen, D., Poel, M., & Nijholt, A. (2001). *Generation of facial expressions from emotion using a fuzzy rule based system*. Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, pp 83-94.
- Bülthoff, H., & Edelman, S. (1992). Psychophysical support for a two-dimensional view interpolation theory of object recognition. *Proceedings - National Academy of Science*, 89, 60-64.
- Buron, V. (2003). Cerveau et Psychologie : revue critique. *In Cognito, Cahiers Romans de Sciences Cognitives*, 1 (1), 75-78.
- Buron, V., & Koenig, O. (2001). *Face perception and facial expression: A parallel processing*. Presented at the XIIth Conference of the European Society for Cognitive Psychology (ESCOP 2001) organized in collaboration with the XVIIIth annual Conference of the British Psychological Society - Cognitive Psychology section, Edinburgh, Scotland.
- Buron, V., Koenig, O., Baciú, M., Collomb, K., Sander, D., Ojéda, N., & Segebarth, C. (2003a). Neural correlates of categorical and metric spatial relations: An event-related fMRI investigation. *Perception*, 32, S67-68.
- Buron, V., Koenig, O., Lamalle, L., & Segebarth, C. (en préparation). *Are visual spatial relations involved into the discrimination of facial expressions?* Event-related fMRI experiments.
- Buron, V., Segebarth, C., & Koenig, O. (2003b). *The role of metric and categorical visual spatial relations in the discrimination of facial expression: Divided visual field experiments*. Presented at the XIIIth Conference of the European Society for Cognitive Psychology (ESCOP 2003), Granada, Spain.
- Burt, D. M., & Perrett, D. I. (1995). Perception of age in adult Caucasian male faces: Computer graphic manipulation of shape and colour information. *Proceedings of the Royal Society of London - Series B, Biological Sciences*, 259, 137-143.
- Burt, D. M., & Perrett, D. I. (1997). Perceptual asymmetries in judgments of facial attractiveness, age, gender, speech and expression. *Neuropsychologia*, 35, 685-693.
- Burton, A. M., Bruce, V., & Dench, N. (1993). What's the difference between men and women? Evidence from facial measurement. *Perception*, 22, 153-177.
- Busse, L., & Woldorff, M. G. (2003). The ERP omitted stimulus response to «no-stim» events and its implications for fast-rate event-related fMRI designs. *NeuroImage*, 18, 856-864.

- Cabeza, R., & Kato, T. (2000). Features are also important: Contributions of featural and configural processing to face recognition. *Psychological Science*, 11 (5), 429-436.
- Calder, A. J., Burton, A. M., Miller, P., Young, A. W., & Akamatsu, S. (2001a). A principal component analysis of facial expressions. *Vision Research*, 41 (9), 1179-1208.
- Calder, A. J., Keane, J., Manes, F., Antoun, N., & Young, A. W. (2000a). Impaired recognition and experience of disgust following brain injury. *Nature Neuroscience*, 3, 1077-1078.
- Calder, A. J., Keane, J., Manly, T., Sprengelmeyer, R., Scott, S., Nimmo-Smith, I., & Young, A. W. (2003). Facial expression recognition across the adult life span. *Neuropsychologia*, 41 (2), 195-202.
- Calder, A. J., Lawrence, A. D., & Young, A. W. (2001b). Neuropsychology of fear and loathing. *Nature Reviews. Neuroscience*, 2, 352-363.
- Calder, A. J., Rowland, D., Young, A. W., Nimmo-Smith, I., Keane, J., & Perrett, D. (2000b). Caricaturing facial expressions. *Cognition*, 76 (2), 105-146.
- Calder, A. J., Young, A. W., Benson, P. J., & Perrett, D. I. (1996a). Self priming from distinctive and caricatured faces. *British Journal of Psychology*, 87, 141-162.
- Calder, A. J., Young, A. W., Keane, J., & Dean, M. (2000c). Configural information in facial expression perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26 (2), 527-551.
- Calder, A. J., Young, A. W., Perrett, D. I., Etcoff, N. L., & Rowland, D. (1996b). Categorical perception of morphed facial expressions. *Visual Cognition*, 3 (2), 81-117.
- Calder, A. J., Young, A. W., Rowland, D., & Perrett, D. I. (1997). Computer-enhanced emotion in facial expressions. *Proceedings of the Royal Society of London - Series B, Biological Sciences*, 264 (1383), 919-925.
- Calder, A. J., Young, A. W., Rowland, D., Perrett, D. I., Hodges, J. R., & Etcoff, N. L. (1996c). Facial emotion recognition after bilateral damage: Differently severe impairment of fear. *Cognitive Neuropsychology*, 13, 699-745.
- Canli, T., Desmond, J. E., Zhao, Z., Glover, G., & Gabrieli, J. D. E. (1998). Hemispheric asymmetry for emotional stimuli detected with fMRI. *NeuroReport*, 9, 3233-3239.
- Canli, T., Zhao, Z., Brewer, J., Gabrieli, J. D. E., & Cahill, L. (2000). Event-related activation in the human amygdala associates with later memory for individual emotional experience. *The Journal of Neuroscience*, 20, 1-5.
- Carbon, C.-C., & Leder, H. (2003). *The Thatcher illusion as new paradigm for investigating face processing*. Presented at the XIIIth Conference of the European Society for Cognitive Psychology (ESCOP 2003), Granada, Spain.
- Carey, S., & Diamond, R. (1977). From piecemeal to configural representations of faces. *Science*, 195, 312-314.
- Carroll, J. M., & Russell, J. A. (1996). Do facial expressions signal specific emotions? Judging emotion from the face in context. *Journal of Personality and Social Psychology*, 70, 205-218.

- Charbonneau, S., Scherzer, B. P., Aspirot, D., & Cohen, H. (2003). Perception and production of facial and prosodic emotions by chronic CVA patients. *Neuropsychologia*, 41, 605-613.
- Christman, S. D. (2002). Hemispheric asymmetries in categorical judgments of direction versus coordinate judgments of velocity of motion. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9 (2), 298-305.
- Christman, S. D., Kitterle, F. L., & Hellige, J. B. (1991). Hemispheric asymmetry in the processing of absolute versus relative spatial frequency. *Brain and Cognition*, 16, 62-73.
- Christman, S. D., & Niebauer, C. L. (1996). *Disruption of categorical relations impairs encoding of coordinate relations in faces*. Presented at the Annual Meeting of the Psychonomic Society, Chicago, IL.
- Cohen, J.D., MacWhinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). PsyScope: A new graphic interactive environment for designing psychology experiments. *Behavioral Research Methods, Instruments, and Computers*, 25 (2), 257-271.
- Cole, J. D. (1998). *About face*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Cook, N. D., Früh, H., & Landis, T. (1995). The cerebral hemispheres and neural network simulation: Design considerations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 410-422.
- Cooper, E. E., & Wojan, T. J. (1996). Differences in the coding of spatial relations in faces and objects. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 37, 177.
- Cooper, E. E., & Wojan, T. J. (2000). Differences in the coding of spatial relations in face identification and basic-level object recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26 (2), 470-488.
- Corbetta, M., Miezen, F. M., Schulman, G. L., & Petersen, S. E. (1993). A PET study of visuospatial attention. *Journal of Neuroscience*, 13, 1202-1226.
- Cowin, E. L., & Hellige, J. B. (1994). Categorical versus coordinate spatial processing: Effects of blurring and hemispheric asymmetry. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6 (2), 156-164.
- Cowin Roth, E., & Hellige, J. B. (1998). Spatial processing and hemispheric asymmetry: Contributions of the transient/magnocellular visual system. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10 (4), 472-484.
- Critchley, H. D., Daly, E., Phillips, M., Brammer, M., Bullmore, E., Williams, S., Van Amelsvoort, T., Robertson, D., David, A., & Murphy, D. (2000a). Explicit and implicit neural mechanisms for processing of social information from facial expressions: A functional magnetic resonance imaging study. *Human Brain Mapping*, 9, 93-105.
- Critchley, H. D., Elliott, R., Mathias, C., & Dolan, R. (2000b). Neural activity relating to generation and representation of galvanic skin conductance responses: A functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, 20, 3033-3040.
- Dailey, M. N., Cottrell, G. W., Padgett, C., & Adolphs, R. (2002). EMPATH: A neural network that categorizes facial expressions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14 (8), 1158-1173.

- Damasio, A. R. (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason and the Human Brain*. New York: Putnam Book.
- Damasio, A. R. (1999). *Le sentiment même de soi corps, émotions, conscience*. Paris : Editions Odile Jacob.
- Damasio, A. R., Damasio, H., & Van Hoesen, G. W. (1982). Prosopagnosia: Anatomic basis and behavioral mechanisms. *Neurology*, 32, 331-341.
- Damasio, A., Grabowski, T., Damasio, H., Bechara, A., Ponto, L. L., & Hichwa, R. (1998). Neural correlates of the expertise of emotion. *Society for Neuroscience Abstracts*, 24, 258.
- Darwin, C. (1872). *L'expression des émotions chez l'homme et les animaux*. Paris : Editions du C.T.H.S., 1998.
- Davidoff, J. (1982). Studies with non-verbal stimuli. In J. G. Beaumont (Eds.), *Divided visual field studies of cerebral organization* (pp. 29-55). New York: Academic Press.
- Davidoff, J. (1994). Les différents types de prosopagnosie. *Psychologie Française*, 4 (39), 307-312.
- Davidson, R. J. (1995). Cerebral asymmetry, emotion, and affective style. In R. J. Davidson & K. Hugdahl (Eds.), *Brain asymmetry* (pp. 361-387). Massachusetts: MIT Press.
- Davidson, R. J., & Irwin, W. (1999). The functional anatomy of emotion and affective style. *Trends in Cognitive Sciences*, 3 (1), 11-21.
- Davies, G., Ellis, H., & Shepherd, J. (1978). Face recognition accuracy as a function of mode of representation. *Journal of Applied Psychology*, 63, 180-187.
- Davis, M. (1992). The role of the amygdala in fear and anxiety. *Annual Review of Neuroscience*, 15, 353-375.
- de Bonis, M. (1999). Introduction. L'expression des émotions : questions actuelles. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 49 (1), 87-90.
- de Bonis, M., De Boeck, P., Pérez-Díaz, F., & Nahas, M. (1999). A two-process theory of facial perception of emotions. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Séries III – Sciences de la Vie*, 322 (8), 669-675.
- de Gelder, B., Pourtois, G., Vroomen, J., & Bachoud-Lévi, A.-C. (2000). Covert processing of faces in prosopagnosia is restricted to facial expressions: evidence from cross-modal bias. *Brain and Cognition*, 44 (3), 425-444.
- de Gelder, B., Vroomen, J., Pourtois, G., & Weiskrantz, L. (1999). Non-conscious recognition of affect in the absence of striate cortex. *NeuroReport*, 10, 3759-3763.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1994). Dissociable mechanisms of subitizing and counting: Neuropsychological evidence from simultanagnosic patients. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 958-975.
- Delis, D. C., Robertson, L. C., & Efron, R. (1986). Hemispheric specialization of memory for visual hierarchical stimuli. *Neuropsychologia*, 24, 205-214.
- Dépy, D., Fagot, J., & Vauclair, J. (1998). Comparative assessment of distance processing and hemispheric specialization in humans and baboons (*Papio papio*). *Brain and Cognition*, 38, 165-182.

- De Renzi, E. (1982). *Disorders of space exploration and cognition*. New York: Wiley.
- Diamond, R., & Carey, S. (1986). Why faces are and are not special: An effect of expertise. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115 (2), 107-117.
- Dijkerman, H. C., Milner, A. D., & Carey, D. P. (1996). The perception and prehension of objects oriented in the depth plane. I. Effects of visual form agnosia. *Experimental Brain Research*, 112 (3), 442-451.
- Dijkerman, H. C., Milner, A. D., & Carey, D. P. (1998). Grasping spatial relationships: Failure to demonstrate allocentric visual coding in a patient with visual form agnosia. *Consciousness and Cognition*, 7 (3), 424-437.
- Dolan, R. J., Fletcher, P., Morris, J., Kapur, N., Deakin, J. F., & Frith, C. D. (1996). Neural activation during covert processing of positive emotional facial expressions. *NeuroImage*, 4, 194-200.
- Dolan, R. J., & Morris, J. S. (2000). The functional anatomy of innate and acquired fear: Perspectives from neuroimaging. In R. D. Lane & L. Nadel (Eds.), *Cognitive Neuroscience of Emotion* (pp. 225-241). New York: Oxford University Press.
- Dunn, J. C., & Kirsner, K. (1988). Discovering functionally independent mental processes: The principle of reversed association. *Psychological Review*, 95, 91-101.
- Edwards, K. (1998). The face of time: Temporal cues in facial expressions of emotion. *Psychological Science*, 9 (4), 270-276.
- Eger, E., Jedynak, A., Iwaki, T., & Skrandies, W. (2003). Rapid extraction of emotional expression: Evidence from evoked potential fields during brief presentation of face stimuli. *Neuropsychologia*, 41, 808-817.
- Ekman, P. (1980). L'expression des émotions. *La Recherche*, 11, 1408-1415.
- Ekman, P. (1984). Expression and the nature of emotion. In K. Scherer & P. Ekman (Eds.), *Approaches to emotion* (pp. 319-343). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Ekman, P. (1992a). An argument for basic emotions. *Cognition and Emotion*, 6, 169-200.
- Ekman, P. (1992b). Facial expressions of emotion: New findings, new questions. *Psychological Science*, 3 (1), 34-38.
- Ekman, P. (1993). Facial expression and emotion. *American Psychology*, 48, 384-392.
- Ekman, P. (1994). Strong evidence for universals in facial expressions: A Reply to Russell's mistaken critique. *Psychological Bulletin*, 115 (2), 268-287.
- Ekman, P. (1999). Basic emotions. In T. Dagleish & M. Power (Eds.), *Handbook of cognition and emotion* (pp. 45-60). New York: Wiley.
- Ekman, P., & Davidson, R. J. (1993). Voluntary smiling changes regional brain activity. *Psychological Science*, 4, 342-345.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1975). *Unmasking the face*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1976). *Pictures of facial affect*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). *The facial action coding system: A technique for the measurement of facial movement*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.

- Ekman, P., Levenson, R. W., & Friesen, W. V. (1983). Autonomic nervous system activity distinguishes among emotions. *Science*, 221, 1208-1210.
- Emery, N. J., & Amaral, D. G. (2000). The role of the amygdala in primate social cognition. In R. D. Lane & L. Nadel (Eds.), *Cognitive Neuroscience of Emotion* (pp. 156-191). New York: Oxford University Press.
- Esteves, F. (1999). Attentional bias to emotional facial expressions. *European Review of Applied Psychology*, 49 (2), 91-96.
- Etcoff, N. L., & Magee, J. J. (1992). Categorical perception of facial expressions. *Cognition*, 44, 227-240.
- Eviatar, Z., Hellige, J. B., & Zaidel, E. (1997). Individual differences in lateralization: Effects of gender and handedness. *Neuropsychology*, 11 (4), 562-576.
- Farah, M. J. (1990). *Visual Agnosia. Disorders of object recognition and what they tell us about normal vision*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Farah, M. J. (1991). Patterns of co-occurrence among the associative agnosias: Implications for visual object representation. *Cognitive Neuropsychology*, 8 (1), 1-19.
- Farah, M. J. (1992). Is an object an object an object? Cognitive and neuropsychological investigations of domain specificity in visual object recognition. *Current Directions in Psychological Science*, 1, 164-169.
- Farah, M. J. (1994). Specialization within visual object recognition Clues from prosopagnosia and alexia. In M. J. Farah & G. Ratcliff (Eds.), *The neuropsychology of high-level vision* (pp. 133-148). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Farah, M. J., Tanaka, J. W., & Drain, H. M. (1995). What causes the face inversion effect? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21 (3), 628-634.
- Farah, M. J., Wilson, K. D., Drain, H. M., & Tanaka, J. R. (1995). The inverted face inversion effect in prosopagnosia: Evidence for mandatory, face-specific perceptual mechanisms. *Vision Research*, 35 (14), 2089-2093.
- Fellous, J.-M. (1997). Gender discrimination and prediction on the basis of facial metric information. *Vision Research*, 37 (14), 1961-1973.
- Fox, E., Lester, V., Russo, R., Bowles, R. J., Pichler, A., & Dutton, K. (2000). Facial Expressions of Emotion: Are Angry Faces Detected More Efficiently? *Cognition and Emotion*, 14 (1), 61-92.
- Freire, A., Lee, K., & Symons, L. A. (2000). The face-inversion effect as a deficit in the encoding of configural information: Direct evidence. *Perception*, 29 (2), 159-170.
- Friedman-Hill, S. R., Robertson, L. C., & Treisman, A. (1995). Parietal contributions to visual feature binding: Evidence from a patient with bilateral lesions. *Science*, 269, 853-855.
- Frijda, N. J. (1969). Recognition of emotion. In L. Berkowitz (Eds.), *Advances in experimental social psychology* (pp. 167-223). New York: Academic Press.
- Friston, K. J., Fletcher, P., Josephs, O., Holmes, A., Rugg, M. D., & Turner, R. (1998). Event-related fMRI: characterizing differential responses. *NeuroImage*, 7, 30-40.

- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J.-B., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. J. (1995). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2, 189-210.
- Furmak, T., Fischer, H., Wik, G., Larsson, M., & Fredrikson, M. (1997). The amygdala and individual differences in human fear conditioning. *NeuroReport*, 8, 3957-3960.
- Galton, F. (1879). Composite portraits, made by combining those of many different persons into a single resultant figure. *Journal of the Anthropological Institute*, 8, 132-144.
- Galton, F. (1880). Visualised numerals. *Nature*, 21, 252-256.
- Galton, F. (1883). *Inquiries into human faculty and its development*. London: Macmillan.
- Garner, W. R. (1978). Aspects of a stimulus: Features, dimensions, and configurations. In E. H. Rosch & B. B. Lloyd (Eds.), *Cognition and categorization* (pp. 99-133). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J. C., & Anderson, A. W. (2000). Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nature Neuroscience*, 3 (2), 191-197.
- Geday, J., Gjedde, A., Boldsen, A.-S., & Kupers, R. (2003). Emotional valence modulates activity in the posterior fusiform gyrus and inferior medial prefrontal cortex in social perception. *NeuroImage*, 18, 675-684.
- George, M. S., Ketter, T. A., Parekh, I., Horwitz, B., Herkovitch, P., & Post, R. (1995). Brain activity during transient sadness and happiness in healthy women. *American Journal of Psychiatry*, 152, 341-352.
- Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia. *Archives of Neurology & Psychiatry*, 44, 398-408.
- Göbel, S., Walsh, V., & Rushworth, M. F. S. (2001). The mental number line and the human angular gyrus. *NeuroImage*, 14, 1278-1289.
- Goldstein, A. G., & Chance, J. E. (1980). Memory for faces and schema theory. *Journal of Psychology*, 105, 47-59.
- Goldstone, R. L., Medin, D. L., & Gentner, D. (1991). Relational similarity and the non-independence of features in similarity judgments. *Cognitive Psychology*, 23, 222-262.
- Gorno-Tempini, M. L., Pradelli, S., Serafini, M., Pagnoni, G., Baraldi, P., Porro, C., Nicoletti, R., Umiltà, C., & Nichelli, P. (2001). Explicit and incidental facial expression processing: An fMRI study. *NeuroImage*, 14, 465-473.
- Grill-Spector, K., Kushnir, T., Hendler, T., & Malach, R. (2000). The dynamics of object-selective activation correlate with recognition performance in humans. *Nature Neuroscience*, 3, 837-843.
- Gur, R. C., Sara, R., Hagendoorn, M., Marom, O., Hughett, P., Macy, L., Turner, T., Bajcsy, R., & Gur, R. E. (2002a). A method for obtaining 3-dimensional facial expressions and its standardization for use in neurocognitive studies. *Journal of Neuroscience Methods*, 115 (2), 137-143.
- Gur, R. C., Schroeder, L., Turner, T., McGrath, C., Chan, R. M., Turetsky, B. I., Alsop, D., Maldjian, J., & Gur, R. E. (2002b). Brain activation during facial emotion processing. *NeuroImage*, 16, 651-662.

- Gusnard, D. A., & Raichle, M. E. (2001). Searching for a baseline: Functional imaging and the resting human brain. *Nature Reviews. Neuroscience*, 2 (10), 685-694.
- Haig, N. D. (1984). The effect of feature displacement on face recognition. *Perception*, 13, 505-512.
- Hamann, S. B., & Adolphs, R. (1999). Normal recognition of emotional similarity between facial expressions following bilateral amygdala damage. *Neuropsychologia*, 37, 1135-1141.
- Hamann, S., & Mao, H. (2002). Positive and negative emotional verbal stimuli elicit activity in the left amygdala. *NeuroReport*, 11 (1), 43-48.
- Hariri, A. H., Bookheimer, S. Y., & Mazziotta, J. C. (2000). Modulating emotional responses: Effects of a neocortical network on the limbic system. *NeuroReport*, 11, 43-48.
- Haxby, J. V., Hoffman, E. A., & Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 223-233.
- Hellige, J. B. (1993). *Hemispheric asymmetry: What's right and what's left*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Hellige, J. B., Bloch, M. I., Cowin, E. L., Eng, T. L., Eviatar, Z., & Sergent, V. (1994). Individual variation in hemispheric asymmetry: Multitask study of effects related to handedness and sex. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123, 235-256.
- Hellige, J. B., & Cumberland, N. (2001). Categorical and coordinate spatial processing: More on contributions of the transient/ magnocellular visual system. *Brain and Cognition*, 45 (2), 155-163.
- Hellige, J. B., Jonsson, J. E., & Michimata, C. (1988). Processing from LVF, RVF, and BILATERAL presentations: Examinations of metacontrol and interhemispheric interaction. *Brain and Cognition*, 7, 39-53.
- Hellige, J. B., & Michimata, C. (1989). Categorization versus distance: Hemispheric differences for processing spatial information. *Memory and Cognition*, 17, 770-776.
- Hellige, J. B., & Sergent, J. (1986). Role of task factors in visual field asymmetries. *Brain and Cognition*, 5, 200-222.
- Hildreth, E. C., & Ullman, S. (1989). The computational study of vision. In M. I. Posner (Eds.), *Foundations of Cognitive Science* (pp. 581-630). Cambridge: MIT Press.
- Hillger, L. A., & Koenig, O. (1991). Separable mechanisms in face processing: Evidence from hemispheric specialization. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3 (1), 42-58.
- Holmes, G., & Horrax, G. (1919). Disturbances of spatial orientation and visual attention, with loss of stereoscopic vision. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 1, 385-407.
- Hopfinger, J. B., Buchel, C., Holmes, A. P., & Friston, K. J. (2000). A study of analysis parameters that influence the sensitivity of event-related fMRI analyses. *NeuroImage*, 11 (4), 326-333.
- Hornak, J., Rolls, E. T., & Wade, D. (1996). Face and voice expression identification in patients with emotional and behavioural changes following ventral frontal lobe damage. *Neuropsychologia*, 34 (4), 247-261.

- Horner, M. D., & Freides, D. (1996). Effects of retinal eccentricity on the lateralized processing of categorical and coordinate spatial relations. *International Journal of Neuroscience*, 86, 7-13.
- Horwitz, B., Grady, C. L., Haxby, J. V., Schapiro, M. B., Rapoport, S. I., Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1992). Functional associations among human posterior extrastriate brain regions during object and spatial vision. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4 (4), 311-322.
- Horwitz, B., Rumsey, J. M., & Donohue, B. C. (1998). Functional connectivity of the angular gyrus in normal reading and dyslexia. *Proceedings - National Academy of Sciences*, 95 (15), 8939-8944.
- Hosie, J. A., Ellis, H. D., & Haig, N. D. (1988). The effect of feature displacement on the perception of well-known faces. *Perception*, 17, 461-474.
- Houdé, O., & Mazoyer, B. (2003). The roots of cognitive science: American, yes, but European too. *Trends in Cognitive Science*, 7 (7), 283-284.
- Houdé, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2002). *Cerveau et psychologie*. Paris : PUF.
- Hoyer, W. J., & Rybash, J. M. (1992). Age and visual field differences in computing visual-spatial relations. *Psychology and Aging*, 7 (3), 339-342.
- Hulten, P. (1987). *The Arcimboldo effect*. London: Thames and Hudson.
- Hummel, J. E., & Biederman, I. (1992). Dynamic binding in a neural network for shape recognition. *Psychological Review*, 99, 480-517.
- Hummel, J. E., & Stankiewicz, B. J. (1996). Categorical relations in shape recognition. *Spatial Vision*, 10, 201-236.
- Humphreys, G. W., Caterina, C., Wolfe, J., Olson, A., & Klempe, N. (2000). Fractionating the binding process: Neuropsychological evidence distinguishing binding of form from finding of surface features. *Vision Research*, 40, 1569-1596.
- Iidaka, T., Omori, M., Murata, T., Kosaka, H., Yonekura, Y., Okada, T., & Sadato, N. (2001). Neural interaction of the amygdala with the prefrontal and temporal cortices in the processing of facial expressions as revealed by fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13 (8), 1035-1047.
- Iidaka, T., Terashima, S., Yamashita, K., Okada, T., Sadato, N., & Yonekura, Y. (2003). Dissociable neural responses in the hippocampus to the retrieval of facial identity and emotion: An event-related fMRI study. *Hippocampus*, 13, 429-436.
- Ino, T., Inoue, Y., Kage, M., Hirose, S., Kimura, T., & Fukuyama, H. (2002). Mental navigation in humans is processed in the anterior bank of the parieto-occipital sulcus. *Neuroscience Letters*, 322 (3), 182-186.
- Ishai, A., Ungerleider, L. G., Martin, A., Maisog, J. M., & Haxby, J. V. (1997). fMRI reveals differential activation in the ventral vision pathways during perception of faces, houses and chairs. *NeuroImage*, 5, S149.
- Ivry, R., & Robertson, L. C. (1998). *The two sides of perception*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Jackson, J. H. (1915). On the duality of the brain. *Brain*, 38, 80-103 (publié originellement en 1874).
- Jager, G., & Postma, A. (2003). On the hemispheric specialization for categorical and coordinate spatial relations: A review of the current evidence. *Neuropsychologia*, 41, 504-515.
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. New York: Dover, 1950.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics*, 14, 201-211.
- Josephs, O., & Henson, R. N. (1999). Event-related functional magnetic resonance imaging: modelling, inference and optimization. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London - Series B, Biological Sciences*, 354 (1387), 1215-1228.
- Josephs, O., Turner, R., & Friston, K. (1997). Event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, 5, 243-248.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience*, 17, 4302-4311.
- Katsikitis, M. (1997). The classification of facial expressions of emotion: A multidimensional scaling approach. *Perception*, 26, 613-626.
- Kaufmann, T. D. C. (1987). The allegories and their meaning. In P. Hulten, *The Arcimboldo effect* (pp. 89-108). London: Thames and Hudson.
- Keightley, M. L., Winocur, G., Graham, S. J., Mayberg, H. S., Hevenor, S. J., & Grady, C. L. (2003). An fMRI study investigating cognitive modulation of brain regions associated with emotional processing of visual stimuli. *Neuropsychologia*, 41, 585-596.
- Kemler, D. G. (1983). Holistic and analytic modes in perceptual and cognitive development. In T. Tighe & B. Shepp (Eds.), *Perception, cognition, and development*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kesler-West, M. L., Andersen, A. H., Smith, C. D., Avison, M. J., Davis, C. E., Kryscio, R. J., & Blonder, L. X. (2001). Neural substrates of facial emotion processing using fMRI. *Cognitive Brain Research*, 11 (2), 213-226.
- Killgore, W. D. S., & Yurgelun-Todd, D. A. (2004). Activation of the amygdala and anterior cingulate during nonconscious processing of sad versus happy faces. *NeuroImage*, 21 (4), 1215-1223.
- Kim, M.-S., & Robertson, L. C. (2001). Implicit representations of space after bilateral parietal lobe damage. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13 (8), 1080-1087.
- Kimura, D. (1969). Spatial localization in left and right visual fields. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 23 (6), 445-448.
- Kitterle, F. L., Christman, S., & Hellige, J. B. (1990). Hemispheric differences are found in the identification but not the detection of low vs. high spatial frequencies. *Perception & Psychophysics*, 48, 297-306.
- Koenig, O. (1997). La perception et l'attention visuelles. In S. Dehaene (Eds.), *Le cerveau en action. Imagerie cérébrale fonctionnelle en psychologie cognitive* (pp. 127-144). Paris : PUF.

- Koenig, O., Reiss, L. P., & Kosslyn, S. M. (1990). The development of spatial relation representations: Evidence from studies of cerebral lateralization. *Journal of Experimental Child Psychology*, 50, 119-130.
- Kosaka, H., Omori, M., Murata, T., Iidaka, T., Yamada, H., Okada, T., Takahashi, T., Sadato, N., Itoh, H., Yonekura, Y., & Wada, Y. (2002). Differential amygdala response during facial recognition in patients with schizophrenia: An fMRI study. *Schizophrenia Research*, 57 (1), 87-95.
- Kosslyn, S. M. (1987). Seeing and imaging in the cerebral hemispheres: A computational approach. *Psychological Review*, 94, 148-175.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain. The resolution of the imagery debate*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kosslyn, S. M. (1999). If neuroimaging is the answer, what is the question? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London - Series B, Biological Sciences*, 354 (1387), 1283-1294.
- Kosslyn, S. M., Anderson, A. K., Hillger, L. A., & Hamilton, S. E. (1994). Hemispheric differences in sizes of receptive fields or attentional biases? *Neuropsychology*, 8 (2), 139-147.
- Kosslyn, S. M., Chabris, C. F., Marsolek, C. J., & Koenig, O. (1992). Categorical versus coordinate spatial relations: Computational analyses and computer simulations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 562-577.
- Kosslyn, S. M., Flynn, R. A., Amsterdam, J. B., & Wang, G. (1990). Components of high-level vision: A cognitive neuroscience analysis and accounts of neurological syndromes. *Cognition*, 34, 203-277.
- Kosslyn, S. M., & Koenig, O. (1992). *Wet Mind: The new cognitive neuroscience*. New York: Free Press.
- Kosslyn, S. M., & Koenig, O. (1995). *Wet Mind: The new cognitive neuroscience* (2nd ed). New York: Free Press.
- Kosslyn, S. M., Koenig, O., Barrett, A., Cave, C. B., Tang, J., & Gabrieli, J. D. E. (1989). Evidence for two types of spatial representations: Hemispheric specialization for categorical and coordinate relations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 723-735.
- Kosslyn, S. M., Shin, L. M., Thompson, W. L., McNally, R. J., Rauch, S. L., Pitman, R. K., & Alpert, N. M. (1996). Neural effects of visualizing and perceiving aversive stimuli: A PET investigation. *NeuroReport*, 7, 1569-1576.
- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Gitelman, D. R., & Alpert, N. M. (1998). Neural systems that encode categorical versus coordinate spatial relations: PET investigations. *Psychobiology*, 26 (4), 333-347.
- Krasnow, B., Tamm, L., Greicius, M. D., Yang, T. T., Glover, G. H., Reiss, A. L., & Menon, V. (2003). Comparison of fMRI activation at 3 and 1.5 T during perceptual, cognitive, and affective processing. *NeuroImage*, 18, 813-826.

- Kruggel, F., & von Cramon, D. Y. (1999). Temporal properties of the hemodynamic response in functional MRI. *Human Brain Mapping*, 8 (4), 259-271.
- Kwong, K. K., Belliveau, J.W., Chesler, D. A., Goldberg, I. E., Weisskoff, R. M., Poncelet, B. P., Kennedy, D. N., Hoppel, B. E., Cohen, M. S., Turner, R., Cheng, H.-M., Brady, T. J., & Rosen, B. R. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proceedings - National Academy of Sciences*, 89 (12), 5675-5679.
- LaBar, K. S., Gatenby, J. C., Gore, J. C., LeDoux, J. E., & Phelps, E. A. (1998). Human amygdala activation during conditioned fear acquisition and extinction: A mixed-trial fMRI study. *Neuron*, 20, 937-945.
- LaBar, K. S., LeDoux, J. E., Spencer, D. D., & Phelps, E. A. (1995). Impaired fear conditioning following unilateral temporal lobectomy. *Journal of Neuroscience*, 15, 6846-6855.
- Laeng, B. (1994). Lateralization of categorical and coordinate spatial functions: A study of unilateral stroke patients. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6, 189-203.
- Laeng, B., & Peters, M. (1995). Cerebral lateralization for the processing of spatial coordinates and categories in left- and right-handers. *Neuropsychologia*, 33 (4), 421-439.
- Laeng, B., Shah, J., & Kosslyn, S. M. (1999). Identifying objects in conventional and contorted poses: Contributions of hemisphere-specific mechanisms. *Cognition*, 70, 53-85.
- Lane, R. D., Chua, P., & Dolan, R. (1997a). Modulation of extrastriate visual cortex by emotion, arousal and attention. *NeuroImage*, 5, S115.
- Lane, R. D., Chua, P., & Dolan, R. (1999). Common effects of emotional valence, arousal and attention on neural activation during visual processing of pictures. *Neuropsychologia*, 37, 989-997.
- Lane, R. D., & Nadel, L. (2000). *Cognitive Neuroscience of Emotion*. New York: Oxford University Press.
- Lane, R. D., Reiman, E. M., Bradley, M. M., Lang, P.J., Ahern, G. L., Davidson, R. J., & Schwartz, G. E. (1997b). Neuroanatomical correlates of pleasant and unpleasant emotion. *Neuropsychologia*, 35, 1437-1444.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., Fitzsimmons, J. R., Cuthbert, B. N., Scott, J., Moulder, B., & Nangia, V. (1998). Emotional arousal and activation of the visual cortex: An fMRI analysis. *Psychophysiology*, 35, 199-210.
- Lang, P. J., Fitzsimmons, J. R., Bradley, M. M., Cuthbert, B. N., & Scott, J. (1996). Processing emotional pictures: Differential activation in primary visual cortex. *NeuroImage*, 3, S231.
- Lê, S., Raufaste, E., & Démonet, J.-F. (2003). Processing of normal, inverted, and scrambled faces in a patient with prosopagnosia: Behavioural and eye tracking data. *Cognitive Brain Research*, 17, 26-35.
- Le Bihan, D. (1997). L'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique. In S. Dehaene (Eds.), *Le cerveau en action. Imagerie cérébrale fonctionnelle en psychologie cognitive* (pp.57-70). Paris : PUF.

- Leder, H. (1996). Line drawings of faces reduce configural processing. *Perception*, 25, 355-366.
- Leder, H., & Bruce, V. (1998). Local and Relational Aspects of Face Distinctiveness. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51A (3), 449-473.
- Leder, H., & Bruce, V. (2000). When inverted faces are recognized: The role of configural information in face recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 53A (2), 513-536.
- Leder, H., Candrian, G., Huber, O., & Bruce, V. (2001). Configural features in the context of upright and inverted faces. *Perception*, 30 (1), 73-83.
- LeDoux, J. E. (1995). In search of an emotional system in the brain: Leaping from fear to emotion and consciousness. In M. S. Gazzaniga (Eds.), *The Cognitive Neurosciences* (pp. 1049-1061). Cambridge (MA): The MIT Press.
- LeDoux, J. E. (1996). *The Emotional Brain: The Mysterious Underpinning of Emotional Life*. New York: Simon and Shuster.
- LeDoux, J. E. (2000). Cognitive-emotional interactions: Listen to the brain. In R. D. Lane & L. Nadel (Eds.), *Cognitive Neuroscience of Emotion* (pp. 129-155). New York: Oxford University Press.
- LeDoux, J. E., Iwata, J., Cicchetti, P., & Reis, D. J. (1988). Different projections of the central amygdaloid nucleus mediate autonomic and behavioral correlates of conditioned fear. *Journal of Neuroscience*, 8, 2517-2529.
- Le Grand, R., Mondloch, C. J., Maurer, D., & Brent, H. P. (2001). Early visual experience and face processing. *Nature*, 410, 890 (Correction : *Nature*, 412, 786).
- Lerner, Y., Hendler, T., Ben-Baashat, D., Harel, M., & Malach, R. (2001). A hierarchical axis of object processing stages in the human visual cortex. *Cerebral Cortex*, 11, 287-297.
- Leube, D. T., Yoon, H. W., Rapp, A., Erb, M., Grodd, W., Bartels, M., & Kircher, T. T. J. (2003). Brain regions sensitive to the face inversion effect: A functional magnetic resonance imaging study in humans. *Neuroscience Letters*, 342, 143-146.
- Lindauer, U., Royle, G., Leithner, C., Kuhl, M., Gold, L., Gethmann, J., Kohl-Bareis, M., Villringer, A., & Dirnagl, U. (2001). No evidence for early decrease in blood oxygenation in rat whisker cortex in response to functional activation. *NeuroImage*, 13 (6 Pt 1), 988-1001.
- Logothetis, N. K., Pauls, J., Augath, M., Trinath, T., & Oeltermann, A. (2001). Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature*, 412 (6843), 150-157.
- Loislot, R., & Koenig, O. (1998). *Priming by facial expression: Evidence from a facial familiarity judgment task*. Presented at the Xth Conference of the European Society for Cognitive Psychology (ESCOP 1998), Jerusalem, Israel.
- Macho, S., & Leder, H. (1998). Your eyes only? A test of interactive influence in processing of facial features. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 1486-1500.
- Malach, R., Reppas, J., Benson, R., Kwong, K., Jiang, H., Kennedy, W., Ledden, P., Brady, T., Rosen, B., & Tootell, R. (1995). Object-related activity revealed by

- functional magnetic resonance imaging in human occipital cortex. *Proceedings - National Academy of Sciences, USA*, 92, 8135-8139.
- Mareschal, D., & Johnson, M. H. (2003). The «What» and «Where» of object representations in infancy. *Cognition*, 88, 259-276.
- Marr, D. (1982). *Vision*. New York: Freeman and Company.
- Martin, M. (1979). Local and global processing: The role of sparsity. *Memory and Cognition*, 7, 476-484.
- Martinez, A. M. (2003). Matching expression variant faces. *Vision Research*, 43, 1047-1060.
- Mather, M., Canli, T., English, T., Whitfield, S., Wais, P., Ochsner, K., Gabrieli, J. D. E., & Carstensen, L. L. (2004). Amygdala responses to emotionally valenced stimuli in older and younger adults. *Psychological Science*, 15 (4), 259-263.
- Matsumoto, D., & Ekman, P. (1988). Japanese and Caucasian Facial Expressions of Emotion (JACFEE) and Neutral Faces (JACNeuF), [CD-Rom], Intercultural and Emotion Research Laboratory, Department of Psychology, San Francisco State University, San Francisco, CA.
- Maurer, D., Le Grand, R., & Mondloch, C. J. (2002). The many faces of configural processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 6 (6), 255-260.
- Mazoyer, B. (2002). L'imagerie par resonance magnétique fonctionnelle (IRMf). In O. Houdé, B. Mazoyer, & N. Tzourio-Mazoyer (Eds.), *Cerveau et psychologie* (pp. 207-230). Paris : PUF.
- Mazoyer, B., Zago, L., Mellet, E., Bricogne, S., Etard, O., Houdé, O., Crivello, F., Joliot, M., Petit, L., & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Cortical networks for working memory and executive functions sustain the conscious resting state in man. *Brain Research bulletin*, 54 (3), 287-298.
- McKelvie, S. J. (1973). Meaningfulness and meaning of schematic faces. *Perception & Psychophysics*, 14, 343-348.
- Mellet, E. (1998). Anatomie fonctionnelle de l'imagerie mentale visuelle. In M. Boucart, M.-A. Hénaff, & C. Belin (Eds), *Vision : Aspects perceptifs et cognitifs* (pp. 63-76). Marseille : Solal.
- Mellet, E., Bricogne, S., Crivello, F., Mazoyer, B., Denis, M., & Tzourio-Mazoyer, N. (2002). Neural basis of mental scanning of a topographic representation built from a text. *Cerebral Cortex*, 12 (12), 1322-1330.
- Menon, V., Mackenzie, K., Rivera, S. M., & Reiss, A. L. (2002). Prefrontal cortex involvement in processing incorrect arithmetic equations: Evidence from event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, 16, 119-130.
- Menon, V., Rivera, S. M., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2000). Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing. *NeuroImage*, 12, 357-365.
- Michimata, C. (1997). Hemispheric processing of categorical and coordinate spatial relations in vision and visual imagery. *Brain and Cognition*, 33 (3), 370-387.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford: Oxford University Press.

- Milner, A. D., Paulignan, Y., Dijkerman, H. C., Michel, F., & Jeannerod, M. (1999). A paradoxical improvement of misreaching in optic ataxia: New evidence for two separate neural systems for visual localization. *Proceedings of the Royal Society of London - Series B, Biological Sciences*, 266 (1434), 2225-2229.
- Mishkin, M., & Ungerleider, L. G. (1982). Contribution of striate inputs to the visuospatial functions of parieto-preoccipital cortex in monkeys. *Behavioral Brain Research*, 6, 57-77.
- Morris, J. S., de Bonis, M., & Dolan, R. J. (2002). Human amygdala responses to fearful eyes. *NeuroImage*, 17, 214-222.
- Morris, J. S., de Gelder, B., Weiskrantz, L., & Dolan, R. J. (2001). Differential extrageniculostriate and amygdala responses to presentation of emotional faces in a cortically blind field. *Brain*, 124 (6), 1241-1252.
- Morris, J. S., Friston, K. J., Buechel, C., Frith, C. D., Young, A. W., Calder, A. J., & Dolan, R. J. (1998). A neuromodulatory role for the amygdala in processing emotional facial expression. *Brain*, 121, 47-57.
- Morris, J. S., Frith, C. D., Perrett, D. I., Rowland, D., Young, A. W., Calder, A. J., & Dolan, R. J. (1996). A differential neural response in the human amygdala to fearful and happy facial expressions. *Nature*, 383 (6603), 812-815.
- Morris, J. S., Ohman, A., & Dolan, R. J. (1999). A subcortical pathway to the right amygdala mediating «unseen» fear. *Proceedings - National Academy of Sciences, USA*, 96, 1680-1685.
- Moscovitch, M., Winocur, G., & Behrmann, M. (1997). What is special about face recognition? Nineteen experiments on a person with visual object agnosia and dyslexia but normal face recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9 (5), 555-604.
- Murray, J. E., Yong, E., & Rhodes, G. (2000). Revisiting the perception of upside-down faces. *Psychological Science*, 11, 492-496.
- Nakamura, K., Kawashima, R., Ito, K., Sugiura, M., Kato, T., Nakamura, A., Hatano, K., Nagumo, S., Kubota, K., Fukuda, H., & Kojima, S. (1999). Activation of the right inferior frontal cortex during assessment of facial emotion. *Journal of Neurophysiology*, 82, 1610-1614.
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9, 353-383.
- Niebauer, C. L. (2001). A possible connection between categorical and coordinate spatial relation representations. *Brain and Cognition*, 47, 434-445.
- Nomura, M., Ohira, H., Haneda, K., Iidaka, T., Sadato, N., Okada, T., & Yonekura, Y. (2004). Functional association of the amygdala and ventral prefrontal cortex during cognitive evaluation of facial expressions primed by masked angry faces: An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 21 (1), 352-363.
- Nosofsky, R. M. (1984). Choice similarity and the context theory of classification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 104-114.
- Nosofsky, R. M. (1986). Attention, similarity and the identification-classification relationship. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1, 39-57.

- O'Doherty, J., Winston, J., Critchley, H., Perrett, D., Burt, D. M., & Dolan, R. J. (2003). Beauty in a smile: The role of medial orbitofrontal cortex in facial attractiveness. *Neuropsychologia*, 41, 147-155.
- Ohman, A. (2002). Automaticity and the amygdala: Nonconscious responses to emotional faces. *Current Directions in Psychological Science*, 11, 62-66.
- Okabe, A. (1987). Kao at the drawn of modernity. In P. Hulten, *The Arcimboldo effect* (pp. 235-239). London: Thames and Hudson.
- Okubo, M., & Michimata, C. (2002). Hemispheric processing of categorical and coordinate spatial relations in the absence of low spatial frequencies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14 (2), 291-297.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Palmer, S. E. (1977). Hierarchical structure in perceptual representation. *Cognitive Psychology*, 9, 441-474.
- Paradiso, S., Johnson, D. L., Andreasen, N. C., O'Leary, D. S., Watkins, G. L., Ponto, L. L., & Hichwa, R. D. (1999). Cerebral blood flow changes associated with attribution of emotional valence to pleasant, unpleasant, and neutral visual stimuli in a PET study of normal subjects. *American Journal of Psychiatry*, 156, 1618-1629.
- Parrot, M., Doyon, B., Démonet, J.-F., & Cardebat, D. (1999). Hemispheric preponderance in categorical and coordinate visual processes. *Neuropsychologia*, 37 (11), 1215-1225.
- Penry, J. (1971). *Looking at faces and remembering them: A guide to facial identification*. London: Blek Books.
- Perrett, D. I., May, K. A., & Yoshikawa, S. (1994). Facial shape and judgments of female attractiveness. *Nature*, 368, 239-242.
- Phan, K. L., Wager, T., Taylor, S. F., & Liberzon, I. (2002). Functional neuroanatomy of emotion: A meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *NeuroImage*, 16 (2), 331-348.
- Phillips, M. L., Medford, N., Young, A. W., Williams, S. C. R., Bullmore, E. T., Gray, J. A., & Brammer, M. J. (2001). Time courses of left and right amygdalar responses to fearful facial expressions. *Human Brain Mapping*, 12, 193-202.
- Phillips, M. L., Williams, L. M., Heining, M., Herba, C. M., Russell, T., Andrew, C., Bullmore, E. T., Brammer, M. J., Williams, S. C. R., Morgan, M., Young, A. W., & Gray, J. A. (2004). Differential neural responses to overt and covert presentations of facial expressions of fear and disgust. *NeuroImage*, 21, 1484-1496.
- Phillips, M. L., Young, A. W., Senior, C., Brammer, M., Andrew, C., Calder, A. J., Bullmore, E. T., Perrett, D. I., Rowland, D., Williams, S. C., Gray, J. A., & David, A. S. (1997). A specific neural substrate for perceiving facial expressions of disgust. *Nature*, 389, 495-498.
- Pizzagalli, D., Koenig, T., Regard, M., & Lehmann, D. (1998). Faces and emotions: Brain electric field sources during covert emotional processing. *Neuropsychologia*, 36 (4), 323-332.

- Poggio, T., & Edelman, S. (1990). A neural network that learns to recognize three-dimensional objects. *Nature*, 317, 314-319.
- Pohl, W. (1973). Dissociation of spatial discrimination deficits following frontal and parietal lesions in monkeys. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 82 (2), 227-239.
- Pomerantz, J. R. (1983). Global and local precedence: Selective attention in form and motion perception. *Journal of Experimental Psychology: General*, 112, 516-540.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25-42.
- Rakover, S. S. (1999). Thompson's Margaret Thatcher illusion: When inversion fails. *Perception*, 28, 1127-1230.
- Rakover, S. S. (2002). Featural vs. configurational information in faces: A conceptual and empirical analysis. *British Journal of Psychology*, 93, 1-30.
- Rakover, S. S., & Teucher, B. (1997). Facial inversion effects: Parts and whole relationship. *Perception & Psychophysics*, 59 (5), 752-761.
- Rapcsak, S. Z., Galper, S. R., Comer, J. F., Reminger, S. L., Nielsen, L., Kaszniak, A. W., Verfaellie, M., Laguna, J. F., Labiner, D. M., & Cohen, R. A. (2000). Fear recognition deficits after focal brain damage: A cautionary note. *Neurology*, 54, 575-581.
- Reiman, E. M., Lane, R. D., Ahern, G. L., Schwartz, G. E., Davidson, R. J., Friston, K. J., Yun, L. S., & Chen, K. (1997). Neuroanatomical correlates of externally and internally generated human emotion. *American Journal of Psychiatry*, 154, 918-925.
- Reinitz, M. T., Lammers, W. J., & Cochran, B. P. (1992). Memory conjunction errors: Microcombination of stored stimulus features can produce illusions of memory. *Memory and Cognition*, 20, 1-11.
- Reisenzein, R. (2000). Exploring the strength of association between the components of emotion syndromes: The case of surprise. *Cognition and Emotion*, 14 (1), 1-38.
- Rhodes, G. (1988). Looking at faces: First-order and second-order features as determinants of facial appearance. *Perception*, 17, 43-63.
- Rhodes, G., Brake, S., & Atkinson, A. P. (1993). What's lost in inverted faces? *Cognition*, 47, 25-57.
- Rhodes, G., Brake, S., Taylor, K., & Tan, S. (1989). Expertise and configural coding in face recognition. *British Journal of Psychology*, 80 (Pt 3), 313-331.
- Rhodes, G., Brennan, S., & Carey, S. (1987). Identification and ratings of caricatures: Implications for mental representations of faces. *Cognitive Psychology*, 19 (4), 473-497.
- Rhodes, G., Carey, S., Byatt, B., & Proffitt, F. (1998). Coding spatial variations in faces and simple shapes: A test of two models. *Vision Research*, 38, 2307-2321.
- Rhodes, G., & Tremewan, T. (1994). Understanding face recognition: Caricature effects, inversion, and the homogeneity problem. *Visual Cognition*, 1 (2/3), 275-311.
- Robertson, L. C., & Delis, D. C. (1986). «Part-whole» processing in unilateral brain damage patients: Dysfunction of hierarchical organization. *Neuropsychologia*, 24, 363-370.

- Robertson, L. C., Treisman, A., Friedman-Hill, S. R., & Grabowecky, M. (1997). The interaction of spatial and object pathways: Evidence from Balint's syndrome. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9 (3), 295-317.
- Rolls, E. T. (1999). *The Brain and Emotion*. New York: Oxford University Press.
- Rolls, E. T., Judge, S. J., & Sanaghera, M. K. (1977). Activity of neurons in the inferotemporal cortex of the alert monkey. *Brain Research*, 130 (2), 229-238.
- Rosch, E. H. (1978). Principles of categorization. In E. H. Rosch & B. B. Lloyd (Eds.), *Cognition and categorization* (pp. 27-48). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Rosen, B. R., Buckner, R. L., & Dale, A. M. (1998). Event-related functional MRI: Past, present, and future. *Proceedings - National Academy of Sciences, USA*, 95, 773-780.
- Rossion, B., Delvenne, J. F., Debatisse, D., Goffaux, V., Bruyer, R., Crommelinck, M., & Guérit, J.-M. (1999). Spatio-temporal localization of the face inversion effect: An event-related potentials study. *Biological Psychology*, 50, 173-189.
- Ross-Kossak, P., & Turkewitz, G. (1984). Relationship between changes in hemispheric advantage during familiarization to faces and proficiency in facial recognition. *Neuropsychologia*, 22, 471-477.
- Rotshtein, P., Malach, R., Hadar, U., Graif, M., & Hendler, T. (2001). Feeling or features: Different sensitivity to emotion in high-order visual cortex and amygdala. *Neuron*, 32, 747-757.
- Royet, J.-P., Zald, D., Versace, R., Costes, N., Lavenne, F., Koenig, O., & Gervais, R. (2000). Emotional responses to pleasant and unpleasant olfactory, visual and auditory stimuli: A positron emission tomography study. *Journal of Neuroscience*, 20, 7752-7759.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39, 1161-1178.
- Russell, J. A., & Bullock, M. (1985). Multidimensional scaling of emotional facial expressions: Similarity from preschoolers to adults. *Journal of Personality and Social Psychology*, 48, 1290-1298.
- Russell, J. A., & Bullock, M. (1986). Fuzzy concepts and the perception of emotion in facial expressions. *Social Cognition*, 4, 309-341.
- Russell, J. A., Lewicka, M., & Niit, T. (1989). A cross-cultural study of circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57, 848-856.
- Rybash, J. M., & Hoyer, W. J. (1992). Hemispheric specialisation for categorical and coordinate spatial representations: A reappraisal. *Memory and Cognition*, 20, 271-276.
- Sander, D (2002). Approche computationnelle des mécanismes émotionnels : test de l'hypothèse de polarité. Manuscrit de thèse de Doctorat de Sciences Cognitives, Université Lyon 2, Lyon.
- Sander, D., Grafman, J., & Zalla, T. (2003). The human amygdala: An evolved system for relevance detection. *Reviews in Neurosciences*, 14 (4), 303-316.
- Scheuchenflog, R. (1999). Predicting face similarity judgments with a computational model of face space. *Acta Psychologica*, 100, 229-242.

- Schlosberg, H. (1941). A scale for the judgment of facial expressions. *Journal of Experimental Psychology*, 29, 497-510.
- Schlosberg, H. (1952). The description of facial expressions in terms of two dimensions. *Journal of Experimental Psychology*, 44 (4), 229-237.
- Schlosberg, H. (1954). Three dimensions of emotion. *Psychological Review*, 61, 81-88.
- Schneider, F., Habel, U., Kessler, C., Salloum, J. B., & Posse, S. (2000). Gender differences in regional cerebral activity during sadness. *Human Brain Mapping*, 9, 226-238.
- Schwaninger, A., & Mast, F. (1999). Why is face recognition so orientation-sensitive? Psychophysical evidence for an integrative model. *Perception*, 28, S116.
- Schwaninger, A., Ryf, S., & Hofer, F. (2003). Configural information is processed differently in perception and recognition of faces. *Vision Research*, 43, 1501-1505.
- Schweinberger, S. R., Baird, L. M., Blümler, M., Kaufmann, J. M., & Mohr, B. (2003). Interhemispheric cooperation for face recognition but not for affective facial expressions. *Neuropsychologia*, 41, 407-414.
- Searcy, J. H., & Bartlett, J. C. (1996). Inversion and processing of component and spatial-relational information in faces. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22 (4), 904-915.
- Sergent, J. (1982). The cerebral balance of power: Confrontation or cooperation? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8 (2), 253-272.
- Sergent, J. (1983). The role of the input in visual hemispheric asymmetries. *Psychological Bulletin*, 93, 481-514.
- Sergent, J. (1984a). An investigation into component and configural processes underlying face perception. *British Journal of Psychology*, 75 (2), 221-242.
- Sergent, J. (1984b). Configural processing of faces in the left and the right cerebral hemispheres. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10 (4), 554-572.
- Sergent, J. (1985). Influence of task and input factors on hemispheric involvement in face processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11 (6), 846-861.
- Sergent, J. (1987). Failures to confirm the spatial-frequency hypothesis: Fatal blow or healthy complication? *Canadian Journal of Psychology*, 41, 412-428.
- Sergent, J. (1991a). Judgments of relative position and distance on representations of spatial relations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 91 (3), 762-780.
- Sergent, J. (1991b). Processing of spatial relations within and between the disconnected cerebral hemispheres. *Brain*, 114, 1025-1043.
- Sergent, J., & Hellige, J. B. (1986). Role of input factors in visual-field asymmetries. *Brain and Cognition*, 5, 174-199.
- Sergent, J., Ohta, S., & MacDonald, B. (1992). Functional neuroanatomy of face and object processing. *Brain*, 115 (1), 15-36.

- Sergent, J., Ohta, S., MacDonald, B., & Zuck, E. (1994). Segregated processing of facial identity and emotion in the human brain: A PET study. *Visual Cognition*, 1, 349-369.
- Sergent, J., & Villemure, J.-G. (1989). Prosopagnosia in a right hemispherectomized patient. *Brain*, 112, 975-995.
- Seron, X. (1994). Le programme de la neuropsychologie. In X. Seron, & M. Jeannerod (Eds.), *Neuropsychologie humaine* (pp. 35-56). Liège : Mardaga.
- Seyama, J., & Nagayama, R. S. (2002). Perceived eye size is larger in happy faces than in surprised faces. *Perception*, 31 (9), 1153-1155.
- Shibui, S., Izawa, K., Harashima, H., & Shigemasa, K. (2003). Adaptation to the facial expressions of emotion in the realistic face. *Perception*, 32, S173-174.
- Silberman, E. K., & Weingartner, H. (1986). Hemispheric lateralization of functions related to emotion. *Brain and Cognition*, 5 (3), 322-353.
- Skosnik, P. D., Mirza, F., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., Mesulam, M.-M., & Reber, P. J. (2002). Neural correlates of artificial grammar learning. *NeuroImage*, 17 (3), 1306-1314.
- Slotnick, S. D., Moo, L. R., Tesoro, M. A., & Hart, J. (2001). Hemispheric asymmetry in categorical versus coordinate visuospatial processing revealed by temporary cortical deactivation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13 (8), 1088-1096.
- Small, D. M., Gregory, M. D., Mak, Y. E., Gitelman, D., Mesulam, M. M., & Parrish, T. (2003). Dissociation of neural representation of intensity and affective valuation in human gustation. *Neuron*, 39 (4), 701-711.
- Sokoloff, L., Mangold, R., Wechsler, R., Kennedy, C., & Kety, S. S. (1955). The effect of mental arithmetic on cerebral circulation and metabolism. *The Journal of Clinical Investigation*, 34, 1101-1108.
- Sprengelmeyer, R., Young, A. W., Calder, A. J., Karnat, A., Lange, H., Hömberg, V., Perrett, D. I., & Rowland, D. (1996). Loss of disgust: Perception of faces and emotions in Huntington's disease. *Brain*, 119, 1647-1665.
- Sprengelmeyer, R., Young, A. W., Mahn, K., Schroeder, U., Woitalla, D., Büttner, T., Kuhn, W., & Przuntek, H. (2003). Facial expression recognition in people with medicated and unmedicated Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 41, 1047-1057.
- Sprengelmeyer, R., Young, A. W., Schroeder, U., Grossenbacher, P. G., Federlein, J., Büttner, T., & Przuntek, H. (1999). Knowing no fear. *Proceedings of the Royal Society of London - Biological Sciences*, 266, 2451-2456.
- Springer, S. P., & Deutsch, G. (1981). *Left brain, right brain*. San Francisco: Freeman.
- Stark, C. E. L., & Squire, L. R. (2001). When zero is not zero: The problem of ambiguous baseline conditions in fMRI. *Proceedings - National Academy of Sciences*, 98 (22), 12760-12766.
- Streit, M., Dammers, J., Simsek-Kraues, S., Brinkmeyer, J., Wölwer, W., & Ioannides, A. (2003). Time course of regional brain activations during facial emotion recognition in humans. *Neuroscience Letters*, 342, 101-104.

- Sutherland, N. S. (1968). Outlines of a theory of visual pattern recognition in animals and man. *Proceedings of the Royal Society of London, 171B*, 95-103.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain: 3-dimensional proportional system: An approach to cerebral imaging*. New York: Thieme.
- Tanaka, J. W., & Farah, M. J. (1991). Second-order relational properties and the inversion effect: Testing a theory of face perception. *Perception & Psychophysics, 50* (4), 367-372.
- Tanaka, J. W., & Farah, M. J. (1993). Parts and wholes in face recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 46A* (2), 225-245.
- Tanaka, J. W., & Sengco, J. A. (1997). Features and their configuration in face recognition. *Memory and Cognition, 25* (5), 583-592.
- Taylor, S. F., Liberzon, I., Fig, L. M., Decker, L. R., Minoshima, S., & Koeppe, R. A. (1998). The effect of emotional content on visual recognition memory: A PET activation study. *NeuroImage, 8*, 188-197.
- Taylor, S. F., Liberzon, I., & Koeppe, R. A. (2000). The effect of graded aversive stimuli on limbic activation. *Neuropsychologia, 38*, 1415-1425.
- Tcherkassof, A. (1999). Les indices de préparation à l'action et la reconnaissance des expressions émotionnelles faciales. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée, 49* (2), 99-105.
- Thomas, K. M., Drevets, W. C., Whalen, P. J., Eccard, C. H., Dahl, R. E., Ryan, N. D., & Casey, B. J. (2001). Amygdala response to facial expressions in children and adults. *Biological Psychiatry, 49* (4), 309-316.
- Thompson, P. (1980). Margaret Thatcher: A new illusion. *Perception, 9*, 483-484.
- Tranel, D., & Damasio, A. R. (1988). Non-conscious face recognition in patients with face agnosia. *Behavioral Brain Research, 30*, 235-249.
- Trojano, L., Grossi, D., Linden, D. E. J., Formisano, E., Goebel, R., Cirillo, S., Elefante, R., & Di Salle, F. (2002). Coordinate and categorical judgments in spatial imagery. *Neuropsychologia, 40*, 1666-1674.
- Ugurbil, K., Toth, L., & Kim, D.-S. (2003). How accurate is magnetic resonance imaging of brain function? *Trends in Neurosciences, 26* (2), 108-114.
- Ullman, S. (1989). Aligning pictorial descriptions: An approach to object recognition. *Cognition, 32*, 193-254.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp. 549-586). Cambridge, MA: MIT Press.
- Valentine, T. (1991). A unified account of the effects of distinctiveness, inversion, and race in face recognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 43A*, 161-204.
- Valentine, T. (1995). *Cognitive and computational aspects of face recognition: Explorations in face space*. London: Routledge.

- Van Essen, D. (1985). Functional organization of primate visual cortex. In A. Peters & E. G. Jones (Eds.), *Cerebral cortex* (Vol. 3, pp. 259-329). New York: Plenum Press.
- van Harskamp, N. J., Rudge, P., & Cipolotti, L. (2002). Are multiplication facts implemented by the left supramarginal and angular gyri? *Neuropsychologia*, 40, 1786-1793.
- Vernier, M.-P. (2000). Traitement des relations spatiales catégorielles et coordonnées : approche neuropsychologique. Manuscrit de thèse de Doctorat de Psychologie Cognitive, Université Lyon 2, Lyon.
- Vernon, M. D. (1955). The function of schemata in perceiving. *Psychological Review*, 62, 180-192.
- Vilringer, A., & Dirnagl, U. (1995). Coupling of brain activity and cerebral blood flow: Basis of functional neuroimaging. *Cerebrovascular and Brain Metabolism Reviews*, 7, 240-276.
- Vincent, J.-D. (1994). *Biologie des passions*. Paris : Odile jacob.
- Vuilleumier, P., Armony, J. L., Driver, J., & Dolan, R. J. (2001). Effects of attention and emotion on face processing in the human brain: An event-related fMRI study. *Neuron*, 30, 829-841.
- Wager, T. D., Phan, K. L., Liberzon, I., & Taylor, S. F. (2003). Valence, gender, and lateralization of functional brain anatomy in emotion: A meta-analysis of findings from neuroimaging. *NeuroImage*, 19 (3), 513-531.
- Wang, K., Hoosain, R., Yang, R.-M., Meng, Y., & Wang, C.-Q. (2003). Impairment of recognition of disgust in Chinese with Huntington's or Wilson's disease. *Neuropsychologia*, 41, 527-537.
- Wehrle, T., Kaiser, S., Schmidt, S., & Scherer, K. R. (2000). Studying the dynamics of emotional expression using synthesized facial muscle movements. *Journal of Personality and Social Psychology*, 78 (1), 105-119.
- Whalen, P. J., Rauch, S. L., Etcoff, N. L., McInerney, S. C., Lee, M. B., & Jenike, M. A. (1998). Masked presentations of emotional facial expressions modulate amygdala activity without explicit knowledge. *The Journal of Neuroscience*, 18 (1), 411-418.
- White, M. (1999). Representation of facial expressions of emotion. *American Journal of Psychology*, 112, 371-381.
- White, M. (2000). Parts and wholes in expression recognition. *Cognition and Emotion*, 14 (1), 39-60.
- White, M. (2002). Different spatial-relational information is used to recognise faces and emotional expressions. *Perception*, 31, 675-682.
- Wilkinson, D., & Donnelly, N. (1999). The role of stimulus factors in making categorical and coordinate spatial judgments. *Brain and Cognition*, 39, 171-185.
- Williams, M. A., Moss, S. A., & Bradshaw, J. L. (2004). A unique look at face processing: The impact of masked faces on the processing of facial features. *Cognition*, 91, 155-172.
- Wilson, H. R., Loffler, G., & Wilkinson, F. (2002). Synthetic faces, face cubes, and the geometry of face space. *Vision Research*, 42, 2909-2923.

- Wilson, F. A. W., Scalandhe, S. P., & Goldman-Rakic, P. S. (1993). Dissociation of object and spatial processing domains in primate prefrontal cortex. *Science*, 260, 1955-1958.
- Winograd, E. (1981). Elaboration and distinctiveness in memory for faces. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 7, 181-190.
- Winston, J. S., O'Doherty, J., & Dolan, R. J. (2003). Common and distinct neural responses during direct and incidental processing of multiple facial emotions. *NeuroImage*, 20, 84-97.
- Wiseman, S., & Neisser, U. (1974). Perceptual organization as a visual recognition memory. *American Journal of Psychology*, 87, 675-681.
- Woodworth, R. S. (1938). *Experimental Psychology*. New York: Henry Holt.
- Wright, C. I., Martis, B., Shin, L. M., Fischer, H., & Rauch, S. L. (2002). Enhanced amygdala responses to emotional versus neutral schematic facial expressions. *NeuroReport*, 13 (6), 785-790.
- Wyke, M., & Ettlinger, G. (1961). Efficiency of recognition in the left and right visual fields. *Archives of Neurology*, 5, 659-665.
- Yaginuma, S., Osawa, Y., Yamaguchi, K., & Iwai, E. (1993). Differential functions of central and peripheral visual field representation in monkey prestriate cortex. In T. Ono, L. R. Squire, M. E. Raichle, D. I. Perrett, & M. Fukuda (Eds.), *Brain mechanisms of perception and memory: From neuron to behavior* (pp. 3-15). Oxford: University Press.
- Yin, R. K. (1969). Looking at upside-down faces. *Journal of Experimental Psychology*, 81 (1), 141-145.
- Young, A. W., Aggleton, J. P., Hellawell, D. J., Johnson, M., Brooks, P., & Hanley, J. R. (1995). Face processing impairments after amygdalotomy. *Brain*, 118, 15-24.
- Young, A. W., Hellawell, D. J., & Hay, D. C. (1987). Configural information in face perception. *Perception*, 16, 747-759.
- Young, A. W., Hellawell, D. J., Van de Wal, C., & Johnson, M. (1996). Facial expression processing after amygdalotomy. *Neuropsychologia*, 34, 31-39.
- Young, A. W., Newcombe, F., de Haan, E. H. F., Small, M., & Hay, D. C. (1993). Face perception after brain injury: Selective impairments affecting identity and expression. *Brain*, 116, 941-959.
- Young, A., Perrett, D., Calder, A., Sprengelmeyer, R., & Ekman, P. (2002). *Facial Expressions of Emotion – Stimuli and Tests (FEEST)*. England: Thames Valley Test Company.
- Young, A. W., Rowland, D., Calder, A. J., Etcoff, N. L., Seth, A., & Perrett, D. I. (1997). Facial expression megamix: Tests of dimensional and category accounts of emotion recognition. *Cognition*, 63, 271-313.
- Yuille, A. L. (1991). Deformable templates for face recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3, 59-70.
- Zacks, J., Rypma, B., Gabrieli, J. D. E., Tversky, B., & Glover, G. H. (1999). Imaged transformations of bodies: An fMRI investigation. *Neuropsychologia*, 37, 1029-1040.