



Institut de Mécanique des Fluides
et des Solides de Strasbourg
UMR ULP-CNRS 7507



THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg I)

Discipline : **Sciences du Vivant**

Spécialités : **Neurosciences, Sciences Cognitives**

Étude psychophysique et modélisation des traitements de
bas niveau sous-tendant la vision des contours des objets

par

Tzvetomir Tzvetanov

soutenue publiquement le 26 novembre 2003

Membres du jury :

| | | |
|-----------------------|---------------|--|
| Directrice de thèse : | Mme B.Dresp, | Chargée de recherche au CNRS |
| Rapporteur interne : | M C.Bonnet, | Professeur à l'Université Louis Pasteur |
| Rapporteur externe : | M M.J.Morgan, | Professeur à la City University London |
| Rapporteur externe : | M O.Koenig, | Professeur à l'Université Lumière Lyon 2 |
| Membre examinateur : | M Y.Rémond, | Professeur à l'Université Louis Pasteur |

Remerciements

Je souhaite remercier Mme B.Dresp de m'avoir proposé ce sujet de thèse et d'avoir accepté d'encadrer un doctorant d'un autre domaine scientifique. Qu'elle trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour la qualité de son encadrement et implication durant ces trois années de travail en commun. Je remercie les membres du jury pour avoir accepté de lire, commenter et examiner mon travail de thèse.

Merci à tous les (ex)membres de l'"équipe Illkirch" de l'IMFS, sans qui une majeure partie de ce travail n'existerait pas : Anne, Benoît, Christophe, Daniel, Jean-Charles, Mohamad, Philippe, Stéphane, Sébastien F. et Sébastien R. ; aide matérielle et discussions scientifiques ont permis de clarifier nombreux points de doute et de faire avancer le travail.

Anne et Cyril (& co.), par leur amitié et conseils avisés, m'ont aussi permis de continuer.

Lidwine, Lina et Jérémy, qui sont venus me voir en cherchant une thématique qui les intéresse, m'ont aidé avec leur travail ainsi que par leurs approches nouvelles.

Je n'oublie pas toutes les personnes qui ont participé aux nombreuses expériences, dont une partie seulement est présentée dans cette thèse et sans qui ce travail n'existerait pas. Merci de leur bénévolat.

Ce travail n'aurait pas put être achevé sans le soutien financier de fin de thèse de la Société de Secours des Amis des Sciences, 16 rue Mazarine, 75006 Paris.

Merci Wilfried, Sarah (& co.) et Vincent.

Résumé

Les mécanismes de formation des contours sont connus pour avoir des propriétés fonctionnelles différentes (Polat , 1999; Dresch , 1999, 2000). Une étude de l'intégration de l'information spatiale entre éléments de lignes coaxiaux a été effectuée.

Deux régimes sont présents, différenciés à partir d'une séparation spatiale d'environ un quart de degré d'angle visuel : les régimes courte et longue distance. Le premier a été intensivement étudié, contrairement au deuxième. En utilisant une approche expérimentale et par modélisation, les caractéristiques fonctionnelles du régime longue distance ont été mesurées et attribuées en partie à l'aire visuelle primaire de l'Homme.

Les expériences ont permis d'obtenir les différentes caractéristiques psychophysiques. Avec des stimuli de polarités positives, le régime courte distance a pour limites spatiales 0 et un tiers de degré, et est sensible à l'intensité de l'inducteur (Expérience 1). Le régime longue distance a pour limites spatiales un tiers de degré et 2,5 degrés, et n'est pas sensible à l'intensité de l'inducteur (Expérience 1). Le régime longue distance semble être de manière générale facilitateur pour la détection de la cible (Expérience 2 et 5), quelles que soient la polarité et l'intensité de l'inducteur. Par contre, des différences entre polarités opposées et identiques des stimuli sont présentes pour ce régime. Les interactions *OFF-vers-ON* sont de manière générale beaucoup moins facilitatrices que les autres interactions dans le régime longue distance (Expérience 2 et 5). La luminance du fond sur lequel sont présentés les stimuli semblait intervenir dans les interactions (Expérience 2), mais l'étude contrôle sur des sujets naïfs n'a pas montré d'effet du fond (Expérience 5). En fonction de la séparation spatiale entre les deux stimuli, il est possible d'obtenir une interaction entre les deux régimes si le stimulus inducteur est placé de manière à ce que les deux régimes soient en compétition pour la détection de la cible (Expérience 3). Pour des polarités positives des stimuli, le régime longue distance s'est avéré posséder une plasticité visuelle spécifique à la direction d'alignement des stimuli (Expérience 4) : la direction verticale a montré une augmentation des seuils de détection des sujets au début des expériences, et la direction horizontale une diminution des seuils de détection des sujets au début des expériences.

Par la suite, nous avons tenté de modéliser ces résultats expérimentaux au moyen du modèle LAMINART (Raizada & Grossberg , 2001). Ce modèle simule certaines propriétés fonctionnelles des neurones du cortex visuel primaire (V1). Celui-ci permet de reproduire de manière globale les effets dus aux polarités, mais ne semble pas être sensible au facteur "séparation spatiale".

Les résultats de cette thèse soutiennent l'idée que les deux régimes d'intégration de l'information spatiale d'iso-orientation sont principalement présents dans le cortex visuel primaire de l'Homme.

Mots clés : psychophysique, vision, régime courte distance, régime longue distance, modélisation, réseau de neurones, LAMINART, théorie de la résonance adaptative, ART, seuil de détection, contraste, écart-type, non linéaire, lignes, Gabor.

Abstract

Psychophysical study and modelling of the low level vision involved in contour integration

The mechanisms of contour formation are known to have different functional properties (Polat , 1999; Dresch , 1999, 2000). A study of the integration of space information between coaxial elements of lines was carried out.

Two regimes are present, differentiated from a space separation of approximately a quarter of degree of visual angle : short- and long-range distance regimes. The first one was intensively studied, contrary to the second one. By using an experimental approach and by modeling, the functional characteristics of the long-range regime were measured and partly explained by the primary visual cortex of the Man.

The experiments made it possible to obtain some psychophysical characteristics. With stimuli of positive polarities, the short-range regime goes from zero to one third of degree, and is sensitive to the intensity of the inducer (Experiment 1). The long-range regime goes from one third of degree to 2,5 degrees, and is not sensitive to the intensity of the inducer (Experiment 1). The long-range regime seems to be in a general way facilitatory for detection of the target (Experiment 2 and 5), whatever the polarity and the intensity of the inducer. On the other hand, differences between opposite and identical polarities of the stimuli are present for this regime. The interaction *OFF-to-ON* is in a general way much less facilitatory than the other interactions (Experiment 2 and 5). The luminance of the background field on which the stimuli are presented seemed to interfere in the interactions (Experiment 2), but the control study on naive subjects did not show an effect of this parameter (Experiment 5). According to the space separation between the two stimuli, it is possible to obtain an interaction between the two regimes if the inductive stimulus is placed so that the two regimes compete for the detection of the target (Experiment 3). For positive polarities of the stimuli, the long-range regime proved to have a visual plasticity specific to the direction of alignment of the stimuli (Experiment 4) : the vertical direction shows an increase in the detection thresholds of the subjects at the beginning of the experiments, and the horizontal direction a reduction in the detection thresholds of the subjects at the beginning of the experiments.

Thereafter, we tried to model these experimental results with the LAMINART model (Raizada & Grossberg , 2001). It simulates a part of the functional properties of the neurons of the primary visual cortex (V1). It reproduces, in a global way, the effects due to the polarities, but does not seem to be sensitive to the factor "space separation".

The results of this thesis support the idea that the two regimes of integration of the space information of Iso-orientation are mainly influenced by the primary visual cortex of the Man.

Key words : psychophysics, vision, short-range, long-range, modeling, neural networks, LAMINART, ART, contrast detection threshold, standard deviation, nonlinear, lines, Gabor.

Table des matières

| | |
|---|-------------|
| Remerciements | iii |
| Résumé | v |
| Abstract | vii |
| Introduction générale | xvii |
| 1 Le système visuel | 1 |
| 1.1 Le modèle LAMINART | 3 |
| 2 Estimation des écart-types des paramètres seuil et pente de la fonction psychométrique | 5 |
| 2.1 Méthode | 8 |
| 2.1.1 La fonction psychométrique | 8 |
| 2.1.2 Les paramètres de la fonction psychométrique | 8 |
| 2.1.3 Procédure | 9 |
| 2.1.4 Les fichiers de données | 10 |
| 2.2 Résultats | 11 |
| 2.2.1 Seuils | 11 |
| 2.2.2 Pentes | 14 |
| 2.3 Conclusion | 16 |
| 3 Etude expérimentale des interactions spatiales entre segments visuels iso-orientés | 19 |
| 3.1 Etat des connaissances | 21 |
| 3.2 Expérience 1 : Etendue spatiale des régimes d'intégration courte et longue distance | 28 |
| 3.2.1 Méthodes | 28 |
| 3.2.2 Résultats | 29 |
| 3.2.3 Discussion | 31 |
| 3.3 Expérience 2 : Caractéristiques fonctionnelles du régime longue distance | 32 |
| 3.3.1 Méthodes | 33 |
| 3.3.2 Résultats | 35 |
| 3.3.3 Discussion | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4 | Expérience 3 : Interactions des deux régimes d'intégration spatiale | 43 |
| 3.4.1 | Méthodes | 43 |
| 3.4.2 | Résultats | 43 |
| 3.4.3 | Discussion | 45 |
| 3.5 | Expérience 4 : L'apprentissage perceptif | 48 |
| 3.5.1 | Méthodes | 49 |
| 3.5.2 | Résultats | 51 |
| 3.5.3 | Discussion | 54 |
| 3.6 | Expérience 5 : Etude contrôle relative au régime longue distance | 59 |
| 3.6.1 | Méthodes | 59 |
| 3.6.2 | Résultats | 61 |
| 3.6.3 | Discussion | 64 |
| 3.7 | Discussion générale des résultats et conclusions | 65 |
| 3.7.1 | Stimuli du type patch de Gabor ou D6 | 67 |
| 3.7.2 | Direction d'alignement des stimuli | 69 |
| 3.7.3 | Effet longue distance avec des polarités opposées | 71 |
| 3.7.4 | Plasticité visuelle en fonction des polarités, du régime d'interaction, et de la direction d'alignement | 71 |
| 3.7.5 | Voies ON et OFF et contours visuels | 72 |
| 3.7.6 | Correspondances neurophysiologiques | 73 |
| 4 | Modélisation des interactions spatiales entre segments visuels iso-orientés | 75 |
| 4.1 | Le modèle LAMINART | 76 |
| 4.1.1 | Rétine | 78 |
| 4.1.2 | Corps Genouillé Latéral | 79 |
| 4.1.3 | Couche 4(S) | 79 |
| 4.1.4 | Couche 6 | 81 |
| 4.1.5 | Couche 4(Y) | 81 |
| 4.1.6 | Couche 2/3 | 84 |
| 4.1.7 | Implémentation et modélisation | 84 |
| 4.2 | Simulation "RETINE-Bloc1" | 85 |
| 4.2.1 | Définition du seuil de détection | 86 |
| 4.2.2 | Résultats des simulations | 88 |
| 4.3 | Simulation "RETINE-Bloc1-Bloc2" | 95 |
| 4.4 | Discussion générale des simulations et conclusions | 103 |
| 4.4.1 | Le régime longue distance | 103 |
| 4.4.2 | Interactions entre polarités identiques | 103 |
| 4.4.3 | Interactions entre polarités opposées | 104 |
| 4.4.4 | Correspondances entre valeurs physiques de la luminance et valeurs nu- mériques en entrée de la rétine | 104 |

| | |
|---|------------|
| 5 Conclusions générales et perspectives | 107 |
| Bibliographie | 113 |
| A Stimuli visuels et lois psychophysiques | 121 |
| A.1 Des lignes ou bord de surface | 121 |
| A.2 Patch de Gabor | 122 |
| A.3 Stimulus D6 | 123 |
| A.4 Comparaison entre stimuli Gabor et stimuli lignes | 124 |
| A.5 Lois psychophysiques | 125 |
| B La fonction psychométrique | 127 |
| B.1 Les fonctions psychométriques théoriques | 129 |
| B.2 Fonctions utilisées et ajustement | 131 |
| B.3 Seuil et pente à 75% de réponses correctes | 132 |
| B.4 Écart-types dans le cadre du calcul asymptotique | 132 |
| B.5 Algorithme bootstrap | 133 |
| C Analyse de la variance | 135 |
| D Listing du code source | 137 |
| E Publications | 151 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Présentation schématique du cortex visuel primaire | 2 |
| 2.1 | Exemple de données ajustées avec une fonction logistique et une fonction Weibull | 7 |
| 2.2 | Comparaison des écart-types bootstraps et asymptotiques des seuils obtenus pour les paramètres de la fonction logistique | 12 |
| 2.3 | Comme pour la figure 2.2. Ici, ce sont les écart-types des seuils pour la fonction Weibull qui sont comparés. | 13 |
| 2.4 | Comme pour la figure 2.2. Ici, ce sont les écart-types des pentes pour la fonction logistique qui sont comparés. | 15 |
| 2.5 | Comme pour la figure 2.2. Ici, ce sont les écart-types des pentes pour la fonction Weibull qui sont comparés. | 16 |
| 3.1 | Exemple des stimuli visuels utilisés dans les expériences de cette thèse. | 20 |
| 3.2 | Données de (a) Polat & Sagi (1993, 1994a), (b) Wehrhahn & Dresp (1998), (c) Solomon et al. (1999), et (d) Solomon et al. (1999) et Morgan & Dresp (1995) | 23 |
| 3.3 | Amplitude de facilitation/masquage en fonction de la distance entre la cible et l'inducteur : données de Dresp (1993), Morgan & Dresp (1995) et Brincat & Westheimer (2000) | 25 |
| 3.4 | Amplitude de facilitation/masquage de la cible en fonction de la séparation angulaire entre les deux stimuli | 30 |
| 3.5 | Illustration des stimuli visuels présentés pour une luminance du fond faible et forte | 34 |
| 3.6 | Amplitude de facilitation (valeur < 1) / masquage (valeur > 1) en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur | 36 |
| 3.7 | Comme pour la figure 3.6, ici pour une luminance du fond de 20 cd/m ² | 37 |
| 3.8 | Comme pour la figure 3.6, ici pour une luminance du fond de 40 cd/m ² | 37 |
| 3.9 | Seuil de détection du contraste de la cible seule en fonction du niveau de luminance du fond pour des cibles noires et blanches | 39 |
| 3.10 | Seuil de détection du contraste et amplitude de facilitation/masquage d'une cible blanche avec un inducteur noir en fonction de la luminance du fond | 40 |
| 3.11 | Résumé des interactions longues distances entre les voies ON et OFF | 41 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.12 | Exemple d'un stimulus inducteur noir, de longueur suffisante pour que, placé à une courte distance d'une cible blanche, il implique les deux régimes spatiaux d'intégration de l'orientation. | 43 |
| 3.13 | Résumé des résultats pour les expériences 2 et 3 | 45 |
| 3.14 | Seuil de détection du contraste du sujet en fonction du numéro du fichier analysé | 51 |
| 3.15 | Seuil de détection du contraste de la cible en fonction du numéro du fichier analysé au cours de l'apprentissage | 52 |
| 3.16 | Données du fichier 100 ₅ du sujet MCN | 55 |
| 3.17 | Diagrammes d'interactions deux à deux entre les trois facteurs de l'expérience. | 63 |
| 3.18 | Amplitude de facilitation/masquage en fonction de la séparation spatiale bord à bord cible-inducteur pour des stimuli Gabor et des stimuli à polarités opposées | 70 |
| 3.19 | L'illusion visuelle du vase de Rubin avec seulement les contours du vase/visage | 72 |
| 4.1 | Présentation schématique du modèle LAMINART | 77 |
| 4.2 | Image présentant les deux lobes de la différence de Gaussiennes décalées . . . | 80 |
| 4.3 | Connexions entre la couche 6 (X_{ijk}) et la couche 4(Y) (Y_{ijk}), passant par les interneurons m_{ijk} | 82 |
| 4.4 | Exemple des activités obtenues dans les couches Rétine, CGL et 4(S) | 86 |
| 4.5 | Activité A_{cumul} de la couche 4(S) en fonction du contraste de la cible | 87 |
| 4.6 | Fonctions de réponses au contraste de deux neurones de type simple | 89 |
| 4.7 | Fonctions de réponses au contraste de 6 neurones de type S_{ij0} | 90 |
| 4.8 | Courbe d'activité A_{cumul}^S de la couche 4(S) en fonction du contraste de l'inducteur (C_i) et de la cible (C_c) | 91 |
| 4.9 | Amplitude de facilitation/masquage obtenue pour la couche 4(S) en fonction du contraste de l'inducteur, de la séparation cible-inducteur ($d_{ci} = 0, 1, 2$ et 3 pixels) et de l'intensité du fond en entrée de l'image. Interactions ON-vers-ON . | 92 |
| 4.10 | Comme pour la figure 4.9, ici pour les interactions OFF-vers-OFF | 93 |
| 4.11 | Comme pour la figure 4.9, ici pour les interactions ON-vers-OFF | 93 |
| 4.12 | Comme pour la figure 4.9, ici pour les interactions OFF-vers-ON | 94 |
| 4.13 | Fonctions de réponses au contraste de 6 neurones de type S_{ij0} de la couche 4(S) | 96 |
| 4.14 | Fonctions de réponses au contraste de 6 neurones de type Z_{ij0} de la couche 2/3 | 97 |
| 4.15 | Amplitude de facilitation/masquage obtenue pour les couches 4(S), 4(Y) et 2/3. Interactions ON-vers-ON | 99 |
| 4.16 | Comme pour la figure 4.15. Ici, interactions OFF-vers-OFF | 100 |
| 4.17 | Comme pour la figure 4.15. Ici, interactions ON-vers-OFF | 101 |
| 4.18 | Comme pour la figure 4.15. Ici, interactions OFF-vers-ON | 102 |
| A.1 | Exemple de stimuli du type bord de surface et du type ligne | 121 |
| A.2 | Exemple d'une fonction $D6$ avec orientation préférentielle selon l'axe y | 123 |
| A.3 | Exemple de stimuli Gabor | 125 |

| | | |
|-----|---|-----|
| A.4 | Lois de de Vries-Rose et Weber pour la détection d'une cible | 126 |
| B.1 | Exemple de données brutes d'un sujet | 128 |
| B.2 | Probabilité d'obtenir une proportion de bonnes réponses étant donné le nombre d'essais et la proportion de bonnes réponses théoriques attendue | 129 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Différences moyennes entre seuils de la fonction Weibull ($x_{75}^{(W)}$) et la fonction logistique ($x_{75}^{(L)}$) en fonction du nombre de niveaux du stimulus (k) et du nombre d'essais par niveau de stimulus (n) | 13 |
| 2.2 | Comme pour le tableau 2.1, ici pour les pentes. Les différences entre pentes sont en unités de proportion de réponses correctes par unité d'intensité lumineuse ($p_c/(cd/m^2)$). | 16 |
| 3.1 | Résumé des différentes études explicitement ciblées sur la mesure des interactions entre éléments visuels iso-orientés | 21 |
| 3.2 | Résumé des conditions expérimentales des différents sujets ayant participé dans les expériences d'apprentissage perceptif | 49 |
| 3.3 | Moyennes et écart-types ($\mu \pm \sigma$) des cinq valeurs du seuil de détection du contraste de l'expérience 5 | 61 |
| 3.4 | Résultats de l'analyse de la variance effectuée sur les rapports des moyennes | 62 |
| 3.5 | Résultats de la deuxième analyse de la variance et des comparaisons multiples deux à deux des quatre niveaux du facteur Condition Expérimentale | 62 |

Introduction générale

La perception de notre environnement passe par la vision, l'ouïe, le toucher, l'odorat, ou le goût. Les représentations perceptives que nous obtenons à partir des informations sensorielles sont générées par le cerveau après traitement par différents systèmes neurocognitifs spécialisés, dont de nombreux ont été fonctionnellement identifiés grâce aux paradigmes expérimentaux développés en neurosciences cognitives. L'étude de l'encodage des informations sensorielles, et la manière dont elles sont interprétées par le cerveau, constitue un vaste domaine de recherche qui peut être subdivisé soit en fonction des différentes étapes de traitement de l'information, soit en fonction des structures du cerveau qui assurent ces traitements, ou encore en fonction des techniques utilisées pour les mettre en évidence.

En ce qui concerne l'étude de la vision chez l'Homme, l'une des approches expérimentales se fonde sur l'étude psychophysique du traitement des premières étapes de transformation des stimuli. Une approche théorique complémentaire s'est développée depuis les années 60, à travers la modélisation numérique avec le domaine de l'analyse des systèmes de réseaux de neurones artificiels. Le sujet abordé dans ce travail concerne la vision humaine en générale et, en particulier, les premières étapes de transformation des informations visuelles par le cerveau sous-tendant la genèse d'une représentation des contours d'un objet. De nombreux résultats neurophysiologiques, psychophysiques et théoriques convergent vers l'idée que le premier codage des contours des objets se fait au niveau du cortex visuel primaire (aire V1). Ce dernier traite exclusivement les informations visuelles provenant des corps genouillés latéraux (CGLs) en les modulant par des rétroactions provenant de systèmes qui assurent des traitements de plus haut niveau.

De nombreux facteurs interviennent dans la création de la représentation du contour d'un objet. Ce sont par exemple les informations de chromaticité, les surfaces avec des luminances et couleurs différentes ou encore la séparation entre les différents éléments du contour. Dans ce travail, nous nous restreignons à l'étude de l'intégration de l'information spatiale entre segments de lignes iso-orientés¹ et achromatiques.

En se limitant aux interactions à éléments iso-orientés sans autre type de facteurs (surface, fond non uniforme...), les publications montrent que deux régimes distincts de l'intégration de l'information spatiale sont présents : le premier appelé régime d'intégration courte distance,

¹Le néologisme *iso-orienté* est utilisé pour bien préciser que les segments de lignes sont parallèles et placés sur la même droite. Le terme colinéaire est communément utilisé comme un synonyme dans la littérature psychophysique.

et le deuxième régime d'intégration longue distance. En utilisant la méthode de mesure du seuil de détection du contraste, une partie de la littérature a utilisé des stimuli visuels du type Gabor (voir Polat & Sagi , 1993, 1994a,b; Zenger & Sagi , 1996, et l'annexe A.2 pour leurs définitions). Ces auteurs ont montré que quand un stimulus cible, qui devait être détecté par les sujets, était présenté avec des stimuli iso-orientés (appelés stimuli inducteurs), le régime courte distance semble être présent jusqu'à des séparations spatiales entre éléments Gabor de deux à trois longueurs d'ondes. Au-delà, un deuxième régime est présent : le régime longue distance. Le régime courte distance produit de manière globale un masquage de la détection de la cible, c'est à dire que pour détecter la cible, il était nécessaire de la présenter aux sujets avec un contraste plus fort par rapport à la condition où la cible était présentée seule aux sujets. Le régime longue distance produit de manière globale une facilitation de la détection de la cible, c'est à dire que pour détecter la cible, il était nécessaire de la présenter aux sujets avec un contraste plus faible par rapport à la condition où la cible était présentée seule aux sujets.

Une autre partie de la littérature psychophysique a utilisé des stimuli visuels du type bord de surface, lignes ou point (voir Brincat & Westheimer , 2000; Yu & Levi , 1997; Dresch , 1993; Dresch & Grossberg , 1997, et l'annexe A.1 pour leurs définitions). Ces publications ont montré que pour des séparations spatiales bord à bord entre les éléments iso-orientés, un régime courte distance facilitateur entre 0 et environ un quart de degré d'angle visuel est présent. Au-delà de cette distance, les publications qui ont utilisé des cibles du type point (Dresch , 1993; Morgan & Dresch , 1995) ont montré qu'aucun effet sur la détection de la cible n'était présent. Ce régime semble être sensible aux polarités des stimuli et à l'intensité de l'élément inducteur. Les publications ayant utilisé des cibles du type segments de lignes (Wehrhahn & Dresch , 1998; Brincat & Westheimer , 2000) ont montré que pour une séparation spatiale de un tiers de degré d'angle visuel, la polarité des stimuli n'était plus un facteur influant sur la facilitation ou le masquage de la cible. Quelle que soit la polarité de l'élément inducteur, une facilitation de la détection du stimulus cible était toujours mesurée. Dresch & Grossberg (1997) donnent des indications que ce deuxième régime, régime longue distance, s'étend jusqu'à des séparations spatiales d'environ 2,5 degrés.

De ces différentes publications, il apparaît que la définition des deux régimes n'est pas identique en fonction du type de stimuli utilisés. Par ailleurs, les caractéristiques fonctionnelles du régime longue distance pour les stimuli du type lignes ne sont pas bien connues. Les effets des facteurs séparation spatiale, intensité du stimulus inducteur et luminance du fond sur les interactions entre les stimuli n'ont pas été étudiés.

D'un autre côté, un effort intensif de modélisation de ces interactions psychophysiques est effectué (Watson & Solomon , 1997; Chen, Kasamatsu, Polat & Norcia , 2001; Grossberg & Williamson , 1999, 2001), pour permettre de comprendre quelle partie du système visuel peut reproduire ce genre d'interaction. Ainsi, par analogie entre les modèles et les connaissances neurophysiologiques, une localisation des interactions psychophysiques peut être faite. Ces modélisations sont basées sur les connaissances neurophysiologiques les plus récentes du système

visuel primaire des mammifères (pour une revue, voir Callaway , 1998). Une partie des modèles utilisent principalement des mécanismes pro-actifs², avec un seul mécanisme de rétroaction intracouche (Watson & Solomon , 1997; Chen, Kasamatsu, Polat & Norcia , 2001). Un autre modèle est basé sur les connaissances de la structure laminaire du cortex primaire et sur la théorie de la résonance adaptative (sigle anglais : *ART*), le modèle LAMINART. Il a été utilisé pour simuler différents résultats psychophysiques et neurophysiologiques : la modulation des activités neurales au niveau du cortex visuel primaire par un système attentionnel, la coopération/compétition entre le système de groupement perceptif d'éléments de contour et le système attentionnel, ainsi que la modulation par la présence d'un inducteur de la fonction de réponse au contraste d'un neurone répondant de manière maximale à une cible (Grossberg & Williamson , 1999; Grossberg & Raizada , 2000; Grossberg & Williamson , 2001; Raizada , 2001; Raizada & Grossberg , 2001, 2003).

Le but de cette thèse était d'étudier et modéliser les interactions entre segments de lignes iso-orientés et achromatiques. Ces interactions sont communément dissociées en deux régimes. Le premier est appelé régime courte distance et le deuxième régime longue distance. Ils sont fonctionnellement distincts. Il s'avère que le premier a été bien étudié avec différents types de stimuli et méthodes expérimentales, bien que sa définition diffère en fonction du type de stimuli utilisés. Le travail qui est présenté concerne spécifiquement le régime longue distance dans le cadre des études expérimentales avec stimuli du type ligne, ainsi que la question d'une possible interaction entre les deux régimes pour la création de la représentation d'un contour. Une modélisation par réseau de neurones (modèle LAMINART de Stephen Grossberg et ses collaborateurs) est abordée. Elle est utilisée pour vérifier la possible explication des résultats expérimentaux par la structure laminaire du cortex visuel primaire.

Le premier chapitre effectue un bref rappel des récentes connaissances neurophysiologiques obtenues sur le système visuel primaire des mammifères. Il reprend les arguments de Raizada (2001) sur les raisons de la structure du modèle LAMINART.

Le deuxième chapitre présente la méthode d'estimation des écart-types des paramètres d'une fonction théorique, dans le cadre des études psychophysiques utilisant la méthode expérimentale des stimuli constants. Cette étude était nécessaire car c'est sur la base de ces écart-types que des différences entre conditions expérimentales peuvent être inférées. L'étude se base sur des publications antérieures montrant qu'une méthode Monte-Carlo, appelée "bootstrap" (Efron , 1979; Maloney , 1990; Foster & Bischof , 1991), s'avère être plus juste pour fournir les intervalles de confiance des paramètres expérimentaux mesurés. Une comparaison des écart-types asymptotiques avec ceux de la méthode bootstrap y est effectuée.

Le troisième chapitre présente les différentes expériences effectuées pour caractériser de manière psychophysique les interactions longues distances. En premier, un état des lieux des publications du domaine y est effectué, suivi par les cinq expériences, chacune servant à carac-

²le néologisme pro-actif, *action vers l'avant*, est communément utilisé en opposition au terme rétroactif, *action vers l'arrière*.

tériser certains aspects de ces interactions.

Le quatrième chapitre présente le modèle LAMINART et les différents résultats des simulations numériques directement comparables aux travaux expérimentaux du chapitre trois.

Une tentative de synthèse des expériences et des simulations réalisées dans le cadre de cette thèse est effectuée dans le dernier chapitre.

Chapitre 1

Le système visuel

Avant d'aborder les différents points traités dans cette thèse, dans cette partie sont présentés les quelques caractéristiques du cortex visuel primaire qui ont été établies récemment, et qui sont utilisées tout au long de cette thèse comme base des discussions sur les correspondances neurophysiologiques entre les résultats expérimentaux et les connaissances neurophysiologiques. Dans une deuxième partie sont présentées les raisons de la structure du modèle LAMINART, utilisé pour les simulations numériques.

Pour une introduction générale au système visuel et les différentes notions neuroscientifiques fondamentales, le lecteur pourra se reporter aux références :

- Hubel (1994) pour une introduction générale à la vision et au cortex visuel primaire ;
- Kandel, Schwartz, & Jessel (1991), les chapitres 28 (M. Tessier-Lavigne, "Phototransduction and information processing in the retina"), 29 (C. Mason & E.K. Kandel, "Central visual pathways"), 30 (E.R. Kandel, "Perception of motion, depth, and form") et 31 (P. Gouras, "Color Vision").

Les différentes voies visuelles

Plusieurs voies visuelles transmettent l'information de la rétine vers l'aire V1 :

- Le système des voies ON et OFF qui transmet les informations de polarité de l'image. Ceci permet un codage de l'information rétinienne sur deux voies séparées (Schiller , 1992, 1995).
- Le système des voies Magnocellulaires (M) et Parvocellulaires (P), ayant des neurones à champs récepteurs de caractéristiques spatiales et temporelles distinctes (voir Lee , 1996; Croner & Kaplan , 1995, pour la rétine). A ces deux voies se rajoute une troisième voie, appelée la voie Koniocellulaire, ayant des neurones à champ récepteurs de caractéristiques se situant entre celles des voies M et P (Irvin, Casagrande & Norton , 1993; Casagrande , 1994, 1999).

Ces deux systèmes de voies parallèles sont entrecroisés de telle manière qu'il y a des cellules des voies ON et OFF dans chacune des voies M et P (et donc vice versa) (voir Croner & Kaplan , 1995; Lee , 1996). Ces voies sont présentes à partir de la rétine, et de manière indépendante transmettent les informations au cortex visuel primaire, à travers les corps genouillés latéraux (CGLs).

Le cortex visuel primaire

L'aire visuelle V1 effectue le premier traitement de codage des directions des stimuli. Elle est subdivisée en six couches, physiologiquement distinctes (voir la figure 1.1). Ces couches sont maintenant connues comme ayant des neurones à champs récepteurs simples et complexes (voir Hubel , 1994), ainsi qu'une structure spatiale en hypercolonnes à dominance oculaire, et hypercolonnes orientationnelles (Hubel & Wiesel , 1974a,b; Wiesel & Hubel , 1974). De plus, chaque couche peut être divisée en un certain nombre de sous-couches, qui varient en fonction des espèces animales.

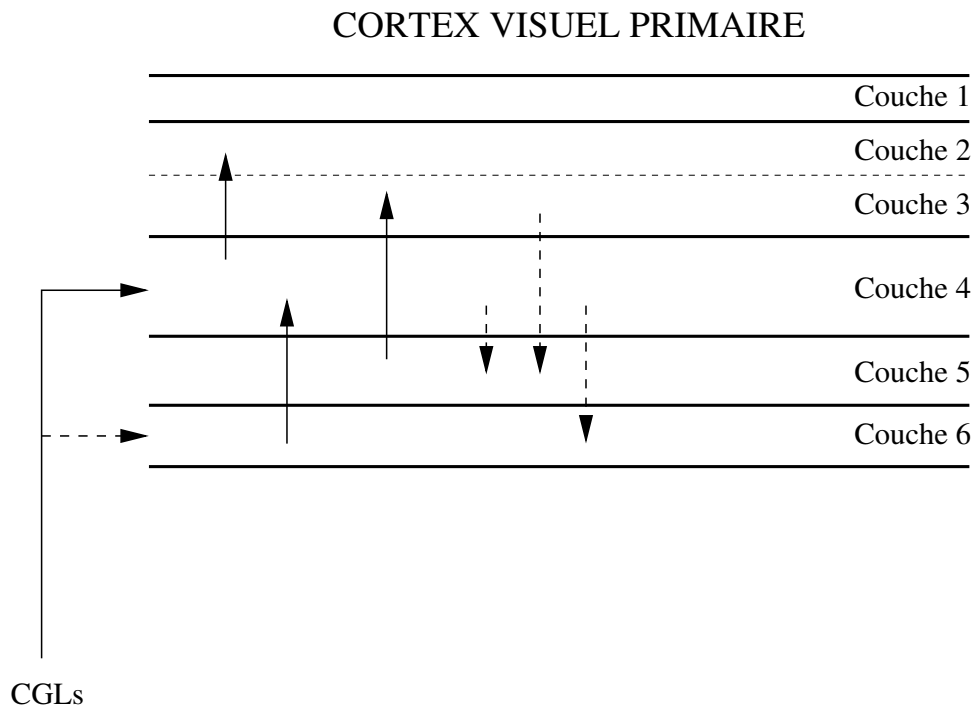


FIG. 1.1 – Présentation schématique du cortex visuel primaire, et connexions du modèle cortical proposé par Callaway (1998). Les couches 2 et 3 sont séparées par une ligne en pointillés, car chez les mammifères, les connexions de la couche 4 peuvent être envoyées vers ces deux couches simultanément. Ces deux couches sont parfois communément rassemblées en une seule, appelée couche 2/3. Les flèches en trait plein correspondent aux connexions du modèle à pondération importante, les flèches en trait interrompu à des connexions parallèles modulatrices.

Les connexions des différents neurones à l'intérieure de l'aire V1 ont été étudiées de manière intensive. Callaway (1998) présente une revue des connaissances acquises sur ce point, et propose un modèle neural simple à deux niveaux de hiérarchie pour le traitement de l'information (voir la figure 1.1 pour les connexions du modèle). Les corps genouillés latéraux (CGLs)

envoient principalement leurs connexions dans la couche 4, entrée directe majeure du cortex visuel, mais aussi dans la couche 6, entrée parallèle dans le cortex primaire, par des connexions CGLs \rightarrow 6 (Callaway , 1998). Il existe aussi une entrée indirecte directement dans les "Blobs de cytochrome oxydase" (blobs de CO) de la couche 2/3 et vers la couche 1, provenant des neurones de la voie Koniocellulaire des CGLs. La connexion principale de la couche 4 se fait vers la couche 2/3, à travers soit une connexion directe $4 \rightarrow 2/3$, soit une connexion indirecte passant par certaines des sous-couches 4 ("sous-couche 4" \rightarrow "sous-couche 4" $\rightarrow 2/3$). Les connexions reçues par la couche 2/3 varient en fonction de la position du neurone par rapport aux domaines des "Blobs de CO", mais aussi en fonction de la profondeur dans la couche où se situe le neurone. De plus, des connexions intracouches 2/3 existent, appelées connexions horizontales, qui s'étendent sur des longueurs allant jusqu'à 7-8 millimètres. Ces connexions horizontales relient spécifiquement des hypercolonnes iso-orientées dans le champ visuel (Bosking, Zhang, Schofield, & Fitzpatrick , 1997). Ce type de connexions horizontales intracouche est aussi présent dans la couche 5 (voir le premier chapitre de la thèse de Raizada , 2001).

1.1 Le modèle LAMINART

Le modèle de S. Grossberg et ses collaborateurs (Grossberg & Williamson , 1999, 2001; Raizada , 2001; Raizada & Grossberg , 2001, 2003) intègre les points les mieux connus de l'anatomie de l'aire V1 et fait quelques suppositions sur la nature de certaines connexions intercouches. Il utilise une architecture de réseau de neurones qui se base sur la théorie de la résonance adaptative (sigle anglais : ART). Pour une revue sur les équations de l'architecture ART, voir Grossberg (1988), ou pour les articles originaux, Grossberg (1976a,b) (pour une traduction en français de ces derniers articles, voir le chapitre 4 de la thèse de Kant , 1996).

Le modèle LAMINART est structuré en couches, chaque couche correspondant à un type de neurones du cortex primaire.

Couche 4

La couche 4 du modèle contient les neurones de type simple, effectuant le premier codage de l'information de la direction. Elle peut être considérée comme équivalente au système Parvocellulaire de la couche 4 physiologique, qui est supposé effectuer le traitement de la forme (Raizada , 2001, p.22).

Couche 2/3

La couche 2/3 du modèle contient les neurones de type complexe, supposés effectuer un premier regroupement des informations sur les contours et les formes. Cette couche rassemble les couches physiologiques 2 et 3, ainsi que probablement la couche 5. C'est dans ces couches que les connexions horizontales longues distances sont présentes. Le modèle intègre spécifiquement ces connexions dans cette couche.

Entrée CGL → couche 4

Les entrées directes CGL → couche 4, nommées couche 4(S) dans cette thèse, ont directement des correspondances neurophysiologiques. Les champs récepteurs des cellules de type simple ont des subrégions ON et OFF qui ont des connexions spécifiques aux neurones de type ON et OFF du CGL. Cette architecture a été reprise à partir de données neurophysiologiques (voir Raizada , 2001, p.23, §2.1.2).

Comme le modèle a été créé à partir des connaissances neurophysiologiques pour modéliser spécifiquement la création des formes et des contours, son utilisation dans ce travail s'est avérée des plus intéressantes. R. Raizada l'a utilisé pour expliquer des processus de haut niveau observés dans le cortex primaire, alors que normalement ces processus sont associés à des aires corticales de haut niveau. Son travail a principalement montré que le modèle permettait d'expliquer les phénomènes de modulation de l'activité au niveau de l'aire V1 par un système attentionnel, et que le processus de regroupement perceptif des contours d'un objet était en interaction avec le système attentionnel, conformément à certaines expériences neurophysiologiques.

Dans notre travail, nous avons étudié l'interaction entre segments de lignes achromatiques et iso-orientés. Le modèle est spécifiquement construit avec les deux voies visuelles ON et OFF. Ainsi, quasiment aucune modification du modèle n'était nécessaire pour son utilisation. Si nous supposons que les interactions observées dans nos expériences de psychophysique résultent principalement des interactions entre ensembles neuraux dans le système visuel primaire, il devrait être possible de modéliser une partie des résultats expérimentaux avec le modèle LAMINART.

Chapitre 2

Estimation des écart-types des paramètres seuil et pente de la fonction psychométrique

Dans le cadre de la mesure des performances d'un sujet dans une tâche de détection ou de discrimination avec la méthode des stimuli constants, les psychophysiciens représentent la distribution des réponses du sujet en fonction du niveau du stimulus comme une fonction continue et monotone. Elle est appelée fonction psychométrique et est supposée être croissante avec le niveau de stimulation, partant d'un niveau $\{0\}$, où pour les tâches de détection le sujet ne voit pas le stimulus, pour arriver à un niveau $\{1\}$, où le sujet est sûr de voir le stimulus. Les fonctions les plus communément utilisées en psychophysique pour représenter cette transition probabiliste sont la fonction Gaussienne cumulée (encore appelée fonction probit), la logit, la Weibull, et la logistique (voir Annexe B). L'ajustement des fonctions psychométriques aux données est important pour pouvoir présenter des estimations des paramètres comme le seuil de sensibilité et la pente de la fonction au seuil. Le seuil de sensibilité est communément défini comme le niveau du stimulus qui donne une réponse du sujet à la moitié entre les deux niveaux extrêmes, $\{0\}$ et $\{1\}$. La pente de la fonction au seuil décrit la forme de la distribution des réponses du sujet pour l'échelle de stimuli utilisée. Les écart-types calculés pour chaque paramètre de la fonction sont extraits de l'ajustement. C'est sur la base de ceux-ci que des différences significatives ou non entre seuils de détection ou discrimination pour différentes conditions expérimentales sont déduites.

Des études ont présenté des résultats concernant les conséquences sur les écart-types des paramètres en fonction du type de fonction et de la méthode d'ajustement. McKee, Klein & Teller (1985) ont montré que les méthodes probit et logit ne donnent pas d'estimation fiable des paramètres et de leurs écart-types pour de faibles nombres d'observations effectuées par un sujet. O'Regan & Humbert (1989) confirment qu'un nombre minimum d'observations est nécessaire pour que l'ajustement fournisse des estimations des paramètres correctes.

Efron (1979) a introduit la méthode bootstrap qui consiste en une simulation Monte-Carlo

des données expérimentales pour estimer l'intervalle de confiance, ou l'écart-type, des paramètres. Elle a été appliquée avec succès en psychophysique par Maloney (1990) et Foster & Bischof (1991) pour l'estimation des intervalles de confiance des paramètres avec des fonctions probit, ajustées à des données avec de faibles nombres d'observations. Cette méthode s'est ainsi montrée utile pour fournir des intervalles de confiance là où les formules classiques ne sont plus valables (e.g. McKee et al., 1985). Wichmann & Hill (2001a,b) ont utilisé la méthode du bootstrap paramétrique et ont modélisé sept manières d'échantillonner la fonction psychométrique, c'est-à-dire de placer les niveaux du stimulus sur la fonction psychométrique. Ils ont montré que des biais sur les estimations des paramètres (Wichmann & Hill, 2001a) et de leur écart-types (Wichmann & Hill, 2001b), pour le seuil et la pente, peuvent résulter de la méthode d'échantillonnage et d'une performance maximale du sujet variable. Ils ont aussi discuté la qualité de l'ajustement pour différentes variables de test. Les auteurs ont montré l'importance, quelle que soit la fonction utilisée pour ajuster les données, qu'il faut rapporter le seuil et la pente à la moitié du maximum et du minimum de bonnes réponses du sujet, puisque ce point est le moins affecté par le type de fonction choisie. Ce point correspond à une performance de 50% de bonnes réponses du sujet pour une procédure expérimentale de type OUI/NON, et à une performance de 75% de bonnes réponses pour la procédure choix-forcé-à-2-alternatives (sigle anglais : 2AFC).

Ainsi, choisir une fonction psychométrique combinée à une méthode d'ajustement aux données et une méthode d'estimation de l'intervalle de confiance peut avoir des conséquences sur l'interprétation des données, pour lesquelles il est quasiment impossible de produire de grands nombres d'observations par sujet.

Nous nous sommes intéressés à la fiabilité des écart-types asymptotiques du seuil et de la pente obtenus avec la méthode d'ajustement des moindres carrés pondérés, pour deux fonctions psychométriques. La fiabilité des écart-types asymptotiques est définie par rapport aux écart-types obtenus par les méthodes bootstraps, considérées donner de meilleures estimations (voir les références des paragraphes précédents). Les effets du nombre de niveaux du stimulus et du nombre d'essais par niveau de stimulus sur les écart-types des seuils et des pentes sont analysés. Des données d'expériences sur les interactions visuelles longue distance entre lignes colinéaires sont analysées. Les fonctions Weibull et logistique sont ajustées aux données. Les deux types de fonctions ont été utilisés pour obtenir les écart-types, qui sont calculés avec la formule classique de la limite asymptotique d'un grand nombre d'observations, ou à partir des techniques bootstrap paramétrique ou non paramétrique.

Wichmann & Hill (2001a,b) ont montré l'importance du taux de fausses réponses qui doit être pris en compte. Ce taux peut être compris comme une quantité de fausses réponses du sujet due par exemple à une baisse de l'attention pendant l'expérience. Ce taux peut avoir des conséquences importantes sur les moyennes obtenues, dans les cas où au moins un niveau du stimulus a été choisi de manière à obtenir exactement 100% de réponses correctes. Dans les expériences correspondantes aux données analysées, les niveaux du stimulus ont été choisis de

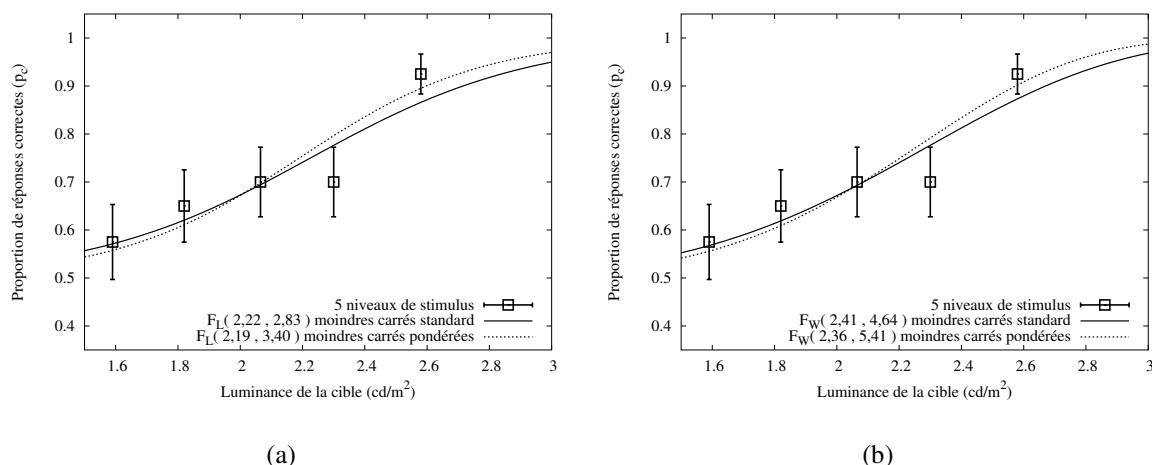


FIG. 2.1 – Exemple de données ajustées avec une fonction logistique, graphique (a), et une fonction Weibull, graphique (b). Données avec 5 niveaux de luminance du stimulus et 40 essais par niveau de luminance. Les chiffres présentés dans les parenthèses des fonctions correspondent aux paramètres finaux de l'ajustement, (a, b) pour la fonction logistique (équ.2.2) et (α, β) pour la fonction Weibull (équ.2.3), obtenus avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt. La courbe continue a été ajustée avec tous les poids égaux (minimisation des moindres carrés). La courbe représentée en pointillés a été ajustée avec les barres d'erreurs comme poids (voir texte pour plus de détail). Les barres d'erreurs indiquent l'écart-type d'une distribution binomiale : $\sqrt{p(1-p)/n}$, avec p la proportion de réponses correctes et n le nombre d'essais pour cette proportion. L'ajustement pondéré par les erreurs déplace la partie supérieure de la courbe vers le dernier point (avec le plus de probabilité) ayant la plus petite erreur.

telle manière que le plus haut et le plus bas niveau produisent une réponse proche respectivement du maximum et du minimum attendu. En conséquence, pour l'analyse des données, un taux de fausses réponses de zéro a été utilisé.

Les fonctions ont été ajustées aux données avec la méthode de minimisation des moindres carrés pondérés (Levenberg-Marquardt ; voir Press, Teukolsky, Vetterling, & Flannery, 1997). Cette méthode permet une convergence rapide vers le minimum en pondérant chaque point de mesure par l'erreur associée. Ainsi, pour la fonction psychométrique dans le cadre de la méthode expérimentale 2AFC, les points proches de 100% de réponses correctes auront des poids plus forts dans la minimisation que les points proches du niveau où la réponse peut avoir une chance sur deux d'être bonne. Un exemple est présenté sur la Figure 2.1. Une fonction logistique, graphique (a), et une fonction Weibull, graphique (b), sont ajustées aux mêmes données avec la méthode des moindres carrés pondérés et la méthode des moindres carrés standard. Il est évident que le point le plus à droite, ayant le plus haut niveau de stimulus, attire la partie supérieure de la courbe quand les moindres carrés pondérés sont utilisés à cause de la plus petite "erreur" associée à ce point.

2.1 Méthode

2.1.1 La fonction psychométrique

Pour la fonction psychométrique, nous utilisons la notation :

$$\Psi(x; \gamma, \lambda, \underline{\theta}) = \gamma + (1 - \gamma - \lambda)F(x; \underline{\theta}) \quad (2.1)$$

où γ est la borne inférieure, $(1-\lambda)$ est la borne supérieure, $F()$ est la fonction caractéristique utilisée et $\underline{\theta}$ est le vecteur des paramètres. Nous utilisons les fonctions logistique et Weibull, respectivement écrites :

$$F_L(x; a, b) = \frac{1}{1 + e^{-b(x-a)}} \quad (2.2)$$

$$F_W(x; \alpha, \beta) = \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}\right). \quad (2.3)$$

2.1.2 Les paramètres de la fonction psychométrique

Pour la méthode expérimentale 2AFC, les constantes qui définissent les bornes supérieures et inférieures de la fonction psychométrique sont fixées à $\lambda = 0$ et $\gamma = 0,5$. Ainsi, seuls les paramètres qui fournissent le seuil et la pente de la fonction doivent être déterminés. Ces deux valeurs, pour le niveau communément accepté de 75% de réponses correctes, seront notées x_{75} et Ψ'_{75} . Pour le cas de la fonction logistique, elles sont :

$$x_{75} = a \quad (2.4)$$

$$\Psi'_{75} = \frac{b}{8}. \quad (2.5)$$

Pour la fonction Weibull :

$$x_{75} = \alpha (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.6)$$

$$\Psi'_{75} = \frac{\beta}{4\alpha} (\ln 2)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \quad (2.7)$$

Ainsi, les écart-types du seuil et de la pente, dans le cas où l'on suppose être dans la limite asymptotique (c'est à dire un nombre suffisamment grand de mesures) pour la fonction logistique sont les écart-types des deux paramètres obtenus (au facteur 8 près pour la pente). Les écart-types du seuil et de la pente, obtenus en ajustant la fonction Weibull aux données, doivent être obtenus par transformation des écart-types des deux paramètres (α, β) . Ces transformations sont présentées dans l'annexe B, et les écart-types (ETs) sont transformés en pourcentages

($100 \times (\text{ET du seuil}) / (\text{seuil})$ ou $100 \times (\text{ET de la pente}) / (\text{pente})$) :

$$\frac{\sigma_{x_{75}}}{x_{75}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\ln(\ln 2)}{\beta}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{\beta}}{\beta}\right)^2 + 2 \frac{\ln(\ln 2)}{\beta} \frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha} \frac{\sigma_{\beta}}{\beta} \text{cor}(\alpha, \beta)} \quad (2.8)$$

$$\frac{\sigma_{\Psi'_{75}}}{\Psi'_{75}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha}\right)^2 + \left(1 + \frac{\ln(\ln 2)}{\beta}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{\beta}}{\beta}\right)^2 - \left(1 + \frac{\ln(\ln 2)}{\beta}\right) \left(\frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha}\right) \left(\frac{\sigma_{\beta}}{\beta}\right) \text{cor}(\alpha, \beta)} \quad (2.9)$$

2.1.3 Procédure

Une méthode d'ajustement non linéaire (méthode de Levenberg-Marquardt) de la fonction aux données est appliquée pour déterminer les coefficients (a, b) de la fonction logistique et (α, β) de la fonction Weibull, et ainsi calculer les seuils et pentes correspondants. Cette méthode est bien expliquée dans Press et al. (1997). Elle minimise la fonction χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Psi(x_i) - p_i)^2}{e_i} \quad (2.10)$$

avec les erreurs de mesure e_i utilisées comme poids pour la proportion p_i ; p_i est la proportion de bonnes réponses du sujet au niveau de luminance du stimulus x_i , et k est le nombre de niveaux de luminance du stimulus utilisé pour l'estimation de la courbe psychométrique. Nous avons introduit les e_i comme les écart-types d'une distribution binomiale de moyenne p_i ($e_i = \sqrt{p_i(1-p_i)/n_i}$ avec n_i le nombre d'essais pour le niveau de stimulus x_i). Les ETs des paramètres finaux sont calculés à partir de la matrice de covariance obtenue à la fin de la minimisation. Cette méthode de minimisation est une routine standard présente dans la majorité des programmes d'ajustement non linéaire.

En parallèle, nous avons appliqué la technique bootstrap pour l'estimation des écart-types, comme proposé à l'origine par Efron (1979). Elle consiste en une simulation Monte-Carlo des données brutes pour obtenir la distribution des paramètres autour de leur moyennes (pour l'algorithme, voir annexe B.5). Deux techniques bootstraps sont appliquées, paramétrique et non paramétrique, en fonction de la méthode de simulation des données. Les données peuvent être simulées soit à partir de la fonction psychométrique (bootstrap paramétrique) obtenue par l'ajustement sur les données brutes, soit directement à partir des données brutes (bootstrap non paramétrique) pour obtenir la distribution des paramètres pour les points mesurés.

Une analyse pour chaque type de bootstrap a été effectuée. Pour chaque fichier, dix milles données ont été simulées. Les paramètres x_{75} et Ψ'_{75} ont été calculés avec les formules appropriées et les moyennes et écart-types extraits.

2.1.4 Les fichiers de données

Une analyse de données d'expériences de psychophysique visuelle décrites en détail dans le chapitre "Expériences" a été effectuée. Il faut noter que :

1. Quatre sujets ont participé à ces expériences, avec une vue normale ou corrigée à la normale.
2. Les sujets devaient détecter une ligne cible présentée au centre de la fovéa avec une ligne inductrice colinéaire. La procédure choix forcé à deux alternatives temporelles était utilisée.
3. Deux sujets ont participé à deux expériences avec huit niveaux de luminance de la cible par expérience. Chacun des deux autres a participé à une expérience avec respectivement 6 et 5 niveaux de luminance pour la cible.
4. La luminance du fond était constante à $0,45 \text{ cd/m}^2$, et les sujets ont effectué une adaptation à la pénombre durant quelques minutes avant chaque session expérimentale.
5. Les niveaux de luminance de la cible ont été ajustés individuellement pour chaque sujet à partir de une ou deux sessions pré-expérimentales, où les niveaux de luminance de la cible qui produisent respectivement près de 100% et près de 50% de bonnes réponses sont déterminés.
6. Les niveaux de luminance de la cible ont été présentés de manière aléatoire avec la méthode des stimuli constants.

Les données brutes consistaient en dix fichiers, obtenus en dix sessions consécutives avec des conditions expérimentales constantes. Deux sujets avaient huit niveaux de luminance par courbe psychophysique, avec 20 essais par niveau de luminance par fichier. Les deux autres sujets avaient respectivement six et cinq niveaux de luminance par courbe psychophysique avec 20 essais par niveau de luminance et par fichier. Puisque le nombre d'essais par niveau de stimulus est faible, les données ont été analysées de quatre manières, en prenant en compte l'ordre dans lequel les fichiers sont obtenus, et en créant des fichiers de données avec :

- 40 essais par niveau de stimulus en regroupant deux fichiers successifs ;
- 60 essais par niveau de stimulus en regroupant trois fichiers successifs ;
- 100 essais par niveau de stimulus en regroupant cinq fichiers successifs ;
- 200 essais par niveau de stimulus en regroupant tous les fichiers.

Nous nous référons à n comme le nombre d'essais par niveau de luminance de la cible dans le fichier analysé ($n = 40, 60, 100, 200$) et à k comme le nombre de niveaux de luminance du stimulus utilisé dans l'expérience ($k = 5, 6, 8$). Le nombre total d'essais dans le fichier analysé est $N = kn$.

2.2 Résultats

Pour éviter la confusion entre les ETs des différentes valeurs de seuils et pentes comme tels et les écart-types des différences entre les valeurs des deux fonctions, obtenues pour les seuils et les pentes pour un n et un k constants (c'est-à-dire calculés pour les fichiers avec un nombre identique d'essais par niveau de stimulus, et nombre de niveaux de stimulus), nous utilisons le terme de **dispersion** pour se référer à l'écart-type des différences, en prenant en compte qu'il est obtenu par la formule normale :

$$\Delta\mu_i = \mu_i^{(W)} - \mu_i^{(L)} \quad (2.11)$$

$$\Delta\bar{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta\mu_i \quad (2.12)$$

$$\mathbf{dispersion} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\Delta\mu_i - \Delta\bar{\mu})^2} \quad (2.13)$$

avec m le nombre de fichiers pour k et n constants, $\mu_i^{(W)}$ la valeur (du seuil ou de la pente) pour la fonction Weibull et $\mu_i^{(L)}$ pour la fonction logistique, obtenue pour le fichier i .

2.2.1 Seuils

ETs bootstraps versus ETs asymptotiques

Pour comparer les ETs obtenus par la technique bootstrap avec les ETs obtenus par la méthode asymptotique, les ETs bootstraps ont été représentés en fonction de leur équivalent asymptotique pour une fonction psychométrique donnée. La figure 2.2 présente les résultats pour la fonction logistique et la figure 2.3 ceux pour la fonction Weibull. Les graphiques (a) et (b) représentent les ETs bootstraps non paramétriques en fonction des ETs asymptotiques, les graphiques (c) et (d) représentent les ETs bootstraps paramétriques en fonction des ETs asymptotiques.

Pour la fonction logistique (figure 2.2), la technique bootstrap non paramétrique pour de faibles n (graphique (a)) produit des ETs supérieurs aux ETs asymptotiques. La majorité des points se situent au-dessus de la ligne $y=x$. Si les deux méthodes produisaient des ETs identiques, tous les points devraient être situés sur cette droite. Seulement pour $k = 8$ la technique bootstrap non paramétrique produit des ETs inférieurs aux ETs asymptotiques. Deux ETs pour $k = 5$ et $n = 40$ sont en dehors du graphe. Il apparaît qu'augmenter n (graphique (b)) déplace tous les points vers la ligne de référence, ce qui indique que les différences entre les ETs de la technique bootstrap non paramétrique et asymptotique diminuent fortement.

Pour le $n = 40$, la technique bootstrap paramétrique en utilisant la fonction logistique (graphique (c)) produit des ETs supérieurs, égaux et inférieurs aux ETs asymptotiques. Les points sont distribués autour de la ligne de référence. Seulement dans le cas où $k = 5$ et $n = 40$, tous

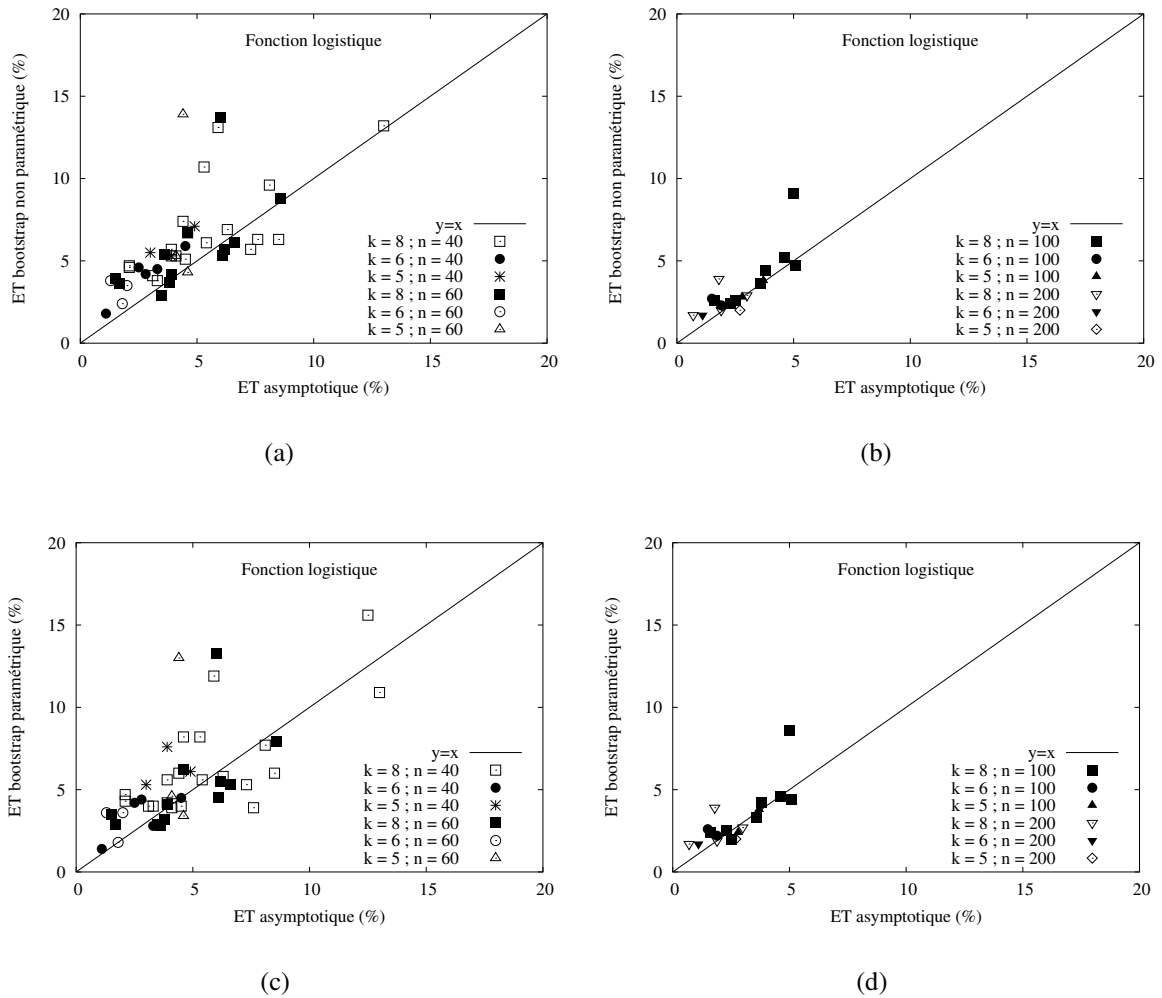


FIG. 2.2 – Comparaison des écart-types bootstraps et asymptotiques des seuils obtenus pour les paramètres de la fonction logistique. Les graphiques (a) et (b) présentent les écart-types de la méthode de calcul bootstrap non paramétrique, les graphiques (c) et (d) présentent les écart-types de la méthode de calcul bootstrap paramétrique. Dans les légendes, n est le nombre d'essais par niveau du stimulus et k le nombre de niveaux de stimulus utilisés dans l'expérience. La droite $y = x$ est donnée comme référence. Si les méthodes bootstraps (paramétrique ou non paramétrique) et asymptotique donnent les mêmes écart-types, tous les points seraient placés sur cette droite.

les points sont au-dessus de la ligne. De nouveau, en augmentant n les points se rapprochent de la ligne de référence (graphique (d)) montrant que les deux techniques produisent des ETs équivalents.

Pour la fonction Weibull, figure 2.3, les deux techniques bootstraps (graphiques (a) à (d)) produisent des ETs égaux ou supérieurs aux ETs asymptotiques, quel que soit le nombre d'observations n . Seuls les ajustements avec $k = 8$ produisent des valeurs en dessous de la ligne de référence, montrant des ETs asymptotiques supérieures aux ETs bootstrap. Avec l'augmentation de n , les ETs asymptotiques tendent à converger vers les ETs bootstraps mais à un degré moindre en comparaison à la fonction logistique.

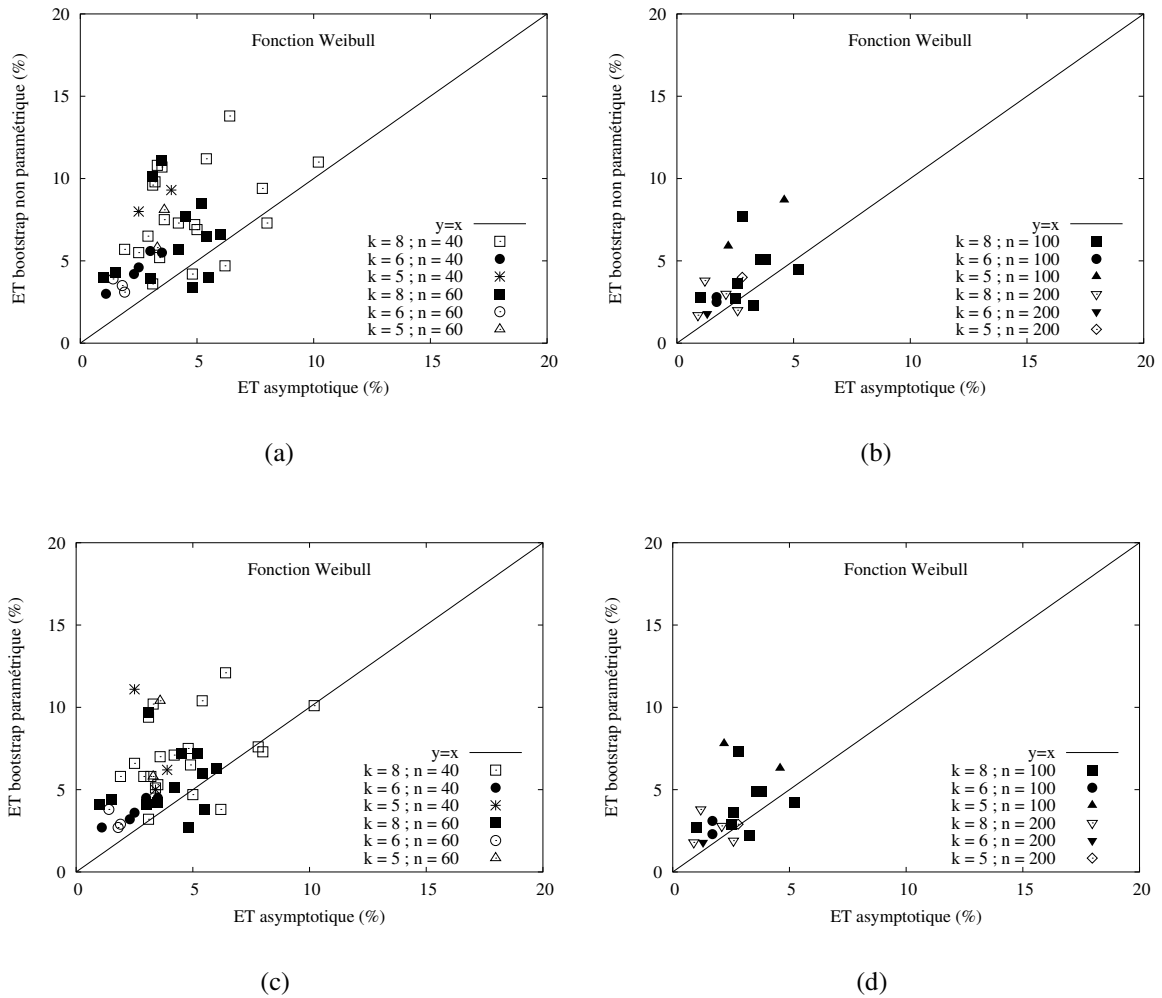


FIG. 2.3 – Comme pour la figure 2.2. Ici, ce sont les écart-types des seuils pour la fonction Weibull qui sont comparés.

Seuils de la fonction Weibull versus seuils de la fonction logistique

| Paramètre | n | Différence moyenne et dispersion ($\times 10^{-2}$) | | | | | |
|---|-----|---|-----------------|-----|----------------|-----|----------------|
| | | m | $k = 8$ | m | $k = 6$ | m | $k = 5$ |
| Seuils $x_{75}^{(W)} - x_{75}^{(L)}$ | 40 | 20 | $0,5 \pm 1,2$ | 5 | $1,2 \pm 1,7$ | 5 | $1,4 \pm 0,8$ |
| | 60 | 12 | $0,08 \pm 0,64$ | 3 | $1,7 \pm 0,47$ | 3 | $1,3 \pm 0,47$ |
| | 100 | 8 | $0,25 \pm 0,66$ | 2 | $1,5 \pm 0,5$ | 2 | $1,5 \pm 0,5$ |
| | 200 | 4 | $0,25 \pm 0,43$ | 1 | $1,0 \pm 0,0$ | 1 | $1,0 \pm 0,0$ |

TAB. 2.1 – Différences moyennes entre seuils de la fonction Weibull ($x_{75}^{(W)}$) et la fonction logistique ($x_{75}^{(L)}$) en fonction du nombre de niveaux du stimulus (k) et du nombre d'essais par niveau de stimulus (n). Le nombre de valeurs numériques (m) pris en compte pour le calcul des moyennes et des dispersions est donné. Les différences entre seuils sont exprimées en unité d'intensité lumineuse (cd/m^2). La dispersion de ces différences moyennes a été calculée en utilisant l'équation 2.13.

Les seuils varient entre 1,0 et 2,2 cd/m^2 entre sujets. Les différences moyennes entre les seuils obtenus par la fonction Weibull et logistique sont présentées dans le tableau 2.1 en fonc-

tion du nombre de niveaux de stimulus (k) et du nombre d'essais par niveau de stimulus (n). La différence entre les seuils des deux types de fonction diminue avec l'augmentation de k . La différence entre les seuils des deux types de fonction diminue aussi avec l'augmentation de n . Il est intéressant de voir, qu'en moyenne, le seuil obtenu avec la fonction Weibull est supérieur au seuil obtenu avec la fonction logistique. Ceci doit être mis en relation avec les dispersions associées à chaque différence moyenne. Il apparaît que pour $k = 8$, les deux fonctions donnent majoritairement le même seuil, sans que l'une fournisse systématiquement un seuil supérieur. Pour $k = 5$ et 6 , il est difficile de prendre en compte les dispersions car le nombre de seuils pris en compte pour le calcul est faible ($m \leq 5$). Par contre, les différences moyennes sont supérieures à celles pour $k = 8$, au minimum d'un facteur deux, ce qui montre que la fonction logistique a tendance à fournir une estimation du seuil inférieure à celle de la fonction Weibull quand le nombre de niveaux du stimulus est faible ($k = 5, 6$). Dans le pire des cas (seuil de $1,0 \text{ cd/m}^2$ pour $n = 40$ avec $k = 6$, donnant un écart-type d'environ 5%), les différences correspondent au maximum à 3% du seuil moyen pour un sujet donné et sont donc inférieures aux ETs des seuils.

2.2.2 Pentés

ETs bootstraps versus ETs asymptotiques

Les ETs des pentés sont représentés de la même manière que ceux pour les seuils, ETs bootstraps versus ETs asymptotiques. La figure 2.4 présente les ETs obtenus avec la fonction logistique, la figure 2.5 présente les ETs obtenus avec la fonction Weibull.

En ce qui concerne les pentés, la fonction logistique (figure 2.4) a des écart-types obtenus avec la méthode bootstrap supérieurs aux ETs obtenus avec la méthode de calcul asymptotique. Pour les deux méthodes bootstrap et pour des nombres n et k donnés, les ETs bootstraps montrent peu de variations par rapport aux ETs asymptotiques. La plupart des ETs bootstraps sont regroupés autour d'une valeur moyenne. Pour les données avec $k = 8$, les deux méthodes bootstrap produisent des ETs aux alentours de 40% pour $n = 40$, aux alentours de 30-35% pour $n = 60$, d'environ 20% pour $n = 100$ et d'environ 10-15% pour $n = 200$. Les ETs asymptotiques s'étendent sur de plus grandes valeurs que les ETs bootstraps.

Avec la fonction Weibull (figure 2.5), les ETs bootstraps sont supérieurs ou égaux aux asymptotiques. Cependant, seule la méthode bootstrap paramétrique, pour $k = 8$ et $n = 200$, produit des ETs quasi équivalents aux ETs asymptotiques (graphique (d)). La méthode bootstrap non paramétrique produit des ETs supérieurs aux ETs asymptotiques. Des variations similaires à celles décrites pour la fonction logistique sont observées pour la fonction Weibull, dans le cadre de la méthode bootstrap paramétrique. Pour cette méthode (graphiques (c) et (d)) et $k = 8$, les ETs sont regroupés autour de 30% pour $n = 40$, entre 20 et 25% pour $n = 60$, entre 15 et 20% pour $n = 100$ et autour de 10% pour $n = 200$.

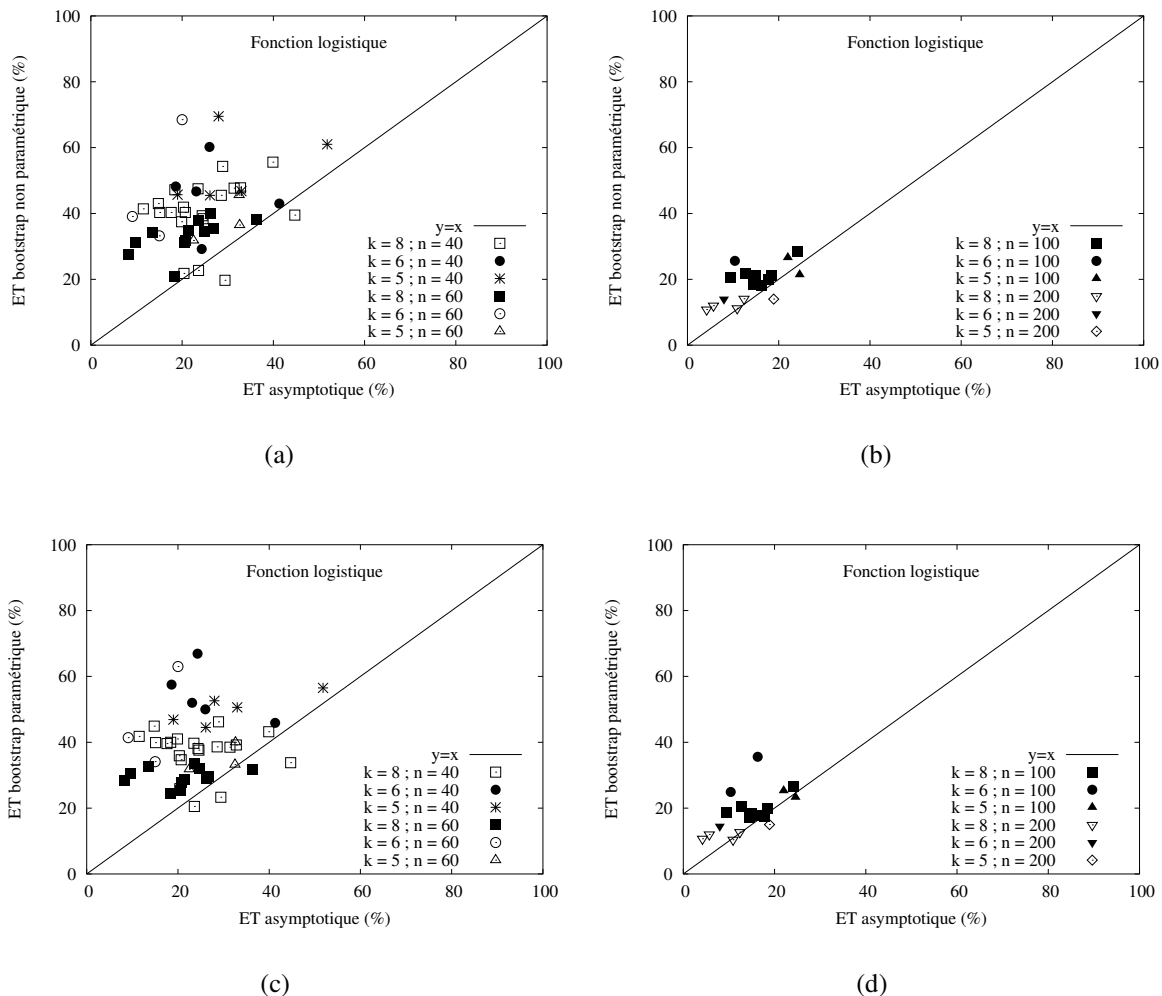


FIG. 2.4 – Comme pour la figure 2.2. Ici, ce sont les écart-types des pentes pour la fonction logistique qui sont comparés.

Pentes de la fonction Weibull versus pentes de la fonction logistique

Les variabilités intraindividuelles et interindividuelles des valeurs des pentes se situent entre 0,3 et 1,0 $p_c/(cd/m^2)$, pour les deux types de fonction. Les différences moyennes entre les valeurs des pentes de la fonction Weibull et logistique sont présentées dans le tableau 2.2 en fonction du nombre de niveaux de stimulus (k) et du nombre d'essais par niveau de stimulus (n). Les différences entre les valeurs des pentes obtenues avec les deux fonctions décroissent avec l'augmentation de n . Pour $n = 200$, ces différences sont les moindres. Cependant, même pour cette valeur élevée d'observations, la différence peut correspondre à 10% de la valeur de la pente. Dans la plupart des cas, la fonction Weibull fournit une estimation plus faible de la pente comparée à l'estimation de la fonction logistique. Il ne semble pas y avoir d'effet du nombre de niveaux de stimulus sur les différences des estimations dues aux deux fonctions.

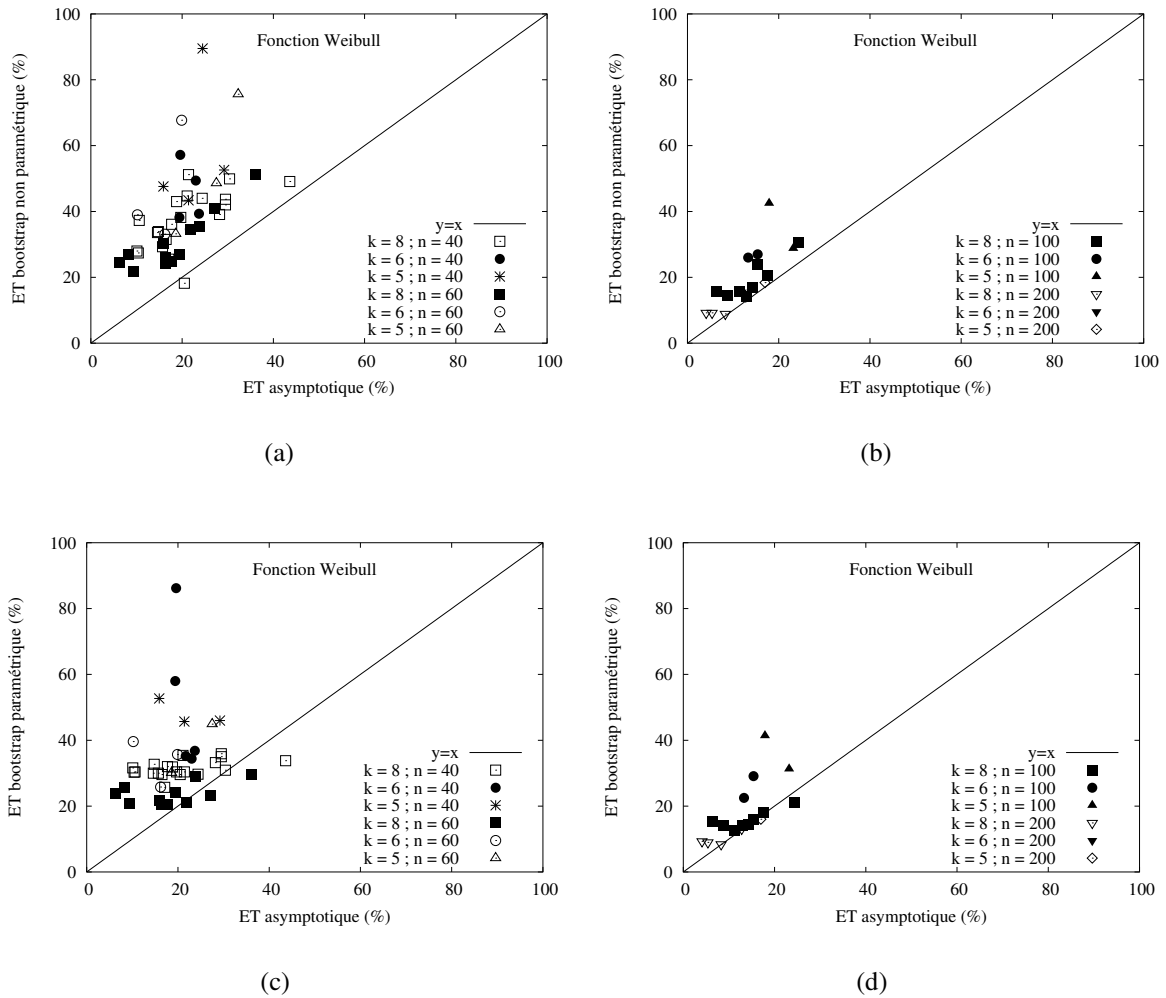


FIG. 2.5 – Comme pour la figure 2.2. Ici, ce sont les écart-types des pentes pour la fonction Weibull qui sont comparés.

| Paramètre | n | Différence moyenne et dispersion ($\times 10^{-2}$) | | | | | |
|---|-----|--|----------------|-----|----------------|-----|-----------------|
| | | m | $k = 8$ | m | $k = 6$ | m | $k = 5$ |
| $\Psi_{75}^{(W)} - \Psi_{75}^{(L)}$ pentes | 40 | 20 | $-5,3 \pm 7,8$ | 5 | -30 ± 40 | 5 | $-2,0 \pm 2,0$ |
| | 60 | 12 | $-4,2 \pm 6,1$ | 3 | $-12 \pm 7,9$ | 3 | $-2,3 \pm 0,47$ |
| | 100 | 8 | $-3,5 \pm 3,7$ | 2 | $-12 \pm 5,5$ | 2 | $-2,0 \pm 0,0$ |
| | 200 | 4 | $-2,8 \pm 2,6$ | 1 | $-8,0 \pm 0,0$ | 1 | $-1,0 \pm 0,0$ |

TAB. 2.2 – Comme pour le tableau 2.1, ici pour les pentes. Les différences entre pentes sont en unités de proportion de réponses correctes par unité d'intensité lumineuse ($p_c/(cd/m^2)$).

2.3 Conclusion

L'analyse présentée dans ce chapitre concerne des données obtenues dans des expériences de mesure du seuil de détection du contraste d'une ligne avec la méthode des stimuli constants. Nous avons regardé si des différences peuvent exister si la fonction logistique ou Weibull sont utilisées pour déterminer les paramètres seuil et pente et leur écart-types. L'analyse montre que :

1. les différences obtenues entre les seuils pour la fonction logistique et pour la fonction

Weibull sont négligeables en comparaison de leur écart-types ;

2. les pentes présentent de grandes différences entre fonctions, avec la fonction Weibull donnant une pente plus faible par rapport à la fonction logistique ;
3. pour la fonction logistique, les écart-types asymptotiques des seuils sont équivalents aux écart-types bootstraps pour un nombre d'essais par niveaux de stimulus supérieur ou égal à 100, quel que soit le nombre de niveaux de stimulus de l'expérience. Cependant, ceci n'est pas valable pour la fonction Weibull ;
4. les estimations des ETs des pentes avec la méthode asymptotique sont généralement inférieures aux estimations par les méthodes bootstraps, et convergent vers celles-ci très lentement avec l'augmentation du nombre d'essais. Ceci est valable pour les deux fonctions utilisées ;

Il semblerait que dans le cadre des études utilisant les seuils avec la méthode des stimuli constants, il serait préférable d'utiliser la fonction logistique car à partir de $n = 100$ essais par niveau de stimulus, les écart-types obtenus par les trois méthodes de calculs sont comparables. Pour l'utilisation des pentes, aucune des deux fonctions ne semble être plus intéressante. Les deux obtiennent des écart-types asymptotiques des pentes qui convergent lentement vers les écart-types bootstraps avec l'augmentation du nombre d'essais par niveau de stimulus.

A partir des résultats de cette analyse, nous avons décidé d'utiliser la fonction logistique pour toutes les études expérimentales qui suivent. Six niveaux de luminance de la cible ont été utilisés avec 100 essais par niveau de luminance. Vu que la première expérience (section 3.2, "Étendue spatiale du régime longue distance") n'a pas contribué de ces résultats, la méthodologie qui y a été utilisée est explicitée en détail, ainsi que la méthode d'analyse des résultats.

Chapitre 3

Etude expérimentale des interactions spatiales entre segments visuels iso-orientés

Les interactions qui nous intéressent sont celles intervenant dans la création du contour d'un objet. Tout changement dans les caractéristiques d'un élément du contour peut influencer les interactions ainsi que le contour créé. Les paramètres à prendre en compte sont toutes les caractéristiques qui peuvent être présentes dans l'image : intensité de chaque élément, taille, orientation, polarité, chromaticité etc. Celui qui nous intéresse plus particulièrement est l'alignement de deux segments de lignes achromatiques.

Plusieurs termes communément utilisés dans la littérature psychophysique sur la vision humaine doivent être définis. En premier nous devons définir les types de stimuli qui peuvent être utilisés : des lignes, des patches de Gabor ou encore des fonctions D6. Ils sont présentés dans l'annexe A. Dans les expériences présentées dans cette thèse, nous avons utilisé des stimuli lignes. Un exemple d'un stimulus inducteur de polarité positive avec un stimulus cible de polarité négative est montré sur la figure 3.1.

La **polarité** du stimulus correspond au signe de la différence entre la luminance du stimulus et la luminance du fond : $\text{signe}(L_s - L_f)$, encore appelé signe du contraste du stimulus. Ainsi, présenté sur un fond gris, un stimulus de polarité positive est blanc et un stimulus de polarité négative est noir. La **cible** est le stimulus sur lequel l'attention de l'observateur est portée et à propos duquel il lui est demandé d'effectuer une tâche. L'**inducteur** est le stimulus qui est présenté avec la cible, sur lequel l'observateur n'a pas de décision à prendre. La **distance** ou encore **séparation** angulaire des deux stimuli, d_{CI} , correspond à l'angle visuel entre les deux plus proches bords de la cible et de l'inducteur. Elle est communément présentée en unité de minutes d'arc visuel ($'$), correspondant à la subdivision des degrés ($1^\circ = 60'$).

De nombreuses publications mentionnent des effets dus à la colinéarité entre éléments de contours. Les premières expériences explicitement dédiées à la mesure des interactions entre éléments iso-orientés sans autres interactions (exemple : masquage dû à un fond non uniforme)

ont été effectuées au début des années 90. Polat & Sagi (1993, 1994a) et Dresch (1993) sont les premiers à présenter des résultats spécifiques sur ce sujet en utilisant comme stimuli des patches de Gabor (voir annexe A.2) pour les premiers et des lignes pour le deuxième. D'autres auteurs (voir Bowen, 1995; Kapadia, Ito, Gilbert & Westheimer, 1995; Morgan & Dresch, 1995; Zenger & Sagi, 1996; Wehrhahn & Dresch, 1998; Solomon, Watson & Morgan, 1999; Brincat & Westheimer, 2000; Kapadia, Westheimer & Gilbert, 2000) ont poursuivi les mesures avec différents types de stimuli et méthodes expérimentales.

Les paramètres expérimentaux des différents auteurs qui nous intéressent sont résumés dans le tableau 3.1. Il faut noter les différences flagrantes qui apparaissent entre les études impliquant des stimuli de type Gabor et des stimuli de type lignes. Pour les Gabor, l'intensité lumineuse du fond sur lequel ils sont présentés est toujours supérieure à celle des études avec des lignes, et quasiment pour toutes les études, il est de 50 cd/m^2 . Quant aux études avec des lignes, la luminance maximale du fond est d'environ 20 cd/m^2 . Les différentes études n'utilisaient pas forcément la même méthode expérimentale. Certaines ont utilisé la méthode de discrimination de l'orientation (*tilt experiments*), mesurant un seuil de discrimination angulaire, d'autres la méthode de détection de la cible, mesurant le seuil de détection absolue du contraste de la cible. Elles ont utilisé différentes procédures expérimentales, qui sont la procédure adaptative (en anglais *staircase*) et la procédure des *stimuli constants* (voir annexe B).

Il faut aussi prendre en compte les différences existantes entre les stimuli de types lignes et ceux de type Gabor (voir annexe A.4). Le fait que le patch de Gabor ait une étendue spatiale selon la direction perpendiculaire à la direction de son orientation préférée peut fournir une information de surface au sujet. L'alternance entre polarités positives et négatives (lignes blanches et noires) dans le patch fournit aussi une information supplémentaire. Dans le cadre des études entre éléments de polarités opposées, les effets ne pourront pas être explicitement associés aux interactions d'une polarité négative sur une polarité positive ou vice versa, les deux étant présentes dans l'image. La définition de la distance cible à inducteur, d_{CI} , pour les patches de Gabor se fait en terme de centre à centre, alors que pour les stimuli lignes c'est de bord à bord. Pour avoir une correspondance approximative entre les deux types de stimuli, nous enlevons aux distances centre à centre des patches de Gabor la valeur 2σ pour obtenir une distance bord à bord (σ étant l'écart type de l'enveloppe Gaussienne du patch, cette transformation ne peut être effectuée que dans les cas où $\sigma = \lambda$; voir l'annexe A.2 pour plus de détails).

Pour les patches de Gabor, c'est le contraste de Michelson qui est utilisé pour présenter les résultats. Pour les lignes, les deux types de contrastes, Michelson et Weber, peuvent être utilisés pour la présentation des résultats. Il faut remarquer que le fait d'utiliser le contraste de

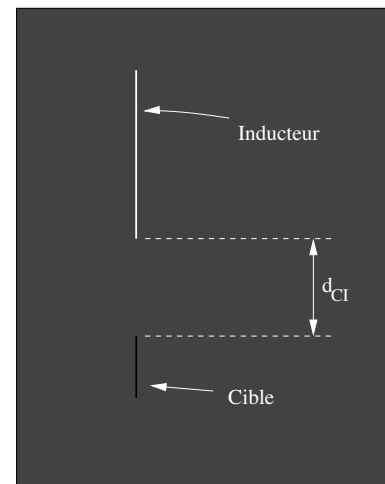


FIG. 3.1 – Exemple des stimuli visuels utilisés dans les expériences de cette thèse. Voir le texte pour plus de détails.

| Publication | Types de stimulus cible | Intensité du fond (cd/m ²) | Paramètres étudiés |
|-----------------------------|-------------------------|--|--|
| Polat & Sagi (1993) | Gabor verticaux | 50 | d_{CI} , angle d'alignement, λ |
| Polat & Sagi (1994a) | Gabor | 50 | d_{CI} , angle du Gabor, type d'alignement |
| Zenger & Sagi (1996) | Gabor | 50 | d_{CI} , angle d'alignement, contraste de l'inducteur |
| Solomon et al. (1999) | Gabor | 27 | d_{CI} pour des polarités opposées (cible blanche avec inducteur noir) |
| Wehrhahn & Dresp (1998) | lignes | 5 | pour $d_{CI}=0'$, les effets des polarités et intensités |
| Brincat & Westheimer (2000) | lignes | 19 | d_{CI} , différences binoculaires, polarité, direction du mouvement, orientation relative entre les deux stimuli |
| Dresp (1993) | points | 10 | d_{CI} , plusieurs types d'inducteur |
| Morgan & Dresp (1995) | points | 20,6 | d_{CI} pour un inducteur donné, polarité et contraste de l'inducteur |

TAB. 3.1 – Résumé des différentes études explicitement ciblées sur la mesure des interactions d'alignement entre éléments visuels comportant des orientations préférentielles. d_{CI} est l'abréviation pour la distance entre l'élément cible et l'élément inducteur; λ est la longueur d'onde du patch de Gabor; D_6 est un stimulus qui est la dérivée 6^{ème} d'une Gaussienne. Pour la définition des différents stimuli, voir l'annexe A. Les données de Dresp (1993) et Morgan & Dresp (1995) sont séparées car la cible utilisée dans leurs études n'a pas d'information d'orientation (ils ont utilisé des points).

Michelson avec les stimuli lignes ne donne pas une correspondance directe avec le contraste de Michelson des patches de Gabor. Pour cette raison, les données des auteurs avec patches de Gabor, qui sont reprises dans les différentes parties qui suivent, ont été représentées en utilisant le contraste de Michelson défini pour un stimulus ligne :

$$C_M = \frac{L_s - L_f}{L_s + L_f}, \quad (3.1)$$

avec L_s la luminance maximale du patch de Gabor (égale à la luminance du pic central) et L_f la luminance du fond.

Pour comparer les interactions obtenues avec des Gabor et celle obtenues avec des lignes, nous définissons la largeur de ligne pour les Gabor comme la moitié de la longueur d'onde du patch de Gabor (voir annexe A.4).

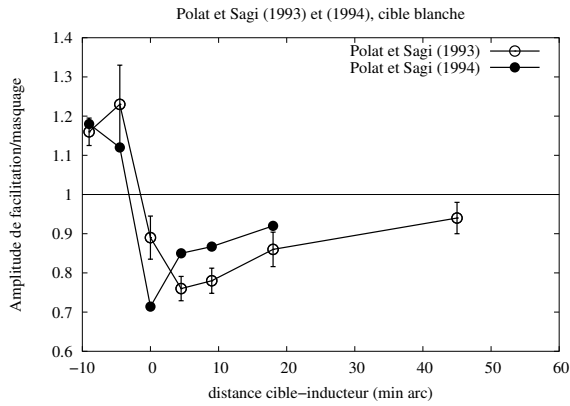
3.1 Etat des connaissances

Nous présentons les études qui concernent directement les interactions entre éléments à orientation préférentielle iso-orientés. Elles sont résumées dans le tableau 3.1. Pour les études qui utilisent des patches de Gabor, nous ne présentons que les aspects que nous pensons être directement comparables avec les études impliquant des stimuli lignes. C'est principalement les

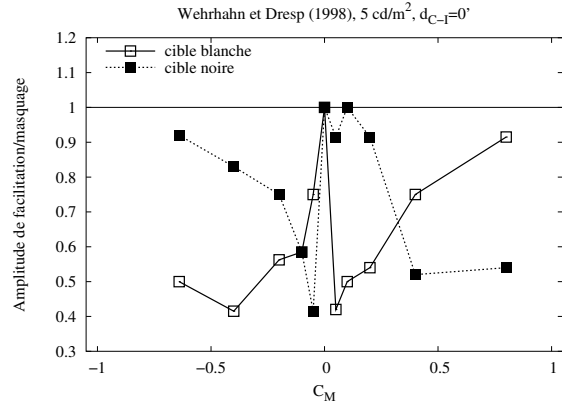
études avec les longueurs d'onde les plus faibles, correspondant aux largeurs de lignes les plus faibles. Les données qui sont reprises ont été transformées de manière à présenter l'**amplitude de facilitation/masquage** en fonction du paramètre expérimental qui a été varié. L'amplitude de facilitation/masquage est obtenue quand le seuil de détection du contraste de la cible présentée avec un inducteur (la condition testée) est divisé par le seuil de détection du contraste de la cible présentée toute seule (la condition contrôle). Ainsi, si l'amplitude est supérieure à 1, cela indique que la détection de la cible nécessite plus de luminance dans la condition testée que dans la condition contrôle, résultat que nous appelons masquage de la cible par la présence de l'inducteur. Si l'amplitude est inférieure à 1, cela indique que la détection de la cible nécessite moins de luminance dans la condition testée que dans la condition contrôle, résultat que nous appelons facilitation de la cible par la présence de l'inducteur. Si l'amplitude est égale à 1, il n'y a pas d'effet visible sur la détection de la cible par la présence de l'inducteur (le calcul et l'interprétation sont identiques pour les mesures de discrimination de l'orientation, sauf qu'il faut utiliser l'angle de discrimination).

Polat & Sagi (1993, 1994a)

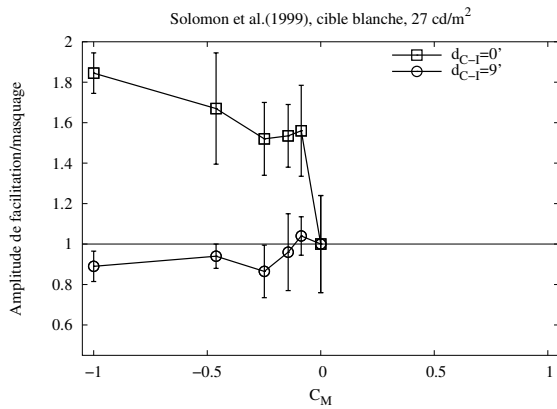
Le graphique 3.2(a) présente les données de Polat & Sagi (1993) (figure 2 de leur article) pour $\lambda = 0,075^\circ = 4,5'$. L'amplitude de facilitation/masquage est représentée en fonction de la distance angulaire cible à inducteur. La largeur d'une bande blanche ou noire du Gabor est égale à $2,25'$. Le fond avait pour intensité lumineuse 50 cd/m^2 et la cible et les inducteurs avaient les mêmes caractéristiques spatio-temporelles. Les mesures pour les trois points à gauche (distances de $-9'$, $-4,5'$ et $0'$) ont été effectuées avec des inducteurs de contraste de Michelson $C_M = 0,3$ ce qui donne une luminance du pic du Gabor de 65 cd/m^2 , les autres points avec des inducteurs de contraste de Michelson $C_M = 0,4$ correspondant à une luminance du pic du Gabor de 70 cd/m^2 (voir annexe A.4). Les auteurs mentionnent que l'effet de facilitation maximale obtenu pour une distance de $3\lambda = 4,5'$ est indépendant pour une large gamme de contraste de l'inducteur ($0,2 \leq C_M \leq 0,8$ ce qui correspond à une échelle de luminance du pic du Gabor entre 60 et 90 cd/m^2). Le graphique montre qu'à partir du moment où les deux stimuli n'ont quasiment plus de contact (distance angulaire supérieure à zéro) la facilitation atteint rapidement un maximum à $0,75$ pour une distance d'environ $4'$, et décroît lentement vers une amplitude de valeur $1,0$ avec l'augmentation de la séparation spatiale, ce qui indique que l'effet s'estompe avec la séparation angulaire. Les données avec des longueurs d'ondes plus grandes ne sont pas intéressantes pour la comparaison, car elles correspondent à des "largeur de lignes" plus importantes que celles des études avec stimuli lignes (voir annexe A.4). Des résultats identiques sont obtenus dans l'article de Polat & Sagi (1994a). Dans ce cas-ci, la facilitation maximale est obtenue à une distance de $2\lambda = 0'$.



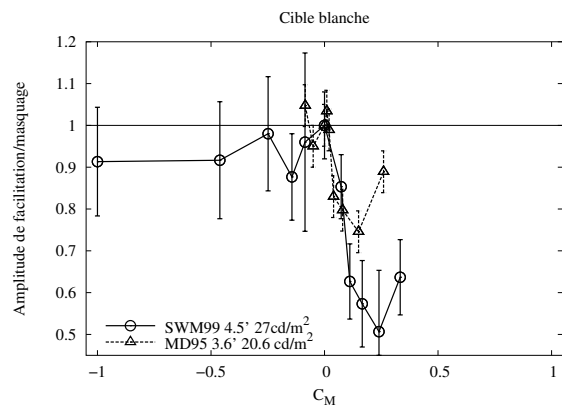
(a) Polat et Sagi (1993) et (1994a). Amplitude de facilitation/masquage d'une cible blanche avec des inducteurs blancs en fonction de la séparation angulaire. Chaque point est la moyenne des réponses des sujets et les barres d'erreurs indiquent les variations interindividuelles.



(b) Wehrhahn et Dresp (1998). Amplitude de facilitation/masquage d'une cible blanche ou noire avec un inducteur blanc ou noir adjacent ($d_{CI} = 0'$) en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur.



(c) Solomon et al. (1999) pour les distances de $2\lambda \cong 0'$ et $4\lambda \cong 9'$. Amplitude de facilitation/masquage d'une cible blanche avec un inducteur noir en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur.



(d) Solomon et al. (1999) et Morgan et Dresp (1995) pour une distance d'environ $4'$. Amplitude de facilitation/masquage d'une cible blanche avec un inducteur blanc ou noir en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur.

FIG. 3.2 – Données de (a) Polat & Sagi (1993, 1994a), (b) Wehrhahn & Dresp (1998), (c) Solomon et al. (1999) pour $d_{CI} = 0'$ et $9'$, et (d) Solomon et al. (1999) et Morgan & Dresp (1995) pour une distance approximative de $4'$. Chaque point représente la moyenne entre les sujets ayant effectué l'expérience de l'étude concernée. Pour les variations interindividuelles, se reporter aux articles correspondants. J.A. Solomon nous a très cordialement communiqué ses données. Les autres ont été reprises à partir des graphiques des articles correspondants.

Wehrhahn & Dresp (1998)

Le graphique 3.2(b) présente les données de Wehrhahn & Dresp (1998) où des stimuli lignes étaient utilisés. L'amplitude de facilitation/masquage est représentée en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur (voir annexe A.4). Un contraste positif correspond à un inducteur

blanc, un contraste négatif à un inducteur noir. Dans cette étude la distance entre les stimuli a été fixée à $0'$ et le fond à 5 cd/m^2 , et ils ont fait varier tous les autres paramètres expérimentaux qui sont reliés à l'intensité des stimuli : la polarité de l'inducteur et de la cible et le contraste de l'inducteur. Il est intéressant de noter que pour des stimuli de même polarités (points noirs à gauche du zéro de l'abscisse et points blancs à droite du zéro de l'abscisse), pour des inducteurs de contraste faible, il y a une facilitation importante et elle diminue fortement en rapprochant l'amplitude vers 1 (aucun effet) avec l'augmentation du contraste de Michelson de l'inducteur. Ainsi, un inducteur trop fort semble ne plus faciliter la détection d'une cible de même polarité. Pour des stimuli de polarités opposées, leurs résultats sont intéressants car ils montrent une asymétrie entre les deux types d'interactions (blanc-vers-noir et noir-vers-blanc). Un inducteur blanc n'a aucun effet sur la détection d'une cible noire (points noirs à droite du zéro de l'abscisse) jusqu'à un contraste de Michelson de l'inducteur d'environ 0,2, et ensuite, la facilitation devient très importante (amplitude d'environ 0,5). Un inducteur noir facilite la détection d'une cible blanche (points blancs à gauche du zéro de l'abscisse) même pour des contrastes de Michelson de l'inducteur faibles et l'amplitude se stabilise rapidement à environ 0,5. Il faut cependant noter que la largeur de leur inducteur est beaucoup plus importante ($5'$) que celle de la cible ($1'$) ce qui peut introduire des interactions autres que la colinéarité (par exemple l'effet *fin de ligne*, ou *end-stopped* en anglais, comme proposé dans l'étude de Yu & Levi (1997), ou les cellules nerveuses à inhibition terminale, voir Hubel (1994)).

Solomon, Watson & Morgan (1999) : distances de $0'$ et $9'$

Le graphique 3.2(c) présente les données de Solomon et al. (1999) uniquement pour les distances angulaires cible à inducteur de $2\lambda = 0'$ et $4\lambda = 9'$ (stimuli Gabors). L'amplitude de facilitation/masquage est représentée en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur (voir annexe A.4). Les mêmes caractéristiques spatio-temporelles des stimuli que Polat & Sagi (1993) ont été utilisées en mesurant les seuils de détection de la cible de polarité positive avec des inducteurs de polarité négative pour une luminance du fond de 27 cd/m^2 . Ces auteurs ont fait varier le contraste de l'inducteur pour mesurer l'effet de ce paramètre sur la détection de la cible. Pour des stimuli adjacents ($d_{CI}=0'$), une amplitude supérieure à 1,0 atteignant une valeur de 1,8 pour le contraste d'inducteur le plus fort ($C_M = -1$), indique la suppression de la détection de la cible par la présence de l'inducteur. À une distance de $9'$, quasiment aucun effet n'est visible. Une légère facilitation semble être présente pour le contraste d'inducteur maximal ($C_M = -1$) mais l'erreur de la mesure contrôle ($C_M = 0$) ne permet pas de conclure à une facilitation.

Morgan & Dresch (1995) et Solomon et al. (1999) : distance d'environ $4'$

Le graphique 3.2(d) présente les données de Solomon et al. (1999) pour la distance cible à inducteur de $4,5'$ ($3\lambda \equiv 4,5'$) et celles de Morgan & Dresch (1995) (figure 6 de leur article) pour une distance cible à inducteur de $3,6'$. L'amplitude de facilitation/masquage est représentée en

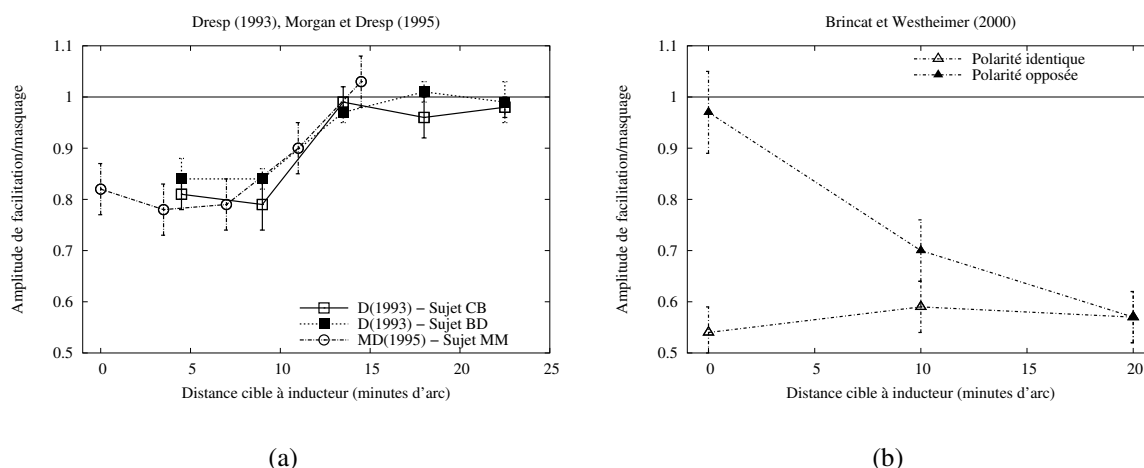


FIG. 3.3 – Amplitude de facilitation/masquage en fonction de la distance entre la cible et l'inducteur. Graphique 3.3(a) : données de Dresp (1993) (sujets CB et BD) et Morgan & Dresp (1995) (sujet MM) pour de petites cibles de polarités positives sans orientation préférentielle. La luminance du fond utilisée était de 10 cd/m^2 et celle de l'inducteur de 22 cd/m^2 pour Dresp (1993) avec une cible de taille $1,5'$. La luminance du fond était de $20,6 \text{ cd/m}^2$ et celle de l'inducteur de $24,2 \text{ cd/m}^2$ pour Morgan & Dresp (1995) avec une cible de taille $3,6'$. Graphique 3.3(b) : données de Brincat & Westheimer (2000) pour des expériences de discrimination de l'orientation avec des cibles et inducteurs de même polarité (triangle ouvert) et de polarité opposée (triangles remplis).

fonction du contraste de Michelson de l'inducteur (voir annexe A.4). Les luminances du fond utilisées dans chaque étude sont données dans la légende du graphique. Dans l'étude de Solomon et al. (1999) est utilisée une cible de type Gabor, et dans celle de Morgan & Dresp (1995) un point. La cible avait toujours une polarité positive dans les deux études. Il est intéressant de voir que les résultats des deux études sont similaires. Pour des inducteurs de polarités négatives (noir), il n'y a pas d'effet sur la détection de la cible. Pour des inducteurs de polarité positive (blanc), une facilitation apparaît dans les deux études. Elle est beaucoup plus importante chez Solomon et al. (1999), allant jusqu'à une amplitude de 0,5, alors que les résultats de Morgan & Dresp (1995) montrent une facilitation maximale d'environ 0,8. Cette différence peut être attribuée à deux facteurs : le manque d'information sur l'orientation de la cible dans l'étude de Morgan & Dresp (1995) alors que la cible a une orientation préférentielle dans l'étude de Solomon et al. (1999), ou la présence des deux polarités (positive et négative) dans l'étude de Solomon et al. (1999) augmentant ainsi l'effet de facilitation de manière cumulative par les deux polarités.

Morgan & Dresp (1995) et Dresp (1993)

La figure 3.3(a) présente les données de Morgan & Dresp (1995) (leur figure 8) et Dresp (1993) (sa figure 5(a)). L'amplitude de facilitation/masquage est représentée en fonction de la distance angulaire entre les deux stimuli. Dans ces deux études, les cibles étaient de petite taille et sans information d'orientation, avec des inducteurs du type lignes de longueur $28'$ chez Morgan & Dresp (1995) et $15'$ pour Dresp (1993). Les stimuli étaient de polarités positives.

Même si la luminance du fond n'était pas identique dans les deux études, il apparaît que l'effet de l'inducteur sur la détection de la cible est une facilitation. L'amplitude atteint une valeur de 0,8 jusqu'à une distance angulaire de 10', à partir de laquelle l'amplitude remonte rapidement à 1, indiquant une absence d'effet au-delà d'une distance d'environ 13'.

Brincat & Westheimer (2000) et Wehrhahn & Dresch (1998)

La figure 3.3(b) présente les données de Brincat & Westheimer (2000) (leur figure 1). Ils ont effectué des mesures de discrimination de l'orientation d'une cible avec un inducteur et ont trouvé que pour des polarités identiques des deux stimuli l'amplitude de facilitation/masquage, en terme de discrimination de l'orientation de la cible, est aussi diminuée à 0,5 et ce pour les trois distances qu'ils ont testées. Pour des polarités opposées, ils ont trouvé que l'amplitude diminue vers 0,5 avec l'augmentation de la séparation spatiale. Ils ont montré ainsi qu'un deuxième régime d'intégration des stimuli colinéaires est présent au-delà d'une certaine séparation angulaire avec un deuxième type de méthodologie expérimentale. Il faut remarquer que ceci était déjà présent dans les données de Wehrhahn & Dresch (1998). Ils ont effectué juste une mesure pour une séparation de 21'. Ils obtiennent aussi une amplitude de facilitation/masquage d'environ 0,6 pour des polarités opposées, quelle que soit la polarité de la cible à détecter.

Zenger & Sagi (1996)

Les données de Zenger & Sagi (1996) n'ont pas pu être reprises à cause de la méthode de présentation choisie dans leur étude. Les valeurs des luminances des inducteurs ont été divisées par le seuil contrôle de chaque sujet. D.Sagi nous a fournis comme information que les seuils des différents sujets étaient aux environs de 5% à 10% de la luminance du fond. Une telle variation ne nous permet pas de représenter l'amplitude de facilitation/masquage en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur, puisqu'une variation d'un facteur 2 du seuil change considérablement la représentation en contraste de Michelson, qui n'est pas linéaire. Les informations intéressantes sur la variation de l'amplitude en fonction de l'intensité de l'inducteur, ainsi que l'étude sur l'effet d'apprentissage qu'ils ont analysé, seront discutées dans les parties concernées.

De ces différentes études, il apparaît que deux régimes d'intégration de segments de lignes alignés sont présents au niveau perceptif. Le premier, largement étudié avec des stimuli de type lignes et Gabor, semble être sensible à la polarité des stimuli, à l'intensité de l'élément inducteur, et semble être effectif jusqu'à une séparation spatiale d'environ 15'.

Au-delà, un deuxième régime d'intégration apparaît, non sensible à la polarité des stimuli. Pour deux types de méthodologie expérimentale, mesure du seuil de détection et mesure du seuil de discrimination de l'orientation de la cible, des résultats qualitativement et quantitativement identiques sont obtenus à des distances de 20' (ou 1/3°). Il semblerait qu'à cette distance, la polarité des stimuli n'intervient pas dans leur interaction. Cependant, les mesures ont été

effectuées à des fonds différents, et pour des contrastes d'inducteur fixe. La distance jusqu'à laquelle ces interactions non spécifiques à la polarité sont présentes n'est pas connue. L'effet de la luminance du fond sur lequel sont présentés les stimuli semble être négligeable, mais des valeurs de luminance du fond faibles ont été utilisées dans ces études en comparaison de celles avec les stimuli Gabor (50 cd/m^2 en moyenne). L'effet de l'intensité de l'élément inducteur sur cette interaction n'est pas connu.

Les études avec stimuli Gabor n'ont pas approfondi les mesures à des distances supérieures à 4λ ce qui correspond en moyenne à une séparation d'environ $10'$ pour les études avec les longueurs d'ondes les plus petites. Il est difficile de prendre en compte les études avec les longueurs d'onde supérieures car elles font intervenir des éléments de surface blancs et noirs de plus en plus importants, ce qui introduit de plus en plus d'information de surface. Seules les deux premières études, Polat & Sagi (1993, 1994a), ont effectué des mesures pour des séparations supérieures à 4λ (voir graphique 3.2(a)) et il ne font que mentionner que l'effet pour des polarités opposées ne change pas les résultats (dans Polat & Sagi, 1993, p.996), sans présenter de résultats expérimentaux.

Les expériences que nous avons mises en place avaient pour but d'étudier en détail les interactions à des séparations supérieures à $20'$, appelé le régime d'intégration longue distance.

La première expérience étudie comment la luminance de la ligne inductrice interagit avec la séparation spatiale des deux lignes. Nous avons mesuré l'étendue spatiale des effets de facilitation due à un inducteur colinéaire. Nous avons vérifié si la limite spatiale de séparation des effets courte et longue distance est similaire à celle rapportée par Brincat & Westheimer (2000) avec des expériences de discrimination de l'orientation, en tenant compte que ces derniers n'ont pas cherché les limites de la facilitation longue distance. Des résultats d'études précédentes (Dresp & Grossberg, 1997) suggèrent une limite aux alentours de $2,5$ degrés pour des stimuli de longueurs suffisantes.

La deuxième expérience étudie les caractéristiques du régime longue distance. Pour une séparation angulaire fixe de $22'$, l'effet des paramètres, tels que la luminance du fond, l'intensité de l'inducteur et la polarité des stimuli, sur le régime longue distance est déterminé. De telles informations sont inexistantes dans la littérature en dehors des quelques publications qui fournissent des éléments épars (Wehrhahn & Dresp, 1998; Brincat & Westheimer, 2000; Dresp & Grossberg, 1997).

La troisième expérience étudie comment les deux régimes interagissent quand ils sont présents simultanément dans les interactions entre les deux stimuli. Ce type de résultats est déjà présent dans les données de Wehrhahn & Dresp (1998) pour une séparation spatiale de $0'$ et un fond de 5 cd/m^2 . Ils ont utilisé un inducteur de largeur plus grande que celle de la cible ce qui pourrait impliquer d'autres interactions que la colinéarité. L'expérience permet de déterminer les caractéristiques des deux régimes et les paramètres qui déterminent quel régime est prépondérant dans les interactions observées.

La quatrième expérience a été mise en place pour vérifier la possibilité d'une plasticité visuelle du régime longue distance. Des stimuli à polarité positive ont été utilisés. Les deux

directions d'alignement des stimuli, verticale ou horizontale, ont été testées.

Une dernière expérience (Expérience 5) a été effectuée pour faire un contrôle sur des variabilités observées dans l'expérience 2.

Le chapitre se termine par une discussion et une conclusion sur les expériences.

3.2 Expérience 1 : Etendue spatiale des régimes d'intégration courte et longue distance

Cette expérience n'a pas bénéficié de l'étude sur les écart-types des paramètres de la fonction psychométrique car elle a été effectuée avant l'analyse du chapitre précédent (le chapitre 2, "Estimation des écart-types des paramètres seuil et pente de la fonction psychométrique"). La méthode d'analyse et de présentation des résultats est explicitée.

L'expérience a consisté en la mesure du seuil de détection d'un stimulus cible de polarité positive présenté avec un stimulus inducteur de polarité positive. La distance entre les deux stimuli a été variée et deux intensités de l'inducteur ont été choisies, une faible et une forte. Ceci a permis de caractériser l'étendue spatiale du régime longue distance, et l'importance de l'intensité de l'inducteur.

3.2.1 Méthodes

Nous avons mesuré les seuils de détection en contraste d'une cible présentée avec un inducteur colinéaire. L'intensité de l'inducteur a été variée, ainsi que la distance bord à bord entre la cible et l'inducteur pour mesurer la distance maximale où l'interaction est encore effective. Au minimum huit distances ont été utilisées.

Sujets

Quatre sujets ont participé dans les premières expériences avec un inducteur de contraste relativement faible. Trois autres ont participé dans les expériences avec un inducteur de contraste relativement élevé. Ils avaient une vue normale ou corrigée à la normale et étaient entraînés pour les expériences psychophysiques.

Entraînement

Tous les sujets ont été entraînés pour les conditions expérimentales. 400 à 600 essais d'entraînement par sujet ont été effectués pour minimiser la variabilité intraindividuelle.

Stimuli

Les stimuli ont été présentés sur un écran monochrome de 21 pouces avec une fréquence de rafraîchissement de 60 Hz et une résolution spatiale de 640×480 pixels. La présentation a été effectuée avec un ordinateur équipé d'une carte graphique VGA. Les différents niveaux de luminance pour mesurer le contraste des lignes ont été générés par des combinaisons des niveaux RGB, calibrés avec un photomètre. La luminance du fond était constante, égale à 2 cd/m². Les luminances des cibles étaient ajustées individuellement pour chaque sujet en fonction des sessions pré-expérimentales d'entraînement. Elles étaient fixées à 2,2, 2,5, 2,8, 3,1 et 3,4 cd/m² pour les sujets SD, NL, CG, BD, MT et YK. Le sujet DW avait les valeurs 2,2, 2,5, 3,1, 3,7 et 4,3 cd/m². La luminance de l'inducteur de faible contraste était de 5 cd/m² et celui de contraste fort de 47 cd/m². Le contraste de Michelson de l'inducteur de faible contraste était de 0,42 et de celui de contraste fort de 0,92. La distance entre les sujets et l'écran était de 126 cm pour que l'angle visuel de visualisation d'un pixel soit de 1'. La longueur de la cible était de 15' et celle de l'inducteur de 25'. La largeur des deux était de 1'. La distance coaxiale entre la cible et l'inducteur variait entre 5' et 200' et des mesures pour 8 à 10 séparations spatiales ont été effectuées pour chaque sujet.

Procédure

Les stimuli ont été présentés brièvement (environ 30 ms) sur le fond de l'écran. Pendant une procédure de choix forcé à deux alternatives temporelles, le sujet devait appuyer sur une des deux touches possibles du clavier, en fonction de leur décision d'avoir vu la cible pendant le premier ou le deuxième des deux intervalles temporels successifs. Ces deux intervalles étaient séparés par un temps de 500 millisecondes. Chaque session expérimentale correspondait à un total de 200 essais successifs, présentant les cinq niveaux de luminance de la cible avec la méthode classique des stimuli constants. Pendant les sessions de tests, la cible était présentée simultanément avec l'inducteur colinéaire.

Chaque session (test et contrôle) était présentée trois fois au sujet pour effectuer trois mesures de seuil par condition expérimentale. La distance de séparation entre la cible et l'inducteur variait entre sessions. Dans la condition contrôle, la cible était présentée sans inducteur.

3.2.2 Résultats

La probabilité de détection correcte de la cible a été calculée pour chaque luminance de cible, session expérimentale et sujet. Ces probabilités ont été transformées ($\text{logit}(p) = \ln(p/(1-p))$) pour obtenir les fonctions psychométriques linéaires ($y=ax-b$) de la différence entre la luminance de la cible et la luminance du fond (contraste de la cible). Les seuils de détection (x) ont été calculés sur la base des paramètres de chaque fonction psychométrique obtenus pour chaque session expérimentale ($x=(y+b)/a$). Le seuil est défini par la proportion de détection

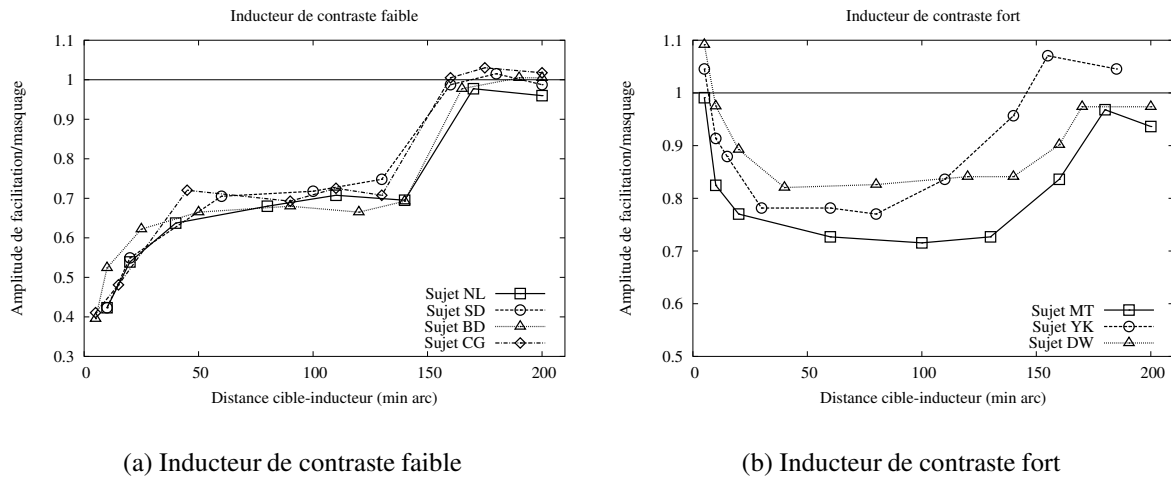


FIG. 3.4 – Amplitude de facilitation/masquage de la cible en fonction de la séparation angulaire entre les deux stimuli. Graphique (a) pour les résultats avec inducteur de contraste faible pour les sujets NL, SD, BD et CG. Graphique (b) pour les résultats avec un inducteur de contraste fort pour les sujets MT, YK et DW. Dans les deux conditions, le régime longue distance est visualisé par le plateau de facilitation constante entre environ 20' et 150'. L'intensité de l'inducteur influence l'amplitude de facilitation/masquage que pour les distances courtes, donc que le régime courte distance.

correcte (p) égale à 0,75, ce qui correspond en logit à 1,09 sur l'ordonnée y de la fonction psychométrique.

Inducteur de contraste faible

L'amplitude de facilitation/masquage des quatre sujets en fonction de la distance spatiale entre la cible et l'inducteur de faible contraste est présentée sur la Figure 3.4(a). Les données des quatre sujets sont similaires dans tous leurs aspects. La variabilité intraindividuelle des seuils n'excédait pas 5% du seuil de détection pour chaque point présenté. Les résultats montrent que la détection de la cible est beaucoup plus facile à de courtes distances. L'effet de facilitation diminue avec la séparation spatiale jusqu'à une limite d'environ 20'. A partir de cette distance, et jusqu'à environ 150', l'effet de facilitation est constant. Ce régime de facilitation de la détection décrit un domaine d'intégration visuelle longue distance au-delà duquel les seuils de détection reviennent au seuil de détection contrôle, sans inducteur.

Inducteur de contraste fort

L'amplitude de facilitation/masquage des trois sujets en fonction de la séparation spatiale entre la cible et l'inducteur de contraste fort est présentée sur la Figure 3.4(b). La variabilité intraindividuelle des seuils de détection n'excédait pas 5% du seuil présenté. Les résultats montrent que la détection de la cible est peu ou pas facilité à une distance de 5' entre la cible et l'inducteur. Le sujet DW montre un effet de masquage à cette distance, la cible a besoin de plus de contraste pour être détectée. L'effet de facilitation apparaît à partir d'une séparation de 10'.

A partir de 25', l'effet de facilitation est maximal et constant jusqu'à une séparation d'environ 150' (2,5 degrés). Ce régime constant de facilitation de la détection décrit des effets similaires à celui rapporté pour un inducteur de contraste faible. Au-delà de l'effet longue distance les seuils de détection du contraste reviennent à un niveau correspondant aux seuils contrôles des sujets.

3.2.3 Discussion

Les résultats de cette expérience montrent que deux effets peuvent être clairement identifiés pour la détection d'éléments colinéaires, c'est à dire une cible présentée avec un inducteur colinéaire. Des effets courte distance, observés quand la séparation spatiale entre les lignes est petite, et des effets longue distance observés pour de grandes séparations spatiales. Ces observations sont en accord avec les observations de Wehrhahn & Dresch (1998), et celles plus récentes de Brincat & Westheimer (2000) établis par des expériences de discrimination de l'orientation. Elles corroborent l'hypothèse que l'intégration de l'orientation suit deux régimes spatiaux fonctionnellement distincts. Brincat et Westheimer ont rapporté une limite spatiale d'environ 15' pour les effets courte distance avec la discrimination de l'orientation. Nos données sur la détection suggèrent une limite à environ 20'. Ces légères différences peuvent être dues aux longueurs des stimuli sur les interactions spatiales entre lignes colinéaires ou au manque de points de mesure à des distances intermédiaires. Brincat et Westheimer ont utilisé des lignes de longueur 10' alors que les nôtres étaient de 25' (inducteur) et 15' (cible). Ceci peut signifier que dans un domaine dynamique de longueur des lignes (à déterminer), des lignes longues peuvent montrer un effet courte distance plus étendu que des lignes courtes. Une autre possibilité est que la longueur des lignes en soit n'a pas d'effet et que la mesure de la discrimination de l'orientation donne des effets courte distance moins étendus que la mesure de la détection de lignes colinéaires. Quant aux effets longue distance, nos données suggèrent une limite spatiale à environ 150'. La limite spatiale des interactions longue distance entre lignes colinéaires n'a pas été étudiée systématiquement et des données n'étaient pas disponibles. Une étude avec des inducteurs en forme de bord de surface et des cibles plus longues (Dresch & Grossberg, 1997) suggérait que la limite spatiale des interactions longue distance doit se situer aux alentours de 2,5 degrés. Ceci est cohérent avec les résultats présents. Nos données clarifient l'effet de l'importance du contraste relatif de l'inducteur pour les deux régimes d'intégration spatiale. Pour l'effet courte distance, la détection de la cible est très nettement facilitée pour de faibles contrastes d'inducteurs et tend à être supprimée pour des contrastes d'inducteurs forts. Cet effet est cohérent avec les résultats de Polat & Sagi (1993, 1994a) et Zenger & Sagi (1996) qui ont utilisé des fonctions de Gabor comme stimuli. Ceci confirme aussi les résultats de Wehrhahn & Dresch (1998) qui ont utilisé des inducteurs longs et épais adjacents à la cible. Pour les effets longue distance, nous avons trouvé que la facilitation de la détection est indépendante de l'intensité de l'inducteur. Ces résultats, une fois de plus, montrent que les effets importants obtenus à des séparations spatiales faibles entre lignes colinéaires sont supprimés dans le domaine longue distance. Les effets longue distance montrent une facilitation constante

de la détection indépendamment des attributs des stimuli autres que l'iso-orientation.

Correspondances neurophysiologiques

Il est communément accepté que le support physiologique de l'intégration de l'orientation à différentes séparations spatiales se trouve dans les interactions latérales entre des ensembles neuraux de la structure V1 (e.g. Brincat & Westheimer, 2000; Gilbert, 1998; Kapadia, Ito, Gilbert & Westheimer, 1995; Polat, 1999; Callaway, 1998). Il est probable que les deux régimes, courte et longue distance, utilisent de telles interactions. Nous supposons que de telles interactions impliquent des degrés changeant avec la séparation spatiale de manière quantitative et qualitative des connexions neurales. Une telle représentation est cohérente avec les données neuroanatomiques de Bosking, Zhang, Schofield, & Fitzpatrick (1997). Leur étude a combiné des images optiques des signaux nerveux intrinsèques avec des injections extra-cellulaires pour déterminer de manière quantitative la spécificité des connexions horizontales en fonction de l'orientation préférentielle des différentes régions connectées (dans le cortex de la musaraigne de l'arbre). Leurs résultats montrent une différence importante entre les connexions locales des connexions longues distances. Les connexions locales apparaissent comme peu spécifiques à l'orientation, contrairement aux connexions horizontales longues distances, qui lient préférentiellement des groupes de neurones avec champs récepteurs iso-orientés. Cette différence dans la spécificité des connexions locales et horizontales peut refléter, comme suggéré par d'autres études neurophysiologiques (e.g. Albus & Wahle, 1994), une différence de la contribution relative des neurones excitateurs et inhibiteurs avec une plus grande contribution de l'activité inhibitrice aux connexions locales (Bosking et al., 1997). Une telle différence entre les poids des connexions excitatrices et inhibitrices peut être la clef de la compréhension de la question : pourquoi les interactions courte distance entre éléments colinéaires produisent parfois des effets facilitateurs et d'autres fois des effets inhibiteurs, alors que les interactions longues distances produisent exclusivement des effets facilitateurs. Pour de courtes distances, des éléments colinéaires peuvent impliquer des connexions excitatrices ou/et inhibitrices en fonction des changements locaux des paramètres des stimuli. Pour de longues distances seulement de la facilitation apparaît car seuls sont impliqués des connexions excitatrices.

3.3 Expérience 2 : Caractéristiques fonctionnelles du régime longue distance

Nous avons décidé de caractériser le régime longue distance par rapport à l'intensité de l'inducteur, la polarité des stimuli et de la luminance du fond. Pour une distance fixe de 22' entre la cible et l'inducteur, les seuils de détection d'une cible avec inducteur ont été mesurés pour différentes luminances du fond, de l'inducteur et toutes les combinaisons de polarités cible/inducteur.

3.3.1 Méthodes

Un total de 110 seuils de détection du contraste a été mesuré dans les conditions contrôles et tests. Pour chaque bloc de mesures, six niveaux d'intensité de la cible ont été présentés avec la méthode des stimuli constants. Chaque estimation de seuil a été effectuée à partir d'un total d'au moins 600 essais avec la méthode présentée dans le chapitre "Estimation des écart-types des paramètres seuil et pente de la fonction psychométrique" (chapitre 2). L'intensité et la polarité de l'inducteur et de la cible, ainsi que la luminance du fond sur lequel sont présentés les stimuli, ont été variées.

Sujets

Six sujets, entraînés dans les tâches de psychophysique visuelle, ont participé à ces expériences. Ils ont une vue normale ou corrigée à la normale.

Entraînement

Tous les sujets ont été entraînés avant les expériences. Au moins 480 essais par sujet et condition expérimentale ont été effectués pour diminuer la variabilité intraindividuelle.

Stimuli

Les stimuli ont été présentés sur un écran monochrome de taille 21 pouces, avec un taux de rafraîchissement de 60 Hz et une résolution de 640×480 pixels. Ils ont été générés avec un PC équipé d'une carte graphique VGA Trident. Les différents niveaux de luminance ont été obtenus à l'aide de combinaisons des signaux RGB, calibrés avec un photomètre. La luminance des cibles noires et blanches a été ajustée individuellement pour chaque sujet en fonction des sessions pré expérimentales d'entraînement. On a pris soin que le contraste maximal de la cible produise une performance du sujet proche de 100% de bonnes réponses et le contraste le plus faible une performance proche du niveau de chance. La luminance du fond était fixée à 5, 20 ou 40 cd/m^2 . La luminance de l'inducteur était 0, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50 ou 60 cd/m^2 pour le fond de 5 cd/m^2 . La luminance de l'inducteur était 0, 10, 20, 30, 40, 50 ou 60 cd/m^2 pour le fond de 20 cd/m^2 , et 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 ou 90 cd/m^2 pour le fond de 40 cd/m^2 . Ces combinaisons ont produit des inducteurs de contraste de Michelson variables. La distance du sujet à l'écran était de 2,5 mètres, et l'angle visuel sous-tendu par un pixel était d'environ $0,8'$. La longueur de la cible était de $24'$ et celle de l'inducteur de $41'$. Tous les stimuli étaient larges de $0,8'$. La distance entre la cible et l'inducteur était de $22'$ dans toutes les conditions de test (inducteur avec cible) pour s'assurer que les stimuli se trouvent dans le régime d'intégration longue distance. Les seuils ont été mesurés pour des cibles et inducteurs présentés simultanément sur un fond de luminance donnée. Deux petites barres de fixation, d'intensité juste perceptible et de polarité

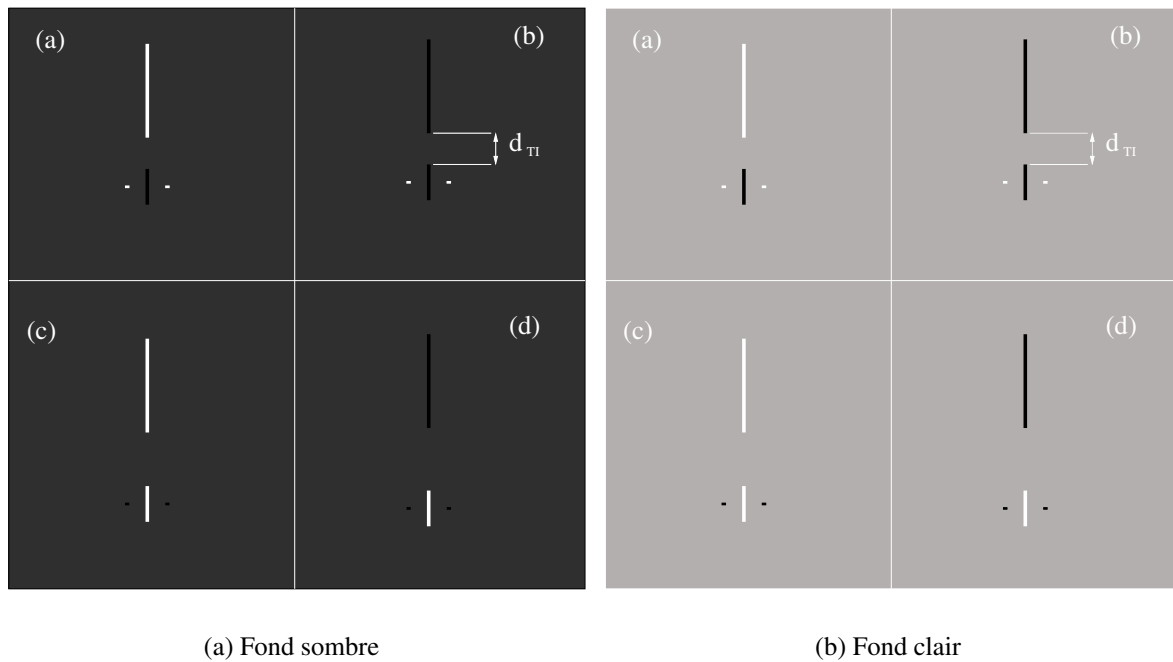


FIG. 3.5 – Illustration des stimuli visuels présentés pour une luminance du fond faible et forte. Les figures (a) et (b) présentent une cible noire avec un inducteur blanc et noir. Les figures (c) et (d) présentent une cible blanche avec un inducteur blanc et noir. Le contraste de la cible, de l'inducteur et des marques de fixation est augmenté pour l'illustration. d_{CI} représente la séparation angulaire cible-inducteur.

opposée à celle de la cible, étaient présentes de manière continue au centre de l'écran, indiquant la localisation spatiale exacte où la cible devait apparaître (voir figure 3.5).

Procédure

Les stimuli étaient présentés brièvement (33 millisecondes) sur le fond de luminance constante pendant une session expérimentale. Pendant une procédure de choix forcé à deux alternatives temporelles, le sujet devait presser une touche du clavier d'ordinateur parmi deux pour indiquer dans quel intervalle temporel il pensait avoir vu la cible. Les deux intervalles étaient séparés temporellement de 500 millisecondes. Chaque bloc expérimental consistait en 120 essais successifs, présentant les six différents niveaux de contraste de la cible de manière pseudo-aléatoire, avec la méthode des stimuli constants. Dans les sessions tests, une cible blanche ou noire était présentée simultanément avec un inducteur noir ou blanc colinéaire. Un bloc était répété successivement cinq fois par chaque sujet. Ainsi un total de 600 essais avec 100 essais par niveau de contraste de la cible a été obtenu pour chaque condition expérimentale et chaque sujet. Pour chaque sujet, les seuils de détection pour un fond donné ont été mesurés dans une période d'une semaine.

3.3.2 Résultats

Le pourcentage, ou probabilité, de détection correcte de la cible a été calculé pour chaque niveau du contraste de la cible, condition expérimentale et sujet. Sur la base de ces probabilités, le seuil à 75% de réponses correctes a été extrapolé pour chaque sujet et condition expérimentale. Une fonction logistique a été ajustée aux données avec la méthode présentée au chapitre 2.

Tous les résultats sont exprimés en terme d'amplitude de facilitation/masquage pour une condition expérimentale donnée. Un seuil de détection du contraste d'une cible blanche ou noire présentée avec un inducteur a été divisé par le seuil de détection du contraste pour la cible présentée seule (seuil contrôle). Dans les graphiques (figures 3.6 à 3.8) une amplitude inférieure à 1 indique une facilitation de la détection de la cible par la présence de l'inducteur ; une valeur supérieure à 1 indique une suppression de la détection de la cible par la présence de l'inducteur. Les barres d'erreurs représentent les écart-types asymptotiques des paramètres, normalisés à l'amplitude de facilitation/masquage pour la condition expérimentale donnée. Les écart-types des conditions contrôles sont présentés dans la légende de chaque figure. Les amplitudes de facilitation/masquage de la cible sont présentées en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur et de la luminance du fond sur lequel étaient présentés les stimuli. Les contrastes de Michelson négatifs correspondent à des inducteurs noirs, et positifs à des inducteurs blancs. Les amplitudes de facilitation/masquage pour les cibles blanches sont représentées avec des symboles ouverts (blanc), pour les cibles noires avec des symboles pleins (noir). La figure 3.6 présente les résultats pour le fond de luminance 5 cd/m^2 , la figure 3.7 pour le fond de 20 cd/m^2 et la figure 3.8 pour le fond de 40 cd/m^2 .

Cible et inducteur de polarités identiques

Les cibles et inducteurs de polarités identiques sur les graphiques correspondent aux points blancs avec des inducteurs de contraste de Michelson positif (points blancs à droite du zéro de l'abscisse), et aux points noirs avec des inducteurs de contraste de Michelson négatifs (points noirs à gauche du zéro de l'abscisse). Ils présentent des interactions exclusivement facilitatrices. Une comparaison entre les figures 3.6, 3.7 et 3.8 montre qu'un inducteur blanc facilite la détection d'une cible blanche et qu'un inducteur noir facilite la détection d'une cible noire. Ces effets de facilitation sont parfois plus forts avec des inducteurs de contraste de Michelson plus forts mais il n'y a pas de tendance générale d'augmentation de la facilitation avec l'augmentation du contraste de Michelson. Ces effets de facilitation sont aussi indépendants de la luminance du fond.

Cible et inducteur de polarités opposées

Les stimuli de polarité opposée correspondent aux points blancs avec des inducteurs de contraste de Michelson négatifs (points blancs à gauche du zéro de l'abscisse), et aux points

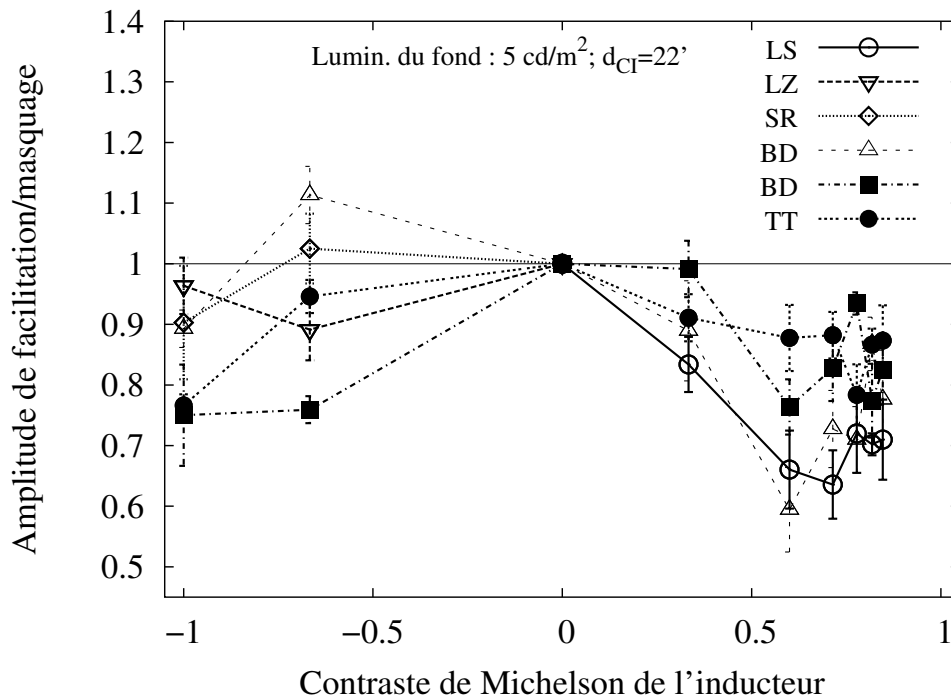


FIG. 3.6 – Amplitude de facilitation (valeur < 1) / masquage (valeur > 1) en fonction du contraste de Michelson de l'inducteur. Les amplitudes ont été calculées en divisant le contraste seuil pour la détection de la cible avec inducteur (condition test) par le contraste seuil pour la détection de la cible seule (condition contrôle). Les amplitudes pour des cibles blanches sont représentées avec des symboles ouverts (blancs), les amplitudes pour des cibles noires avec des symboles fermés (noirs). Séparation angulaire cible-inducteur (d_{CI}) de $22'$. Un contraste de Michelson de l'inducteur négatif indique un inducteur noir, un contraste positif indique un inducteur blanc. Ici, résultats pour le fond de 5 cd/m^2 . Écart-type de la valeur contrôle (sujet valeur) ; pour la cible blanche : (LS 0,040), (LZ 0,032), (SR 0,076) et (BD 0,023) ; pour la cible noire : (TT 0,090) et (BD 0,021).

noirs avec des inducteurs de contraste de Michelson positif (points noirs à droite du zéro de l'abscisse). Ils ont montré des interactions facilitatrices et inhibitrices. Pour un fond de 20 cd/m^2 (figure 3.7), un inducteur de polarité quelconque facilite la détection d'une cible de polarité quelconque. Les effets de facilitation ne semblent pas augmenter de manière systématique avec l'augmentation du contraste de Michelson de l'inducteur. Cependant, pour les luminances du fond de 5 et 40 cd/m^2 (figures 3.6 et 3.8), les effets des inducteurs noirs et des inducteurs blancs sur la détection de la cible colinéaire deviennent asymétriques. Pour le fond de 5 cd/m^2 , les inducteurs noirs ne facilitent pas, ou très peu, la détection d'une cible blanche, alors qu'un inducteur blanc facilite fortement la détection d'une cible noire. Pour une forte luminance du fond (40 cd/m^2), les inducteurs blancs peuvent faciliter de manière forte la détection d'une cible noire (sujets TT et BD). Il faut cependant noter que le sujet BD, pour l'inducteur blanc avec le plus fort contraste, ne montre aucune facilitation, ni suppression, de la détection de la cible noire. Les résultats montrent que la détection d'une cible blanche peut être supprimée (sujets LS et BD), inchangée (sujet TT), ou facilitée (sujet LZ) par un inducteur noir.

En résumé, des cibles et inducteurs de même polarité semblent produire des résultats identiques et systématiques de facilitation et ne sont pas affectés par les changements de la lumi-

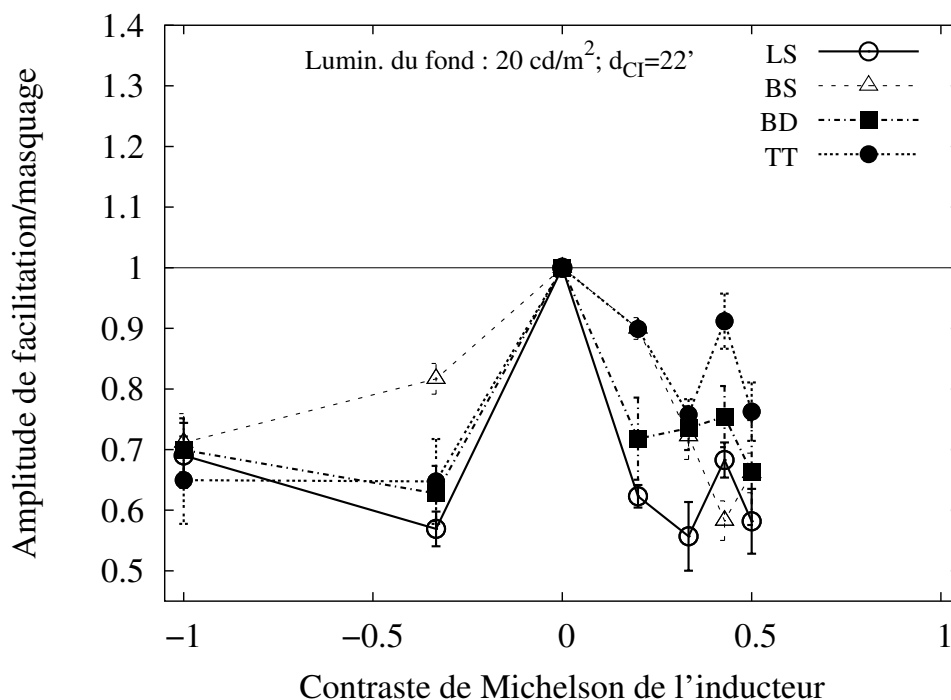


FIG. 3.7 – Comme pour la figure 3.6, ici pour une luminance du fond de 20 cd/m^2 . Écart-type de la valeur contrôle (sujet valeur) ; pour la cible blanche : (LS 0,072) et (BS 0,030) ; pour la cible noire : (TT 0,060) et (BD 0,053).

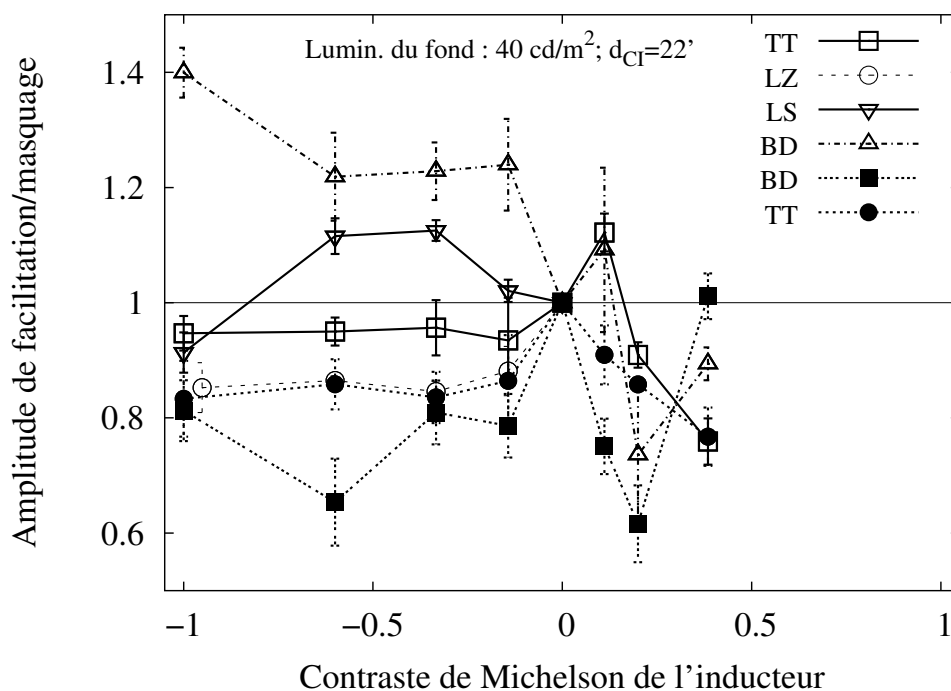


FIG. 3.8 – Comme pour la figure 3.6, pour une luminance du fond de 40 cd/m^2 . Écart-type de la valeur contrôle (sujet valeur) ; pour la cible blanche : (TT 0,071), (LZ 0,042), (LS 0,066) et (BD 0,074) ; pour la cible noire : (BD 0,077) et (TT 0,020).

nance du fond. Des cibles et inducteurs de polarité opposée ne produisent pas des effets systématiques de facilitation ou masquage et des variations importantes entre sujets sont présentes.

3.3.3 Discussion

Nos résultats montrent que quand une cible et un inducteur colinéaires, séparés par une distance de 22', ont la même polarité, l'inducteur facilite toujours la détection de la cible. L'amplitude de cette facilitation peut atteindre jusqu'à 40% du seuil contrôle, mesuré dans une condition sans inducteur. Ceci implique que les interactions dans le régime longue distance entre orientations de même polarités sont toujours facilitatrices, confirmant des résultats antérieurs (Wehrhahn & Dresch, 1998; Brincat & Westheimer, 2000) et l'expérience précédente (Expérience 1).

Quand la cible et l'inducteur ont des polarités opposées, un inducteur blanc facilite de manière générale la détection d'une cible noire, quelle que soit la luminance du fond sur lequel sont présentés les stimuli. Ceci est beaucoup moins valable pour un inducteur noir avec une cible blanche. L'amplitude de facilitation peut atteindre, comme dans le cas des stimuli de polarités identiques, jusqu'à 40% du seuil contrôle, mais dans la plupart des cas cette facilitation est plus faible.

Dans le régime longue distance, Wehrhahn & Dresch (1998) ont trouvé que pour un fond de 5 cd/m² un inducteur noir facilite la détection d'une cible blanche d'environ 40% par rapport au seuil de détection contrôle. Ces auteurs ont utilisé un inducteur beaucoup plus large (largeur 5', hauteur 50') en comparaison avec ceux utilisés dans cette expérience (largeur 0,8', hauteur 41'). Nous avons trouvé qu'un inducteur noir peut supprimer ou légèrement faciliter la détection d'une cible blanche. La variabilité est importante et plus forte qu'avec des stimuli de même polarité. Une variabilité intersujets similaire a été rapportée pour des stimuli Gabor ou lignes colinéaires de polarités opposées, mais pour des séparations beaucoup plus faibles que 22' (e.g. Zenger & Sagi, 1996; Morgan & Dresch, 1995). En dernier, pour le fond de 40 cd/m², nous avons trouvé que les effets obtenus avec des stimuli de polarités opposées sont fortement asymétriques, asymétrie faiblement ou pas présente pour des fonds plus faibles.

Asymétries des interactions des voies ON et OFF

Les interactions à polarités opposées semblent asymétriques. L'interaction *Noir-vers-Blanc* montre de fortes asymétries en fonction de la luminance du fond et des sujets. Nous avons vérifié si ces asymétries peuvent être expliquées par un changement au niveau des deux voies visuelles dans : (1) le niveau d'adaptation rétinien à une luminance (scotopique, mésopique ou photopique), (2) le régime d'intégration du contraste de la cible, ou (3) une variation de l'interaction *OFF-vers-ON* avec la luminance du fond.

Dans nos expériences, nous avons utilisé des niveaux de luminance pour le fond dans le domaine photopique, une luminance de 5 cd/m² correspondant approximativement à 50 Trolands (Le Grand, 1975). Ainsi, l'hypothèse que des niveaux d'adaptation visuelle différents puissent être impliqués dans les effets qui sont rapportés peut être éliminée. Nous avons aussi vérifié le régime d'intégration de l'information visuelle pour les segments de lignes en mesurant les seuils

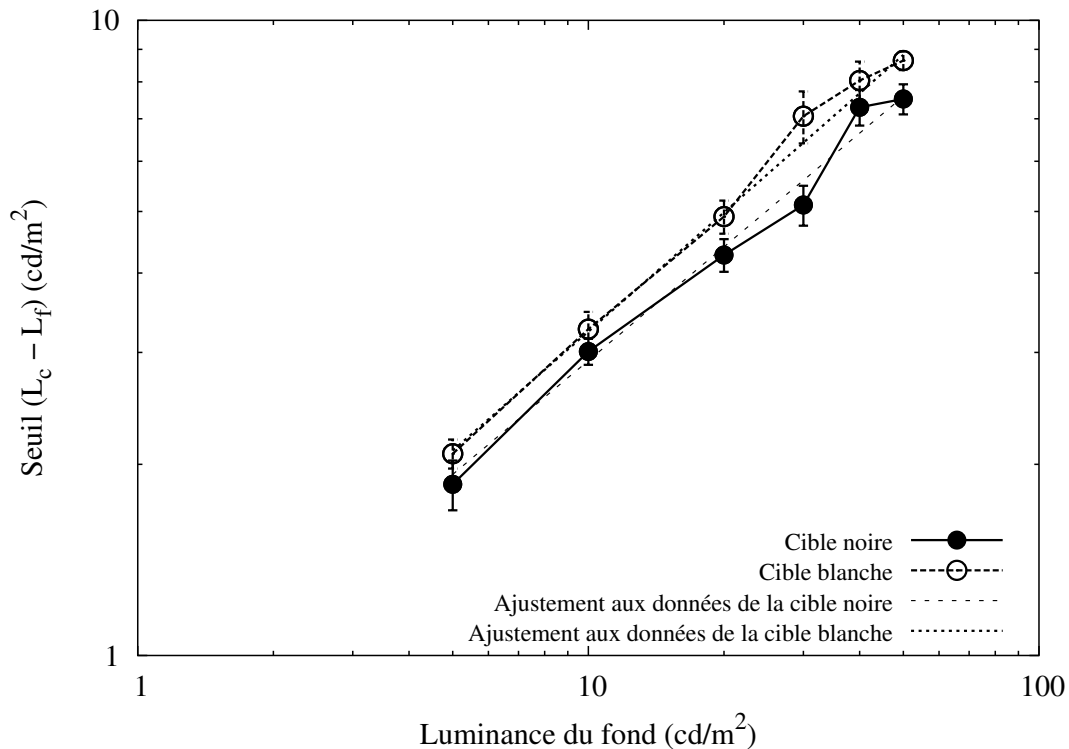


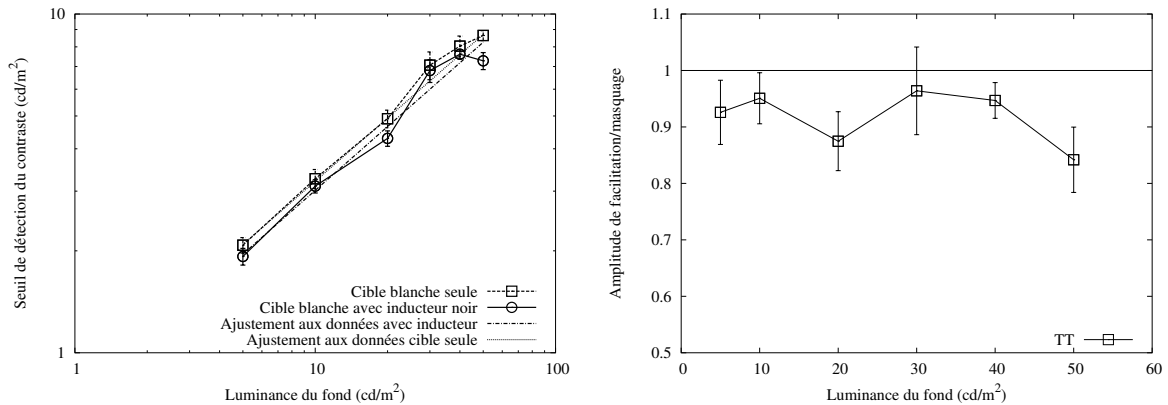
FIG. 3.9 – Seuil de détection du contraste de la cible seule en fonction du niveau de luminance du fond pour des cibles noires et blanches. Les seuils des cibles noires sont négatifs et pour la présentation ont été multipliés par -1 . Une fonction puissance (équation 3.2) a été ajustée à chaque ensemble de données, obtenant ($a = 0,59 \pm 0,04$; $b = 0,74 \pm 0,08$) pour la cible noire, et ($a = 0,62 \pm 0,02$; $b = 0,77 \pm 0,04$) pour la cible blanche. Ces valeurs correspondent à la loi de de Vries-Rose, avec une puissance proche de 0,5.

de détection du contraste de cibles blanches et noires, présentées sans inducteur, en fonction de la luminance du fond, L_f (voir annexe A.5). En ajustant une fonction puissance du type :

$$f(L_f) = bL_f^a \quad (3.2)$$

à ces données (voir figure 3.9), nous avons obtenu un exposant constant d'environ 0,6 pour les deux types de polarités qui activent sélectivement la voie ON ou OFF. Ceci indique que les types de cibles se trouvent dans le régime d'intégration de la loi de de Vries-Rose (voir l'annexe A.5). Ainsi, des effets qui pourraient être dus à un changement dans le régime d'intégration du contraste en soit peuvent être éliminés.

Le paragraphe précédent montre que l'adaptation visuelle et le régime d'intégration du contraste de la cible ne semblent pas intervenir dans les asymétries observées entre les différentes conditions expérimentales, sujets et luminances du fond de l'écran. Etant donné qu'une asymétrie importante pour l'interaction *OFF-vers-ON* est présente au fond de 40 cd/m^2 , et que les deux points mentionnés ci-dessus ne semblent pas intervenir, il reste la possibilité que le changement dans ces interactions se produit avec la variation de la luminance du fond. Pour cette raison, un sujet (TT) a effectué une mesure pour les six luminances du fond avec exactement la même méthodologie expérimentale que précédemment. Le seuil de détection du contraste d'une



(a) Seuil de détection du contraste d'une cible blanche avec et sans inducteur noir en fonction de la luminance du fond.

(b) Amplitude de facilitation/masquage en fonction de la luminance du fond.

FIG. 3.10 – Seuil de détection du contraste du sujet TT pour une cible blanche seule, ou avec un inducteur noir de contraste maximal ($C_M = -1$), en fonction de la luminance du fond (graphique (a)), et amplitude de facilitation/masquage de cette cible blanche avec l'inducteur noir en fonction de la luminance du fond (graphique (b)). Les données des seuils cible avec inducteur ont été ajustées avec une fonction puissance (équation 3.2) pour vérifier si un changement dans le régime de de Vries-Rose est présent. L'ajustement des données cible avec inducteur donne les coefficients ($a = 0,62 \pm 0,05$; $b = 0,71 \pm 0,11$).

cible blanche seule (condition contrôle), ou avec un inducteur noir de contraste de Michelson maximal ($C_M = -1$, condition test), a été mesuré pour les six luminances du fond (données présentés dans la figure 3.10(a)). Ainsi, si un changement des interactions *OFF-vers-ON* avec la variation du fond est présent la fonction d'intégration du régime de de Vries-Rose devrait être modifiée. Ceci pourrait être visualisé par une puissance différente dans l'équation 3.2 pour les conditions testées de celle des conditions contrôle. L'ajustement donne une puissance identique dans les deux cas de figure : $a = 0,62 \pm 0,02$ pour la cible seule, et $a = 0,62 \pm 0,05$ pour la cible avec inducteur noir. La figure 3.10(b) présente l'amplitude de facilitation/masquage de la cible blanche avec un inducteur noir en fonction de la luminance du fond. On y remarque que l'amplitude n'est pas significativement différentes d'un fond à l'autre. Ces résultats semblent indiquer que l'interaction *OFF-vers-ON* pour ce sujet ne varie pas systématiquement avec la luminance du fond de l'écran.

Interaction entre les voies ON et OFF dans le régime d'intégration longue distance

Bowen (1995) a montré que la discrimination de contraste avec des motifs sinusoïdaux dans le régime courte distance (pas de séparation spatiale entre le motif de masquage et la cible à détecter) révèle des interactions entre motifs de contraste positifs et négatifs. Les effets de polarité des motifs obtenus en fonction de l'intensité du motif de masquage ou de l'intensité du motif de fond, ont montré des effets facilitateurs pour des polarités identiques et inhibiteurs pour

des polarités opposées. Il en a conclu que ces effets peuvent être expliqués par des interactions entre voies ON et OFF du système visuel. Même si au niveau rétinien les deux voies contribuent à la détection des changements de luminance ou contraste (e.g. Schiller , 1992), il est considéré qu'un stimulus bien défini n'activera qu'une des deux voies au niveau cortical (V1 ; e.g. Tyler, Chan, & Liu , 1992). Les interactions entre voies ON et OFF apparaîtront quand la réponse d'une voie, activée par un stimulus de polarité appropriée, sera influencée par la réponse de la deuxième voie, activée par un stimulus de polarité opposée.

Les résultats de cette expérience pour le fond de 40 cd/m² peuvent être interprétés en termes d'interactions longue distance excitatrices/inhibitrices *ON-vers-OFF* et *OFF-vers-ON*. Pour des stimuli de même polarité, une facilitation apparaît à cause d'une augmentation des réponses d'une seule et unique voie (ON ou OFF). Quand un inducteur blanc est présenté avec une cible noire, la réponse de la voie OFF activée par la cible interagit avec la réponse de la voie ON activée par l'inducteur. Nos données montrent des interactions *ON-vers-OFF* exclusivement excitatrices (voir figure 3.11). Ces résultats sont en accord avec les résultats de Brincat & Westheimer (2000) utilisant la méthode expérimentale de discrimination de l'orientation (*tilt experiments*), et de Wehrhahn & Dresch (1998) avec la méthode de mesure du seuil de détection du contraste.

Quand une cible blanche est présentée avec un inducteur noir, la réponse de la voie ON activée par la cible interagit avec la réponse de la voie OFF activée par l'inducteur. Les différences intersujets obtenues pour le fond de 40 cd/m² impliquent que les interactions longues distances entre les voies ON et OFF sont sujettes à de fortes variabilités intersujets. L'asymétrie entre les voies ON et OFF pourrait expliquer que les données pour la cible noire et inducteur blanc présentent moins de variabilité (par exemple Magnussen & Glad , 1974).

Correspondances neurophysiologiques

Des données neurophysiologiques (Chen, Kasamatsu, Polat & Norcia , 2001; Polat, Mizobe, Pettet, & Kasamatsu , 1998; Mizobe, Polat, Pettet & Kasamatsu , 2001) montrent qu'un inducteur de contraste fort change la fonction de réponse au contraste (FRC) d'un neurone de l'aire V1 quand l'inducteur est placé en dehors du champ récepteur du neurone. Ces résultats se réfèrent à des mesures pour un fond de luminance de 40 cd/m² avec un inducteur de contraste fort. Environ 40% des neurones étudiés ont montré un effet de facilitation sur la FRC pour de faibles contrastes de la cible, et des effets de suppression à de forts contrastes de la cible. Ces

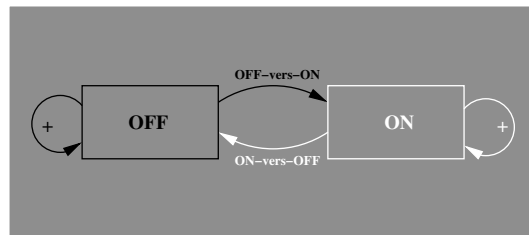


FIG. 3.11 – Résumé des interactions longues distances entre les voies ON et OFF. La voie OFF et les connexions qu'elle fait sont représentés en noir; la voie ON et les connexions qu'elle fait sont représentés en blanc. Nous avons trouvé que les interactions *ON-vers-OFF* sont exclusivement excitatrices. Les interactions *OFF-vers-ON* varient entre sujets et avec la luminance du fond. A l'intérieur d'une voie, les interactions longues distances sont exclusivement excitatrices.

résultats ont été obtenus pour des caractéristiques spatiales et temporelles identiques de la cible et de l'inducteur (les stimuli étaient des fonctions de Gabor), et des distances de séparations centre à centre allant jusqu'à 12 degrés d'angle visuel (Mizobe et al., 2001). Puisque dans nos expériences la plupart des contrastes des inducteurs étaient bien au-dessus du seuil de détection du contraste de la cible, nos résultats pour tous les fonds et pour des polarités identiques sont cohérents avec les données neurophysiologiques. Pour le fond de 40 cd/m² (figure 3.8), le point avec l'inducteur blanc le plus faible ($C_M = 0, 11$) qui ne montre pas de facilitation est expliqué par le fait que le contraste de cet inducteur était trop proche du seuil de détection du contraste de la cible pour produire un effet de facilitation important.

En ce qui concerne les cibles et inducteurs de polarités opposées présentés sur le fond de luminance 40 cd/m², nous avons trouvé qu'un inducteur noir de fort contraste n'aide pas à la détection d'une cible blanche. Pour deux sujets il y a de la suppression, un sujet ne produit pas d'effet, et un quatrième sujet produit environ 15 % de facilitation. Kapadia, Westheimer & Gilbert (2000) ont montré que pour un fond constant au niveau photopique, et des caractéristiques identiques de la cible et de l'inducteur, changer le contraste d'un des deux stimuli change de manière importante la carte des interactions excitatrices/inhibitrices autour de la cible. Leur étude compare des cartes d'interactions neurophysiologiques et psychophysiques, obtenues avec les mêmes types de stimuli en utilisant des expériences de discrimination de l'orientation. Des changements significatifs dans les cartes d'interactions physiologiques et psychophysiques ont été obtenus avec la modification du contraste d'un des deux stimuli. Ceci suggère que le nombre de neurones qui présentent un effet facilitateur pour les contrastes faibles et de la suppression à des contrastes forts (comme dans Mizobe, Polat, Pettet & Kasamatsu, 2001), peut être changé de manière drastique avec le changement de la luminance du fond quand des polarités opposées sont utilisées, et que ce nombre varie entre les sujets. Ceci pourrait apporter une explication neurophysiologique plausible aux modifications dans les interactions entre des stimuli colinéaires avec le changement de la luminance du fond et du contraste des stimuli, comme celles obtenues dans nos résultats.

Représentation des contours

Les interactions longues distances entre orientations sont considérées intervenir dans les processus d'intégration des contours (e.g. Field, Hayes & Hess, 1993; Dresch, 1999; Polat, 1999). Les résultats que nous avons obtenus avec des stimuli de contrastes opposés peuvent être dus à une compétition entre les voies ON et OFF pour la création de la représentation d'un contour. Dans les stimuli que nous avons utilisés, il n'y a pas d'éléments autres que l'orientation pour la décision sur les contours (une différence de luminance de surface par exemple). Nos données suggèrent que les interactions *OFF-vers-ON* peuvent être inhibitrices alors que les interactions *ON-vers-OFF* montrent généralement de la facilitation. Ainsi, les représentations des contours impliquant la voie OFF pourraient être générées et perçues beaucoup plus facilement que celles impliquant la voie ON.

3.4 Expérience 3 : Interactions des deux régimes d'intégration spatiale

A la suite des résultats des expériences 1 et 2, et des résultats de Wehrhahn & Dresch (1998) pour une séparation angulaire cible-inducteur nulle, la question de savoir comment les deux régimes interagissent se posait.

Si un inducteur est à une distance courte, impliquant donc le régime courte distance, et si sa longueur est suffisamment grande pour que le reste de l'inducteur implique le régime longue distance, les deux régimes devraient influencer les seuils de détection de la cible (voir la figure 3.12 pour un exemple d'un inducteur noir avec une cible blanche). Ainsi, il devrait être possible d'obtenir des interactions entre les effets spécifiquement dus à chaque régime. En comparant ces résultats à ceux de l'expérience précédente, où seul le régime longue distance a été étudié, il devrait être possible de déduire l'influence des paramètres expérimentaux sur le poids relatif de l'un ou l'autre de ces deux régimes dans le mécanisme d'interaction des lignes.

Afin de clarifier cette question, nous avons fixé la distance cible-inducteur à 6', et deux sujets ont effectué les expériences dans les mêmes conditions que celles de l'expérience 2. De cette manière, les deux régimes devraient être en compétition pour la détection de la cible.

3.4.1 Méthodes

La méthodologie suit exactement celle de l'expérience 2 (section 3.3). Les points qui ont été changés sont :

1. la distance séparant les deux stimuli a été fixée à 6' ;
2. deux sujets ont participé à cette expérience, l'un ayant effectué des expériences avec les deux polarités de la cible (sujet TT), le deuxième ayant effectué les expériences seulement avec les polarités négatives de la cible (sujet JC).

3.4.2 Résultats

Les résultats sont présentés en terme d'amplitude de facilitation/masquage, de la même manière que pour les expériences 1 et 2. Ils sont présentés dans la figure 3.13 (graphiques de la

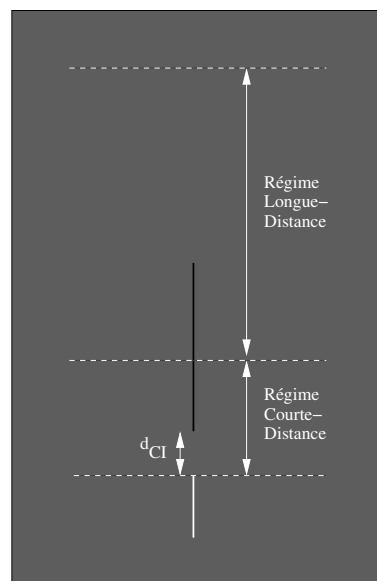


FIG. 3.12 – Exemple d'un stimulus inducteur noir, de longueur suffisante pour que, placé à une courte distance d'une cible blanche, il implique les deux régimes spatiaux d'intégration de l'orientation.

colonne de droite). Le graphique du haut pour la luminance du fond de 5 cd/m^2 , le graphique du milieu pour la luminance du fond de 20 cd/m^2 , et celui du bas pour la luminance de 40 cd/m^2 . Les cibles blanches avec des symboles ouverts (blancs), les cibles noires avec des symboles fermés (noirs), les inducteurs blancs de contraste de Michelson positif et les inducteurs noirs de contraste de Michelson négatif. Dans la colonne de gauche sont présentés les résultats de l'expérience qui a caractérisé le régime longue distance (section 3.3).

Cible et inducteur de polarités identiques

Les résultats pour des stimuli de polarités identiques montrent une facilitation qui devient très vite constante avec l'augmentation du contraste de Michelson de l'inducteur, et ce pour les trois fonds testés. L'amplitude de facilitation/masquage a une valeur variant entre 0,5 et 0,8 en fonction du fond, du contraste de l'inducteur et du sujet. Seul pour le fond de 5 cd/m^2 et les polarités positives, à partir d'un contraste de Michelson de l'inducteur d'environ 0,7, l'amplitude semble augmenter vers 1. Une variabilité importante est présente dans les données du sujet TT au-delà de cette valeur de contraste.

Cible et inducteur de polarités opposées

Pour des stimuli de polarités opposées, des interactions facilitatrices et suppressives ont été obtenues. Pour la luminance du fond de 5 cd/m^2 , un inducteur blanc semble n'avoir aucun effet sur la détection d'une cible noire (amplitude quasi-constante à 1 pour les points noirs à droite du zéro de l'abscisse) jusqu'à un contraste de Michelson de l'inducteur d'environ 0,7. A partir de cette valeur, les deux sujets obtiennent une amplitude de facilitation/masquage d'environ 0,75. Pour la luminance du fond de 20 cd/m^2 , un inducteur blanc n'a pas le même effet sur la détection de la cible noire chez les deux sujets. Pour le sujet TT aucun effet n'est visible, avec une amplitude fluctuant autour de la valeur de 1. Pour le sujet JC, l'amplitude baisse rapidement avec l'augmentation du contraste de l'inducteur, se stabilisant autour de 0,6. Vu les différences entre les deux sujets, le sujet TT a répété l'expérience et les résultats (données TT(bis)) ne diffèrent pas de ses premiers résultats. Pour le fond de 40 cd/m^2 , les deux sujets ne montrent pas d'effet de la présence de l'inducteur sur la détection de la cible. Il faut noter la variabilité des résultats pour les amplitudes proches de 1 aux fonds de 20 et 40 cd/m^2 .

Un inducteur noir semble avoir un effet de plus en plus facilitateur sur la détection de la cible avec l'augmentation de la luminance du fond. L'amplitude de facilitation/masquage passe de 1 (pas d'effet) pour le fond de 5 cd/m^2 à 0,7 (facilitation) pour le fond de 40 cd/m^2 (sujet TT). Pour une luminance de fond constante, l'effet semble être constant, sauf pour le fond de 5 cd/m^2 où un seul point est disponible.

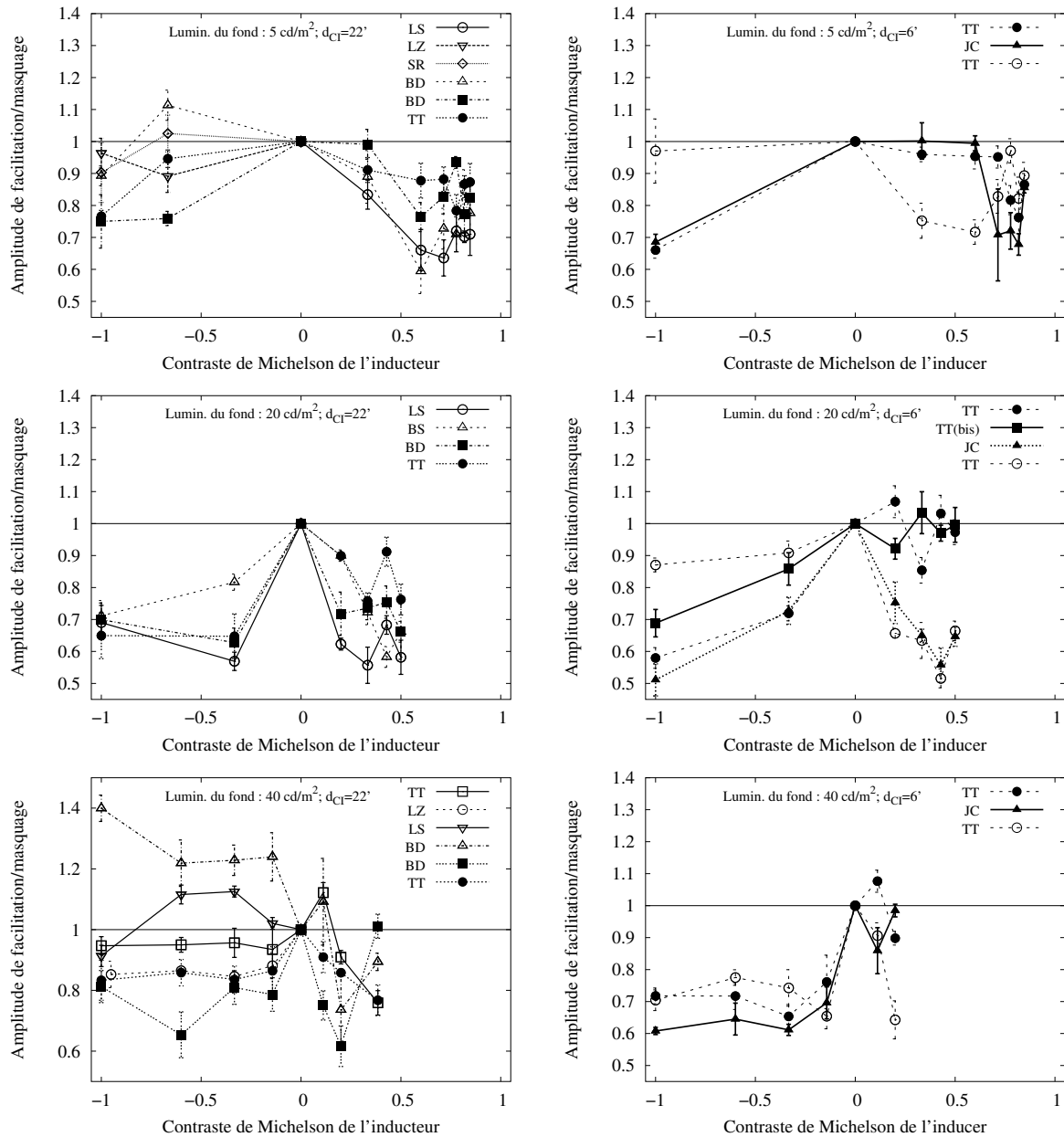


FIG. 3.13 – Résumé des résultats pour l'expérience 2 ("Caractéristique fonctionnelles du régime longue distance", section 3.3) pour une séparation angulaire de 22' (graphiques de la colonne de gauche) et l'expérience 3 ("Interactions des deux régimes d'intégration spatiale", section 3.4) pour une séparation angulaire de 6' (graphiques de la colonne de droite). Deux graphiques d'une même ligne correspondent aux données obtenues pour la même luminance du fond. Les écart-types des conditions contrôles ($C_M = 0$) pour l'expérience 3 sont : fond de 5 cd/m^2 , cible noire (TT 0,049) et (JC 0,034), cible blanche (TT 0,029); fond de 20 cd/m^2 , cible noire (TT 0,018) et (JC 0,043), cible blanche (TT 0,025); fond de 40 cd/m^2 , cible noire (TT 0,054) et (JC 0,096), cible blanche (TT 0,025).

3.4.3 Discussion

Les résultats obtenus avec une séparation spatiale de 6' entre stimuli ne présentent pas les mêmes variations que les résultats avec une séparation spatiale de 22'.

Stimuli de polarité identique

Interactions ON-vers-ON

A une distance angulaire de 6', un inducteur blanc facilite la détection d'une cible blanche. Seule pour la luminance du fond de 5 cd/m², il semblerait qu'un inducteur blanc de contraste très fort ne facilite plus beaucoup la détection de la cible blanche (contraste de Michelson de l'inducteur supérieur à 0,7). Il faut noter que pour les fonds plus forts (20 et 40 cd/m²), l'inducteur n'a pas atteint le contraste à partir duquel l'interaction semble basculer. Ce basculement doit correspondre à un changement du poids relatif de chaque régime avec l'augmentation de l'intensité de l'inducteur. Ainsi, nous obtenons les résultats de Wehrhahn & Dresch (1998) et ceux de l'expérience 1 à un moindre degré. Cela montre que pour une distance faible ou nulle, le régime courte distance devient fortement suppressif avec l'augmentation de l'intensité de l'inducteur, alors que le régime longue distance semble avoir un effet facilitateur constant. Il faut cependant noter que les résultats de Wehrhahn & Dresch (1998) peuvent aussi impliquer un effet *fin de ligne*, ou des cellules à inhibition terminale (en anglais *end-stopped cells*), à cause de la largeur beaucoup plus grande de leur inducteur (5') par rapport à la cible (1').

Interactions OFF-vers-OFF

Un inducteur noir facilite la détection d'une cible noire quelle que soit la luminance du fond et de l'inducteur. Le décrochage observé dans les données du système ON n'est pas observé pour le système OFF même pour le fond de luminance la plus élevée. Ceci peut signifier que les interactions à l'intérieur de la voie OFF ne sont pas identiques à celles de la voie ON, et que pour la voie OFF elles sont purement excitatrices. Les seules données montrant ce genre d'interaction sont celles de Wehrhahn & Dresch (1998) pour des stimuli adjacents. Ils ont obtenu des interactions qui montrent une suppression croissante avec l'augmentation du contraste de l'inducteur. Comme pour le système ON, il est possible qu'un effet *fin de ligne*, ou des cellules à inhibition terminale, soit impliqué dans cette interaction. Le fait que nous n'observons absolument pas ce genre d'effet dans nos résultats suggère une différence de comportement à courte distance quand les stimuli appartiennent à la voie ON ou à la voie OFF.

Stimuli de polarités opposées

Interactions ON-vers-OFF

Pour un sujet (TT), pour les trois luminances du fond testées, pour une séparation angulaire de 6', un inducteur blanc ne facilite pas la détection d'une cible noire jusqu'à un contraste de Michelson d'environ 0,7 (voir le fond de 5 cd/m²), alors qu'à une séparation angulaire de 22' une facilitation importante apparaît pour la majorité des sujets. Nous en déduisons que pour ce sujet, la facilitation longue distance est contrebalancée par une suppression courte distance ; le système ON (inducteur blanc) semble être excitateur pour le système OFF (cible noire) dans le régime longue distance et inhibiteur pour le régime courte distance. Il est important de noter

que pour un contraste d'inducteur suffisamment fort, il semble que le régime longue distance ON-vers-OFF devient prépondérant par rapport à l'interaction courte distance ON-vers-OFF (voir le décrochage à partir de $C_M = 0,7$ pour la luminance du fond de 5 cd/m^2). Ce type d'interaction est aussi présent dans les résultats de Wehrhahn & Dresch (1998) pour un fond de 5 cd/m^2 . La figure 3.2(b) montre qu'à partir d'un contraste de Michelson d'environ 0,2 la facilitation du régime longue distance prend le dessus sur la suppression du régime courte distance. Pour le deuxième sujet (JC) à la luminance du fond de 20 cd/m^2 , si nous nous basons sur l'idée d'interaction entre les deux régimes, il semblerait que soit le poids relatif entre les deux régimes a changé pendant les mesures, soit un changement dans un des deux régimes soit intervenu, ou il reste aussi la possibilité qu'un des deux régimes change avec la luminance du fond.

Interactions OFF-vers-ON

Pour les interactions OFF-vers-ON, à la distance de 6' nous n'avons des données que pour un seul sujet. Pour les deux distances (6' et 22', figure 3.13), les résultats pour le fond de 5 cd/m^2 se ressemblent. Aucun effet sur la détection de la cible blanche n'est observé dû à la présence d'un inducteur noir. Pour le fond de 20 cd/m^2 , le régime longue distance semble être facilitateur alors que le régime courte distance semble être suppressif, puisque le sujet TT montre une faible facilitation à une séparation de 6'. Pour le fond de 40 cd/m^2 , les effets des deux régimes d'intégration spatiale sont complètement inversés : le régime longue distance est très variable, pouvant être faiblement facilitateur pour un sujet ou fortement inhibiteur pour un deuxième, alors que le régime courte distance pour le sujet TT semble être excitateur et prépondérant quel que soit le contraste de l'inducteur noir.

Correspondances neurophysiologiques

La discussion sur les correspondances neurophysiologiques de l'expérience 2 (section 3.3) doit être reprise suite aux résultats qui viennent d'être rapportés.

Il s'avère que les interactions longue et courte distances peuvent être très différentes en fonction du système (ON ou OFF) qui agit sur l'autre, ou encore en fonction du système dans lequel ont lieu les interactions (ON seul ou OFF seul), et en fonction de la distance qui sépare les deux stimuli.

Hubel & Wiesel (1974a,b) ont montré que dans le système visuel primaire du singe, une hypercolonne orientationnelle (colonne qui contient des neurones avec des champs récepteurs qui représentent toutes les orientations possibles pour une localisation sur la rétine) est répétée environ tous les 0,25 degré au niveau du centre de la fovéa. Ainsi, les interactions que nous avons obtenu pour des séparations spatiales inférieures à un tiers de degré d'angle visuel impliqueraient des interactions intra- et interhypercolonne. Les premières sont dues à des activations différentes de l'hypercolonne par les deux stimuli. Le fait que les deux stimuli aient une longueur d'au moins 20' montre que même pour des séparations aussi faibles que 6', plusieurs

hypercolonnes du système V1 sont impliquées dans les interactions. Si les deux stimuli étaient adjacents (séparation nulle), ils impliqueraient au minimum trois hypercolonnes puisque la longueur totale des deux fait environ 1 degré. Donc des connexions neurophysiologiques intra- et interhypercolonnes sont automatiquement impliquées dans les interactions que nous observons. C'est seulement à partir de la séparation d'environ 20' qu'un changement qualitatif et quantitatif dans les interactions apparaît. Ceci montre que les connexions intrahypercolonne ne sont plus activées de manière suffisante par l'inducteur pour intervenir sur les neurones activés par la cible. Il serait aussi possible que les connexions courtes distances neurophysiologiques proviennent des différentes hypercolonnes entourant les neurones répondant à la cible. Ainsi la distance de 15 à 20 minutes d'arc correspondrait directement aux connexions neurophysiologiques entre hypercolonnes adjacentes.

En prenant en compte ces données neurophysiologiques, les interactions qui sont obtenues dans cette expérience nous suggèrent que des différences qualitatives dans les connexions entre neurones de type ON et OFF sont présentes :

- soit au niveau intrahypercolonne ; les différentes interactions obtenues en fonction du système impliqué (seulement ON ou seulement OFF) peuvent être expliquées par des connexions intraON et intraOFF de types différents (inhibitrices, excitatrices ou les deux) ;
- soit au niveau interhypercolonne ; les interactions *ON-vers-OFF* longue distance ont montré être exclusivement facilitatrices alors que les interactions *OFF-vers-ON* semblent être variables en fonction du fond lumineux et des sujets. Ainsi des connexions excitatrices et inhibitrices semblent être impliquées dans ces interactions avec une pondération variable envers l'une ou l'autre.

3.5 Expérience 4 : L'apprentissage perceptif

Suite aux différents résultats sur l'effet de la luminance de l'inducteur sur la détection de la cible pour le régime longue distance, nous nous sommes intéressés à l'apprentissage au cours des expériences quand les stimuli ne font intervenir que le régime longue distance.

Différentes études ont montré qu'en fonction de la tâche demandée à l'observateur, de la méthodologie expérimentale, du type d'expérience (par exemple discrimination d'alignement, discrimination par effet de masquage dû à des patterns, discrimination avec un fond non uniforme ou texture), l'apprentissage ne se transférait que partiellement au deuxième œil, avait une localisation très précise dans le champ visuel (pas de transfert spatial), était spécifique à l'orientation du stimulus et ne se transférait pas aux autres orientations et tailles de stimuli (pour des revues, voir Goldstone , 1998; Gilbert , 1998; Sagi & Tanne , 1994).

Ainsi, Ahissar & Hochstein (1993) ont montré que l'apprentissage d'une tâche de détection locale est spécifique aux attributs des éléments des stimuli alors que l'apprentissage d'une tâche globale d'identification de l'orientation est spécifique aux attributs de tout l'ensemble des stimuli. Fahle, Edelman & Poggio (1995) ont montré que l'apprentissage d'une tâche de

| Sujet | direction des stimuli | Luminance du fond | Luminance de l'inducteur | d_{CI} | k | n | Nombre de fichiers par jour | Nombre de jour |
|-------|-----------------------|---------------------|--------------------------|----------|-----|-----|-----------------------------|----------------|
| SF | horizontale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 120' | 8 | 20 | 10 | 3 |
| NB | horizontale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 120' | 8 | 20 | 5 | 7 |
| BD | horizontale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 90' | 6 | 20 | 10 | 5 |
| TT | horizontale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 60' | 6 | 20 | 10 | 5 |
| CG | horizontale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 90' | 5 | 20 | 10 | 6 |
| LS | horizontale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 120' | 6 | 20 | 10 | 6 |
| LS | verticale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 120' | 6 | 20 | 10 | 5 |
| BD | verticale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 90' | 6 | 20 | 10 | 5 |
| PS | verticale | 1 cd/m ² | 5 cd/m ² | 120' | 6 | 20 | 10 | 5 |
| JB | horizontale | 2 cd/m ² | 43 cd/m ² | 120' | 6 | 20 | 10 | 5 |
| TG | horizontale | 2 cd/m ² | 43 cd/m ² | 120' | 6 | 20 | 10 | 5 |
| MCN | verticale | 2 cd/m ² | 43 cd/m ² | 120' | 6 | 20 | 10 | 5 |
| BM | verticale | 2 cd/m ² | 43 cd/m ² | 120' | 6 | 20 | 10 | 5 |

TAB. 3.2 – Résumé des conditions expérimentales des différents sujets ayant participé dans les expériences d'apprentissage perceptif. d_{CI} représente la distance cible-inducteur, k le nombre de niveaux de luminance de la cible utilisé dans l'expérience (5, 6 ou 8), et n représente le nombre d'essais par niveau de luminance de cible présentés au sujet. L'avant dernière colonne donne le nombre de fois où le bloc a été répété par le sujet dans une journée, et la dernière colonne le nombre de journées de répétition du sujet.

discrimination de l'orientation avait un transfert partiel entre les deux yeux (transfert interoculaire) et était dépendant des sujets, n'était pas transférable dans le champ visuel (apprentissage pour une position spatiale spécifique), que la rétroaction au sujet sur la justesse de ses réponses n'était pas nécessaire pour que l'apprentissage ait lieu, et que l'apprentissage ne se transférait pas entre orientations différentes du stimulus. Ils ont obtenu des variabilités importantes entre sujets et aussi des différences importantes au niveau de la rapidité de l'apprentissage entre les sujets. Ces derniers résultats pris avec ceux de Karni & Sagi (1993), où il est montré que deux régimes d'apprentissage coexistent (un rapide qui concerne la tâche à effectuer, et le deuxième pouvant être attribué à une plasticité lente du système visuel), suggèrent que la composante rapide de l'apprentissage est probablement moins spécifique à l'œil et varie entre sujets, alors que la composante lente est commune à tous et spécifique à l'œil et aux paramètres du stimulus.

En tenant compte de ces résultats, nous avons décidé de vérifier la présence ou non d'un apprentissage perceptif correspondant à une plasticité visuelle lente pour les directions verticales et horizontales du régime longue distance en mesurant la variation du seuil de détection du contraste avec la pratique expérimentale. Nous avons aussi testé l'importance de l'intensité de l'inducteur en prenant deux valeurs extrêmes de contraste de l'inducteur.

3.5.1 Méthodes

La méthodologie expérimentale est identique à celle utilisée dans l'expérience 2 (section 3.3). Les points qui diffèrent sont les conditions expérimentales, résumées dans le tableau 3.2. La cible avait pour longueur 22' et l'inducteur environ 40'. Les deux avaient pour largeur envi-

ron 1' et étaient de polarité positive (blanc).

Un bloc expérimental correspond à $n = 20$ présentations de chacune des $k = 5, 6$ ou 8 luminances de la cible (5 pour CG, 8 pour NB et SF, et 6 pour les autres sujets), faisant un total de nk essais par bloc (100 pour CG, 160 pour NB et SF, et 120 pour les autres). Chaque bloc a été répété par chaque sujet 10 fois par jour (5 fois pour le sujet NB), et a donné lieu ainsi à 10 fichiers de données brutes par jour d'apprentissage (5 pour le sujet NB). Les blocs ont été pris successivement, avec des pauses plus ou moins longues, en fonction du sujet (l'expérience durait entre 2h et 3h en fonction du sujet). Le sujet était libre de se reposer dans la salle d'expérimentation ou de sortir, mais en prenant le temps (quelques minutes) pour se réadapter à la pénombre et luminance de l'écran en revenant dans la salle d'expérimentation. Pour chaque sujet, il a été fait attention à ce que chaque jour d'apprentissage, les blocs soient pris à la même période journalière (l'après-midi ou le matin). Tous les sujets ont ainsi eu $10 \times nk$ essais d'apprentissage total par jour ($5 \times nk$ pour le sujet NB). Chaque sujet a effectué au minimum 5 jours d'apprentissage successifs, sauf pour les sujets NB et SF, qui pour cause de disponibilité ont effectué 7 jours d'apprentissage, répartis sur 2 semaines, pour NB, et 3 jours successifs pour SF.

Sujets

Quatre sujets (TT, BD, SF et CG) étaient entraînés dans les tâches de psychophysique visuelle pour la direction d'alignement verticale des stimuli. Le sujet LS ayant participé aussi dans l'expérience 2, il faut préciser qu'il a effectué cette expérience d'apprentissage avant de participer dans l'expérience 2. Ce sujet avait participé dans une étude préliminaire pour la direction d'alignement horizontale qui avait eu lieu 9 mois avant cette expérience. Les autres n'avaient pas d'expérience en psychophysique visuelle.

Stimuli

Les stimuli étaient générés de la même manière que dans l'expérience 2. Cependant il faut préciser un point technique important. Le fait d'utiliser un écran d'ordinateur pour l'affichage des stimuli impose une rigueur si l'on souhaite effectuer des mesures comparables pour différentes directions d'alignement. L'affichage se fait par trames successives, de manière non entrelacés (les lignes sont "allumées" les unes après les autres). Or, si l'on affiche un segment de ligne en vertical avec une valeur de luminance donnée (choisie en fonction du calibrage de l'écran), l'intensité perçue est beaucoup plus faible qu'en horizontal pour exactement la même luminance. Il faut rajouter à ceci le fait que l'inducteur est affiché quelques millisecondes avant la cible (au maximum 6 ms) pour la méthode d'affichage choisit dans les expériences (inducteur toujours au-dessus de la cible). Pour être absolument certain que nous présentons les stimuli de la même manière pour les deux directions d'alignement (temps d'affichage, excitation lumineuse par le faisceau de balayage de l'écran), les expériences où les directions horizontales

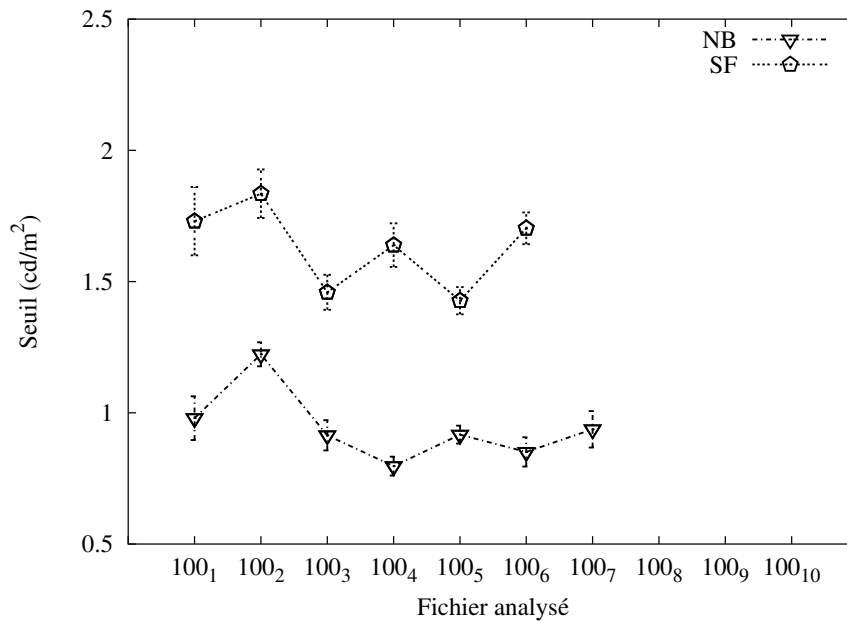


FIG. 3.14 – Seuil de détection du contraste du sujet en fonction du numéro du fichier analysé (voir texte pour plus de détail). Résultats des expériences sur l'apprentissage en régime longue distance pour les sujets NB et SF pour la direction horizontale. Ils ont effectué les expériences dans des conditions différentes aux autres sujets, car les conditions expérimentales n'étaient pas fixées.

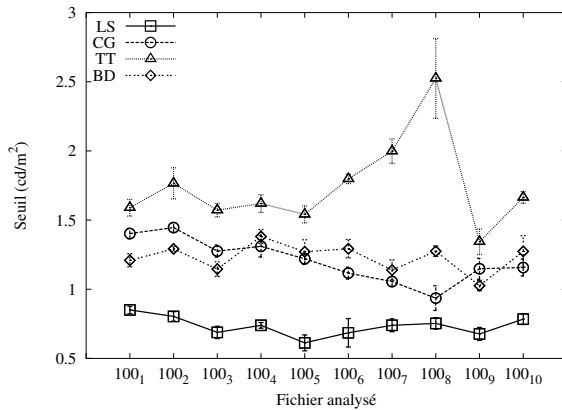
étaient présentes avaient l'écran tourné de 90° dans le sens des aiguilles d'une montre (l'inducteur se trouve à droite de la cible). Ainsi, nous nous sommes assurés que la présentation des stimuli dans les deux conditions d'alignement étaient identiques.

3.5.2 Résultats

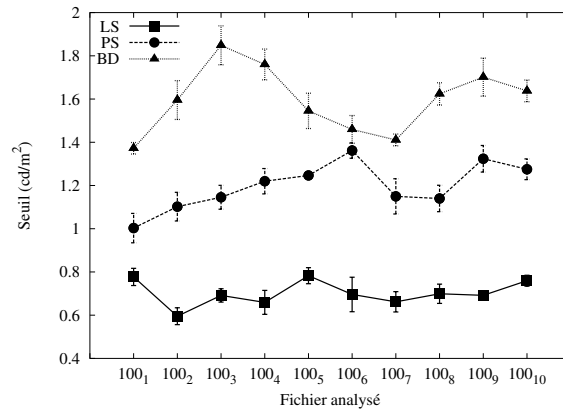
Pour présenter les résultats, les fichiers correspondants à une journée de mesure ont été regroupés de manière à ce que dans le fichier analysé avec la méthode d'ajustement (chapitre 2), il y ait $n = 100$ essais par niveau de stimulus. Ainsi, pour les sujets ayant effectué 10 blocs expérimentaux dans une journée, deux fichiers par journée d'apprentissage ont été obtenus. Seul le sujet NB a un fichier par jour d'apprentissage. Les fichiers analysés ont été numérotés successivement par le numéro d'apprentissage ainsi obtenu : 100₁, 100₂, 100₃ ... 100₁₀. Pour la présentation, seuls les dix premiers fichiers sont utilisés, correspondants à cinq jours successifs d'apprentissage.

Inducteur de contraste faible (4 cd/m²)

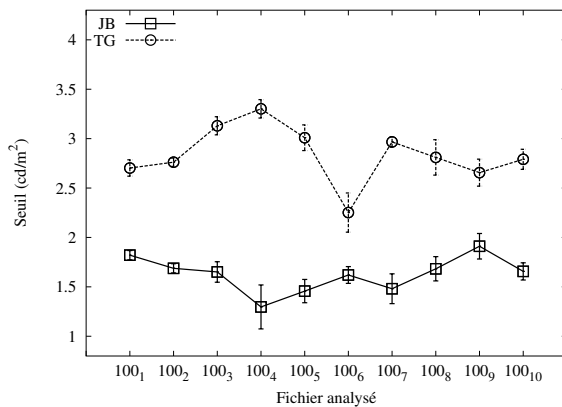
La figure 3.14 présente les résultats de l'évolution des seuils de détection des sujets SF et NB, pour les fichiers successifs analysés. Le sujet SF a 6 fichiers (100₁ à 100₆) avec chaque paire correspondant à une journée de mesure, et le sujet NB 7 fichiers (100₁ à 100₇) avec chaque fichier correspondant à une journée de mesure. Ces données sont séparées car elles n'ont pas été obtenues dans les mêmes conditions que pour les autres sujets. Le sujet SF montre un effet



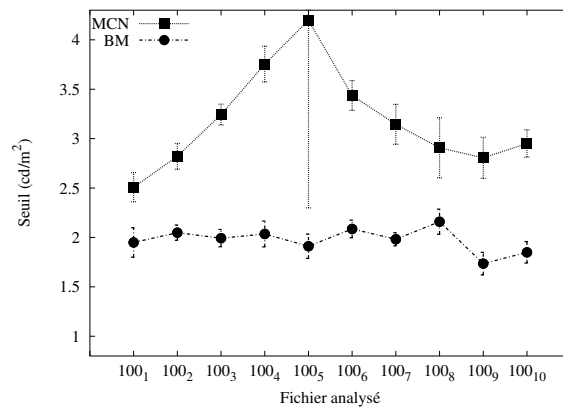
(a) Inducteur faible, alignement horizontal



(b) Inducteur faible, alignement vertical



(c) Inducteur fort, alignement horizontal



(d) Inducteur fort, alignement vertical

FIG. 3.15 – Seuil de détection du contraste de la cible en fonction du numéro du fichier analysé au cours de l'apprentissage. Graphique 3.15(a) et 3.15(b) pour un inducteur de contraste faible (4 cd/m^2), pour respectivement la direction horizontale et verticale. Graphique 3.15(c) et 3.15(d) pour un inducteur de contraste fort (41 cd/m^2), pour respectivement la direction horizontale et verticale.

de fatigue important pendant une journée. Le seuil du deuxième fichier est systématiquement supérieur au seuil du premier fichier correspondant au même jour ($\text{seuil}_{100_2} > \text{seuil}_{100_1}$; $\text{seuil}_{100_4} > \text{seuil}_{100_3}$; $\text{seuil}_{100_6} > \text{seuil}_{100_5}$). Si nous ne prenons en compte que le premier fichier de chaque jour (100₁, 100₃ et 100₅), nous observons une diminution d'environ 15% du seuil de détection du sujet. Si l'on regarde la variation sur les deuxièmes fichiers (100₂, 100₄ et 100₆), elle est moindre, de 10% du deuxième au quatrième et de 7% du deuxième au sixième. La méthodologie utilisée avec ce sujet était très contraignante et désagréable. L'augmentation du seuil dans une journée de mesure nous a fait modifier la méthodologie en prenant cinq blocs expérimentaux de mesure par jour (sujet NB). Le sujet a effectué 7 jours d'apprentissage non consécutifs. En dehors du seuil du fichier 100₂, ses résultats ne montrent aucun changement significatif au cours de l'expérience.

En prenant en compte ces résultats, il a été décidé d'effectuer des expériences sur un mini-

mum de 5 jours consécutifs, avec 10 blocs expérimentaux par sujet par jour, avec 6 luminosités de cible par sujet. Dans une première partie, un contraste d'inducteur faible (environ 4 cd/m^2) a été utilisé pour les deux directions d'alignement des stimuli testées. Les résultats sont présentés dans les graphiques 3.15(a) et 3.15(b), respectivement pour les directions horizontale et verticale.

Alignement selon la direction horizontale

Puisque deux fichiers consécutifs correspondent à une mesure dans une journée, il apparaît que l'effet de fatigue observé chez le sujet SF est aussi présent de manière systématique pour les sujets TT et BD (les fichiers avec un numéro pair ont systématiquement un seuil plus grand que le seuil du fichier avec le numéro impair qui le précède). Le sujet TT montre une variabilité très importante le quatrième jour d'apprentissage (fichier avec les numéros 7 et 8). Il n'apparaît pas d'effet systématique de variation du seuil de jour en jour (le premier seuil est quasiment égal au dernier). Le sujet BD, comme le sujet TT, ne montre pas d'effet systématique de variation de son seuil de détection au cours des jours. Le sujet LS a son seuil qui diminue jusqu'au fichier numéro 6, et ensuite il semble être stabilisé autour de $0,75$. Le sujet CG est celui qui montre le plus clairement une diminution de son seuil de détection au cours de l'expérience jusqu'au quatrième jour de répétition. Son seuil commence à $1,40 \pm 0,04 \text{ cd/m}^2$ (fichier 100_1) et descend à $0,94 \pm 0,09 \text{ cd/m}^2$ (fichier 100_8), correspondant à une diminution d'environ 33% ($0,46 \pm 0,13 \text{ cd/m}^2$). Le cinquième jour, son seuil est remonté à une valeur de $1,15 \pm 0,07 \text{ cd/m}^2$ (fichier 100_{10}) montrant une diminution d'environ 18%.

Alignement selon la direction verticale

L'effet systématique de fatigue n'est pas visible dans les données des sujets ayant effectué ces expériences (graphique 3.15(b)). Le sujet LS montre une stabilité autour d'une valeur moyenne de son seuil de $0,7 \text{ cd/m}^2$ avec une variabilité importante le premier jour. Par contre, les deux autres sujets montrent un effet opposé à celui observé pour la direction horizontale : les seuils ont tendance à augmenter pour les sujets BD et PS au cours des premiers jours d'apprentissage. Malgré que le sujet BD semble avoir variation importante de jour en jour, les seuils du dernier jour (100_9 et 100_{10}) sont significativement plus grand que le seuil 100_1 (de 24% pour le fichier 100_9 et de 20% pour 100_{10}). Le sujet PS montre sur les trois premiers jours d'apprentissage (fichiers avec numéros 1 à 6) une augmentation constante. Il passe de $1,00 \pm 0,07 \text{ cd/m}^2$ à $1,36 \pm 0,03 \text{ cd/m}^2$, ce qui correspond à une augmentation d'environ 36% de son seuil. Pour les deux derniers jours, son seuil redescend légèrement, en restant supérieur au seuil initial.

Inducteur de contraste fort (41 cd/m^2)

Alignement selon la direction horizontale

Le graphique 3.15(c) présente les résultats d'apprentissage pour la direction d'alignement horizontale des sujets JB et TG. Les seuils de détection du contraste de la cible ne semblent pas

évoluer de manière systématique, que ce soit une diminution ou une augmentation. L'effet de fatigue systématique n'est pas visible chez ces sujets. Le sujet TG a une variation importante les 2^{ème} et 3^{ème} jours. Son seuil passe de $2,76 \pm 0,04 \text{ cd/m}^2$ à $3,3 \pm 0,09 \text{ cd/m}^2$ et diminue à $2,25 \pm 0,20 \text{ cd/m}^2$ en trois jours (fichiers 100₂, 100₄ et 100₆). Les deux derniers jours, le seuil de détection varie autour de la valeur initiale. Le sujet JB semble montrer une diminution de son seuil les trois premiers jours ($1,82 \pm 0,05$ pour 100₁, $1,65 \pm 0,10$ pour 100₃ et $1,46 \pm 0,12$ pour 100₅). Ensuite son seuil ré-augmente vers la valeur qu'il avait au début des expériences.

Alignement selon la direction verticale

Le graphique 3.15(d) présente les résultats d'apprentissage pour la direction d'alignement verticale, pour les sujets BM et MCN. L'effet de fatigue systématique n'est pas visible pour ces sujets. Le sujet BM ne semble pas avoir d'évolution de son seuil de détection au cours des cinq jours de répétition des expériences. Même si le dernier jour la première mesure semble être plus faible, $1,73 \pm 0,11 \text{ cd/m}^2$ pour le fichier 100₉, elle n'est pas significative puisque la première valeur est de $1,95 \pm 0,15 \text{ cd/m}^2$ (fichier 100₁). Nous considérons que ce sujet ne montre pas d'évolution de son seuil au cours des sessions expérimentales. Le sujet MCN présente une augmentation importante de son seuil de détection les deux premiers jours d'expérimentation. Le point correspondant au fichier 100₅ ne doit pas être pris en compte car le sujet nous a prévenu être fatigué. L'écart-type associé est très grand car il s'avère que les données de ce point sont loin de montrer une augmentation régulière de la proportion de réponses correctes du sujet avec l'augmentation du contraste de la cible (voir figure 3.16 présentant les données de ce fichier). Les fichiers suivants montrent que le seuil du sujet est revenu à une valeur approximativement de $3,0 \text{ cd/m}^2$, ce qui est supérieur de 20% à la valeur initiale de $2,51 \pm 0,15 \text{ cd/m}^2$.

3.5.3 Discussion

Apprentissage perceptif à courte et longue distance, pour les directions horizontale et verticale

Ces résultats montrent que des différences significatives entre les deux directions d'alignement, horizontale et verticale, existent pour des expériences d'apprentissage impliquant uniquement le régime longue distance (séparation coaxiale minimale de 1°). Pour la direction horizontale, tous les sujets ont montré soit un seuil qui varie autour d'une valeur moyenne, soit un seuil qui diminue légèrement au début de l'apprentissage pour ré-augmenter et revenir à la valeur initiale au bout du cinquième jour. Pour la direction verticale, deux sujets obtiennent des seuils constants au cours des sessions expérimentales et trois sujets montrent une augmentation les premiers jours et une rediminution les jours suivants, sans pourtant revenir à la valeur initiale. Le seuil au bout du cinquième jour est toujours supérieur au seuil initial. La valeur du contraste de l'inducteur ne semble pas avoir de rôle dans les résultats d'apprentissage que nous avons effectué.

Il est encore plus intéressant de voir que ces changements sont aussi intervenus parmi les

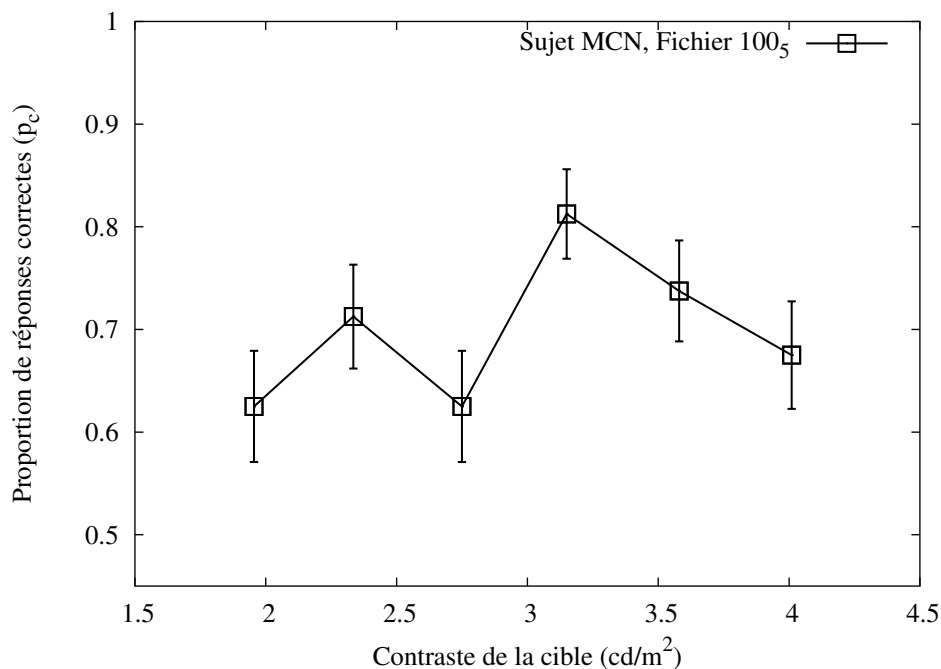


FIG. 3.16 – Données du fichier 100₅ du sujet MCN, montrant l'évolution de la proportion de réponses correctes avec l'augmentation du contraste de la cible. Les données sont difficilement interprétables et un ajustement ne permet pas d'obtenir de paramètres valides. Le sujet s'est plaint de fatigue au début de l'expérience correspondant à ce fichier.

deux sujets ayant déjà eu une expérience en psychophysique visuelle avec le type d'alignement des stimuli auquel ils ont participé, les sujets BD et LS. Le sujet BD semble montrer une augmentation du seuil au cours des expériences pour la direction verticale (direction où une expérience était déjà présente) comme le sujet PS, qui était naïf de ce point de vue, alors que pour la direction d'alignement horizontale (direction où pas d'expérience était présente), le sujet BD ne montre pas de changement. Le sujet LS n'obtient pas d'effet pour la direction d'alignement verticale, alors qu'il semblerait qu'il en ait pour la direction horizontale. Même si on élimine les données de ces deux sujets pour les directions d'alignement où ils avaient un précédent en expérimentation psychophysique, il reste quand même deux sujets qui montrent un changement pour la direction verticale et deux pour la direction horizontale. Ceci semble indiquer que cette plasticité n'est pas fixée, c'est à dire qu'une pratique dans d'autres expériences similaires (mais avec des distances beaucoup plus faibles) ne change pas la plasticité longue distance, ou du moins un retour à un "état stable du système" a été effectué.

Les résultats sont obtenus avec un grand nombre de répétitions de la condition expérimentale. Pour les sujets ayant eu 6 niveaux de stimulus avec 20 essais par niveau de luminance de la cible, 1200 essais par jour ont été effectués, ce qui correspond à un total de 6000 essais à la fin du cinquième jour. Ainsi, l'évolution temporelle sur plusieurs jours, qui est visible dans les données pour l'alignement vertical, pourrait impliquer une plasticité visuelle lente (voir les revues Sagi & Tanne, 1994; Goldstone, 1998; Gilbert, 1998) qui est associée à une modification à long terme du système visuel du sujet. La plasticité visuelle rapide est connue pour être effective dès la première centaine d'essais. Elle implique un changement dans le critère de

réponse du sujet en fonction de la familiarité du sujet avec le stimulus inducteur ou la tâche à effectuer (voir Fahle, Edelman & Poggio, 1995; Swift & Smith, 1983, par exemple). Donc, l'augmentation du seuil observé chez certains sujets, mais seulement pour la direction verticale, montrerait une plasticité "négative" due à la présence de l'inducteur. Chez certains sujets ayant eu comme direction d'alignement l'horizontale, la diminution du seuil observé pendant la première partie des expériences, montrerait une plasticité "positive" due à la présence de l'inducteur, et l'augmentation qui a suivi une deuxième plasticité "négative".

Certaines études ont montré qu'un effet temporel important sur l'apprentissage de la détection de la cible est présent pour des séparations spatiales courtes des stimuli (voir Zenger & Sagi (1996); Dresch (1998); Polat & Sagi (1994b) pour des données directement en relation avec les expériences de ce mémoire ; pour des revues traitant entièrement ou partiellement de l'apprentissage perceptif, voir Goldstone (1998); Spillmann & Ehrenstein (1996); Gilbert (1998); Dresch (1999); Polat (1999); Camus (1998); Craddock & Guerrien (1998); Sagi & Tanne (1994)).

En utilisant des stimuli de type Gabor et des procédures expérimentales adaptatives de type 2AFC, Polat & Sagi (1994b) ont montré qu'un apprentissage a lieu au niveau de la facilitation de la détection de la cible Gabor quand des inducteurs sont présentés au cours de l'expérience à différentes séparations spatiales de la cible. Si cette condition n'était pas respectée, séparation constante, un apprentissage avait lieu mais dans ce cas, ils ont obtenu un inversement de l'effet pour un alignement vertical des stimuli Gabor : l'amplitude de facilitation/masquage a augmenté au cours des expériences. Elle s'est rapprochée de 1,0, ne montrant pas d'effet de l'inducteur sur la détection de la cible. Ceci indique que les seuils des sujets ont augmenté avec la pratique répétée des expériences. Au contraire, l'effet de facilitation par apprentissage augmentait seulement quand des inducteurs étaient présentés à des séparations très courtes, correspondant à une superposition totale ou partielle des patches de Gabor puisque la distance était inférieure à $2\lambda \equiv 0^\circ$. Dans ce cas-ci, la distance maximale où l'inducteur facilitait la détection de la cible était considérablement augmentée, passant de 6λ à 12λ , avec une amplitude de facilitation/masquage égale à environ 0,9 pour une distance de 12λ (équivalente bord à bord à $1,5^\circ$). Il faut noter que dans leur étude, les résultats pour les directions horizontale et verticale ne sont pas entièrement comparables car n'ayant pas exactement les mêmes conditions expérimentales. Il n'est pas possible de comparer leurs résultats pour les deux directions avec les nôtres. Seuls certaines de leurs expériences pour la direction verticale, où ils ont utilisé une séparation spatiale fixe entre la cible et les inducteurs, montrent le comportement de plasticité "négative" que nous avons obtenu. Ils ont attribué leurs résultats à des modifications des connexions courte distance dans le système visuel de bas niveau, puisque la plasticité "positive" qu'ils ont observé n'avait lieu que pour un apprentissage où les stimuli étaient séparés d'une distance plus petite que 2λ , équivalente à une superposition totale ou partielle de la cible avec l'inducteur.

Avec le même type de stimuli et de procédure expérimentale que Polat & Sagi (1994b), Zenger & Sagi (1996) ont montré un effet d'augmentation de la facilitation de la cible par la présence des inducteurs au cours des expériences. Ils ont utilisé des séparations cible-inducteur

entre 0λ et 4λ , correspondant approximativement à des distances entre $-18'$ (cible et inducteurs entièrement superposés) et $18'$ ($\lambda = 0.15^\circ$). Cette étude n'était pas destinée à étudier les effets de l'apprentissage en soit et une analyse plus détaillée n'a pas été effectuée. Ils ne montrent pas s'il y a une différence entre les stimuli qui avaient un alignement horizontal de ceux qui avaient un alignement vertical.

De ces deux études, il apparaît que l'apprentissage a un effet "positif", c'est à dire diminue le seuil de luminance du sujet au fur et à mesure de l'expérimentation, seulement quand les stimuli sont adjacents ou partiellement (ou entièrement) superposés. Dans le cas contraire, l'effet obtenu était "négatif", c'est à dire l'amplitude de facilitation/masquage revenait à une valeur de 1,0. Swift & Smith (1983) ont montré que quand le stimulus cible est présenté par-dessus un masque, ou inducteur, la familiarité du sujet avec le stimulus inducteur le conduit à utiliser deux stratégies de réponses très différentes. La première est entièrement dépendante du rapport signal/bruit quand le sujet n'a pas le temps de s'habituer au masque (ils ont effectué une expérience où le masque variait pendant l'expérience). La deuxième dépend de critères beaucoup plus fins car le sujet a le temps de s'habituer au stimulus masque et ainsi il peut affiner son critère de jugement. Ils ont montré que la première stratégie conduit à la loi de Weber, l'évolution du seuil de détection de la cible (C_s) en fonction du contraste du masque (C_m) est linéaire ($C_s = k.C_m$, avec k une constante), alors que la deuxième conduit à une loi de puissance, avec une puissance de l'ordre de 0,65 ($C_s = k_1.C_m^{0,65}$), une fois le sujet habitué au stimulus inducteur. Ils ont démontré que pour un masque fixe durant l'expérience, le sujet change de critère de décision en passant de la loi de Weber, au début de l'expérience, à la loi de puissance, au bout d'un temps expérimental très court (à peine quelques centaines d'essais).

Dresp (1998) a montré, avec une procédure 2AFC et la méthode des stimuli constants, que des cibles du type segment de ligne d'intensité subliminaire (en dessous du seuil de visibilité du sujet) devenaient visibles au cours d'un apprentissage très lent (plusieurs milliers d'essais expérimentaux). La séparation spatiale entre la cible et les deux inducteurs en forme de bord de surface était nulle. Cet apprentissage a été corrélé au temps de réaction des sujets, qui ont suivi la loi caractéristique de Piéron, entre l'augmentation du contraste de la cible et la diminution du temps de réaction correspondant, une fois l'apprentissage effectif (voir Pins & Bonnet, 1996). Cette dernière étude doit aussi être interprétée en rapport aux résultats de Swift & Smith (1983), car la séparation nulle entre les deux inducteurs de types bord de surface et la cible implique sûrement un critère de jugement du sujet en fonction de l'apparence générale du stimulus "cible+inducteurs".

Dans ces études (Polat & Sagi, 1994b; Zenger & Sagi, 1996; Dresp, 1998), impliquant principalement le régime courte distance, le fait que l'apprentissage ait pris plusieurs milliers d'essais montre que, qualitativement parlant, une plasticité différentes de celle de Swift & Smith (1983) est intervenue. Même s'il est très probable que les sujets ont pris du temps pour "s'habituer" aux stimuli, la longueur des expériences et les interruptions de plusieurs jours entre sessions expérimentales signifient qu'il y a un changement profond de la caractéristique du système visuel stimulé. D'un autre côté, le fait que la plasticité soit présente chez deux sujets ayant

déjà fait des expériences avec ce type de stimuli et direction d'alignement indique que le système stimulé est revenu à un état d'équilibre initial d'où il peut de nouveau être modifié par la pratique.

Correspondances neurophysiologiques

Si nous associons à l'apprentissage rapide, du type rapporté par Swift & Smith (1983), une modification de la réponse du sujet vis-à-vis du critère de réponse, cette modification ne peut impliquer que des systèmes cognitifs de haut niveau qui interagissent avec les systèmes visuels de plus bas niveau par des processus de rétroactions. Ainsi, toutes les études montrant un apprentissage rapide pour certaines tâches, impliquent sûrement le système attentionnel du sujet, qui est connu pour se ramifier vers les systèmes visuels de bas niveau (voir la thèse de Raizada, 2001, pour une revue). Les résultats de Polat & Sagi (1994b), Zenger & Sagi (1996) et Dresch (1998) sont difficilement interprétables dans ce sens puisqu'un apprentissage rapide n'a pas été explicitement rapporté dans ces études. L'autre possibilité serait une modification des connexions locales dans le système visuel, à l'intérieur et autour d'une hypercolonne orientationnelle. Ceci suggérerait une plasticité du champ récepteur des neurones à long terme, modifié par la seule présentation répétée du stimulus. Ce type de modification a été rapporté par Eysel, Eyding & Schweigart (1998) et Eyding, Schweigart & Eysel (2002) pour des temps de présentation des stimuli entre 10 minutes et 75 minutes. Ils ont trouvé qu'environ 70% des neurones du cortex visuel primaire du chat ont montré des modifications structurelles de leurs champs récepteurs en réponse aux stimulations répétées, où le champ récepteur et une partie adjacente étaient stimulés simultanément. Ces modifications se sont avérées être réversibles, mais avec des temps longs, durant en moyenne 100 minutes, et fortement dépendantes de l'intensité de la réponse du neurone après la stimulation. Ces résultats neurophysiologiques et les résultats psychophysiques suggèrent une modification à long terme au niveau des champs récepteurs de quelques neurones, pour des séparations spatiales nulles entre stimuli visuels (stimuli adjacents).

Nos propres résultats sont difficilement interprétables de cette manière. La séparation spatiale minimale était de 60', et pour la majorité des sujets elle était de 120'. Si nous considérons que la plasticité a eu lieu dans le système visuel de bas niveau (V1), cela impliquerait que des connexions longues distances, du type connexions horizontales entre hypercolonnes orientationnelles, sont modifiées. Il est connu que la taille des champs récepteurs des neurones augmente plus haut se trouve le neurone dans la chaîne de traitement des informations visuelles. Les modifications que nous observons pourraient impliquer la modification du champ récepteur d'un neurone dans un système visuel de plus haut niveau que le système V1 mais les résultats ne nous permettent pas de déterminer où se situe la plasticité que nous observons.

De plus, nos résultats suggèrent deux types de plasticités en fonction de la direction d'alignement des deux stimuli pendant la période d'apprentissage. Quel type de plasticité cela implique-t-il et où la situer? Nos expériences ont été effectuées avec des stimuli de polarité positive. Existe-t-il des différences d'apprentissage, ou de plasticité, entre des stimuli à polarité oppo-

sée ? Pour aller plus loin dans la compréhension de ces phénomènes, plus de données doivent être obtenues.

3.6 Expérience 5 : Etude contrôle relative au régime longue distance

La dernière expérience sur l'apprentissage perceptif pour le régime longue distance a montré un effet à long terme, important chez certains sujets, sur la détection d'une cible blanche avec un inducteur blanc. En se reportant aux résultats des expériences 2 et 3 (section 3.3 et 3.4), il est visible que certains sujets ont effectué plusieurs conditions expérimentales, alors que d'autres ont participé que dans une seule condition (par exemple, le sujet LZ pour le fond de 40 cd/m^2 pour l'interaction *OFF-vers-ON* dans l'expérience 2). La méthodologie expérimentale utilisait aussi une procédure 2AFC avec un grand nombre de répétitions. Ainsi, il est possible qu'une plasticité visuelle soit intervenue entre les différentes expériences. Cette plasticité a pu intervenir dans toutes les conditions, polarités identiques et opposées des stimuli, car l'expérience 4 a montré une plasticité à long terme pour des polarités identiques, alors que les expériences 2 et 3 ont montré des asymétries dans les interactions entre polarités identiques et opposées. Il est impossible de savoir si un apprentissage dû à une des polarités à influencer l'amplitude de facilitation/masquage (même s'il est très probable que ce soit le cas).

Pour ne pas avoir le problème de la plasticité à long terme au cours des expériences et vérifier l'asymétrie des interactions à polarités opposées, nous avons décidé d'effectuer une expérience contrôle pour les quatre interactions possibles du régime longue distance (*ON-vers-ON*, *OFF-vers-OFF*, *OFF-vers-ON*, *ON-vers-OFF*) sur des sujets naïfs.

3.6.1 Méthodes

Pour ce but, 14 sujets naïfs (sans aucun précédent dans des expériences psychophysiques) ont participé à l'expérience. Six conditions expérimentales ont été choisies. Pour chaque polarité de la cible, le seuil contrôle, le seuil avec un inducteur noir et le seuil avec inducteur blanc ont été mesurés. Pour éviter la plasticité à long terme une procédure d'ajustement rapide a été utilisée. Deux valeurs extrêmes des intensités des inducteurs ont été prises : 0 et 90 cd/m^2 .

Sujets et Entraînement

14 sujets ont participé à cette expérience. Ils ont une vue normale ou corrigée à la normale. Tous les sujets ont effectué une séance d'entraînement avec chaque condition expérimentale.

Stimuli

Les stimuli ont été présentés sur un écran monochrome de taille 21 pouces, avec un taux de rafraîchissement de 60 Hz et une résolution de 640×480 . Ils ont été générés avec un PC équipé d'une carte graphique VGA Trident. Les différents niveaux de luminance ont été obtenus à l'aide de combinaisons des signaux RGB, calibrés avec un photomètre. La luminance du fond était fixée à 5 ou 40 cd/m^2 . La luminance de l'inducteur dans les conditions expérimentales tests (cible avec inducteur) était de 0 ou 90 cd/m^2 . La distance du sujet à l'écran était de 2,5 mètres, et l'angle visuel sous-tendu par un pixel était d'environ $0,8'$. La longueur de la cible était de $24'$ et celle de l'inducteur de $41'$. Tous les stimuli étaient larges de $0,8'$. La distance entre la cible et l'inducteur était de $22'$ dans toutes les conditions de test (inducteur avec cible) pour s'assurer que les stimuli se trouvent dans le régime d'intégration longue distance. Deux petites barres de fixation, d'intensité juste perceptible et de polarité opposée à celle de la cible étaient présentes de manière continue au centre de l'écran, indiquant la localisation spatiale exacte où la cible devait apparaître. En tout, six conditions expérimentales étaient présentées à chaque sujet : deux pour les conditions contrôle (cible noire et cible blanche), et quatre pour les quatre conditions tests possibles à polarités identiques ou opposées.

Procédure

La procédure d'ajustement consistait à présenter en un flash de durée 33 millisecondes la condition expérimentale (condition test ou condition contrôle). L'apparition de la condition expérimentale était précédée par un bip sonore. Il était demandé au sujet de faire attention à l'apparition de la cible. Le sujet devait soit augmenter, soit diminuer le contraste de la cible entre deux présentations successives à l'aide de deux touches du clavier numérique. Il lui était demandé de trouver la zone de transition entre l'intensité où la cible commence à devenir tout le temps visible, et l'intensité où la cible commence à ne plus être visible. Quand il pensait avoir atteint cette zone, il devait appuyer sur une troisième touche du clavier pour commencer une nouvelle condition expérimentale. La valeur où il s'est arrêté était enregistrée. Le pas d'augmentation ou de diminution du contraste de la cible était fixé à 1 RGB. Ceci correspond approximativement à un pas de $0,16 \text{ cd/m}^2$ pour le fond de 5 cd/m^2 , et un pas de $0,41 \text{ cd/m}^2$ pour le fond de 40 cd/m^2 . Les six conditions expérimentales ont été présentées à chaque sujet cinq fois de manière pseudo-aléatoire. Avant qu'une condition ne réapparaisse au sujet, il fallait que les autres cinq conditions soient présentées. Pour chaque condition expérimentale, la valeur initiale du contraste de la cible était choisie de manière aléatoire parmi quinze valeurs, faisant que le sujet pouvait commencer avec une cible non visible ou visible. Huit sujets ont effectué les expériences en commençant avec le fond de luminance 5 cd/m^2 , les six sujets restants avec le fond de luminance 40 cd/m^2 .

Cette procédure a été choisie car elle permet de faire cinq mesures du seuil très rapidement. En moyenne, pour toutes les conditions expérimentales et les deux luminances du fond qui ont été utilisés, il a fallu entre 20 et 30 minutes par sujet.

| Lum. fond | N° du Sujet | contrôle cible noire | NN | BN | contrôle cible blanche | BB | NB |
|-------------------------|-------------|----------------------|------------|-------------|------------------------|-----------|------------|
| 5 cd/m ² | 1 | -2.59±0.24 | -1.85±0.52 | -2.52±0.21 | 3.08±0.27 | 2.24±0.14 | 3.04±0.48 |
| | 2 | -3.03±0.25 | -2.24±0.35 | -2.80±0.14 | 3.67±0.26 | 2.99±0.17 | 2.88±0.53 |
| | 3 | -3.46±0.32 | -2.70±0.40 | -2.77±0.27 | 4.57±0.49 | 3.17±0.72 | 4.33±0.74 |
| | 4 | -2.64±0.66 | -2.33±0.31 | -2.37±0.39 | 2.92±0.58 | 2.29±0.59 | 2.71±0.31 |
| | 5 | -2.72±0.12 | -2.31±0.57 | -2.57±0.14 | 3.28±0.38 | 2.47±0.81 | 3.01±0.73 |
| | 6 | -2.24±0.23 | -1.47±0.44 | -1.58±0.18 | 2.29±0.50 | 1.52±0.42 | 2.05±0.35 |
| | 7 | -2.89±0.30 | -2.55±0.62 | -2.48±0.40 | 3.14±0.97 | 1.99±0.51 | 2.68±0.22 |
| | 8 | -2.49±0.62 | -1.58±0.23 | -2.36±0.35 | 2.72±0.23 | 2.44±0.37 | 2.32±0.35 |
| | 9 | -2.67±0.40 | -1.69±0.36 | -2.14±0.46 | 2.96±0.37 | 2.14±0.45 | 2.41±0.44 |
| | 10 | -2.88±0.31 | -2.54±0.34 | -2.39±0.27 | 3.24±0.38 | 2.51±0.30 | 3.45±1.40 |
| | 11 | -3.46±0.29 | -3.22±0.36 | -3.08±0.26 | 4.84±0.37 | 3.17±0.75 | 4.45±0.73 |
| | 12 | -2.57±0.42 | -2.11±0.17 | -2.20±0.30 | 2.96±0.34 | 2.17±0.35 | 2.08±0.15 |
| | 13 | -2.19±0.40 | -1.55±0.67 | -1.97±0.41 | 2.44±0.31 | 1.77±0.52 | 2.11±0.60 |
| | 14 | -2.43±0.23 | -1.93±0.15 | -1.81±0.21 | 3.17±0.73 | 2.12±0.26 | 2.56±0.18 |
| 40 cd/m ² | 1 | -7.47±1.47 | -4.42±1.50 | -5.15±0.80 | 9.85±1.01 | 4.27±1.44 | 6.98±1.58 |
| | 2 | -9.90±1.55 | -8.26±1.40 | -7.71±1.88 | 11.68±1.38 | 6.53±1.64 | 10.29±1.66 |
| | 3 | -11.64±2.11 | -8.64±0.99 | -10.14±0.71 | 12.41±1.20 | 8.72±1.58 | 10.30±1.66 |
| | 4 | -8.84±1.73 | -6.91±2.21 | -7.24±1.29 | 9.76±1.06 | 7.60±2.78 | 7.49±2.80 |
| | 5 | -9.63±1.12 | -5.06±1.24 | -6.39±1.07 | 10.82±1.01 | 7.49±2.57 | 9.16±0.85 |
| | 6 | -7.02±1.05 | -5.23±0.87 | -5.77±0.99 | 8.89±1.16 | 4.97±1.39 | 7.85±0.87 |
| | 7 | -8.47±1.57 | -8.38±1.94 | -8.71±1.32 | 11.51±1.19 | 9.94±2.51 | 10.63±0.95 |
| | 8 | -7.95±1.92 | -6.87±1.65 | -5.30±0.72 | 9.85±0.66 | 7.32±1.72 | 7.41±1.11 |
| | 9 | -10.07±1.13 | -6.22±0.90 | -6.69±1.23 | 10.11±1.01 | 8.48±1.39 | 8.38±1.20 |
| | 10 | -9.61±1.30 | -8.09±1.35 | -7.87±0.96 | 10.29±1.15 | 8.13±0.83 | 9.84±0.80 |
| | 11 | -9.83±1.45 | -7.52±2.22 | -8.39±1.65 | 11.26±1.70 | 7.95±1.87 | 10.56±2.01 |
| | 12 | -7.40±1.05 | -6.70±1.25 | -5.76±1.32 | 9.77±1.70 | 6.65±1.86 | 7.77±1.34 |
| | 13 | -8.57±0.58 | -5.85±0.92 | -5.62±1.13 | 9.42±1.64 | 7.85±1.77 | 7.33±1.08 |
| | 14 | -6.54±0.58 | -4.61±0.57 | -5.30±0.54 | 8.11±1.33 | 5.93±0.87 | 7.33±1.46 |

TAB. 3.3 – Moyennes et écart-types ($\mu \pm \sigma$) des cinq valeurs du seuil de détection du contraste obtenues pour chaque sujet et chaque condition expérimentale, pour le fond de 5 cd/m² (partie supérieure du tableau) et pour le fond de 40 cd/m² (partie inférieure du tableau). Les colonnes NN et BN correspondent respectivement aux conditions expérimentales inducteur noir avec cible noire et inducteur blanc avec cible noire. Les colonnes BB et NB correspondent respectivement aux conditions expérimentales inducteur blanc avec cible blanche et inducteur noir avec cible blanche (première lettre pour la polarité de l'inducteur, la deuxième pour la cible).

3.6.2 Résultats

Le tableau 3.3 présente les moyennes et leurs écart-types des cinq valeurs du seuil de détection du contraste obtenues pour chaque sujet dans chaque condition expérimentale. Les résultats dans les trois premières colonnes correspondent aux conditions avec la cible de polarité négative, et ceux dans les trois dernières colonnes correspondent à la cible de polarité positive. Les colonnes NN et BB correspondent aux conditions expérimentales où la cible et l'inducteur avaient la même polarité, les colonnes NB et BN correspondent aux conditions expérimentales où la cible et l'inducteur avaient des polarités opposées (première lettre pour la polarité de l'inducteur, la deuxième pour la cible). De manière générale on voit que, pour une polarité de cible donnée et pour une luminance du fond fixe, les conditions expérimentales cible avec inducteur donnent des seuils moyens inférieures au seuil contrôle correspondant. Les écart-types fluctuent entre 10% et 40% de la moyenne correspondante (il n'y a que deux valeurs aux alentours de

| Terme | D.L. | SC ajustée | CM ajustée | F | P |
|--------------|------|------------|------------|-------|---------|
| fond | 1 | 0,049 | 0,0493 | 2,80 | 0,118 |
| C.Exp. | 3 | 0,321 | 0,107 | 14,57 | P<0,001 |
| sujet | 13 | 0,219 | 0,0168 | 0,93 | 0,552 |
| fond*C.Exp. | 3 | 0,016 | 0,0053 | 0,78 | 0,513 |
| fond*sujet | 13 | 0,227 | 0,0176 | 2,56 | 0,012 |
| C.Exp.*sujet | 39 | 0,286 | 0,0073 | 1,07 | 0,417 |
| Erreur | 39 | 0,268 | 0,0069 | | |
| Total | 111 | 1,39 | | | |

TAB. 3.4 – Résultats de l'analyse de la variance effectuée sur les rapports des moyennes des quatre conditions expérimentales (NN, BN, BB et NB) aux moyennes des seuils contrôles. C.Exp. correspond au facteur Condition Expérimentale, et les termes avec une étoile aux interactions entre deux facteurs. La colonne D.L. est la colonne du nombre de degré de liberté du terme, SC ajustée est la somme des carrés ajustée, CM ajustée est la somme des carrés moyens ajustées, F est la valeur du test de Fischer, et P la valeur de probabilité obtenue pour cette valeur de F. Une P valeur inférieure à 0,05 est considérée être significative.

40% et la majorité sont entre 10% et 30%).

Comme nous sommes intéressés par l'effet de facilitation obtenu par des inducteurs de polarités identiques ou opposées à celle de la cible, nous avons calculé l'amplitude de facilitation/masquage des conditions expérimentales NN, BN, BB et NB en divisant chaque moyenne par la moyenne contrôle correspondante. Une analyse de la variance (ANOVA) a été appliquée sur les rapports des moyennes ainsi obtenus. Les trois facteurs présents dans l'expérience sont le *sujet* (qui est un facteur aléatoire), le *fond* (qui est un facteur contrôlé à deux niveaux de luminance : 5 cd/m² et 40 cd/m²) et la *condition expérimentale* (qui est un facteur contrôlé à 4 niveaux :

| Terme | D.L. | SC ajustée | CM ajustée | F | P |
|------------|------|------------|------------|-------|---------|
| fond | 1 | 0,049 | 0,0493 | 2,80 | 0,118 |
| sujet | 13 | 0,219 | 0,0168 | 0,96 | 0,532 |
| C.Exp. | 3 | 0,321 | 0,107 | 15,21 | P<0,001 |
| fond*sujet | 13 | 0,229 | 0,0176 | 2,50 | 0,006 |
| Erreur | 81 | 0,570288 | 0,007041 | | |
| Total | 111 | 1,388100 | | | |

| Comparaison deux à deux des 4 niveaux du facteur C.Exp. | | | | |
|---|--------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|
| Niveaux comparés | Différence moyenne | Écart-type de la différence | Valeur du test de Tukey | Valeur de P |
| BN-NN | 0,053 | 0,023 | 2,371 | 0,0909 |
| BB-NN | -0,048 | 0,023 | -2,130 | 0,1524 |
| NB-NN | 0,094 | 0,023 | 4,191 | 0,0004 |
| BB-BN | -0,101 | 0,023 | -4,501 | 0,0001 |
| NB-BN | 0,041 | 0,023 | 1,819 | 0,2718 |
| NB-BB | 0,142 | 0,023 | 6,321 | P<0,0001 |

TAB. 3.5 – Résultats de la deuxième analyse de la variance (partie supérieure du tableau) et des comparaisons multiples deux à deux des quatre niveaux du facteur **Condition Expérimentale** (partie inférieure du tableau). La comparaison multiple a été effectuée avec le test de Tukey.

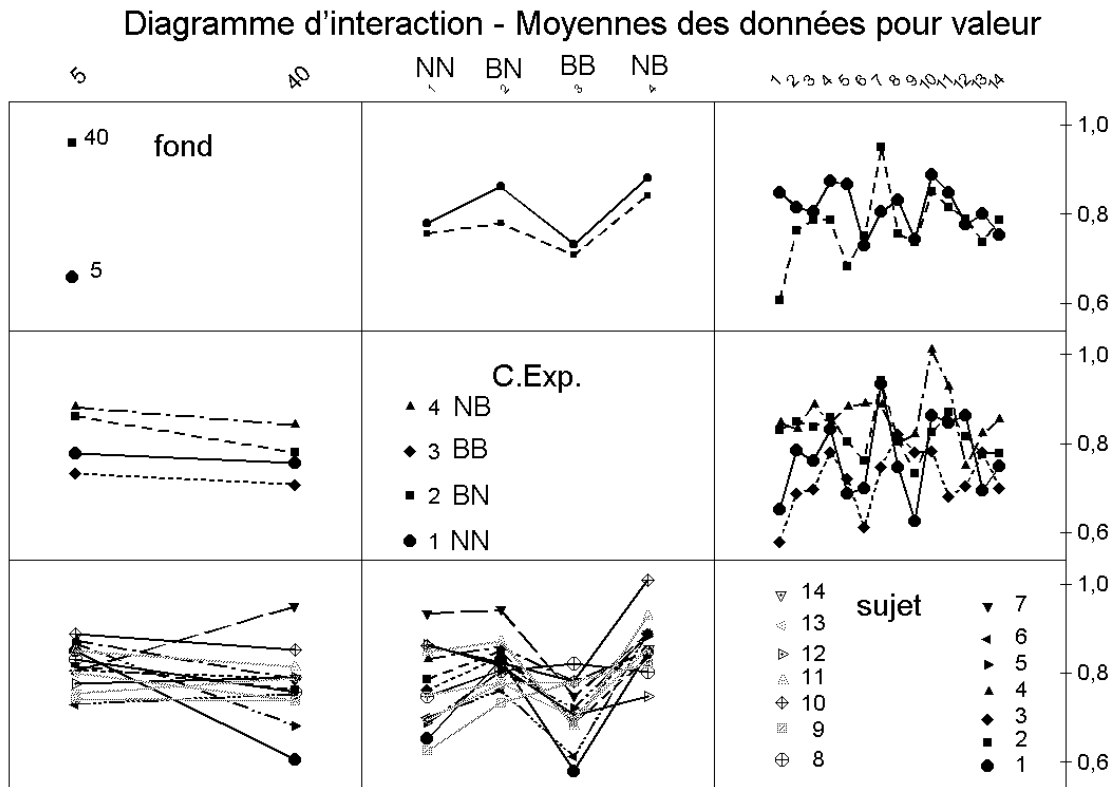


FIG. 3.17 – Diagrammes d'interactions deux à deux entre les trois facteurs de l'expérience.

NN, BN, BB et NB). Dans une première partie, les trois termes d'interactions deux à deux ont été utilisés car l'expérience de la section 3.3 a montré des différences entre les sujets, les fonds et les conditions expérimentales (voir l'annexe C pour plus de détails). Les résultats de cette ANOVA sont présentés dans le tableau 3.4. On prend comme niveau de rejet de l'hypothèse nulle de non-effet du terme, une probabilité (P valeur) inférieure à 0,05. On remarque que deux termes dans cette analyse donnent des valeurs significativement différentes, la *condition expérimentale* ($P < 0,001$) et le terme d'interaction des facteurs *fond*sujet* ($P = 0,012$). Étant donné qu'aucune interaction entre la condition expérimentale et les deux autres facteurs n'est visible ($P(\text{fond}*C.Exp.) = 0,513$ et $P(C.Exp.*sujet) = 0,417$), l'analyse a été refaite en prenant compte seulement la troisième interaction *fond*sujet*. Ceci a permis d'effectuer une comparaison multiple deux à deux des différences entre les quatre niveaux du facteur *Condition expérimentale*. Les résultats de cette nouvelle analyse de la variance et de la comparaison multiple sont présentés dans le tableau 3.5.

Les résultats de l'ANOVA sont légèrement différents, mais la conclusion ne change pas. Les seuls effets visibles sont ceux dus à la condition expérimentale et à l'interaction *fond*sujet*. Pour la comparaison deux à deux, la méthode de Tukey donne trois différences significatives. La condition NN est significativement différente de la condition NB ($P = 0,0004$); la condition BB est significativement différente de la condition BN ($P = 0,0001$) et de la condition NB ($P < 0,0001$). Ceci est visualisé dans la figure 3.17 qui montre les diagrammes d'interactions deux

à deux entre les trois facteurs. Le diagramme d'interaction *fond*C.Exp.* montre que les conditions NB et BN, stimuli à polarités opposées, ont systématiquement des valeurs supérieures aux conditions NN et BB, stimuli à polarités identiques. La comparaison statistique des moyennes démontre que seule la condition à polarités positives donne systématiquement des valeurs plus faibles par rapport aux conditions à polarités opposées. Quand les stimuli sont de polarités négatives (condition NN), l'effet de facilitation semble avoir le même ordre de grandeur que pour les conditions BN (inducteur blanc avec cible noire), mais être plus fort que pour la condition NB (inducteur noir avec cible blanche). L'effet d'interaction entre le *fond* et le *sujet* est visualisé sur le diagramme d'interaction entre ces deux facteurs (diagramme colonne 1 - ligne 3). On voit que trois sujets ont des valeurs moyennes très différentes en fonction du fond (pente très forte entre la moyenne au fond de 5 cd/m² et au fond de 40 cd/m²) : sujets 1, 5 et 7.

3.6.3 Discussion

Stimuli à polarités identiques

Les conditions expérimentales à polarités identiques de la cible et de l'inducteur montrent une facilitation générale de la détection de la cible. Ce résultat est en accord avec les résultats de l'expérience 2. A l'intérieure d'une voie visuelle (ON ou OFF), le régime longue distance est facilitateur.

Stimuli à polarités opposées

Les conditions expérimentales à polarités opposées montrent que les résultats qualitatifs de l'expérience 2 (section 3.3) sont encore valables. C'est à dire que l'interaction *ON-vers-OFF* semble ne pas être différente de l'interaction *OFF-vers-OFF* en donnant des différences significatives par rapport à l'interaction *ON-vers-ON*, mais l'interaction *OFF-vers-ON* est différente des interactions *ON-vers-ON* et *OFF-vers-OFF*.

Le seul point qui n'est pas confirmé par cette expérience est le masquage observé chez certains sujets pour la luminance du fond de 40 cd/m². Dans cette expérience, un seul sujet (n° 10) a montré aucun effet sur la détection de la cible par la présence de l'inducteur noir (voir le diagramme d'interaction de la colonne 3 - ligne 2 de la figure 3.17, pour la condition expérimentale NB). En moyenne, l'amplitude de facilitation/masquage pour l'interaction *OFF-vers-ON* est de 0,86, montrant une faible facilitation de la détection d'une cible blanche par la présence d'un inducteur noir. En se reportant aux données de l'expérience 2 (section 3.3), il s'avère que ce sont les sujets qui ont effectué le plus d'expérience qui montrent un masquage important au niveau de l'interaction *OFF-vers-ON* (inducteur noir avec cible blanche). Ainsi, il est très probable (même si non quantifiable) qu'un apprentissage spécifique à la polarité des stimuli a eu lieu. D'un autre côté, une interaction fond-sujet semble être présente. Ceci pourrait indiquer que certains sujets, qu'ils soient naïfs vis à vis de l'expérimentation en psychophysique

visuelle (résultats de cette expérience) ou expérimenté (Expérience 2 et 3), n'ont pas le même comportement en fonction du fond. Il est aussi possible que les deux phénomènes, variation d'une interaction entre les deux voies visuelles avec la luminance du fond ou plasticité modifiant l'interaction entre les deux voies, interviennent simultanément.

3.7 Discussion générale des résultats et conclusions

En début de chapitre, l'état des connaissances a permis de mettre en évidence que deux régimes d'intégration, qualitativement et quantitativement différents, existent entre stimuli du type lignes colinéaires : le régime courte distance et le régime longue distance. Le premier est présent quand les stimuli sont séparés par des distances bord à bord inférieures à environ 20' et plusieurs publications (voir la section 3.1, "État des connaissances") ont montré qu'il est sensible à la polarité des stimuli et au contraste de l'inducteur. Le second régime est présent pour des séparations angulaires supérieures à 20'. Peu de résultats étaient disponibles sur ce régime. Les expériences qui ont été effectuées ont permis de caractériser ce deuxième régime d'interaction. Les conclusions principales suivent.

La première expérience (section 3.2, "Etendue spatiale des régimes d'intégration courte et longue distance"), en utilisant des stimuli de polarités positives, a montré que :

1. le régime longue distance a pour borne inférieure environ 20', que nous définissons comme la séparation maximale où le régime courte distance se manifeste, et pour borne supérieure environ 2,5 degrés, distance à partir de laquelle aucun effet sur la détection de la cible n'est visible ;
2. le régime courte distance pour les polarités positives est dépendant du contraste de l'inducteur, montrant une facilitation pour la détection de la cible aux faibles contrastes de l'inducteur, et une suppression de la détection de la cible aux forts contrastes de l'inducteur ;
3. le régime longue distance est indépendant du contraste de l'inducteur, montrant une facilitation générale de la détection de la cible.

La deuxième expérience (section 3.3, "Caractéristiques fonctionnelles du régime longue distance") a étudié spécifiquement les effets du contraste de l'inducteur, de la polarité des deux stimuli (cible et inducteur) et de la luminance du fond sur lequel ils sont présentés, sur les interactions longues distances. Elle a montré que :

4. pour des stimuli de polarités identiques, impliquant seulement une des deux voies visuelles transmettant l'information de contraste (ON ou OFF), la luminance du fond ne semble pas affecter les interactions longues distances ; un inducteur noir facilite la détection d'une cible noire, et un inducteur blanc facilite la détection d'une cible blanche ; les interactions à l'intérieur d'une voie restent facilitatrices ;

5. pour des stimuli de polarités opposées, une asymétrie dans les interactions longues distances est présente ; un inducteur blanc (voie ON) facilite la majorité du temps une cible noire (voie OFF) pour toutes les luminances du fond que nous avons testées, alors qu'un inducteur noir (voie OFF) peut faciliter ou masquer la détection d'une cible blanche (voie ON) ; pour la luminance de fond la plus forte que nous avons utilisé, pour les interactions *OFF-vers-ON*, une variabilité intersujets est apparue, certains sujets montrant une suppression importante et d'autres une facilitation au niveau de la détection de la cible ;
6. il semblerait que le niveau d'adaptation visuelle et le régime d'intégration de l'information du contraste n'interviennent pas dans les variations des interactions à polarités opposées ; pour un sujet, l'interaction *OFF-vers-ON* ne varie pas avec la luminance du fond.

La troisième expérience (section 3.4, "Interactions des deux régimes d'intégration spatiale") a permis de montrer que, pour des séparations nulles ou faibles et un inducteur de longueur suffisante pour qu'il implique les deux régimes d'intégration (voir la figure 3.12), les deux régimes influencent les seuils de détection de la cible. Les résultats ont montré que :

7. à l'intérieure de la voie visuelle OFF, les interactions semblent être exclusivement facilitatrices ; pour la voie ON, un inducteur de contraste très fort semble commencer à supprimer la détection de la cible (résultat similaire à celui de la première expérience), ce qui montrerait que le régime courte distance, devenant suppressif aux contrastes d'inducteur forts, influence de manière plus forte la détection de la cible que le régime longue distance ;
8. une asymétrie dans les interactions *ON-vers-OFF* et *OFF-vers-ON* existe ; pour de faibles contrastes d'un inducteur blanc (voie ON), une interaction *ON-vers-OFF* courte distance suppressive est prépondérante par rapport à une interaction longue distance facilitatrice ; pour de forts contrastes d'un inducteur blanc (voie ON), une interaction *ON-vers-OFF* longue distance facilitatrice est prépondérante par rapport à une interaction courte distance suppressive ; pour les interactions *OFF-vers-ON*, il est difficile de déterminer quel régime est prépondérant car celles-ci semblent varier avec la luminance du fond dans les deux régimes, et il semblerait avec les sujets.

La quatrième expérience (section 3.5, "L'apprentissage perceptif") a étudié la possibilité d'une plasticité visuelle du régime longue distance, pour la direction d'alignement horizontale des stimuli et la direction d'alignement verticale, quand les deux stimuli ont une polarité positive. Deux contrastes extrêmes de l'inducteur ont été testés et les résultats montrent que :

9. le contraste de l'inducteur ne semble pas influencer la plasticité longue distance ;
10. certains sujets, quelle que soit la direction d'alignement des stimuli et le contraste de l'inducteur, ne montrent aucune évolution de leurs seuils de détection au cours des journées d'expériences ;

11. pour les sujets où des changements ont eu lieu, les seuils ne variaient pas de la même manière pour les deux directions d'alignement ; la direction verticale montrant une plasticité "négative" sur les premiers jours d'expériences, correspondant à une augmentation du seuil de détection des sujets, la direction horizontale montrant une plasticité "positive" sur les premiers jours d'expériences, correspondant à une diminution des seuils de détection des cibles des sujets ; il y a eu un inversement de la plasticité de ces sujets au cours des expériences ; pour la direction verticale une baisse des seuils de détection des sujets sur les derniers jours, et pour la direction horizontale une augmentation des seuils sur les derniers jours ;
12. la plasticité longue distance est apparente chez des sujets naïfs et non naïfs vis à vis des expériences effectuées.

La cinquième et dernière expérience a vérifié que les asymétries observées dans les interactions entre polarités opposées du régime longue distance (conclusion numéro 5 de la deuxième expérience) étaient présentes chez des sujets naïfs (sans expérience en psychophysique visuelle). L'analyse des résultats a montré que :

13. les quatre conditions expérimentales, quelles que soient les polarités des deux stimuli, produisent une facilitation de la détection de la cible ;
14. aucun sujet a montré du masquage pour l'interaction *OFF-vers-ON*, contrairement à la deuxième expérience ;
15. les interactions à polarités positives (*ON-vers-ON*) semblent être plus fortes que les interactions à polarités opposées ;
16. les interactions à polarités négatives (*OFF-vers-OFF*) semblent être plus fortes en comparaison des interactions *OFF-vers-ON*, mais pas significativement différentes des interactions *ON-vers-OFF* ;
17. la luminance du fond ne semble pas jouer de rôle important, même si certains sujets ont des variations de leurs réponses en fonction du fond (une interaction fond-sujet est présente).

Plusieurs points doivent être discutés vis-à-vis de ces résultats.

3.7.1 Stimuli du type patch de Gabor ou D6

En premier, il s'agit de l'utilisation de stimuli visuels à orientation préférentielle qui possèdent les deux polarités. Ce sont typiquement les patches de Gabor et les stimuli D6 (voir l'annexe A).

Problème des polarités

L'utilisation de ces stimuli pour étudier les interactions entre éléments avec orientations préférentielles ne permet pas d'étudier les interactions entre polarités opposées. Nos résultats

montrent que des asymétries sont présentes dans les interactions *ON-vers-OFF* et *OFF-vers-ON* pour les deux régimes d'intégration. Comment associer les résultats des expériences avec ces stimuli à l'une ou l'autre des interactions ? Même s'il est possible d'associer une polarité par rapport à la composante centrale du Gabor, comme c'est explicitement fait dans la partie "Etat des connaissances", il est loin d'être évident que c'est l'interaction entre les composantes centrales du patch qui vont être prépondérantes. Les polarités alternes, et donc la bande centrale est entouré de deux bandes de polarités opposées qui vont interagir avec les deux bandes correspondant à l'autre Gabor (voir annexe A.4). Il est impossible de savoir quel interaction est prépondérante si des expériences n'ont pas été effectuées impliquant l'une ou l'autre seulement des polarités (voir aussi la discussion générale).

Problème de la valeur maximale du contraste

Il s'avère que l'utilisation des patchs de Gabor (Annexe A.2) est loin d'être satisfaisante à cause du contraste maximal utilisable dans la polarité positive. L'utilisation des patchs de Gabor impose que, si le pic central du patch de Gabor est de polarité positive, la luminance maximale de la polarité positive ne dépassera pas deux fois la valeur en luminance du fond ($C_M = 1$ donne la luminance maximale du pic égale à deux fois la luminance du fond, $L_{max} = 2L_f$). En utilisant cette valeur et la définition du contraste de Michelson pour des stimuli ligne (Annexe A.1, équ. A.2), on obtient le maximum à 0,33 ! Or, des stimulations visuelles avec des barres ou lignes lumineuses avec des luminances bien supérieures à deux fois la luminance du fond sur lequel elles sont présentées montrent que les interactions peuvent changer radicalement. Pour des polarités positives des stimuli et des contrastes forts de l'inducteur, l'effet de suppression sur la détection de la cible dont nous avons montré la présence à de courtes distances ne peut pas être obtenu avec les patchs de Gabor car nous avons trouvé cet effet à partir d'un contraste de Michelson ligne d'environ 0,7.

Différences entre les voies ON et OFF

En plus de l'argument précédent, il apparaît qu'il peut y avoir des différences entre les deux voies visuelles. Il est possible que les interactions à l'intérieur de la voie ON ne soient pas identiques aux interactions à l'intérieur de la voie OFF. Ceci est suggéré par le fait que nous n'avons pas observé de suppression à courte distance pour le système OFF quand le contraste de l'inducteur noir augmente. Cependant, il faut pondérer cette affirmation par les résultats de Wehrhahn & Dresch (1998) qui ont montré une telle suppression. Pour le moment, il est difficile de savoir si elle existe. Des expériences aux courtes distances spécifiquement dédiées à cette problématique peuvent être effectuées pour y répondre.

Définition des régimes courte et longue distance

Nous avons défini ces deux régimes en fonction des séparations angulaires entre stimuli en terme de bord à bord. Contrairement aux différentes publications utilisant les patchs de Gabor,

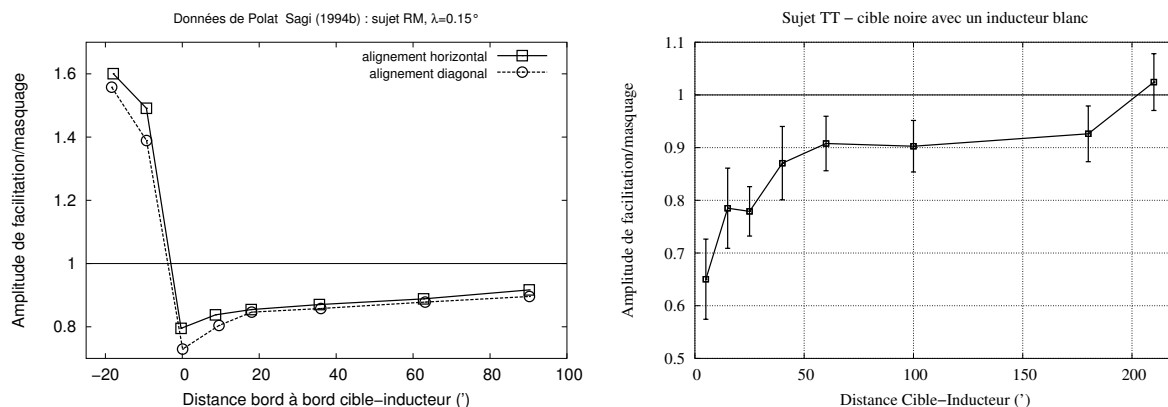
où les distances sont exprimées de centre à centre, le régime longue distance est apparent à partir d'une séparation d'environ 20'. Ces publications (Polat & Sagi, 1993, 1994a; Zenger & Sagi, 1996; Polat, 1999) considèrent que les deux régimes sont fonctionnellement séparés à partir d'une séparation centre à centre d'environ 2 à 3 λ . Pour les patchs de Gabor avec les plus petites longueurs d'onde ($\lambda = 0,075^\circ$), ceci correspond à une distance bord à bord d'environ 0' à 5' ! Ainsi, la séparation spatiale à partir de laquelle leur régime d'intégration courte distance passe à leur régime d'intégration longue distance, correspondrait à une distance où les stimuli Gabor commencent à ne plus être superposés. Ceci n'est pas le cas dans nos résultats, ni dans ceux de Brincat & Westheimer (2000) (voir la section 3.1, "Etat des connaissances"). Nous préférons garder la dénomination régime courte distance pour les séparations spatiales bord à bord entre 0' et 20', et la dénomination régime longue distance pour les séparations spatiales bord à bord supérieures à 20'. En plus, ces deux régimes sont aussi présents en utilisant des stimuli Gabor (voir la figure 3.18(a), mais avec d'autres directions d'alignement des stimuli ; sinon se reporter à l'article de Polat & Sagi (1994b) où des données pour la direction verticale sont présente, ou à la section "Etat des connaissances"). Une différence beaucoup plus fondamentale que la simple superposition des stimuli semble être présente à ces séparations spatiales.

Plasticité visuelle

Il existe un point très intéressant dans les résultats de Polat & Sagi (1994b). Ils ont trouvé que pour que la plasticité soit "positive", c'est à dire qu'il y ait diminution de l'amplitude de facilitation/masquage et une augmentation de la séparation spatiale d'interaction entre les deux stimuli, il est absolument nécessaire que la cible et l'inducteur soient au minimum partiellement superposés ! Nous n'avons pas effectué de telles expériences. La question qui se pose est de savoir comment ce changement brusque se fait, ou quel type de changement a lieu pour que la plasticité se modifie aussi radicalement. La seule explication que nous avons trouvée, et qui confirme d'une certaine manière celle proposée par Polat & Sagi (1994b), est qu'une plasticité importante du champ récepteur est induite suite à la superposition des deux stimuli, et que c'est elle qui entraîne la modification des interactions longues distances. La plasticité du champ récepteur est apparue effective au niveau d'un neurone du système visuel primaire du chat (Eysel, Eydin & Schweigart, 1998; Eydin, Schweigart & Eysel, 2002). Ainsi, la plasticité visuelle entraînerait la modification des interactions du neurone non seulement avec ses plus proches voisins mais aussi avec des neurones plus éloignés, correspondant à des connexions qui n'influencent pas directement son champ récepteur.

3.7.2 Direction d'alignement des stimuli

Pour les expériences concernant l'apprentissage, il est apparu que les deux directions d'alignement des stimuli ne sont pas équivalentes. Les expériences qui ont caractérisé le régime longue distance et les interactions entre les deux régimes ont été effectuées avec des aligne-



(a) Amplitude de facilitation/masquage d'une cible de type Gabor en fonction de la séparation angulaire bord à bord avec les inducteurs. Données reprises de Polat & Sagi (1994b), figure 2, sujet RM pour un alignement horizontal et diagonal. On remarque qu'à partir d'une séparation d'environ $20'$, un plateau est présent pour les deux directions d'alignement des stimuli, comme dans nos données de l'expérience 1.

(b) Amplitude de facilitation/masquage d'une cible noire de type ligne en fonction de la séparation angulaire bord à bord avec l'inducteur de type ligne. Données correspondant à l'expérience (section 3.2). Alignement vertical des stimuli. L'écart-type du seuil contrôle donne une valeur normalisée à 1 de 0,032. Tous les points, sauf les deux plus grandes séparations, ont une différence significative par rapport à l'amplitude de 1.

FIG. 3.18 – Amplitude de facilitation/masquage en fonction de la séparation spatiale bord à bord cible-inducteur. Graphique (a) : données de Polat & Sagi (1994b) avec stimuli Gabor ; graphique (b) : données pour des polarités opposées avec stimuli lignes, sujet TT.

ments verticaux des stimuli. Est-ce qu'une différence existe par rapport à un alignement horizontal ? Il ne semble pas car Polat & Sagi (1993, 1994a), Zenger & Sagi (1996) et Solomon, Watson & Morgan (1999) ont montré que pour des alignements horizontaux, ils obtiennent le même type d'interaction pour le régime courte distance. Le régime longue distance ne semble pas avoir été étudié, même si des indices, publiés dans Polat & Sagi (1994b), indiquent qu'il est aussi présent pour les directions verticale, horizontale et diagonale, mais en utilisant des stimuli Gabors. Les données du sujet RM de leur étude sont présentées sur la figure 3.18(a) pour les directions horizontale et verticale (ils ont utilisé des cibles et inducteurs de même caractéristiques spatio-temporelles, donc correspondant à des interactions à polarités identiques). On voit qu'à partir du moment où les deux stimuli ne sont plus superposés (séparation supérieure à $0'$), le régime courte distance, entre $0'$ et $20'$, facilite plus fortement la détection de la cible que le régime longue distance, au-delà de $20'$. Il faut cependant préciser que cette étude montrait un effet d'apprentissage important sur la durée (voir la discussion de la section 3.5, "L'apprentissage perceptif") et que la distance d'interaction du régime longue distance (au-delà de $20'$) est considérablement augmentée, passant d'environ $40'$ à $90'$ en fin d'apprentissage. Les données qui sont reprises dans la figure 3.18(a) correspondent aux résultats du sujet RM après apprentissage. Ceci indique que les stimuli lignes et Gabors stimulent les mêmes régimes d'intégration de l'orientation pour des stimuli non superposés.

3.7.3 *Effet longue distance avec des polarités opposées*

Ainsi, pour des polarités identiques entre cible et inducteur, le régime longue distance a aussi été mis en évidence pour les autres directions d'alignement. Qu'en est-il si les polarités sont opposées ? Pendant la première expérience, correspondant à la section 3.2 ("Etendue spatiale des régimes d'intégration courte et longue distance"), le sujet TT a effectué une mesure à polarités opposées (cible noire avec un inducteur blanc) pour huit séparations spatiales différentes (ces données n'ont pas été publiées dans Tzvetanov & Dresch, 2002). La méthodologie est identique à celle de la première expérience. L'analyse des résultats a été effectuée en considérant un seul fichier avec 120 essais par niveau de stimulus et en ajustant une fonction logistique aux données (chapitre 2). Les résultats sont présentés sur la figure 3.18(b). On remarque la rapide remontée de l'amplitude de facilitation/masquage à partir d'une valeur d'environ 0,65 pour une distance de 5' à une valeur de 0,9 aux environs de 50'. Le plateau se trouve être présent jusqu'à la séparation d'au moins 100', avec une amplitude de facilitation/masquage d'environ 0,9. Il est intéressant de noter que pour les faibles séparations cible-inducteur le sujet TT a une amplitude correspondant à une facilitation importante (de l'ordre de 35%). Cette expérience était la première qu'il effectuait avec des polarités opposées. Les expériences suivantes, impliquant les régimes courte et longue distance, utilisant des polarités opposées ont montré que l'amplitude de facilitation/masquage pour l'interaction *ON-vers-OFF* de ce sujet fluctuait autour de 1 pour les courtes distances (Expérience 3, section 3.4, "Interactions des deux régimes d'intégration spatiale"). Ceci montre qu'il est très probable qu'une plasticité du régime courte distance et entre polarités opposées est intervenue chez ce sujet entre ces différentes expériences.

En considérant les résultats inattendus sur l'apprentissage entre les directions horizontale et verticale, et le manque d'information sur un apprentissage spécifique entre polarités opposées (*ON-vers-OFF* ou *OFF-vers-ON* ou les deux simultanément), il serait dangereux de généraliser les interactions longues distances à polarités opposées obtenues pour un alignement vertical aux autres directions d'alignement.

3.7.4 *Plasticité visuelle en fonction des polarités, du régime d'interaction, et de la direction d'alignement*

En dehors de la plasticité spécifiquement induite par les petites séparations spatiales (voir la section 3.7.1, le paragraphe "Plasticité visuelle"), il semblerait que pour les deux régimes une plasticité visuelle spécifique aux polarités, et à la direction d'alignement des stimuli pour le régime longue distance, soit présente.

La dernière expérience (expérience 5) a montré que des sujets naïfs, sans expérience en psychophysique visuelle, ne montrent pas de masquage pour l'interaction *OFF-vers-ON* longue distance, or deux sujets ont montré clairement ce comportement dans l'expérience 2. Il s'est avéré que ces deux sujets font partie de ceux ayant effectué le plus d'expérience dans le régime longue distance à polarités opposées. L'expérience contrôle (n°5) n'a pas montré de masquage.

Par contre, une interaction fond sujet est présente, ce qui indique que certains sujets ne se comportent pas de la même manière pour ces expériences quand la luminance du fond change. Même si une expérience spécifique à cette problématique est nécessaire, il est déjà clair que des différences significatives avec la pratique répétée des expériences apparaissent. De plus, pour le régime courte distance, il semblerait aussi exister une plasticité visuelle pour l'interaction *ON-vers-OFF* (voir la discussion de la section 3.7.3), ou du moins un changement dans les interactions entre les deux régimes.

Si l'on rajoute à ceci les différences entre les deux directions d'alignement, verticale et horizontale, pour les interactions longues distances à polarités positives, il devient évident qu'une plasticité à plusieurs niveaux est présente. Le premier en fonction de la direction d'alignement des stimuli, le deuxième en fonction des polarités de ces stimuli, et le troisième en fonction de la séparation spatiale bord à bord des stimuli. Il apparaît donc qu'une étude beaucoup plus approfondie que ce qui a été effectué dans ce travail, ainsi que dans les travaux de Polat & Sagi (1994b), est nécessaire pour bien analyser les différentes composantes de la plasticité visuelle.

3.7.5 Voies ON et OFF et contours visuels

Dans la discussion de l'expérience 2 (section 3.3, "Caractéristiques fonctionnelles du régime longue distance"), il a été mentionné que les différences dans les interactions longue distance entre voies visuelles (*ON-vers-OFF* et *OFF-vers-ON*) pourraient suggérer des différences dans la création des contours, spécifiquement associés à une voie. Les résultats des interactions entre les deux régimes d'intégration (expérience 3, section 3.4) pondèrent les premiers résultats, car il s'avère que les interactions entre voies peuvent être radicalement changées à de courtes séparations spatiales. Les représentations de contour noir et blanc, ainsi que les images associées à chaque polarité, sont traités de manière séparée (voir la cé-

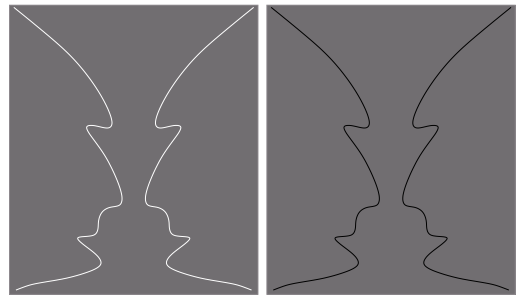


FIG. 3.19 – L'illusion visuelle du vase de Rubin avec seulement les contours du vase/visage. Deux formes apparaissent séparément, une qui est un vase sur un fond, l'autre deux visages qui se font face. Les deux formes ne sont jamais perçues en même temps.

lèbre image du vase de Rubin, ou le dessin de Freud et amie dans Livingston & Hubel, 1987, figure 37, p.3456, par exemple). L'exemple du vase de Rubin, dans la figure 3.19, utilisant seulement les contours du vase soit en blanc, soit en noir, permet d'illustrer que même pour une telle image, il y a un effet de profondeur associé au contour. Essayer de créer un contour pur sur un fond uniforme, sans autres informations que l'effet de colinéarité, qui permet de montrer des différences rien que dans le traitement noir/blanc des contours, s'avère des plus difficile. L'utilisation de différentes séparations angulaires entre les différents segments de lignes, des segments de lignes des deux polarités étant systématiquement présents, fait que la prépondérance de l'un ou l'autre des contours est difficilement prévisible, et l'interaction va sûrement

impliquer le système attentionnel du sujet.

3.7.6 *Correspondances neurophysiologiques*

Le système visuel primaire (aire V1) est connu pour être structuré en 6 couches. Les neurones des différentes couches sont classés selon la terminologie des cellules simples et complexes, proposée à l'origine par Hubel & Wiesel (1962). Ces deux types correspondent aux caractéristiques spatiales et temporelles du champ récepteur du neurone. Les cellules simples sont les premières à coder l'information de l'orientation et sont présentes dès la couche 4, même si cette dernière possède des cellules à champ récepteur circulaire du même type que les cellules du CGL. Il existe des cellules des deux polarités pour chaque localisation spatiale du champ visuel. Les cellules complexes sont présentes à partir des couches 2 et 3 où les connexions horizontales longues distances sont présentes. De telles connexions sont aussi présentes dans la couche 5, mais il semblerait avec de plus courtes distances que dans les couches 2 et 3 (voir la thèse de Raizada, 2001). L'aire V1 est subdivisée fonctionnellement en "colonnes" à dominance oculaire et à dominance orientationnelle (Hubel & Wiesel, 1974a,b), appelées hypercolonnes. Chez le singe, au niveau de la fovéa, la taille des hypercolonnes orientationnelles est d'environ 10' à 15' et augmente de manière quasi-linéaire avec l'augmentation de l'excentricité visuelle (facteur de magnification d'environ $(0,18 \pm 0,07)$ degré/mm de cortex avec une pente de $(4,3 \pm 1,5) \cdot 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$, obtenus à partir des données de Hubel & Wiesel, 1974b). Si nous supposons une similitude des systèmes visuels du singe et celui de l'Homme, la même taille d'hypercolonne orientationnelle peut être supposée se trouver chez l'Homme. Les études des longueurs des connexions neurophysiologiques longues distances montrent qu'elles peuvent être aussi grandes que 7 à 8 mm (Gilbert, 1998) ce qui correspondrait à une séparation dans le champ visuelle d'environ 2,5 à 3,0 degrés.

Nous avons séparé les deux régimes d'intégration de l'information de colinéarité à partir d'une séparation visuelle d'environ 20' et la limite du régime psychophysique longue distance semble être environ 2,5 degrés. Le paragraphe précédent suggère que les deux régimes psychophysiques sont directement influencés par les connexions inter et intrahypercolonnes orientationnelles. La limite spatiale du régime longue distance correspond approximativement aux limites des connexions longues distances neurophysiologiques. Quant à la limite du régime courte distance de 20', elle suggère que les connexions à l'intérieure d'une hypercolonne et les connexions avec les hypercolonnes adjacentes sont directement impliquées dans les résultats obtenus. Ainsi, les différences entre stimuli à polarités opposées pour le régime courte distance impliquerait directement ces connexions locales. Quant aux connexions longues distances, elles semblent être peu variables pour les connexions à polarités ON-vers-OFF, par contre très variables d'un sujet à un autre en fonction de son expérience antérieure (apprentissage) pour les polarités OFF-vers-ON. Ce point de vue n'exclue pas que les résultats psychophysiques puissent être influencés par des processus visuels de plus haut niveau, situés dans les aires visuelles postérieures à V1 (V2, V3 etc.).

Une autre évidence pour l'association du régime courte distance avec les connexions lo-

cales des hypercolonnes est apportée par l'étude de Yu & Levi (1997). Ils ont montré que pour une cible blanche de taille $1' \times 5'$ (largeur \times hauteur) flanquée de deux inducteurs carrés de taille $3' \times 3'$, ce n'est pas la colinéarité entre les trois éléments qui est importante pour obtenir l'effet de facilitation à courte distance. Au contraire, ils associent un filtre spatial longiligne de type centre-périphérie pour la détection de la cible, et ils proposent que c'est la nature antagoniste de la périphérie par rapport au centre du filtre qui entraîne la facilitation spatiale à courte distance. Il faut noter que la facilitation obtenue pour les deux cas de figure testés (inducteurs colinéaires avec la cible, ou inducteurs placés sur les côtés de la cible) est quasiment identique et s'étend jusqu'à une séparation bord à bord d'environ $10'$. Ceci est entièrement en accord avec les données neurophysiologiques présentées ci-dessus.

Chapitre 4

Modélisation des interactions spatiales entre segments visuels iso-orientés

Nous avons confronté nos résultats expérimentaux sur le régime longue distance à un modèle de réseau de neurones formels simulant la connectivité du cortex visuel primaire. Deux régimes psychophysiques distincts sont présents pour l'intégration de l'information spatiale. Les résultats psychophysiques majeurs qui devraient être reproduits sont : (1) le plateau du régime longue distance, insensible à l'intensité du contraste de l'inducteur ; (2) les possibles interactions entre polarités opposées des deux stimuli, ainsi que les interactions entre les deux régimes d'intégration de l'information d'iso-orientation. Si nous souhaitons associer ces interactions à une partie physiologique du système visuel, dans notre cas expliquer explicitement au moins une partie des résultats par l'aire visuelle V1, il est nécessaire que le modèle soit basé directement sur les connaissances neurophysiologiques.

La modélisation du système visuel primaire de l'Homme se base sur toutes les données des différents domaines scientifiques qui étudient le système visuel : la neurophysiologie, la neurochimie et la psychologie cognitive. Les modèles proposés pour le système V1 utilisent principalement les connaissances neurophysiologiques des connexions entre les différentes couches et les résultats obtenus par l'intermédiaire de la psychophysique visuelle. Nous avons montré précédemment qu'il existe deux régimes d'intégration de l'information de colinéarité, distincts à partir d'une séparation spatiale d'environ 20'. Ils semblent correspondre aux connexions spécifiques intra- et interhypercolonnes. Les différents modèles présentés pour expliquer ces interactions doivent par conséquent explicitement prendre en compte ces différences.

En neurophysiologie, Chen, Kasamatsu, Polat & Norcia (2001), par exemple, utilisent un modèle spécifiquement appliqué à simuler les fonctions de réponse au contraste d'un neurone répondant à une cible de type patch de Gabor entourée de deux inducteurs de même caractéristiques spatiales et temporelles. Ce modèle se base sur les connaissances neurophysiologiques des hypercolonnes en supposant une interaction inhibitrice à l'intérieure d'une hypercolonne et des interactions excitatrices entre neurones iso-orientés et appartenant à des hypercolonnes différentes. Par ailleurs, la littérature scientifique traitant spécifiquement la psychophysique vi-

suelle présente des modèles de réseaux de neurones construits à partir de blocs fondamentaux représentant chaque neurone. Certains modèles utilisent directement des fonctions neurales construites à partir des patchs de Gabor et des non-linéarités connues (voir Watson & Solomon , 1997, par exemple). D'autres modèles utilisent directement les connaissances neurophysiologiques des connexions entre les différentes couches du système V1 et essaient d'attribuer des fonctionnalités à ces couches. Un de ces modèles se base sur la théorie de la résonance adaptative (sigle anglais *ART*) de S. Grossberg. L'application de cette théorie à la modélisation du système visuel primaire a donné le modèle LAMINART (voir Grossberg & Williamson , 1999, 2001; Raizada , 2001) qui essaye de prendre en compte les connaissances de la structure laminaire du cortex primaire et des connexions intracortex.

Dans ce chapitre est présenté le modèle LAMINART de Grossberg et ses collaborateurs. Il a été utilisé pour vérifier son comportement en comparaison des résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre précédent. Il a été repris en gardant les valeurs numériques des différentes constantes du réseau (constantes de temps des équations différentielles, constantes d'espace des champs récepteurs des différentes couches). Les seules modifications concernent : les connexions entre certaines couches, obtenues par auto-organisation dans l'étude de Grossberg & Williamson (1999), qui ont dû être approximées par des fonctions et qui sont présentées dans les parties concernées (matrices W^+ , W^- et H) ; la séparation des couches 4 et 6 en deux sous-couches ayant des neurones à champs récepteurs opposés, permettant ainsi de modéliser les interactions entre polarités opposées. Le modèle est divisé en deux blocs pour étudier son comportement en fonction de sa complexité.

4.1 Le modèle LAMINART

Ce modèle est construit à partir des connaissances neurophysiologiques du système visuel primaire des mammifères. La structure en couche est gardée avec les connexions connues. La variation de l'activité de chaque neurone du modèle se base sur l'équation différentielle générale de membrane d'un neurone (voir Hodgkin & Huxley , 1952, par exemple), écrite sous la forme :

$$C_m \frac{dV(t)}{dt} = - [V(t) - E_{excit}] \gamma_{excit}(t) - [V(t) - E_{inhib}] \gamma_{inhib}(t) - [V(t) - E_{fuite}] \gamma_{fuite} \quad (4.1)$$

avec les conductances $\gamma_{excit}(t)$, $\gamma_{inhib}(t)$ variant dans le temps, et représentant l'entrée totale, respectivement excitatrice et inhibitrice, arrivant sur le neurone au temps t . γ_{fuite} est la conductance de fuite du système et les termes E_i représentent les potentiels d'équilibre des composantes excitatrices, inhibitrices et de fuite. Ces constantes ont été fixées à $E_{excit} = 1$, $E_{inhib} = -1$ et $E_{fuite} = 0$ pour tous les neurones du modèle.

Le système visuel primaire des mammifères est connu comme étant structuré en couche avec des connexions intra- et intercouches spécifiques (Hubel , 1994; Callaway , 1998). D'un point

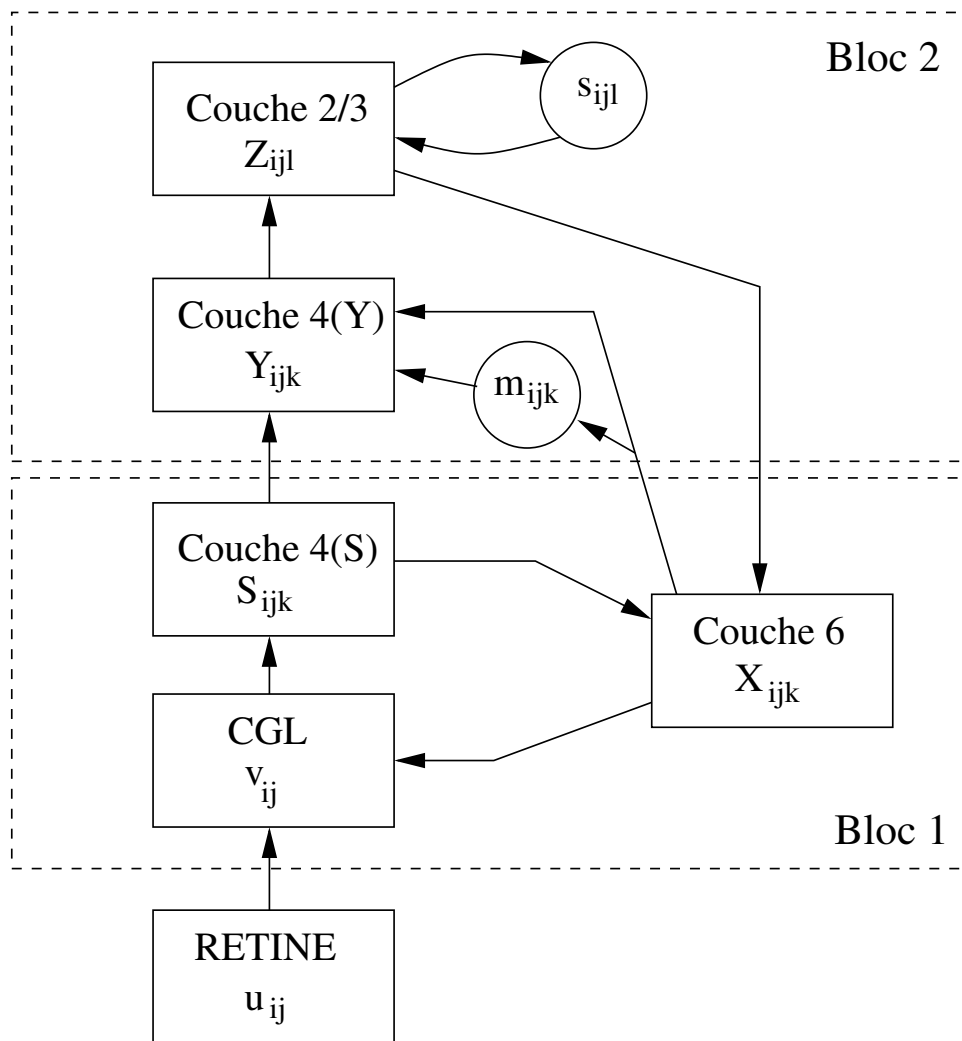


FIG. 4.1 – Présentation schématique du modèle LAMINART utilisé par Raizada (2001). L'information circule de la rétine vers le haut. Des rétroactions sont présentes entre les différents niveaux (voir les flèches). Les rectangles représentent les couches, indiquées par leurs noms et leur sigle mathématique dans le modèle, et les cercles les interneurons inhibiteurs d'une couche. Les interneurons m_{ijk} appartiennent à la couche 4(Y), les interneurons s_{ijl} appartiennent à la couche 2/3. CGL représente le corps genouillé latéral. Le modèle est divisé en deux blocs fondamentaux pour permettre l'étude du comportement du modèle en fonction de sa complexité.

de vue fonctionnel, des neurones avec des champs récepteurs de type simple et complexe sont présents à travers les différentes couches. Le modèle proposé par Grossberg et ses collaborateurs prend en compte la structure laminaire du cortex primaire, en mettant des neurones à champ récepteur de type simple dans la couche qu'ils appellent "4" et des neurones à champ récepteur de type complexe dans la couche "2/3".

Le modèle général, de la rétine jusqu'au cortex primaire (structure V1), est présenté sur la figure 4.1. Il est divisé en deux blocs fondamentaux qui ont été numérotés 1 et 2 en fonction de la hiérarchie de traitement de l'information qu'ils contiennent. Même si d'un point de vue anatomique les corps genouillés latéraux (CGLs) sont séparés du cortex primaire, ils ont été introduits dans le Bloc 1 à cause des rétroactions connues pour être présentes de la couche 6 vers les CGLs. Ainsi le premier bloc fondamental contient le CGL, une partie de la couche 4

(nommée 4(S)), et la couche 6. Le deuxième bloc contient la deuxième partie de la couche 4 (nommée 4(Y)) et la couche 2/3, correspondant à la couche où l'on sait que les connexions horizontales longues distances sont présentes (voir Bosking et al., 1997, par exemple). La rétine et le CGL sont décomposés en deux sous-couches ON et OFF, correspondant à chaque voie visuelle du système visuel. Ainsi ces couches et leurs équations contiennent des cellules ON, qui répondent à un incrément de lumière en leur centre et sont notées par un exposant $^+$, et des cellules OFF, qui répondent à un décrement de lumière en leur centre et sont notées par un exposant $^-$.

Pour la modélisation, les équations et l'image sont discrétisées dans un plan (x, y) correspondant respectivement aux indices (i, j) . Pour chaque position spatiale (i, j) il existe un neurone dans chaque couche, centré en cette position. La rétine et le CGL ont chacun deux neurones, l'un pour la voie ON et le deuxième pour la voie OFF. Les couches où des orientations préférentielles existent ont un troisième indice (k ou l) correspondant à l'orientation du champ récepteur. Pour l'implémentation pratique, seulement deux directions de champs récepteurs sont choisies, une selon x et une selon y . Le nombre de directions est indiqué par K , qui est égal à 2 (horizontale et verticale). Le nombre d'indice k varie entre 0 et $2K - 1$, permettant ainsi d'avoir deux neurones selon une direction donnée avec des champs récepteurs antagonistes pour chaque position spatiale (i, j) (voir la couche 4 pour plus de détails). Le modèle utilisé par Raizada (2001) prend en compte le système visuel V2 ainsi que des rétroactions de plus haut niveau provenant d'un système attentionnel. Le modèle utilisé dans ce travail s'arrête à la structure V1. Les équations des différentes couches et interneurons suivent.

4.1.1 Rétine

Le modèle utilisé pour la rétine correspond à l'équation standard de la différence de Gaussiennes, permettant de modéliser le champ récepteur circulaire de centre et périphérie antagonistes (ON-OFF ou OFF-ON) :

$$u_{ij}^+ = I_{ij} - \sum_{pq} G_{ij}(p, q, \sigma_1) I_{pq} \quad (4.2)$$

$$u_{ij}^- = -I_{ij} + \sum_{pq} G_{ij}(p, q, \sigma_1) I_{pq} \quad (4.3)$$

où u_{ij}^+ et u_{ij}^- représentent les activités en sortie de la rétine des cellules ON et OFF (l'équivalent des cellules ganglionnaires), I_{ij} est l'intensité en entrée de l'image à la position (i, j) , et $G_{ij}(p, q, \sigma_1)$ est l'équation d'une Gaussienne bidimensionnelle centrée en (i, j) , d'écart-type σ_1 , écrite comme :

$$G_{ij}(p, q, \sigma_1) = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{(p-i)^2 + (q-j)^2}{2\sigma_1^2}\right). \quad (4.4)$$

L'écart-type de la Gaussienne est fixé à $\sigma_1 = 1$.

4.1.2 Corps Genouillé Latéral

Les cellules ON et OFF du CGL, notées v_{ij}^+ et v_{ij}^- , sont excitées respectivement par les cellules rétinienne ON et OFF suite à une rectification de demi-onde. Cette rectification ne prend en compte que les réponses "positives" des cellules rétinienne car les neurones ne répondent pas à une stimulation "négative" (Albrecht & Geisler, 1991). Les cellules du CGL sont aussi excitées par une rétroaction à centre-périphérie antagonistes provenant de la couche 6 (cellules notées X_{ijk}) : une excitation centrale A_{ij} provenant de toutes les cellules X_{ijk} de centre (i, j) et pour toutes les orientations des champs récepteurs k , et une inhibition périphérique de type Gaussienne, B_{ij} , provenant des neurones situés dans une zone spatiale centrée autour de la position (i, j) . Les équations différentielles gouvernant l'activité des cellules de cette couche sont :

$$\frac{1}{\delta_v} \frac{dv_{ij}^+}{dt} = -v_{ij}^+ + (1 - v_{ij}^+)[u_{ij}^+]^+(1 + A_{ij}) - (1 + v_{ij}^+)B_{ij} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{\delta_v} \frac{dv_{ij}^-}{dt} = -v_{ij}^- + (1 - v_{ij}^-)[u_{ij}^-]^+(1 + A_{ij}) - (1 + v_{ij}^-)B_{ij} \quad (4.6)$$

avec :

$$A_{ij} = C_1 \sum_k X_{ijk} \quad (4.7)$$

$$B_{ij} = C_2 \sum_{pqk} G_{ij}(p, q, \sigma_1) X_{ijk} \quad (4.8)$$

et $G_{ij}(p, q, \sigma_1)$ étant la Gaussienne bidimensionnelle donnée par l'équation 4.4, $[a]^+ = \max(a, 0)$ est la rectification de demi-onde du paramètre a , et les constantes ont pour valeur $\delta_v = 1, 25$, $C_1 = 1, 5$ et $C_2 = 0, 075$.

4.1.3 Couche 4(S)

Nous avons appelé cette couche "Couche 4(S)" car elle contient déjà des cellules à champ récepteur avec orientation privilégiée et ce sont elles qui envoient l'information vers la couche 6 (figure 4.1, flèche "Couche 4(S) S_{ijk} " vers "Couche 6 X_{ijk} "). Dans le modèle de Raizada (2001) elle est appelée "*Entrées du CGL vers les cellules corticales de type simple*" (*LGN inputs to cortical simple cells*) et n'est pas incluse dans la couche 4.

Pour chaque position spatiale (i, j) , et pour chaque orientation k , le modèle contient des cellules simples à champs récepteurs de symétrie paire, le champ récepteur étant subdivisé en

un nombre pair de zones OFF et ON. La subrégion ON, notée R_{ijk} , est excitée par les cellules ON du CGL à cette localisation spatiale et est inhibée par les cellules OFF du CGL de la même localisation spatiale. La subrégion OFF, notée L_{ijk} , est excitée par les cellules OFF du CGL à cette localisation spatiale et est inhibée par les cellules ON du CGL de la même localisation spatiale. Le modèle intègre ces caractéristiques et celle de l'orientation en convoluant ces différences avec le lobe positif d'une différence de Gaussiennes décalées ($DDGD_{pq,ij}^k$) correspondant à la direction privilégiée k , centrée en (i, j) et faisant la convolution sur les positions (p, q) des neurones du CGL. Les équations sont :

$$R_{ijk} = \sum_{pq} \left([v_{pq}^+]^+ - [v_{pq}^-]^+ \right) [DDGD_{pq,ij}^k]^+ \quad (4.9)$$

$$L_{ijk} = \sum_{pq} \left([v_{pq}^-]^+ - [v_{pq}^+]^+ \right) [-DDGD_{pq,ij}^k]^+ \quad (4.10)$$

$$DDGD_{pq,ij}^k = G_{i-\delta \cos \theta, j-\delta \sin \theta}(p, q, \sigma_2) - G_{i+\delta \cos \theta, j+\delta \sin \theta}(p, q, \sigma_2) \quad (4.11)$$

avec $\delta = \sigma_2/2$ étant le décalage du centre de chaque Gaussienne, $\theta = k\pi/K$ est l'angle de la direction privilégiée du neurone (où k varie entre 0 et $2K-1$) et K est le nombre de direction dans le modèle (ici fixé à 2). L'écart-type pour la différence de Gaussiennes décalées est fixé à $\sigma_2 = 0,5$. Une image de l'équation 4.11 est présentée sur la figure 4.2. On y remarque les deux lobes positifs et négatifs de la différence des Gaussiennes correspondant respectivement aux zones blanches et noires sur l'image du dessous. La variation de l'amplitude est schématisée sur le graphique du dessus, représentant une coupe par la perpendiculaire à la direction privilégiée de cette différence de Gaussiennes décalées.

Ainsi, à une position spatiale (i, j) donnée, une cellule sera excitée de manière maximale quand un bord de surface sera placée de telle manière que la partie la plus lumineuse soit placée sur la subrégion ON (R_{ijk}) et la partie la moins lumineuse sur la subrégion OFF (L_{ijk}). Cette particularité est intégrée par l'équation :

$$S_{ijk} = \gamma [R_{ijk} + L_{ijk} - |R_{ijk} - L_{ijk}|]^+ \quad (4.12)$$

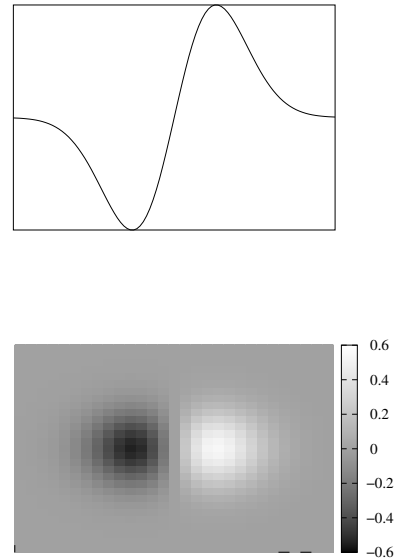


FIG. 4.2 – Image présentant les deux lobes de la différence de Gaussiennes décalées codée en niveau de gris (image du dessous), et une coupe à travers la perpendiculaire à la direction privilégiée (image du dessus). Exemple pour $k = 2$, les cellules S_{ij2} .

qui fait la somme des activités des deux subrégions et soustrait leur différence absolue.

C'est cette dernière équation qui représente l'activité des neurones de la couche 4(S). Dans le modèle de Raizada (2001), les activités S_{ijk} et $S_{ij(k+K)}$ sont rassemblées dans une seule valeur C_{ijl} , correspondant à une simple somme :

$$C_{ijl} = S_{ijk} + S_{ij(k+K)} \quad (4.13)$$

(l variant entre 0 et $(K - 1)$) que nous n'effectuons pas. Pour pouvoir vérifier les interactions à polarités opposées, nous laissons la possibilité que des neurones à champs récepteurs opposés interagissent, ce qui d'un point de vue pratique augmente considérablement le temps de calcul puisque les couches suivantes (4(Y), 6 et les interneurons correspondant) sont dédoublées par rapport au modèle original.

4.1.4 Couche 6

Les cellules de la couche 6 reçoivent une entrée directe de la couche 4(S) et une rétroaction excitatrice de la couche 2/3. Cette dernière est reçue à travers une fonction de seuillage donnée par l'équation :

$$F(Z_{ijl}, \Gamma) = \max(Z_{ijl} - \Gamma, 0) \quad (4.14)$$

où Γ représente le seuil. Les équations de cette couche obéissent à l'équation différentielle :

$$\frac{1}{\delta_c} \frac{dX_{ijk}}{dt} = -X_{ijk} + (1 - X_{ijk}) (\alpha S_{ijk} + \phi F(Z_{ijl}, \Gamma)). \quad (4.15)$$

Cette équation est résolue à l'équilibre, donnant :

$$X_{ijk} = \frac{\alpha S_{ijk} + \phi F(Z_{ijl}, \Gamma)}{1 + \alpha S_{ijk} + \phi F(Z_{ijl}, \Gamma)} \quad (4.16)$$

avec les valeurs suivantes des constantes : $\delta_c = 0, 25$, $\alpha = 0, 5$, $\phi = 2, 0$ et $\Gamma = 0, 2$.

4.1.5 Couche 4(Y)

Les cellules de la couche 4(Y) reçoivent une entrée directe de la couche 4(S) ainsi qu'une entrée de type centre-périphérie provenant de la couche 6. L'entrée excitatrice centrale provient des cellules de la couche 6 ayant la même position et orientation que celles de la couche 4(Y) qui reçoit. L'entrée périphérique inhibitrice provient des projections de portées moyennes des connexions de la couche 6 à travers les interneurons inhibiteurs m_{ijk} de la couche 4(Y) (figure 4.3). La distribution spatiale de ces connexions est représentée par une fonction de poids spatiale et orientationnelle $W_{pqr,ijk}^+$, représentant la connexion du neurone m_{pqr} (position (p, q) et orientation r) vers le neurone Y_{ijk} (position (i, j) et orientation k , figure 4.3(a)). Cette fonction est la fonction de poids des neurones obtenue par auto-organisation dans l'étude de Grossberg

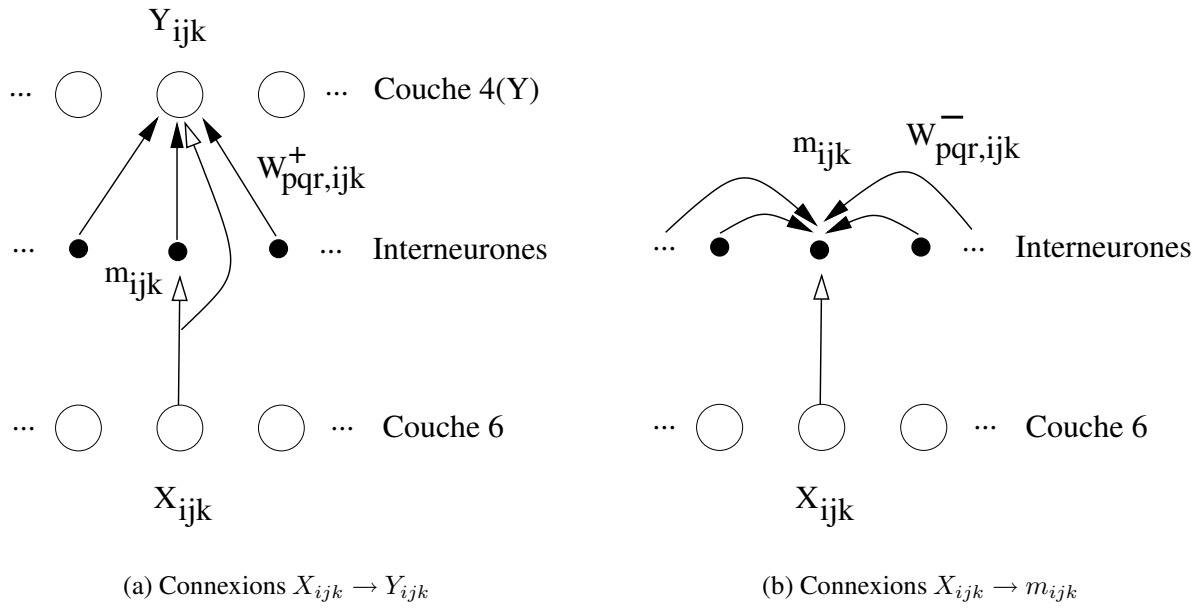


FIG. 4.3 – Connexions entre la couche 6 (X_{ijk}) et la couche 4(Y) (Y_{ijk}), passant par les interneurons m_{ijk} . Figure 4.3(a) pour les connexions excitatrices directes couche 6 \rightarrow couche 4(Y) (flèches blanches), et les connexions inhibitrices provenant des interneurons m_{ijk} par les fonctions de poids $W_{pqr,ijk}^+$ (flèches noires). Figure 4.3(b) pour les connexions excitatrices directes couche 6 \rightarrow interneurons m_{ijk} (flèche blanche), et les connexions inhibitrices entre interneurons m_{ijk} par les fonctions de poids $W_{pqr,ijk}^-$ (flèches noires).

& Williamson (1999, 2001). Raizada (2001) présente des graphiques codés en niveaux de gris de ces fonctions spatio-orientationnelles et précise qu'elles ont une forme approximativement Gaussienne. Ces fonctions ont été approximées par les équations suivantes :

$$W_{pq2,ij1}^+ = 0,25 - 0,1 \exp\left(-\frac{(p-i)^2}{2\sigma_{W_{12}}^2}\right) - 0,1 \exp\left(-\frac{(q-j)^2}{2\sigma_{W_{12}}^2}\right) \quad (4.17)$$

$$W_{pq0,ij0}^+ = 0,6 \exp\left(-\frac{(p-i)^2}{2\sigma_{W_{11,x}}^2} - \frac{(q-j)^2}{2\sigma_{W_{11,y}}^2}\right) \quad (4.18)$$

$$W_{pq1,ij1}^+ = 0,6 \exp\left(-\frac{(p-i)^2}{2\sigma_{W_{11,y}}^2} - \frac{(q-j)^2}{2\sigma_{W_{11,x}}^2}\right) \quad (4.19)$$

avec les constantes fixées à $\sigma_{W_{12}} = 0,75$, $\sigma_{W_{11,x}} = 0,75$ et $\sigma_{W_{11,y}} = 3,0$. Les indices 0, 1, 2 et 3 correspondent aux directions r et k des neurones entre lesquels la connexion se fait. Les fonctions de poids entre neurones avec des directions non colinéaires sont celles de l'équation 4.17 (entre $r = 0 \rightarrow k = 1, r = 0 \rightarrow k = 3, r = 1 \rightarrow k = 0 \dots$). Les fonctions de poids entre neurones à champs récepteurs identiques avec des directions verticales sont celles de l'équation 4.18, et pour les directions horizontales celles de l'équation 4.19.

L'activité Y_{ijk} des cellules de la couche 4(Y) est régie par l'équation différentielle :

$$\frac{1}{\delta_c} \frac{dY_{ijk}}{dt} = -Y_{ijk} + (1 - Y_{ijk})(S_{ijk} + \eta^+ X_{ijk}) - (1 + Y_{ijk})f \left(\sum_{pqr} W_{pqr,ijk}^+ m_{pqr} \right) \quad (4.20)$$

où $f()$ est la fonction sigmoïde :

$$f(x) = \mu \frac{x^n}{\nu^n + x^n}. \quad (4.21)$$

qui permet de normer l'activité inhibitrice totale des interneurones m_{ijk} vers chaque neurone Y_{ijk} . L'équation différentielle 4.20 est résolue à l'équilibre, donnant :

$$Y_{ijk} = \frac{S_{ijk} + \eta^+ X_{ijk} - f \left(\sum_{pqr} W_{pqr,ijk}^+ m_{pqr} \right)}{1 + S_{ijk} + \eta^+ X_{ijk} + f \left(\sum_{pqr} W_{pqr,ijk}^+ m_{pqr} \right)} \quad (4.22)$$

Les m_{ijk} sont les interneurones inhibiteurs de la couche 4(Y) qui ont leur propre équation différentielle régissant leurs activités :

$$\frac{1}{\delta_m} \frac{dm_{ijk}}{dt} = -m_{ijk} + \eta^- X_{ijk} - m_{ijk} f \left(\sum_{pqr} W_{pqr,ijk}^- m_{pqr} \right) \quad (4.23)$$

avec des connexions entre neurones m_{ijk} données par la fonction de poids $W_{pqr,ijk}^-$ (figure 4.3(b)). Comme la fonction de poids $W_{pqr,ijk}^+$, celle-ci est obtenue par auto-organisation dans l'étude de Grossberg & Williamson (1999). Ayant une structure spatiale et orientationnelle similaire à $W_{pqr,ijk}^+$, la seule différence étant l'amplitude plus grande d'un facteur environ 7, les équations 4.17 à 4.19 sont reprises pour ces fonctions en multipliant leurs amplitudes par 7.

Les différentes valeurs des constantes des équations de cette couche sont : $\mu = 2$, $\nu = 1$, $n = 6$, $\delta_m = 0,01875$, $\eta^+ = 2,1$ et $\eta^- = 1,5$.

Symétries des connexions

Les couches 6 et 4(Y) sont dédoublées par rapport au modèle original. Pour une direction donnée, il y a deux cellules dans chaque couche, avec des champs récepteurs opposés. Les connexions dans l'étude de Grossberg & Williamson (1999, 2001) (fonctions de poids $W_{pqr,ijk}^+$ et $W_{pqr,ijk}^-$) étaient spécifiques entre des directions données. Or, en rajoutant des cellules à champs récepteurs opposés mais de même direction privilégiée, il n'est absolument pas évident de savoir quels types de connexions devraient être présentes entre ces cellules. Nous ne connectons pas les cellules à champs récepteurs opposés en gardant les connexions entre cellules à directions privilégiées différentes, ce qui suppose une symétrie totale de la connectivité pour des directions différentes de l'image. Ainsi, les résultats devront être interprétés dans le sens où si des différences sont présentes, elles ne peuvent pas provenir du type de connexions choisi, vu que celles-ci sont symétriques pour une direction.

4.1.6 Couche 2/3

Cette couche contient les neurones qui effectuent le premier regroupement de colinéarité considéré comme fait par les connexions horizontales intracouches. Les cellules Z_{ijl} reçoivent une entrée excitatrice directe de la part des deux neurones de la couche 4(Y) qui ont la même direction mais des champs récepteurs opposés, Y_{ijk} et $Y_{ij(k+K)}$, ainsi que des rétroactions intracouches des autres cellules Z_{ijl} iso-orientées, à travers les connexions longues distances représentées par la fonction de poids $H_{pqr,ijl}$. Comme avec les fonctions W^+ et W^- , celle-ci est la fonction obtenue par auto-organisation dans l'étude de Grossberg & Williamson (1999). Les cellules Z_{ijl} reçoivent une entrée inhibitrice à travers les interneurones inhibiteurs s_{ijl} par la fonction de poids T_{rl}^+ . Les interneurones s_{ijl} reçoivent une entrée excitatrice des neurones Z_{ijl} à travers les connexions longues distances $H_{pqr,ijl}$, et une entrée inhibitrice de la part des autres interneurones s_{ijr} de même position spatiale mais d'orientations différentes, par l'intermédiaire des fonctions de poids T_{rl}^- . L'indice l varie entre 0 et $K - 1$, puisque les neurones font la somme des activités antagonistes pour une direction de l'image donnée. Les équations différentielles régissant la variation des activités de ces deux groupes de neurones sont :

$$\frac{1}{\delta_z} \frac{dZ_{ijl}}{dt} = -Z_{ijl} + (1 - Z_{ijl}) \left(\lambda \left([Y_{ijk}]^+ + [Y_{ij(k+K)}]^+ \right) + \sum_{pqr} H_{pqr,ijl} F(Z_{pqr}, \Gamma) \right) - (\psi + Z_{ijl}) \sum_r T_{rl}^+ s_{ijr} \quad (4.24)$$

$$\frac{1}{\delta_s} \frac{ds_{ijl}}{dt} = -s_{ijl} + \sum_{pqr} H_{pqr,ijl} F(Z_{pqr}, \Gamma) - s_{ijl} \sum_r T_{rl}^- s_{ijr}. \quad (4.25)$$

où la matrice $H_{pqr,ijl}$ a été approximée par (exemple pour la direction verticale y) :

$$H_{pqr,ijl} = 0,9 \exp \left(-\frac{|p-i|}{\sigma_x} - \frac{|q-j|}{\sigma_y} \right) \quad (4.26)$$

qui est une exponentielle décroissante (voir la figure 7 dans Grossberg & Williamson, 1999, des connexions entre hypercolonnes). Les paramètres de ces trois équations ont pour valeurs : $\delta_z = 0,0125$, $\delta_s = 2,5$, $\lambda = 1,5$, $\psi = 0,5$, $\sigma_x = 0,3$ et $\sigma_y = 2,0$.

4.1.7 Implémentation et modélisation

Le modèle a été implémenté en langage C. Les équations différentielles temporelles qui ne sont pas directement résolues à l'équilibre (équations 4.5 et 4.6 du CGL, 4.23 des interneurones de la couche 4(Y), 4.24 et 4.25 de la couche 2/3) sont intégrées numériquement avec la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (voir Press et al., 1997, par exemple). Le pas d'intégration temporelle a été fixé à $\Delta t = 0,1$. Le modèle est discrétisé spatialement, avec l'indice i pris pour la direction horizontale et l'indice j pris pour la direction verticale. Le problème des bords de l'image et des différentes couches est traité par rebouclage torique de chaque couche (un plan est plié

selon une direction pour donner un cylindre, qui lui-même est plié selon la deuxième direction pour donner un tore). Pour toutes les simulations, les états initiaux des différentes couches dont l'activité varie étaient fixés à 0. Pour le critère d'arrêt de l'intégration numérique, les simulations du Bloc 1 utilisaient la somme des différences absolues des activités des neurones de toutes les couches entre deux intégrations successives. Le critère était que cette somme ne varie pas plus de 10^{-5} . Pour les simulations de tout le modèle du système V1, le critère était que la variation maximale des activités des neurones dans une zone $x \times y$ de 9×10 autour de la cible soit inférieure à 10^{-4} . L'inducteur et la cible avaient pour longueur respectivement 10 et 6 pixels. Ils étaient placés verticalement. L'intensité en entrée de l'image (I_{ij} dans les équations 4.2 et 4.3) variait dans les limites de 0 et 2. Ceci a été effectué car les fonctions de poids obtenues par auto-organisation dans l'étude de Grossberg & Williamson (1999, 2001) l'ont été avec des entrées dans ces limites (voir Grossberg & Williamson, 1999, p.18).

Comme nous sommes intéressés par les interactions avec toutes les polarités des stimuli, il faut se laisser la possibilité d'utiliser des polarités négatives et positives dans l'image. L'échelle de variation des valeurs en entrée de l'image est entre 0 et 2, ce qui nous a imposé d'utiliser deux valeurs d'intensité du fond pour les simulations : 0,5 et 1,0. Des valeurs plus faibles que 0,5 sont difficilement utilisables à cause de la faible variation du contraste des stimuli négatifs. De même pour des valeurs plus fortes que 1,0, mais à cause des stimuli positifs.

4.2 Simulation "RETINE-Bloc1"

Les simulations du Bloc 1 ont utilisé les formules des couches correspondantes en enlevant les expressions de rétroaction provenant des couches supérieures. La taille de chaque couche du réseau avait pour dimensions $x \times y$ de 15×30 en pixels. De manière générale, pour calculer le seuil d'activité (voir ci-dessous) un pas de contraste de 0,02 a été pris pour la cible et pour l'inducteur. Si des valeurs différentes sont utilisées, elles seront précisées dans les parties concernées. Le contraste est défini par la différence entre l'intensité de l'élément et l'intensité du fond, respectivement écrite pour la cible et l'inducteur :

$$C_c = I_c - I_f \quad (4.27)$$

$$C_i = I_i - I_f \quad (4.28)$$

avec I_c, I_i, I_f étant respectivement les intensités de la cible, de l'inducteur et du fond.

Comme le modèle n'intègre pas de partie "décisionnelle", nous nous bornons à définir un seuil de détection de la cible pour chaque couche. Ainsi, les résultats devront être interprétés vis à vis des expériences de manière qualitative (facilitation/masquage, changement des interactions avec la distance) et non quantitative (valeur exacte de la facilitation/masquage d'une couche à l'autre). De plus, la simplicité du modèle de la rétine fait qu'il est impossible d'associer les valeurs de luminance physique des stimuli des expériences aux valeurs en entrée de l'image ce

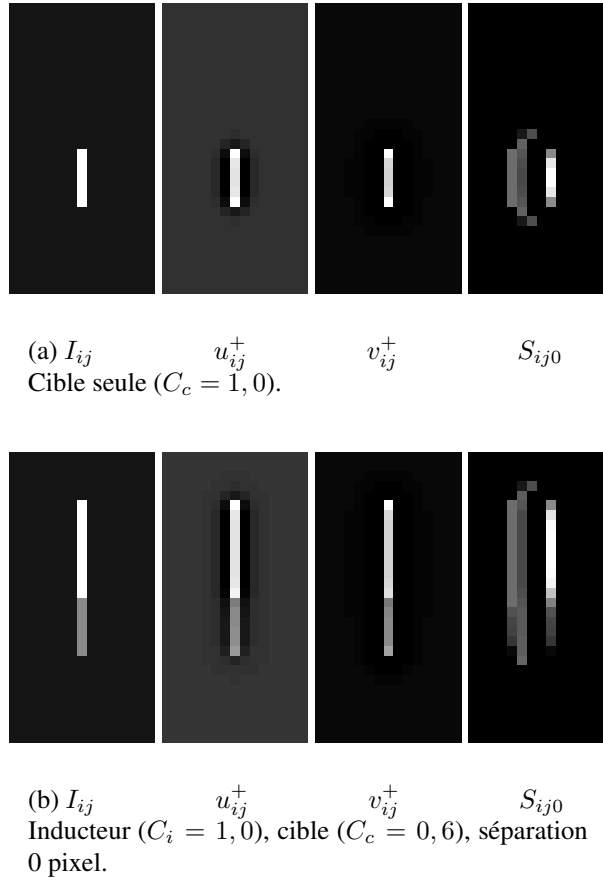


FIG. 4.4 – Exemple des activités obtenues dans les couches Rétine, CGL et 4(S). Les quatre images de la figure (a) correspondent à une entrée avec une cible seule de contraste 1,0. Les quatre images de la figure (b) correspondent à une entrée inducteur de contraste 1,0 séparé de 0 pixel d'une cible de contraste 0,6. Pour chaque figure, de gauche à droite : image en entrée (I_{ij}), cellules ON de la rétine (u_{ij}^+), cellules ON du CGL (v_{ij}^+) et les cellules 4(S) avec champ récepteur vertical de polarité gauche-droite ON-OFF. Les activités de chaque couche sont normées pour avoir des niveaux de gris entre Noir et Blanc correspondant au minimum et maximum de la couche.

qui rajoute un autre facteur d'incertitude pour les comparaisons quantitatives.

4.2.1 Définition du seuil de détection

Pour avoir une correspondance approximative avec les seuils de détection psychophysiques, nous calculons l'activité des neurones qui répondent à la cible pour la couche qui nous intéresse. Ces neurones correspondent à une petite zone spatiale dont l'activité A_{cumul}^S (exemple pour la couche 4(S)) est calculée par :

$$A_{cumul}^S = \sum_{i,j,k} |S_{ijk} - S_{ijk}^{ref}| \quad (4.29)$$

où S_{ijk} est l'activité de la cellule de la couche 4(S) à la position (i, j) et d'orientation k , répon-

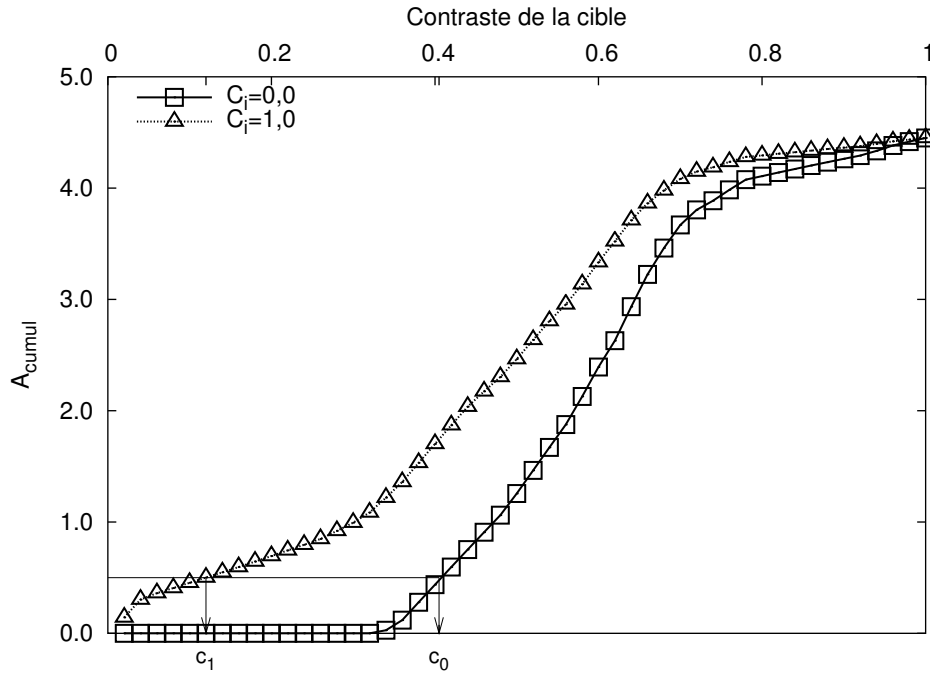


FIG. 4.5 – Activité A_{cumul} de la couche 4(S) en fonction du contraste de la cible. Fond d'intensité 0,5. Courbes pour deux contrastes d'inducteurs : $C_i = 0,0$ (cible seule) et $C_i = 1,0$. La distance entre la cible et l'inducteur est de 0 pixel. Le seuil d'activité défini par défaut à 0,5 est utilisé pour déterminer les deux seuils de détection de la cible (c_0 et c_1) qui correspondent à chaque courbe d'inducteur différent.

dant à l'image "cible avec inducteur", et S_{ijk}^{ref} est l'activité de la même cellule mais répondant à l'image "inducteur seul", activité de référence pour le calcul. En pratique, les cellules qui répondent à la cible sont situées dans une zone autour de la cible et ne répondent pas toutes en même temps. Plus le contraste augmente, plus le nombre de cellules ayant une activité non nulle augmente. Nous avons visualisé les activités des différentes couches une fois stabilisées. La figure 4.4 présente des images des activités pour deux cas de figure. La figure 4.4(a) présente les activités pour une entrée cible seule de contraste 1,0, la figure 4.4(b) présente les activités pour une entrée inducteur avec cible, de contrastes respectifs 1,0 et 0,6 avec une séparation spatiale de 0 pixel. Le fond avait pour intensité 0,1. De gauche à droite sont présentées les activités des couches : entrée du réseau (I_{ij}), rétine de type ON (u_{ij}^+), CGL de type ON (v_{ij}^+) et les cellules de la couche 4(S) de direction verticale et champ récepteur de zones gauche-droite ON-OFF (S_{ij0}). Sur l'image des S_{ij0} de la figure 4.4(a), on remarque clairement qu'il n'y a pas qu'une cellule S_{ij0} qui répond à la présence de la cible. Ainsi, pour calculer l'activité moyenne A_{cumul}^S (équ. 4.29) de cette couche, il faut prendre en compte toute la zone où une activité est modifiée par la présence de la cible. Ceci est fait en calculant A_{cumul}^S sur un rectangle de dimensions $x \times y = 9 \times 10$ pixels, centré sur la cible.

Un exemple de la variation de A_{cumul}^S en fonction du contraste de la cible pour une intensité du fond de 0,5, deux contrastes de l'inducteur (0 et 1,0), et une séparation spatiale de 0 pixel entre la cible et l'inducteur, est présenté sur la figure 4.5. Quel que soit le contraste de l'inducteur, l'activité cumulée croît de manière non linéaire avec le contraste de la cible. Ce graphique permet de discuter deux points qui concernent les simulations et la définition du seuil de détec-

tion. Premièrement, par nécessité de réduire le temps de calcul un pas de variation du contraste de la cible de 0,02 a été fixé car le temps de calcul pour une image d'entrée fixe (I_i, I_f, I_c, d_{ci} fixées) était d'environ 15 secondes sur un PC Intel 700 MHz. Le même pas a été utilisé dans la suite du calcul en ce qui concerne le contraste de l'inducteur. La figure 4.5 représente tous les points calculés pour un inducteur donné, reliés par des segments de lignes. Pour ne pas surcharger la présentation, dans les graphiques suivant les points sont supprimés laissant les courbes sous format de lignes. Deuxièmement, c'est la définition du seuil d'activité correspondant au seuil de détection du contraste de la cible. La figure 4.5 présente les seuils obtenus pour chaque courbe pour un niveau d'activité par défaut de 0,5 (c_0 pour $C_i = 0$, et c_1 pour $C_i = 1, 0$). Ce niveau est fixé ici à 0,5. De manière générale, les études neurophysiologiques présentant un seuil d'activité fréquentielle le choisissent supérieur à la variabilité de l'activité fréquentielle du neurone mesurée dans la condition contrôle (correspondant à son activité intrinsèque, sans qu'il y ait de stimulation directe). De plus, cette variabilité dépend du type auquel appartient le neurone, cellule simple ou complexe (voir Tolhurst, Movshon & Dean, 1983; Edwards, Purpura & Kaplan, 1995, par exemple) (il faut cependant préciser que des études définissent le seuil à partir du moment où l'activité "augmente", voir Polat et al., 1998). Pour nos simulations, les couches ayant toujours le même point initial, il est impossible de définir une variabilité de l'activité du neurone étant donné que cette variabilité peut être la conséquence de nombreux facteurs de bruit provenant des connexions qu'il reçoit et de l'activité initiale des différentes couches. La variabilité de la réponse des neurones n'est pas simulée. Ainsi, le seuil d'activité de A_{cumul} au-delà duquel il sera considéré que les neurones de la zone de calcul "détectent" la cible sera pris pour 0,5. Cette valeur est choisie car le nombre de cellules sur lequel l'activité A_{cumul} est calculé est de 90×4 pour les couches 4(S) et 4(Y), et de 90×2 pour la couche 2/3, ce qui donne une différence moyenne d'activité par neurone de $1,4 \cdot 10^{-3}$ pour les deux premières couches et de $2,8 \cdot 10^{-3}$ pour la couche 2/3. Ces valeurs paraissent très faibles, mais il faut prendre en considération aussi le fait qu'en moyenne entre le quart et la moitié des neurones de la zone de calcul de A_{cumul} ont une variation de leurs activités (les couches à champ récepteur orthogonal à la direction des stimuli cible et inducteur n'ont quasiment pas de variation). Tous les graphiques qui présenteront des seuils de détection du contraste auront utilisé cette définition du seuil à $A_{cumul} = 0,5$, quelle que soit la couche.

4.2.2 Résultats des simulations

Comparaison avec les données neurophysiologiques

Les données neurophysiologiques directement comparables aux simulations qui ont été effectuées sont les résultats de Polat et al. (1998) et Chen et al. (2001). Ils ont montré que la présence d'un inducteur colinéaire à la cible, de mêmes caractéristiques spatiales et temporelles que la cible, modifie la fonction de réponse au contraste (FRC) du neurone. Dans la publication de Polat et al. (1998), deux exemples de neurones avec changement de la fonction de réponse

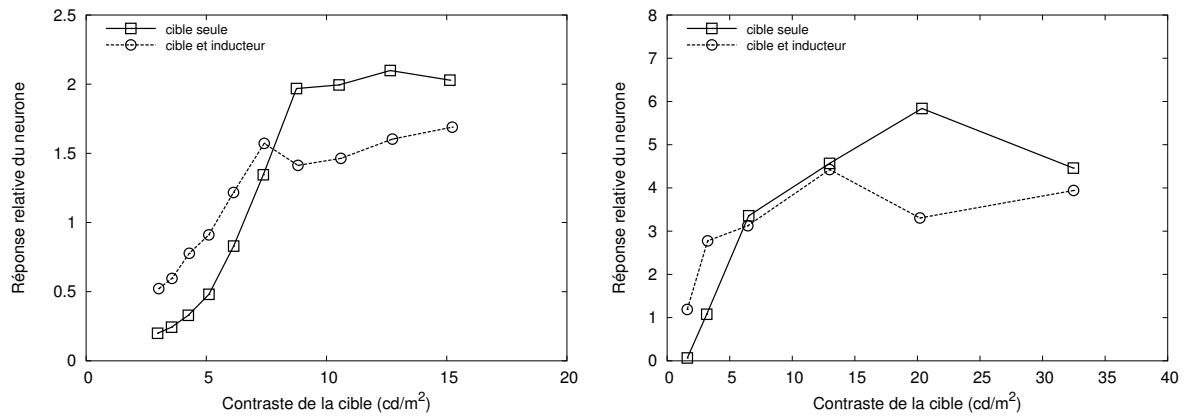


FIG. 4.6 – Fonctions de réponses au contraste de deux neurones de type simple (données reprises de Polat et al., 1998) représentées en fonction du contraste de la cible. Les stimuli étaient des patches de Gabor, avec les deux inducteurs de contraste fixe à $C_M = 0,8$ ce qui représente un pic de contraste de 32 cd/m^2 . La présence des deux inducteurs modifie la réponse du neurone à la présence de la cible, en augmentant sa réponse pour les faibles contrastes de la cible et diminuant sa réponse aux forts contrastes de la cible.

au contraste sont présentés (repris dans la figure 4.6). Puisque les stimuli étaient des patches de Gabor, les données sont reprises en changeant la présentation. L'axe des abscisses étant le contraste de la cible exprimée en contraste de Michelson (C_M), la transformation en contraste simple est effectuée par :

$$C_c = C_M I_f \quad (4.30)$$

pour pouvoir comparer ces courbes à celles des simulations. La figure 4.6 présente les deux FRCs pour chaque neurone, dans le cas où la cible est présentée seule au neurone (courbe continue) et dans le cas où la cible est présentée avec les deux inducteurs (courbe en tirets). Sur les deux graphiques la présence de l'inducteur modifie la FRC en augmentant l'activité du neurone pour les faibles contrastes de la cible par rapport à la condition où la cible était présentée seule, et diminue l'activité du neurone pour les contrastes plus forts de la cible (toujours par rapport à la condition "cible seule"). Le modèle neural qui est utilisé ici ayant une partie rétine très simplifiée et des entrées dans les limites de 0 et 2, il est difficile de savoir quelle valeur de contraste de l'inducteur il faudrait utiliser pour avoir une correspondance directe avec les valeurs de leur étude. La figure 4.5 présente déjà une possible comparaison de la couche 4(S) avec les deux cas expérimentaux, la cible seule (courbe avec les carrés) et la cible avec inducteur (courbe avec les triangles). On y remarque que la présence de l'inducteur augmente considérablement l'activité cumulée aux faibles contrastes de la cible comme dans les graphiques de la figure 4.6. Par contre, l'effet de croisement n'est pas présent dans ces simulations, la courbe d'activité "cible+inducteur" ($C_i = 1, 0$) rejoignant la courbe d'activité "cible seule" ($C_i = 0$) aux forts contrastes de la cible. Pour avoir une comparaison plus directe entre les résultats de Polat et al. (1998) et les simulations, il est nécessaire d'extraire l'activité du neurone répondant de manière optimale à la cible. Comme il a été montré sur la figure 4.4, il n'y a pas un seul neurone qui répond à la cible. Pour cette raison les activités des 6 neurones de la couche $S_{ij0}[i, j]$ répon-

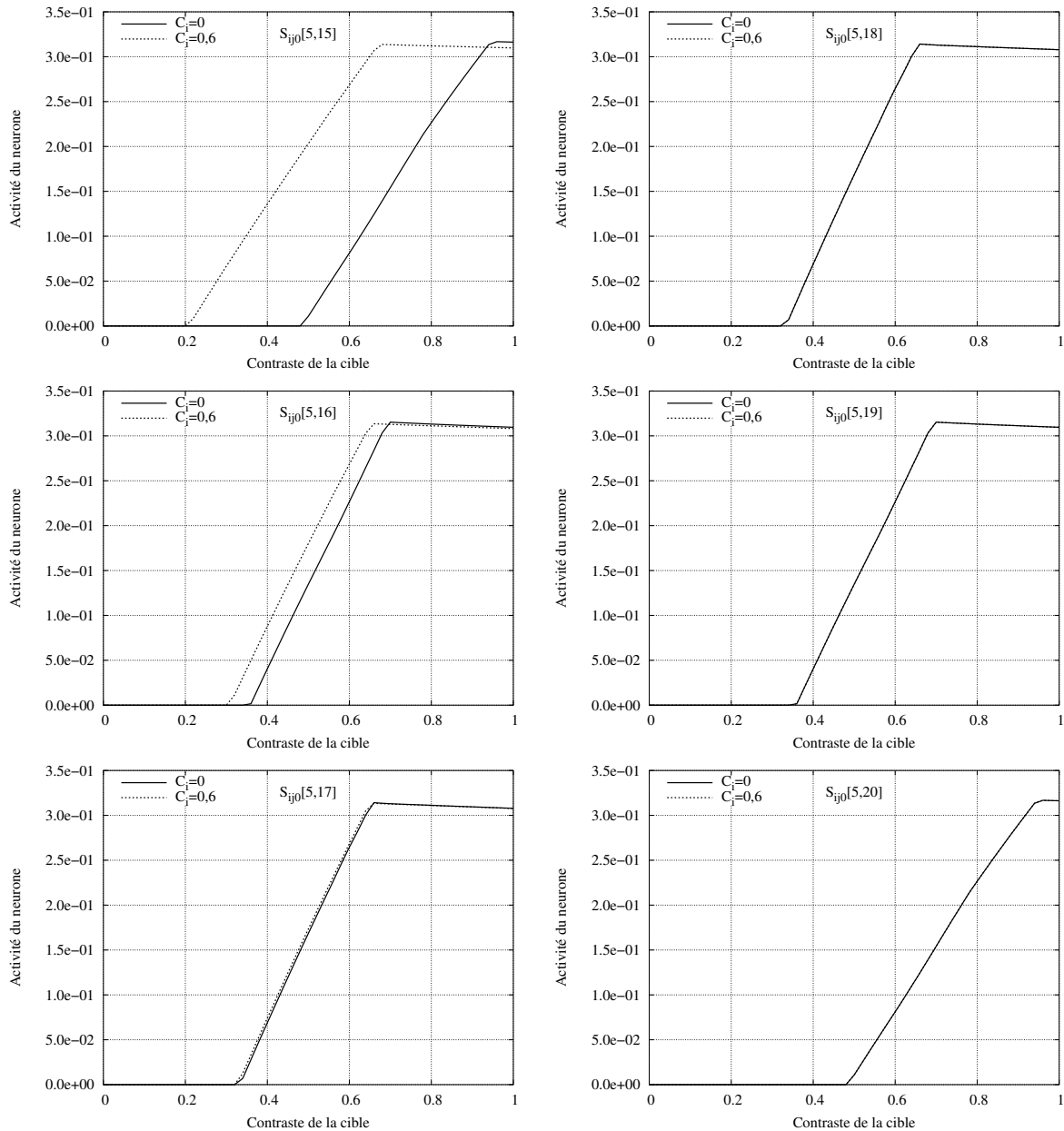


FIG. 4.7 – Fonctions de réponses au contraste de 6 neurones de type S_{ij0} . Le contraste de la cible varie par pas de 0,02. L'intensité du fond était de 0,5, et le contraste de l'inducteur de 0,6 pour les conditions cible avec inducteur ($C_i = 0,6$ dans les légendes).

dant à la cible aux faibles valeurs de contrastes sont utilisées. Les activités des neurones sont présentées dans la figure 4.7 pour les deux cas de figure, cible seule et cible avec un inducteur de contraste 0,6. L'intensité du fond était de 0,5. La distance entre l'inducteur et la cible est de 0 pixel dans cet exemple. Le neurone $S_{ij0}[5, 15]$ (figure 4.7, graphique en haut à gauche) est celui qui devrait avoir le plus de changement de sa FRC en fonction des contrastes de la cible et de l'inducteur car c'est lui qui se trouve le plus près de l'inducteur. C'est bien ce que nous apercevons sur les six figures. Les FRCs des deux premiers neurones (graphiques du haut de la colonne de gauche) sont ceux qui montrent une modification de la FRC par la présence de l'inducteur alors que les quatre autres ne montrent pas d'effet. Ce résultat n'est pas comparable

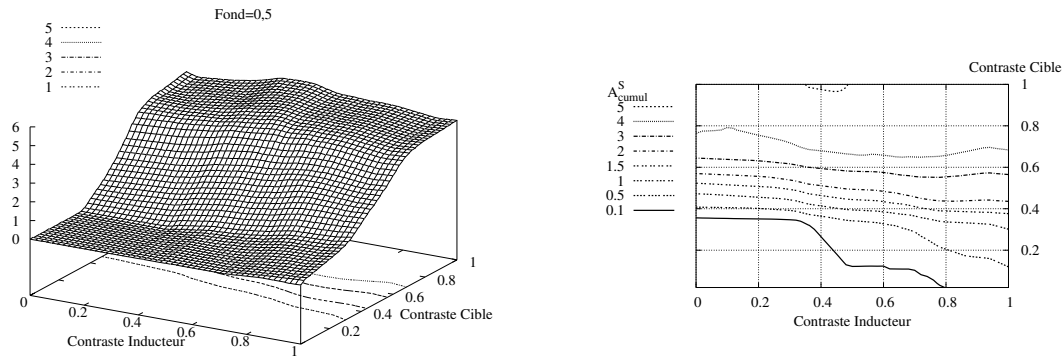
(a) A_{cumul}^S en fonction de C_i et C_c (b) Projection des isolignes d'activité A_{cumul}^S constantes sur le plan (C_i, C_c)

FIG. 4.8 – Courbe d'activité A_{cumul}^S de la couche 4(S) en fonction du contraste de l'inducteur (C_i) et de la cible (C_c). Graphique (a) : courbe en 3 dimensions ; graphique (b) projection sur le plan (C_i, C_c) . Fond d'intensité 0,5, distance cible - inducteur de 0 pixel.

à ceux de la figure 4.6, mais il s'avère qu'en pratique, il y a aussi d'autres types d'effets qui sont rapportés (voir Chen, Kasamatsu, Polat & Norcia, 2001) (les différents effets rapportés par Polat et al. (1998) et Chen et al. (2001) ont été obtenus avec des stimuli lignes de polarités identiques et opposées, pour des intensités du fond plus faibles ; résultats présentés dans le rapport de L.Zapata, Zapata (2003)).

Comparaison avec les données de psychophysique visuelle

Des simulations plus complètes, avec tous les contrastes d'inducteur et des distances cible-inducteur (d_{ci}) de 0 à 3 pixels, ont été effectuées. Ceci a permis de faire une cartographie de l'activité cumulée de la couche 4(S) (A_{cumul}^S) en fonction des deux paramètres C_i et C_c pour une séparation spatiale fixe. Pour un fond de l'image d'intensité $I_f = 0,5$ et une séparation $d_{ci} = 0$ pixel, les résultats pour un inducteur blanc ($C_i \geq 0$) avec une cible blanche ($C_c \geq 0$) sont présentés sur la figure 4.8. La courbe en 3 dimensions (graphique 4.8(a)) présentant la surface obtenue en fonction des valeurs de C_i et C_c est difficilement lisible. On remarque cependant deux variations caractéristiques : une augmentation de l'activité avec l'augmentation du contraste de la cible, et un effet de modulation de l'activité cumulée par la présence de l'inducteur. Pour extraire les courbes d'activité constante, une projection de la surface 3D sur le plan (C_i, C_c) est effectuée en prenant comme isolignes de A_{cumul}^S les valeurs 0,1, 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4 et 5. Le résultat de cette projection est représenté sur le graphique 4.8(b). La courbe de référence (image "cible seule") correspond à un contraste d'inducteur nul, donc sur le graphique à la verticale en $C_i = 0$.

Dans les expériences nous avons étudié les effets sur les seuils de détection des sujets de la variation de la distance entre la cible et l'inducteur, des polarités des deux stimuli, du contraste

de l'inducteur, et de l'intensité du fond. Les effets ont été exprimés en terme d'amplitude de facilitation/masquage en divisant le seuil de détection du contraste du sujet pour la condition testée (image "cible+inducteur") par la condition contrôle (image "cible seule"). Si nous nous basons sur la définition du seuil par rapport à l'activité cumulée (équation 4.29), il suffit d'effectuer la même opération avec les seuils du contraste correspondant à une activité cumulée de 0,5. C'est la courbe correspondant à l'isoline $A_{cumul}^S = 0,5$ qui est utilisée pour représenter l'amplitude de facilitation/masquage en fonction du contraste de l'inducteur. Cette courbe est calculée en extrapolant linéairement le seuil du contraste de la cible nécessaire pour obtenir $A_{cumul}^S = 0,5$ à partir des courbes de A_{cumul}^S en fonction du contraste de la cible, pour un contraste d'inducteur fixe (voir figure 4.5).

Polarités identiques des stimuli

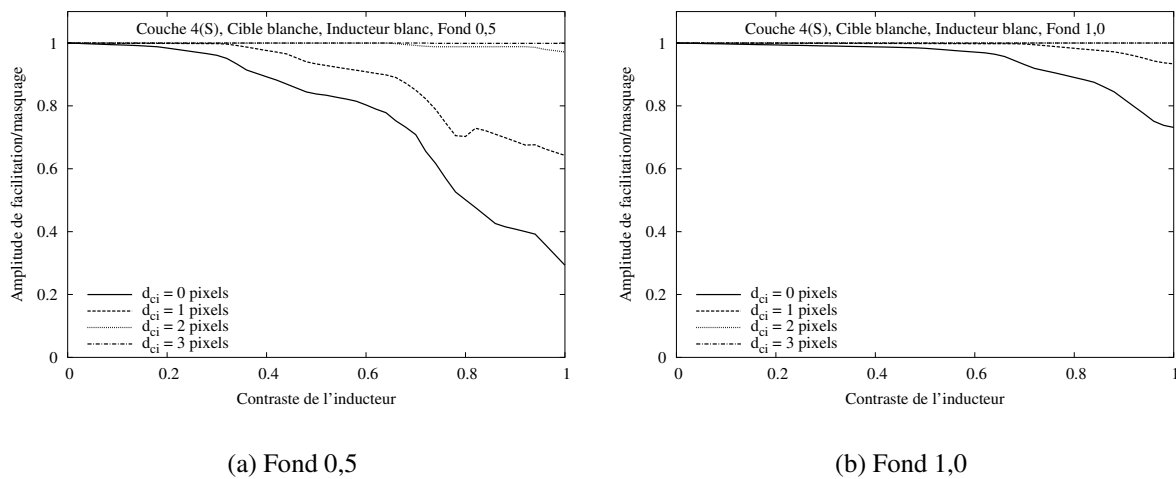


FIG. 4.9 – Amplitude de facilitation/masquage obtenue pour la couche 4(S) en fonction du contraste de l'inducteur, de la séparation cible-inducteur ($d_{ci} = 0, 1, 2$ et 3 pixels) et de l'intensité du fond en entrée de l'image. Interactions **ON-vers-ON**.

Interactions ON-vers-ON Les stimuli étaient de polarité positive. Les résultats pour les intensités du fond de 0,5 et 1,0 et les quatre distances cible-inducteur (de 0 à 3 pixels) sont présentés sur la figure 4.9 pour la couche 4(S). On remarque que pour la plus faible distance, 0 pixel, l'amplitude devient très faible aux forts contrastes de l'inducteur. Ceci indique une forte facilitation de la détection de la cible puisqu'il faut environ 70% moins d'intensité de la cible en entrée pour obtenir un niveau moyen d'activité cumulée de 0,5 pour l'intensité du fond de 0,5. La valeur de l'intensité du fond semble avoir un effet important sur les courbes de l'amplitude de facilitation/masquage. Malgré ces différences, il existe une constance dans les résultats qui est la facilitation pour les deux intensités du fond. Cette facilitation diminue avec l'augmentation de la séparation spatiale cible à inducteur et semble être nulle à partir de d_{ci} supérieure à 3 pixels.

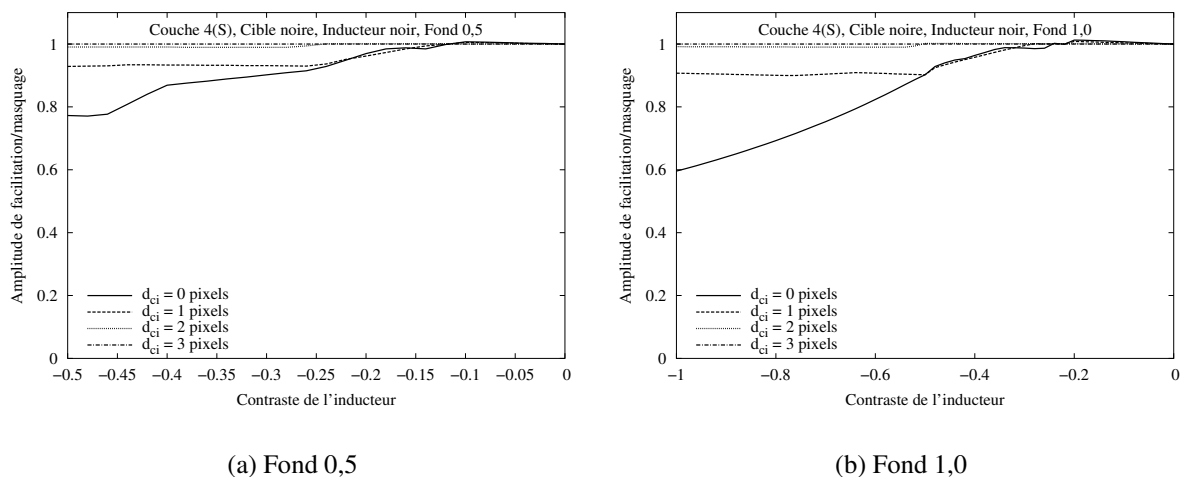


FIG. 4.10 – Comme pour la figure 4.9, ici pour les interactions **OFF-vers-OFF**.

Interactions OFF-vers-OFF La figure 4.10 présente les résultats des simulations pour les interactions entre stimuli à polarités négatives pour la couche 4(S). De nouveau, la facilitation décroît avec l'augmentation de la distance, et à partir d'une séparation de 3 pixels aucune interaction n'est visible. L'intensité du fond semble intervenir dans la valeur maximale de la facilitation, de 40% pour le fond d'intensité 1,0 ($C_i = -1$) et d'environ 22% pour le fond d'intensité 0,5 ($C_i = -0,5$). De nouveau, pour les deux valeurs du fond, une facilitation générale est présente.

Polarités opposées des stimuli

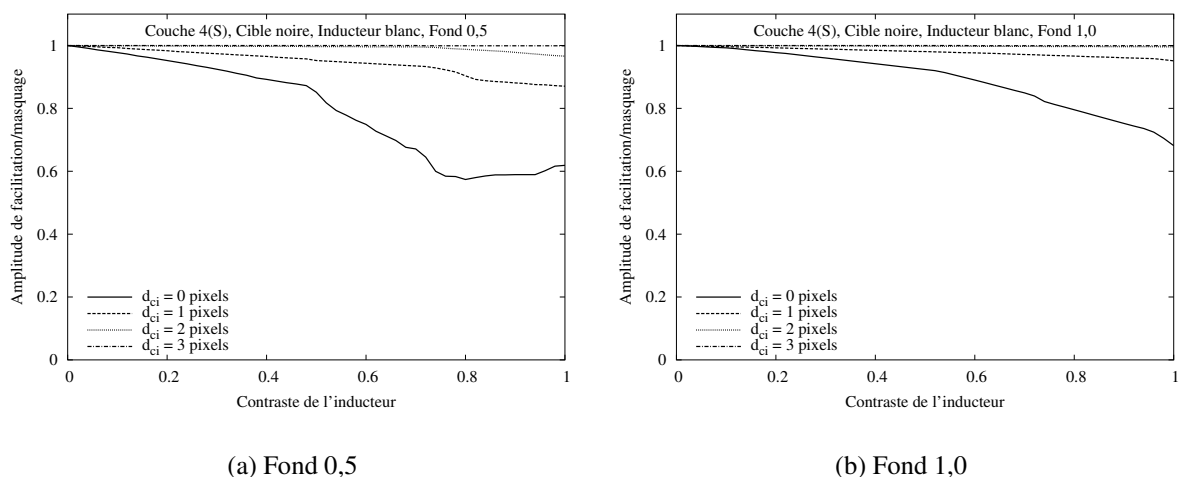


FIG. 4.11 – Comme pour la figure 4.9, ici pour les interactions **ON-vers-OFF**.

Interactions ON-vers-OFF La figure 4.11 présente les résultats des simulations pour la couche 4(S), pour les conditions inducteur blanc avec cible noire. Pour chaque intensité du fond

(0,5 et 1,0), l'augmentation de la séparation spatiale entre les deux stimuli diminue considérablement l'amplitude de facilitation/masquage, et à partir d'une distance de 3 pixels il n'y a plus d'interactions visibles. La facilitation maximale est d'environ 40% pour le fond d'intensité 0,5 (conditions $d_{ci} = 0$ pixel et C_i supérieur à 0,7) et d'environ 30% pour le fond d'intensité 1,0 (conditions $d_{ci} = 0$ pixel et $C_i = 1,0$). Une facilitation générale de la détection de la cible est présente.

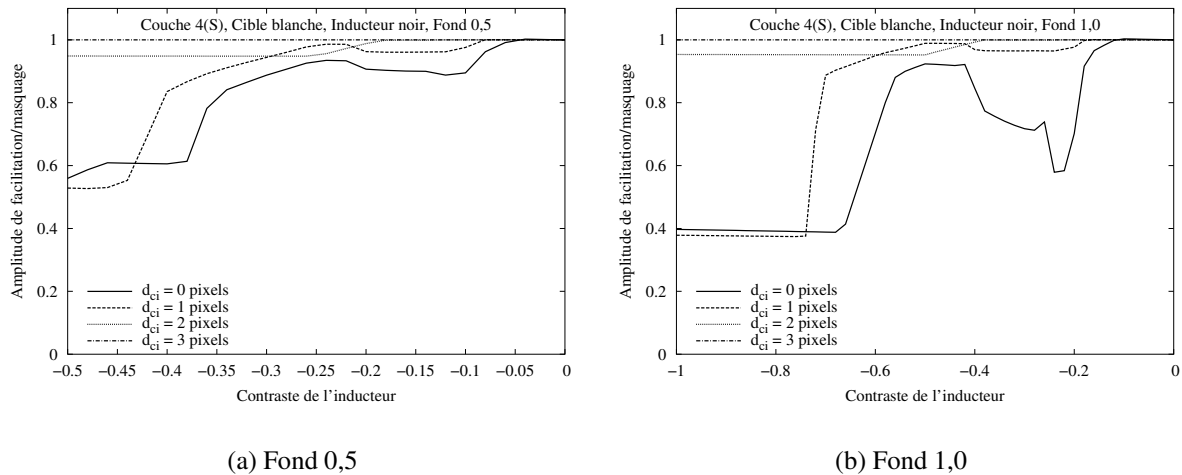


FIG. 4.12 – Comme pour la figure 4.9, ici pour les interactions **OFF-vers-ON**.

Interactions OFF-vers-ON La figure 4.12 présente les résultats des simulations pour la couche 4(S), pour les conditions inducteur noir avec cible blanche. Pour chaque intensité du fond (0,5 et 1,0), l'augmentation de la séparation spatiale entre les deux stimuli diminue considérablement la facilitation et à partir d'une distance de 3 pixels il n'y a plus d'interactions visibles. La facilitation maximale est d'environ 40%-50% pour le fond d'intensité 0,5 et d'environ 60% pour le fond d'intensité 1,0. Il faut cependant remarquer que pour ces interactions, pour les contrastes de l'inducteur faibles (entre -0,15 et -0,4) et le fond de 1,0, une facilitation importante apparaît (amplitude d'environ 0,6), qui diminue pour des contrastes de l'inducteur entre -0,4 et -0,5. Le comportement par rapport aux autres interactions est totalement différent puisque leurs courbes montrent de manière générale une diminution de l'amplitude avec l'augmentation du contraste de l'inducteur.

Ces résultats sont comparables aux interactions longues distances obtenues dans les expériences psychophysiques. Pour des polarités identiques des stimuli une facilitation générale est présente dans les expériences comme dans ces simulations. Pour des polarités opposées, l'interaction ON-vers-OFF semble être facilitatrice, alors que l'interaction OFF-vers-ON a des variabilités entre sujets dans les expériences. Les simulations montrent que l'interaction ON-vers-OFF semble avoir le même comportement que les interactions à polarités identiques, par contre les résultats des simulations des interactions OFF-vers-ON montrent des différences sur

deux points. Le premier est la variation avec la distance où l'on observe un croisement des courbes pour les différentes distances, ce qui n'est pas présent dans les résultats des autres interactions. Le deuxième est la non-monotonie de l'amplitude de facilitation/masquage en fonction du contraste de l'inducteur.

Avant de discuter les différences observées, il faut vérifier le comportement du modèle total de l'aire V1, Rétine-Bloc1-Bloc2, où l'introduction du bloc 2 peut changer les interactions entre différentes polarités, et aussi la distance maximale où les interactions sont présentes (ici de 3 pixels).

4.3 Simulation "RETINE-Bloc1-Bloc2"

Cette modélisation est faite comme pour la section précédente. La taille de chaque couche était de 30×60 pour ces simulations. Les intensités des inducteurs n'ont pas pu être variées avec des pas de 0,02 car le temps de stabilisation du réseau est multiplié par 20 à 50 par rapport au modèle "Rétine-Bloc1", où pour une image fixe (d_{ci} , I_i , I_c , I_f sont fixées) le temps de convergence était d'environ 15 secondes sur un PC Intel 700MHz. Ainsi pour ces simulations, le contraste de l'inducteur était varié par pas de 0,04 ou 0,06 ou 0,10, et la présentation graphique garde les points de calcul pour visualiser les simulations qui ont été effectuées.

Comparaison avec les données neurophysiologiques

La comparaison avec les données de Polat, Mizobe, Pettet, & Kasamatsu (1998) doit être faite de nouveau puisque le comportement du réseau est complètement changé. Les résultats pour les mêmes neurones de la couche 4(S), que ceux présentés dans la section précédente, sont présentés sur la figure 4.13. Le fond avait pour intensité 0,5 et la distance cible-inducteur était de 0 pixel. On remarque que le comportement des deux courbes (courbe "cible seule" et courbe "cible avec inducteur") observé dans le modèle Bloc1 est aussi présent ici. Le neurone le plus proche de l'inducteur a la plus grande modification de sa fonction de réponse au contraste (FRC), alors que celui qui est le plus éloigné a le moins de modification. Il faut cependant noter un point intéressant, la discontinuité dans la FRC pour la condition "cible seule" pour ce modèle au niveau du contraste de la cible d'environ 0,5. Cette discontinuité n'est plus présente dans les FRCs où l'inducteur est placé adjacent à la cible.

Les FRCs des neurones de la couche 2/3 sont présentées dans la figure 4.14. Ces neurones ont la même localisation spatiale (coordonnées $[i, j]$) que ceux de la couche 4(S) présentés précédemment et correspondent aux mêmes simulations. On voit que toutes les FRCs de la condition "cible avec inducteur" sont différentes par rapport aux FRCs de la condition "cible seule". Ainsi l'interaction introduite par le système "couche 4(Y) - couche 2/3" (le bloc 2) augmente la sensibilité de la FRC à la présence des deux stimuli, mais uniquement dans la couche 2/3. Les 3 cellules qui sont placées le plus loin (les graphiques de la colonne de droite) ont des modifications importantes par rapport à celles de la couche 4(S).

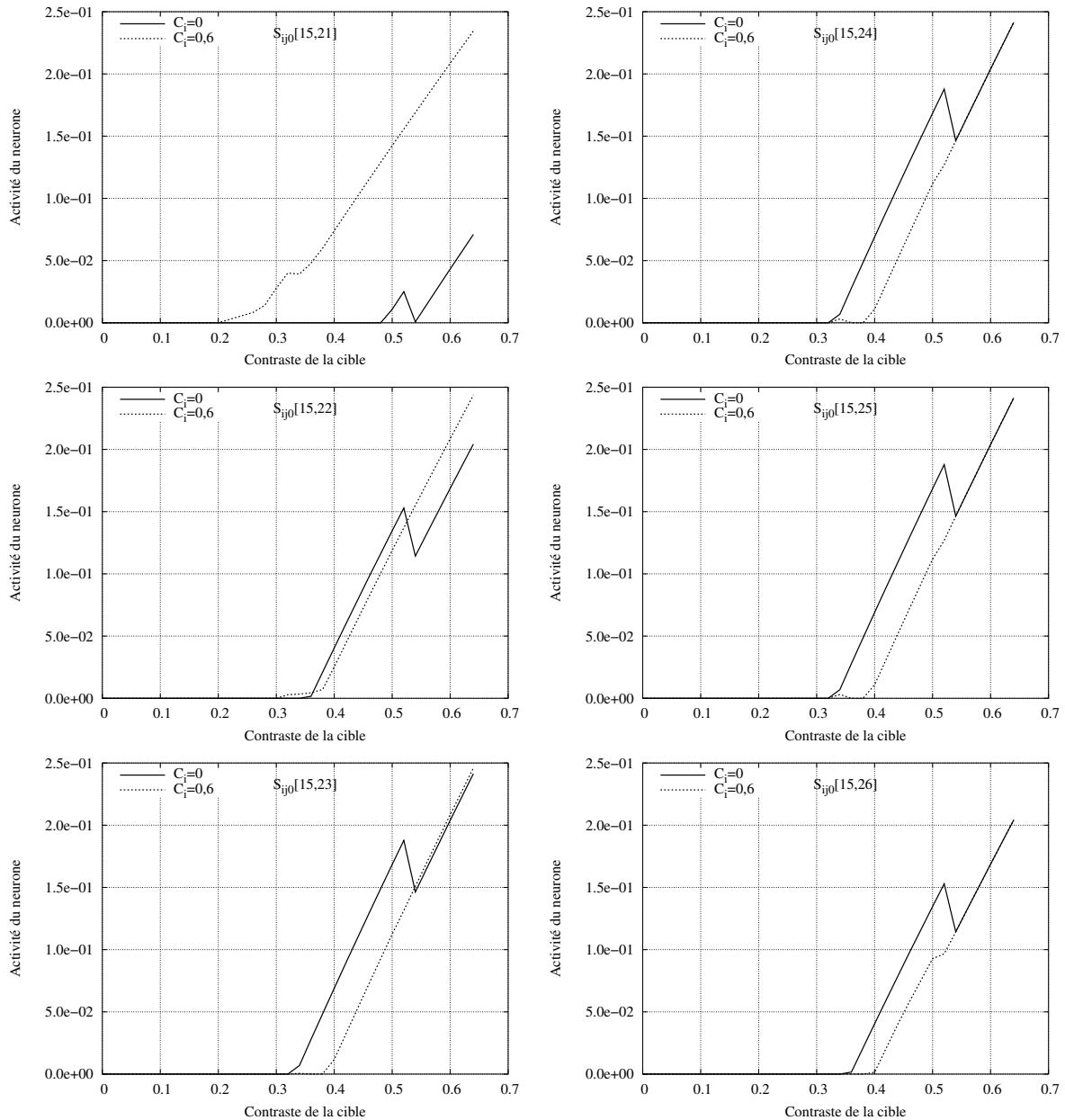


FIG. 4.13 – Fonctions de réponses au contraste de 6 neurones de type S_{ij0} de la couche 4(S). Le contraste de la cible varie par pas de 0,02. L'intensité du fond était de 0,5, et le contraste de l'inducteur de 0,6 pour les conditions cible avec inducteur ($C_i = 0, 6$ dans les légendes).

Comparaison avec les données de psychophysique visuelle

On utilise la même méthode de calcul de l'amplitude de facilitation/masquage de chaque couche que précédemment (section 4.2). Les résultats des trois couches principales sont présentés (couches 4(S), 4(Y) et 2/3) pour comparer le comportement de chaque couche vis-à-vis des autres.

Interactions à polarités identiques

Interactions ON-vers-ON La figure 4.15 présente les résultats des simulations pour les conditions inducteur blanc avec cible blanche, pour les deux intensités du fond : 0,5 (graphiques

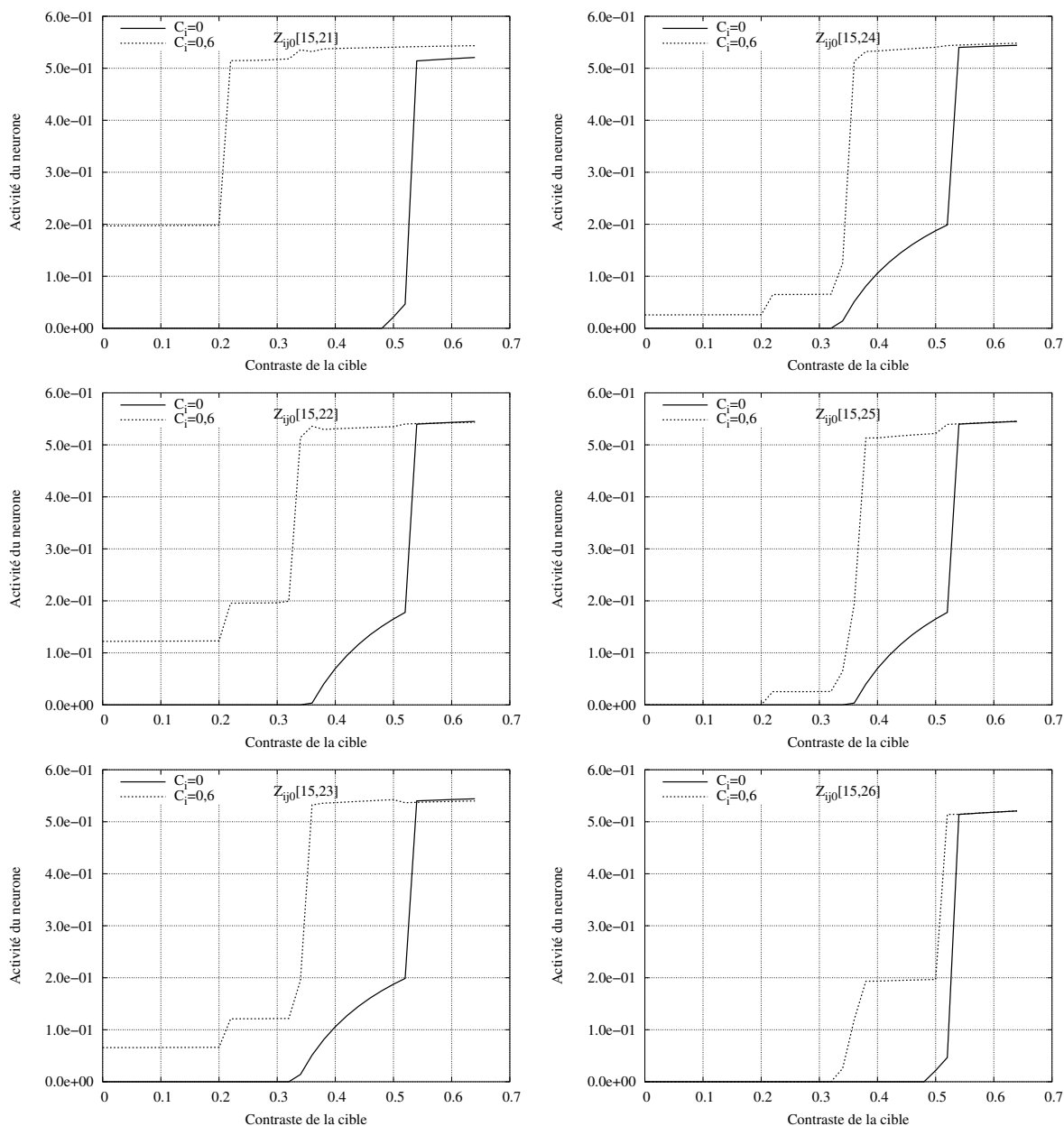


FIG. 4.14 – Fonctions de réponses au contraste de 6 neurones de type Z_{ij0} de la couche 2/3. Le contraste de la cible varie par pas de 0,02. L'intensité du fond était de 0,5, et le contraste de l'inducteur de 0,6 pour les conditions cible avec inducteur ($C_i = 0, 6$ dans les légendes).

4.15(a)) et 1,0 (graphiques 4.15(b)). De manière générale on remarque une facilitation de la détection de la cible par la présence de l'inducteur, qui semble augmenter avec le contraste de l'inducteur. Cette facilitation diminue fortement avec la distance spatiale et au-delà de 3 pixels aucun effet sur la cible n'est visible. Il faut cependant remarquer la faible amplitude (environ 0,8 pour le maximum) obtenue pour la couche 4(S), et les non-linéarités présentes dans ses courbes.

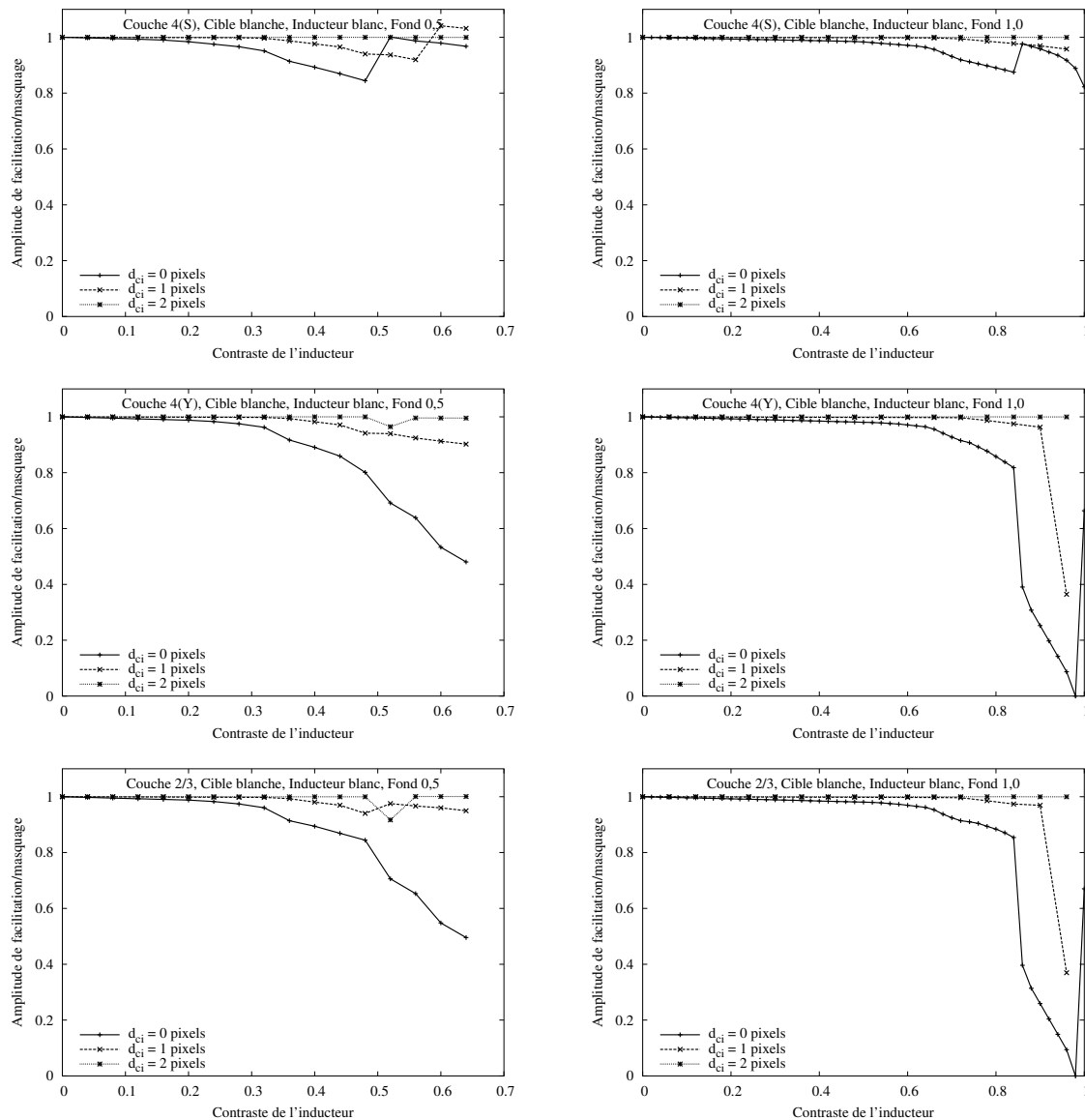
Interactions OFF-vers-OFF La figure 4.16 présente les résultats des simulations pour les conditions inducteur noir avec cible noire, pour les deux intensités du fond : 0,5 (graphiques

4.16(a)) et 1,0 (graphiques 4.16(b)). De nouveau, de manière générale, une facilitation est présente. Seule la couche 4(S), pour l'intensité du fond de 0,5, montre un masquage de 20% (amplitude de 1,2) pour les séparations spatiales de 0 et 1 pixel. Ce masquage semble disparaître avec l'augmentation du contraste de l'inducteur noir (amplitude de facilitation/masquage de 0,9 pour $d_{ci}=0$ pixel et $C_i=-0,48$). À partir d'une séparation spatiale de 3 pixels, aucun effet n'est visible.

Interactions à polarités opposées

Interactions ON-vers-OFF La figure 4.17 présente les résultats des simulations pour les conditions inducteur blanc avec cible noire, pour les deux intensités du fond : 0,5 (graphiques 4.17(a)) et 1,0 (graphiques 4.17(b)). Pour l'intensité du fond de 1,0, les trois couches montrent une facilitation qui croît avec l'augmentation du contraste de l'inducteur blanc. Cette facilitation diminue fortement avec l'augmentation de la séparation spatiale, et à partir d'une distance de 3 pixels aucun effet de l'inducteur sur la détection de la cible n'est visible. Pour le fond d'intensité 0,5, les effets sont différents des résultats pour le fond de 1,0. Les couches 4(S) et 4(Y) montrent des effets opposés aux distances de 0 pixel (facilitation avec l'augmentation du contraste de l'inducteur) et de 1 à 3 pixels (masquage avec l'augmentation du contraste de l'inducteur). Quant à la couche 2/3, les variations sont fortement asymétriques, vu qu'à partir d'un contraste de l'inducteur de 0,6 un décrochage est présent dans les courbes.

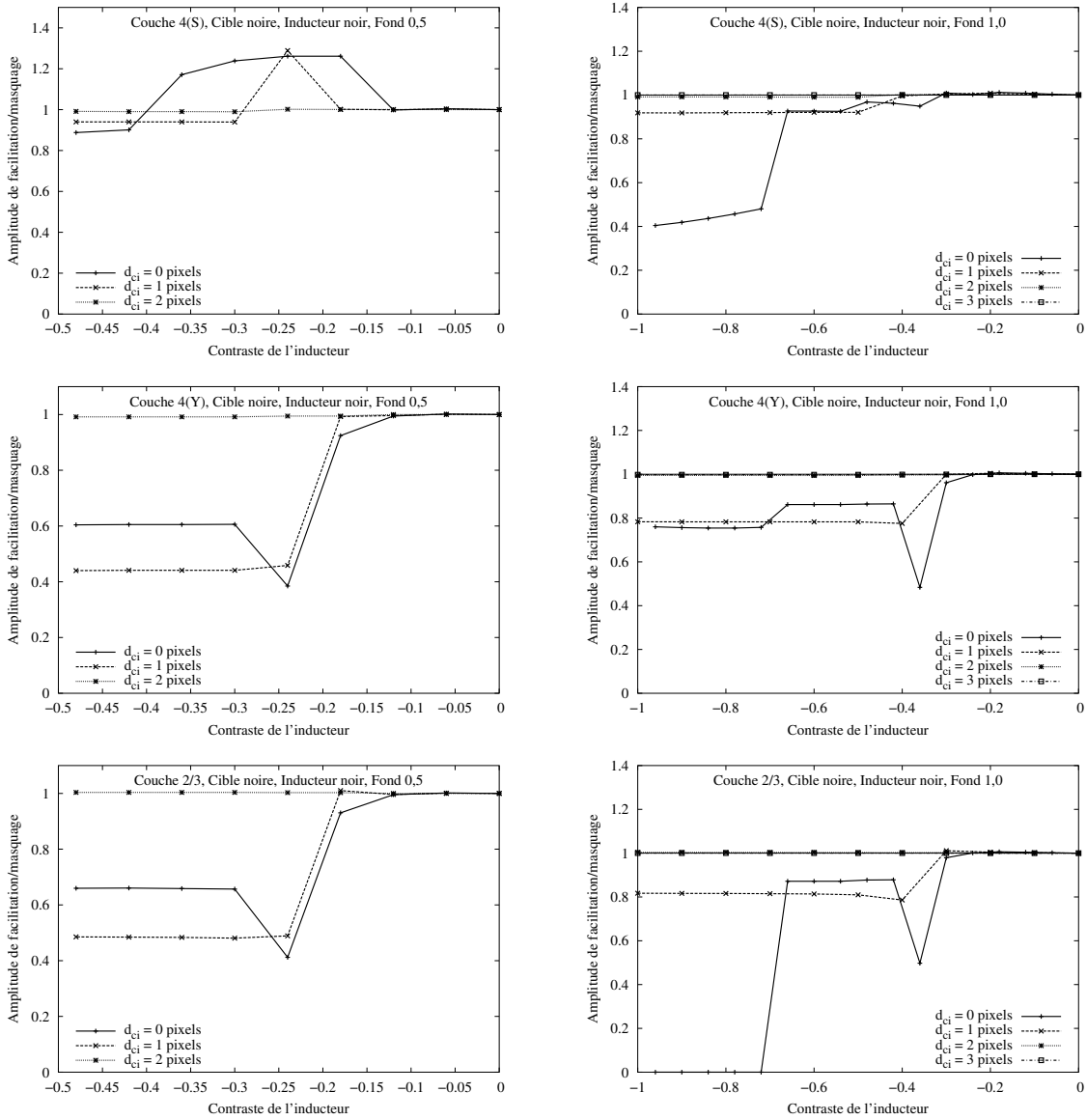
Interactions OFF-vers-ON La figure 4.18 présente les résultats des simulations pour les conditions inducteur noir avec cible blanche, pour les deux intensités du fond : 0,5 (graphiques 4.18(a)) et 1,0 (graphiques 4.18(b)). Les trois couches montrent des comportements différents pour les faibles séparations spatiales (0 et 1 pixel). Pour une distance de 0 pixel (les courbes en trait continu) : la couche 4(S) présente de la facilitation, avec un comportement non monotone pour le fond de 1,0 ; pour la couche 4(Y) au fond de 0,5, l'amplitude passe de 0,8 à 1,3 pour redescendre à des valeurs très faibles, alors qu'au fond de 1,0 elle descend rapidement à environ 0,2 ($C_i=-0,3$) pour revenir approximativement à un niveau de 1,0, ne montrant aucun effet ; pour la couche 2/3, une facilitation générale est présente au fond de 0,5 (même si pour $C_i=-0,3$ l'amplitude remonte près de 1), alors qu'au fond d'intensité 1,0, l'amplitude a le même comportement que pour la couche 4(Y), une diminution rapide jusqu'à une amplitude d'environ 0,3 pour $C_i=-0,3$, et elle revient à une valeur de 1 pour les autres contrastes de l'inducteur. Seules les séparations spatiales de 2 et 3 pixels semblent donner un comportement semblable des couches 4(S) et 4(Y), où un masquage d'environ 1,1 à 1,4 est présent. Ce masquage semble diminuer avec l'augmentation de l'intensité du fond (il est plus fort aux faibles intensités).



(a) Fond d'intensité 0,5

(b) Fond d'intensité 1,0

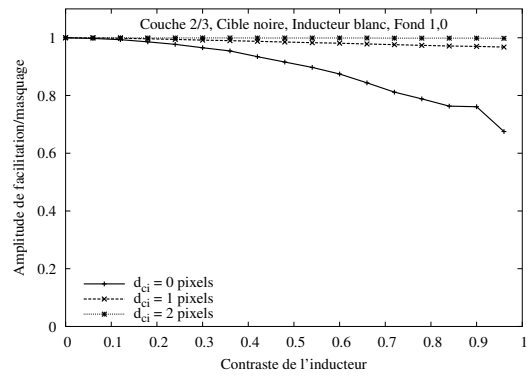
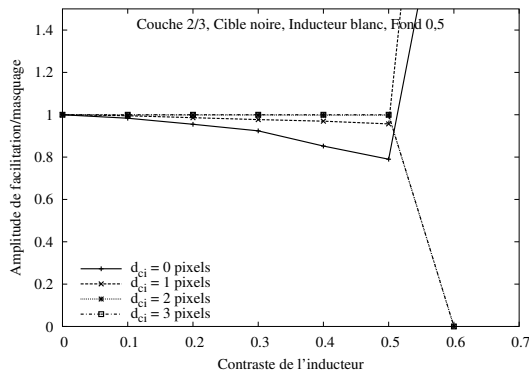
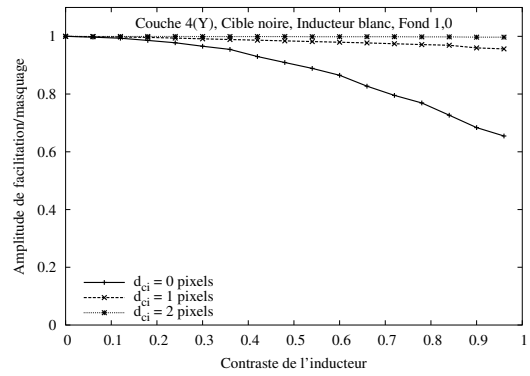
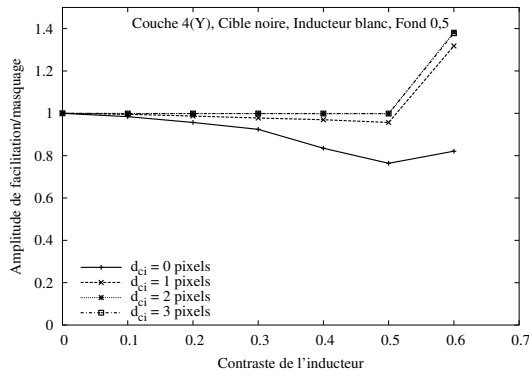
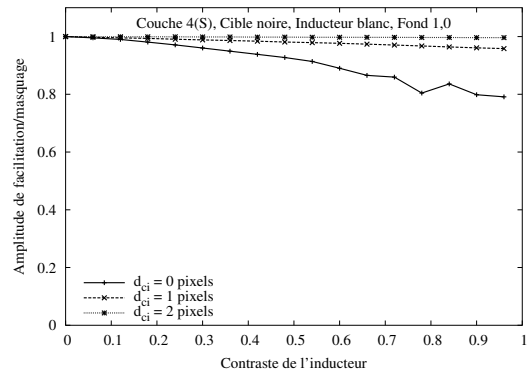
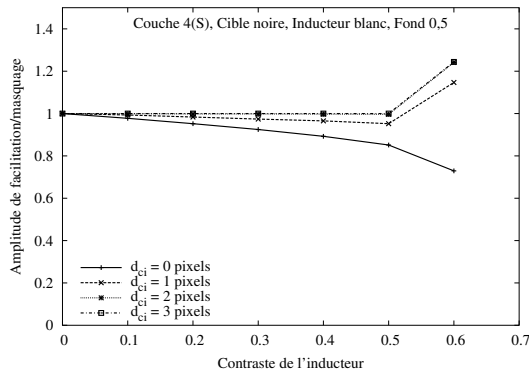
FIG. 4.15 – Amplitude de facilitation/masquage obtenue pour les couches 4(S), 4(Y) et 2/3, en fonction du contraste de l'inducteur, de la séparation spatiale cible-inducteur et de l'intensité du fond en entrée de l'image. Graphiques de la colonne de gauche pour un fond de 0,5, graphiques de la colonne de droite pour un fond de 1,0. Les graphiques sur une ligne correspondent à la même couche. Première ligne couche 4(S), deuxième ligne couche 4(Y) et troisième ligne couche 2/3. Interactions **ON-vers-ON**.



(a) Fond d'intensité 0,5

(b) Fond d'intensité 1,0

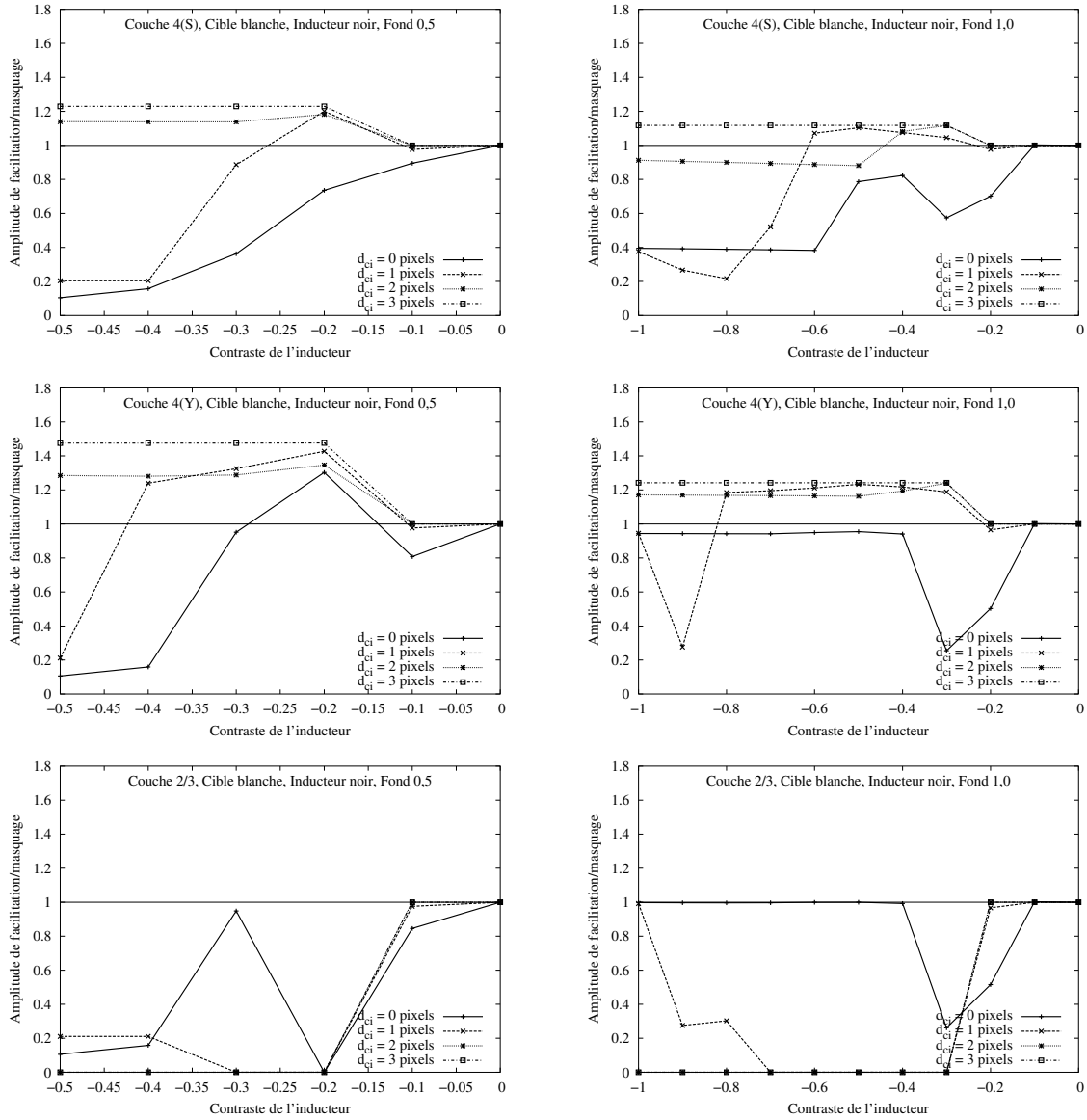
FIG. 4.16 – Comme pour la figure 4.15. Ici, interactions **OFF-vers-OFF**.



(a) Fond d'intensité 0,5

(b) Fond d'intensité 1,0

FIG. 4.17 – Comme pour la figure 4.15. Ici, interactions ON-vers-OFF.



(a) Fond d'intensité 0,5

(b) Fond d'intensité 1,0

FIG. 4.18 – Comme pour la figure 4.15. Ici, interactions OFF-vers-ON.

Les résultats des simulations pour le modèle "Rétine-Bloc1" sont à nouveau obtenus mais seulement pour l'intensité du fond de 1,0. Pour ce fond et pour des polarités identiques des deux stimuli, le modèle de l'aire V1 simule une facilitation générale de la détection de la cible par la présence de l'inducteur (en dehors de la faible facilitation de la couche 4(S)). Pour des polarités opposées des deux stimuli, les asymétries sont toujours présentes, les interactions *ON-vers-OFF* sont différentes des interactions *OFF-vers-ON*. Les premières présentent de la facilitation pour cette valeur de fond, alors que les deuxièmes montrent de la facilitation et du masquage en fonction de la séparation cible-inducteur et de la couche du modèle que l'on considère. Pour le fond d'intensité 0,5, les interactions à polarités identiques sont facilitatrices pour les couches 4(Y) et 2/3 mais pas pour la couche 4(S). Celle-ci montre des différences entre polarités positives et négatives. Pour les interactions à polarités opposées, l'effet peut passer de la facilitation à du masquage en fonction de la distance entre la cible et l'inducteur, et du contraste de l'inducteur.

4.4 Discussion générale des simulations et conclusions

4.4.1 *Le régime longue distance*

En premier, il faut préciser pourquoi aucun résultat concernant le plateau du régime longue distance n'a été présenté. Toutes les simulations ont montré que l'effet de la présence de l'inducteur sur l'intensité de la cible, pour obtenir le niveau d'activation fixé à $A_{cumul} = 0,5$, disparaît à partir d'une séparation spatiale de 3 pixels. Seules les interactions à polarités opposées du modèle "Rétine-Bloc1-Bloc2" montrent des effets qui semblent être à plus longue distance (masquage toujours présent même pour une séparation de 3 pixels). Ce résultat montre que le Bloc 2 du modèle ne rajoute pas d'effet supplémentaire majeur concernant le paramètre *séparation spatiale* entre les deux stimuli, pour toutes les interactions. Ainsi, le régime longue distance psychophysique est difficilement interprétable seulement à l'aide du modèle de l'aire V1 de LAMINART. Il serait nécessaire soit d'introduire d'autres couches de l'aire V1 et donc de nouvelles connexions, soit de voir les résultats du modèle LAMINART des deux aires corticales V1 et V2 telles qu'elles sont utilisées par Raizada (2001).

4.4.2 *Interactions entre polarités identiques*

Les résultats des interactions entre stimuli de polarités identiques sont équivalents dans les deux simulations effectuées : "Rétine-Bloc1" et "Rétine-Bloc1-Bloc2". Dans les deux cas, de manière générale une facilitation de la détection de la cible par la présence de l'inducteur est obtenue. Ce résultat est "rassurant", car les interactions qui sont rajoutées par les connexions du Bloc 2 (couches 4(Y) et 2/3) sont entièrement symétriques pour les couches de neurones à directions identiques et opposées (voir le paragraphe 4.1.5, *Symétrie des connexions*). Par contre, comme il a été précisé dans le paragraphe précédent, le bloc 2 ne rajoute pas d'effet

supplémentaire sur les interactions longues distances. Elles restent bornées à la limite de 3 pixels.

4.4.3 Interactions entre polarités opposées

Les résultats des interactions entre stimuli de polarités opposées sont différents entre les deux modèles simulés. Pour le modèle "Rétine-Bloc1", les interactions *ON-vers-OFF* et *OFF-vers-ON* sont de manière générale facilitatrices, même si des différences entre les deux existent. Pour le modèle "Rétine-Bloc1-Bloc2", les interactions *ON-vers-OFF* donnent de manière générale une facilitation de la détection de la cible, alors que les interactions *OFF-vers-ON* varient en fonction de l'intensité du fond et entre les couches : les couches 4(S) et 4(Y) montrant de la facilitation et du masquage, variant en fonction du contraste de l'inducteur et de la distance cible-inducteur, la couche 2/3 montrant principalement de la facilitation. Le point le plus remarquable dans ces résultats est le fait que les asymétries dans les interactions ne proviennent pas d'une asymétrie dans les connexions entre les couches. Celles-ci ont été clairement posées symétriques pour des directions identiques sans connexions entre cellules à champs récepteurs opposés. Donc, l'asymétrie ne peut provenir que : (1) de l'entrée asymétrique de la rétine, les deux voies ON et OFF ; ou (2) tout simplement de l'asymétrie naturelle entre un incrément et un décrétement sur un fond uniforme.

4.4.4 Correspondances entre valeurs physiques de la luminance et valeurs numériques en entrée de la rétine

Le point le plus problématique s'est avéré être la définition des valeurs d'entrée du modèle. Elles varient entre 0 et 2 et la correspondance avec les valeurs de luminance physique, utilisées dans les expériences, n'est pas claire. Pour cette raison, les discussions autour des résultats se bornent à des critères généraux de changement des interactions. Pour avoir la possibilité de faire des comparaisons plus poussées (quantitatives), il est nécessaire d'introduire un modèle de la rétine plus complexe que le simple modèle de la Différence des Gaussiennes communément utilisée. Un exemple serait l'utilisation d'une couche de neurone ON et OFF, correspondant aux cellules ganglionnaires, modélisé par une équation du type modèle ART :

$$\frac{1}{\delta_g} \frac{dg_{ij}}{dt} = -g_{ij} + (1 - g_{ij})u_{ij}(1 + E_{ij}) - (1 + g_{ij})F_{ij} \quad (4.31)$$

qui représenterait l'activité des cellules ganglionnaires, où les termes E_{ij} , F_{ij} sont deux termes d'excitation et d'inhibition à déterminer. L'activité en entrée sera automatiquement normée dans les limites de variations des cellules g_{ij} (dans ce cas -1 et 1) ce qui permettra d'avoir en entrée des valeurs de 0 à l'infini (il faut préciser que le début d'une telle étude est déjà partiellement présent dans le travail de L.Simon, Simon (2002), mais avec un modèle de Dong & Hop-

field plus simple, qui est un cas particulier des équations générales de S.Grossberg, Grossberg (1988)).

Un autre problème qui apparaît en considérant le calcul de l'image formée sur la rétine est la répartition de la lumière sur la rétine. Il a été montré (Flamant , 1955; Westheimer & Campbell , 1962) que l'image d'un point lumineux sur la rétine a une distribution spatiale d'une certaine largeur, qui peut avoir une taille de quelques minutes d'arc. Ceci devrait obligatoirement être pris en compte pour pouvoir bien modéliser les interactions à faibles séparations comme le régime courte distance.

L'introduction du deuxième bloc du modèle n'a pas changé la distance d'interaction maximale entre les deux stimuli. Pour des polarités identiques des stimuli, cette distance reste 3 pixels. Or, il a été supposé que le régime psychophysique longue distance devait être en partie expliqué par les connexions longues distances neurophysiologiques. Pour l'interaction en fonction de la séparation spatiale, ceci n'est pas le cas. L'état actuel du modèle ne permet pas de modéliser le facteur "séparation spatiale".

Par contre, le modèle LAMINART permet de reproduire dans une certaine mesure les asymétries entre polarités opposées et identiques. C'est la conclusion majeure de cette étude malgré le manque de sensibilité du modèle au facteur "séparation spatiale" entre les stimuli.

La deuxième conclusion, provenant des symétries intrinsèques des connexions utilisées, est que ces asymétries ne sont pas expliquées par la présence de connexions spécifiquement asymétriques posées de manière ad hoc (par exemple inhibition *OFF-vers-ON* et excitation *ON-vers-OFF* pour des directions colinéaires). Ces connexions n'existent tout simplement pas dans le modèle utilisé. Donc, l'asymétrie ne peut que provenir d'un autre niveau, que nous supposons être l'entrée asymétrique de la rétine : les incréments et décréments de lumière, ou des deux voies parallèles du système visuel.

Chapitre 5

Conclusions générales et perspectives

Le travail a porté sur l'étude des mécanismes d'intégration spatiale de segments de lignes iso-orientés et achromatiques, supposés intervenir dans la création des contours. L'étude a été effectuée par une approche expérimentale et de modélisation de l'aire visuelle primaire de l'Homme.

Avant d'effectuer les expériences qui utilisent la méthode des stimuli constants, une vérification de la validité des écart-types asymptotiques a été effectuée. Les écart-types obtenus par la méthode d'ajustement non linéaire de Levenberg-Marquardt, ont été comparés aux écart-types bootstraps considérés comme donnant de meilleurs estimations (Efron , 1979; Maloney , 1990; Foster & Bischof , 1991). Deux fonctions ont été utilisées, la fonction logistique et la fonction Weibull. Les résultats ont montré que pour le seuil de la fonction psychométrique, quand la fonction logistique est utilisée, les écart-types des deux méthodes convergent rapidement vers les mêmes valeurs à partir d'un nombre d'essais par niveaux de stimulus de 100. Ceci n'est pas valable pour la fonction Weibull où la convergence est beaucoup plus lente. En regardant les écart-types des pentes pour les deux fonctions utilisées, la méthode d'estimation asymptotique donne des valeurs très différentes de celles de la méthode bootstrap. Pour les expériences réalisées, la fonction logistique a été utilisée pour extraire les seuils et leurs écart-types des différentes conditions expérimentales et sujets.

La thèse s'est restreinte à l'étude avec des stimuli lignes achromatiques pour délimiter les deux régimes d'intégration connus : le régime courte distance et le régime longue distance. Le premier a été étudié de manière intensive, même si ses limites spatiales n'étaient pas clairement définies à cause de l'utilisation de différents types de stimuli (lignes et Gabors) dans les différentes études psychophysiques. Les caractéristiques psychophysiques des deux régimes ont été clairement obtenues par une nouvelle analyse d'une partie des données déjà publiées ("État des connaissances", section 3.1) et des mesures pour caractériser le régime longue distance. Avec des stimuli de polarités positives, le régime courte distance a pour limites spatiales 0 et un tiers de degré d'angle visuel, et est sensible au contraste de l'inducteur (Expérience 1). Le régime longue distance a pour limites spatiales un tiers de degré et 2,5 degrés d'angle visuel, et n'est pas sensible à l'intensité de l'inducteur (Expérience 1). Le régime longue distance semble être

de manière générale facilitateur pour la détection de la cible (Expérience 2 et 5), quelles que soient la polarité et l'intensité de l'inducteur. Par contre, des différences entre polarités opposées et identiques des stimuli sont présentes pour ce régime. Dans le régime longue distance, les interactions *OFF-vers-ON* sont de manière générale beaucoup moins facilitatrices que les autres interactions (Expérience 2 et 5). La luminance du fond sur lequel sont présentés les stimuli semblait intervenir dans les interactions (Expérience 2), mais l'étude contrôlée sur des sujets naïfs n'a pas montré d'effet global du fond (Expérience 5), mais une interaction fond-sujet qui semble indiquer des différences entre sujets d'un fond à l'autre. En fonction de la séparation spatiale entre les deux stimuli, il est possible d'obtenir une interaction entre les deux régimes si le stimulus inducteur est placé de manière à ce que les deux régimes soient en compétition pour la détection de la cible (Expérience 3). Pour des polarités positives des stimuli, le régime longue distance s'est avéré posséder une plasticité visuelle spécifique à la direction d'alignement des stimuli (Expérience 4) : la direction verticale a montré une augmentation des seuils de détection des sujets au début des expériences, et la direction horizontale une diminution des seuils de détection des sujets au début des expériences.

Nous avons essayé de modéliser ces interactions entre segments de lignes iso-orientés avec le modèle LAMINART (Grossberg & Williamson, 1999, 2001; Raizada, 2001; Raizada & Grossberg, 2001, 2003). Il est construit sur la base des connaissances neurophysiologiques des connexions intra et intercouches du cortex visuel primaire, en modélisant spécifiquement les cellules de types simple et complexe dans différentes couches. Il a été testé pour expliquer d'autres résultats observés dans ce cortex (voir Raizada, 2001; Grossberg & Williamson, 1999, 2001; Grossberg & Raizada, 2000; Raizada & Grossberg, 2001, 2003). Il permet de reproduire des résultats sur le regroupement perceptif, la sélection d'élément visuel par l'attention, ainsi que la variation temporelle de l'activité des neurones répondant à la cible. Le modèle de l'aire visuelle primaire (V1) a été utilisé pour vérifier si au moins une partie des résultats expérimentaux du régime longue distance peuvent être reproduits (expériences 1 à 5 de cette thèse). Les interactions entre polarités identiques et opposées du modèle semblent être identiques à celles des expériences de cette thèse. De manière générale, en fonction de l'intensité de l'inducteur, les interactions *OFF-vers-ON* donnent des résultats différents des trois autres interactions (*ON-vers-ON*, *OFF-vers-OFF*, *ON-vers-OFF*). Le paramètre "séparation spatiale" ne semble pas changer les interactions, quelle que soit la couche considérée et le niveau de complexité du modèle. Le point le plus intéressant est que l'asymétrie observée dans les interactions *OFF-vers-ON* ne provient pas d'une asymétrie des connexions entre couches. Celles-ci sont entièrement symétriques, et donc l'asymétrie obtenue ne peut pas provenir d'un choix ad hoc des connexions, ce qui suggère une possible asymétrie "naturelle" provenant des entrées asymétriques de la rétine : les voies ON et OFF.

D'autres modèles auraient pu être utilisés pour ce travail (exemple : Zenger & Sagi, 1996; Watson & Solomon, 1997), mais ils n'intègrent pas la structure des connexions longues distances des couches 2 et 3. Même s'ils semblent plus simples, et probablement peuvent expli-

quer les effets courtes distances seulement avec des connexions locales excitatrices/inhibitrices en fonction des orientations des cellules, ils ne sont pas créés pour fournir des résultats sur une telle diversité de conditions expérimentales du fait qu'ils n'intègrent que très peu de mécanismes de rétroactions.

Les résultats expérimentaux de cette thèse, ainsi que ceux déjà publiés dans la littérature psychophysique (Dresp, 1993; Polat & Sagi, 1993, 1994a,b; Dresp, 1998; Brincat & Westheimer, 2000; Yu & Levi, 1997; Field, Hayes & Hess, 1993; Kapadia, Ito, Gilbert & Westheimer, 1995; Kapadia, Westheimer & Gilbert, 2000; Morgan & Dresp, 1995; Solomon, Watson & Morgan, 1999; Wehrhahn & Dresp, 1998; Westheimer, 1998), posent de sérieuses contraintes sur la méthodologie expérimentale des études à venir. La présence d'au moins trois niveaux de plasticité visuelle (polarité des stimuli, séparation spatiale entre les stimuli, direction d'alignement des stimuli) impose de fortes contraintes sur la méthodologie. Si une étude des effets d'apprentissage à long terme en fonction des polarités est envisagée, il faudrait effectuer des mesures utilisant différentes séparations entre stimuli pour vérifier l'existence d'une plasticité pour chaque régime et les interactions entre les deux régimes, et en plus, vérifier la plasticité en fonction des directions d'alignement. Si l'on souhaite étudier les deux régimes d'intégration pour d'autres directions d'alignement, il est nécessaire de prendre des sujets sans précédents dans des expériences de psychophysique visuelle avec ces directions, et utiliser une procédure rapide de mesure des seuils. Il faut noter que même lors des procédures adaptatives, connues pour être les plus rapides en utilisant le moins d'essais par condition expérimentale, les expériences se déroulent avec un minimum d'environ 50 essais par condition expérimentale, en effectuant plusieurs mesures pour calculer la variabilité intrasujet. Dans notre cas, une telle procédure n'est pas envisageable dans la mesure où l'apprentissage perceptif peut être cumulatif. La procédure devrait effectuer un mixage des différentes conditions, avec très peu de présentations, comme cela est effectué dans l'expérience de vérification de la variabilité intersujets et interconditions de la section 3.6.

D'un autre côté, une variabilité intrinsèque intra et intersujets est présente (voir les résultats des expériences de cette thèse, et par exemple les résultats de Fahle, Edelman & Poggio, 1995; Morgan & Dresp, 1995; Solomon, Watson & Morgan, 1999, certains repris dans la section 3.1, "État des connaissances"). Elle est présente à tous les niveaux, que ce soit pour l'apprentissage où certains sujets ne montrent pas d'effet et d'autres montrent un effet, ou que ce soit au niveau de la variabilité des seuils d'une mesure à l'autre. Ainsi, les mesures doivent prendre en compte l'existence de ces variabilités intrinsèques et vérifier que, (1) soit les effets mesurés ne sont pas dans les limites de cette variabilité (variabilité intrasujet), ou (2) soit que les effets sont identiques entre sujets (variabilité intersujets).

Il ne faut pas oublier que tout le travail présenté dans cette thèse s'est basé sur le principe de mesure des seuils de détection du contraste. Ceci implique que le contraste de la cible est toujours très faible par rapport à celui de l'inducteur. Il est difficile de savoir s'il est possible d'extrapoler ces résultats pour des intensités plus fortes de la cible, conditions où celle-ci est

visible en continue. Ainsi, une autre méthodologie expérimentale est nécessaire pour répondre à ce type de question (par exemple, comme effectué par Brincat & Westheimer, 2000, avec une méthode de discrimination de l'orientation).

L'utilisation des pentes des fonctions psychophysiques s'est avérée impossible à cause des écart-types importants obtenus avec la méthode expérimentale des stimuli constants. Il faudrait vérifier avec un autre type de méthodologie et de procédure si des différences sont présentes. Il serait aussi intéressant de regarder les temps de réactions entre les différentes conditions (polarités identiques contre polarités opposées). Des études ont montré que pour un stimulus simple présenté dans la fovéa, les temps de réactions entre les deux voies ne sont pas différents (Ehrenstein & Spillmann, 1983), mais ceci n'indique pas si les interactions entre plusieurs stimuli changent les temps de réactions. Par ailleurs, il faudrait prendre en compte le fait que le temps de réaction change avec la visibilité et l'intensité de la cible (Pins & Bonnet, 1996). Si l'on se base sur la hiérarchie du traitement de l'information, un temps de traitement plus long correspondant à un niveau hiérarchique plus haut dans le système visuel, il serait possible de vérifier si les traitements se font à des niveaux différents (Pins & Bonnet, 1996).

Le point le plus important est l'asymétrie observée entre polarités opposées et polarités identiques, ainsi que la possible plasticité en fonction des polarités. Ceci pose (ou repose) la question fondamentale : que mesure-t-on avec des stimuli lignes et des stimuli Gabor ? Les deux types de stimuli semblent donner des résultats identiques du point de vue de la mesure du seuil de détection, mais pas pour d'autres méthodologies expérimentales (Westheimer, 1998, par exemple, montre que les lignes donnent des seuils plus bas pour les mesures de discrimination de l'orientation). L'utilisation des stimuli du type Gabor, ou d'autres types de stimuli sinusoïdaux, se base sur les deux caractéristiques des champs récepteurs des neurones : le caractère local du champ récepteur et une fréquence spatiale optimale pour stimuler le neurone. A cet argument peut être opposé l'argument selon lequel ce type de stimuli n'est absolument pas présent naturellement dans les images formées sur la rétine. Le système visuel s'est adapté, depuis l'enfance jusqu'à l'âge adulte, à répondre de manière optimale à ce qui lui était présenté en entrée : les images rétinienne provenant des différents éléments de l'environnement ayant réfléchis la lumière. Qui plus est, quand les stimuli sinusoïdaux sont présentés au sujet, il est conscient que les deux polarités sont présentes sur l'image. Même s'il est très probable que des stimuli de petites tailles, comme ceux majoritairement utilisés dans les études de l'intégration de l'information d'orientation, stimulent à peu près les mêmes zones corticales de bas niveau et les mêmes caractéristiques spatio-temporelles, il est loin d'être évident que ce soit le cas pour des aires de plus haut niveau. Ainsi, les modulations dues aux rétroactions d'aires visuelles de plus haut niveau peuvent être complètement différentes.

Ce problème de la mesure est aussi présent quand des stimuli Gabors sont utilisés avec des polarités opposées (encore appelés à phases opposées). L'interprétation des résultats de ces mesures est très problématique. Même s'il est possible d'attribuer une polarité vis à vis de la composante centrale du Gabor, il ne faut pas oublier que les polarités alternent avec une diminution Gaussienne de l'amplitude par rapport au centre. Comment savoir si l'interaction qui va être

obtenue est due à l'interaction blanc/noir entre les pics centraux des Gabors ou à l'interaction noir/blanc des deux bandes adjacentes des pics ? La seule manière d'y répondre serait d'effectuer des mesures équivalentes avec des lignes et des Gabors, comme effectué par Westheimer (1998). C'est à partir de ces résultats, et des considérations théoriques et de modélisation de l'aire visuelle primaire, qu'une compréhension plus approfondie de la mesure psychophysique peut être obtenue.

La question fondamentale que posent les résultats du régime longue distance concerne la raison d'être des asymétries à polarités opposées. La seule réponse qui semble valable est la possible interaction entre les deux voies visuelles (noir/blanc) pour la création d'une représentation de contour blanc ou noir. Il semblerait qu'une préférence vers la voie noire soit présente, puisque le contour de cette voie masquerait la création du contour de la voie blanche. De ce point de vue, la modélisation par la théorie de la résonance adaptative semble être justifiée (le modèle LAMINART est construit sur cette base). Son principe est la coopération/compétition entre différents niveaux de l'architecture du modèle. Or, c'est exactement ce qui a été introduit par les couches de neurones à champs récepteurs opposées, mais en gardant des connexions symétriques entre les couches. Ceci implique que c'est la boucle de coopération/compétition entre les deux voies (ici représentées par les couches à champs récepteurs opposées), sans introduire de connexions asymétriques ad hoc, qui permet d'obtenir ces asymétries au niveau de certaines couches. Par contre, le manque de sensibilité du modèle au paramètre "séparation spatiale" indique que de ce point de vue, soit un autre niveau hiérarchique est nécessaire (l'aire V2, comme utilisée par Raizada, 2001; Raizada & Grossberg, 2001, 2003), soit le modèle de l'aire V1 doit être modifié en rajoutant d'autres couches et connexions intracortex.

Les études à faire restent donc nombreuses. Les asymétries à polarités opposées posent des questions importantes, auxquelles on ne pourra répondre que par des études combinées entre plusieurs domaines des neurosciences (modélisation, psychologie cognitive et neurophysiologie).

Bibliographie

- Adini, Y., Sagi, D. & Tsodyks, M. (2002), Context-enabled learning in the human visual system, *Nature*, 415, 790-793.
- Ahissar, M., & Hochstein, S. (1993), Attentional control of early perceptual learning, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 90, 5718-5722.
- Albrecht, D.G. & Geisler, W.S. (1991), Motion selectivity and the contrast-response function of simple cells in the visual cortex, *Visual Neuroscience*, 7, 531-546.
- Albus, K., & Wahle, P. (1994), The topography of tangential inhibitory connections in the postnatally developing and mature striate cortex of the cat, *European Journal of Neuroscience*, 6, 779-792.
- Barlow, H.B. (1957), Increment thresholds at low intensities considered as signal/noise discriminations, *Journal of Physiology*, 136, 469-488.
- Bonnet, C. (1986), *Manuel pratique de psychophysique*, éd. Armand Colin - édition U.
- Bonnet, C. (1998), La perception, in *Psychologie Cognitive*, chap.2, Ouvrage collectif, éd. Bréal.
- Bosking, W.H., Zhang, Y., Schofield, B., & Fitzpatrick, D. (1997), Orientation selectivity and the arrangement of horizontal connections in tree shrew striate cortex, *The Journal of Neuroscience*, 17, 2112-2127.
- Bowen, R.W. (1995), Isolation and interaction of ON and OFF pathways in human vision : pattern-polarity effects on contrast discrimination, *Vision research*, 35, 2479-2490.
- Brincat, S.L., Westheimer, G. (2000). Integration of foveal orientation signals : distinct local and long-range domains. *Journal of Neurophysiology*, 83, 1900-1911.
- Callaway, E.M. (1998), Local circuits in primary visual cortex of the macaque monkey, *Annual Review of Neuroscience*, 21, 47-74.
- Camus, J.-F. (1998), L'attention, in *Psychologie cognitive*, chap.3, Ouvrage collectif, éd. Bréal.
- Casagrande, V.A. (1994), A third parallel visual pathway to primate area V1, *Trends in Neurosciences*, 17, 305-310.

- Casagrande, V.A. (1999), The mystery of the visual system K pathway. *Journal of Physiology, Perspectives*, 517.3, p.630.
- Chen, C.-C., Kasamatsu, T., Polat, U., Norcia, A.M. (2001). Contrast response characteristics of long-range lateral interactions in cat striate cortex. *NeuroReport*, 12, 655-661.
- Craddock, P. & Guerrien, A. (1998), Apprendre, in *Psychologie cognitive*, chap.4, Ouvrage collectif, éd. Bréal.
- Croner, L.J. & Kaplan, E. (1995), Receptive fields of P and M ganglion cells across the primate retina, *Vision Research*, 35, 7-24.
- Dengler, M., Nitschke, W. (1993), Color stereopsis : a model for depth reversals based on border contrast, *Perception & Psychophysics*, 53, 150-156.
- Dresp, B. (1993), Bright lines and edges facilitate the detection of small light targets, *Spatial Vision*, 7, 213-225.
- Dresp, B. (1998), The effect of practice on the visual detection of near-threshold lines, *Spatial Vision*, 11, 315-327.
- Dresp, B. (1999), Dynamic characteristics of spatial mechanisms coding contour structures, *Spatial Vision*, 12, 129-142.
- Dresp, B. (2000), Do alignment thresholds define a critical boundary in long-range detection facilitation with colinear stimuli, *Spatial Vision*, 13, 343-357.
- Dresp, B., & Grossberg, S. (1997), Contour integration across polarities and spatial gaps : from local contrast filtering to global grouping, *Vision Research*, 37, 913-924.
- Edwards, D.P., Purpura, K.P., & Kaplan, E. (1995), Contrast sensitivity and spatial frequency response of primate cortical neurons in and around the cytochrome oxidase blobs, *Vision Research*, 35, 1501-1523.
- Efron, B. (1979), Bootstrap methods : another look at the jackknife, *The Annals of Statistics*, 7, 1-26.
- Ehrenstein, W.H., & Spillmann, L. (1983), Time thresholds for increments and decrements in luminance, *Journal of the Optical Society of America*, 73, 419-426.
- Eyding, D., Schweigart, G., & Eysel, U.T. (2002), Spatio-temporal plasticity of cortical receptive fields in response to repetitive visual stimulation in the adult cat, *Neuroscience*, 112, 195-215.
- Eysel, U.T., Eyding, D., & Schweigart, G. (1998), Repetitive optical stimulation elicits fast receptive field changes in mature visual cortex, *Neuroreport*, 9, 949-954.

- Flamant, F. (1955), Étude de la répartition de la lumière dans l'image rétinienne d'une fente, *Revue d'optique théorique et instrumentale*, 34, 433-459.
- Foster, D.H. & Bischof, W.F. (1991), Thresholds from psychometric functions : superiority of Bootstrap to incremental and probit variance estimators, *Psychological Bulletin*, 109, 152-159.
- Fahle, M., Edelman, S. & Poggio, T. (1995), Fast perceptual learning in hyperacuity, *Vision Research*, 35, 3003-3013.
- Field, D.J., Hayes, A., & Hess, R.F. (1993), Contour integration by the human visual system : evidence for a local "Association field", *Vision Research*, 33, 173-193.
- Gilbert, C.D. (1998), Adult cortical dynamics, *Physiological reviews*, 78, 467-485.
- Goldstone, R.L. (1998), Perceptual learning, *Annual Review of Psychology*, 49, 585-612.
- Le Grand, Y. (1975), Measurement of the visual stimulus, chap. 2, in *Handbook of Perception : vol. 5, Seeing*, eds. E.C. Carterette and M.P. Friedmann, Academic Press.
- Grossberg, S. (1976a), Adaptative pattern classification and universal recoding : I. Parallel development and coding of neural feature detectors, *Biological Cybernetics*, 23, 121-134.
- Grossberg, S. (1976b), Adaptative pattern classification and universal recoding : II. Feedback, expectation, olfaction, illusions, *Biological Cybernetics*, 23, 187-202.
- Grossberg, S. (1988), Nonlinear neural networks : principles, mechanisms, and architectures, *Neural Networks*, 1, 17-61.
- Grossberg, S. & Raizada, R.D.S (2000), Contrast-sensitive perceptual grouping and object-based attention in the laminar circuits of the primary visual cortex, *Vision Research*, 40, 1413-1432.
- Grossberg, S. & Williamson, J.R. (1999), *A neural model of how horizontal and interlaminar connections of visual cortex develop into adult circuits that carry out perceptual grouping and learning*, rapport technique du Department of Cognitive and Neural Systems, Boston University, CAS/CNS TR-98-022.
- Grossberg, S. & Williamson, J.R. (2001), A neural model of how horizontal and interlaminar connections of visual cortex develop into adult circuits that carry out perceptual grouping and learning, *Cerebral Cortex*, 11, 37-58.
- van Hateren, J.H. (1993), Spatiotemporal contrast sensitivity of early vision, *Vision Research*, 33, 257-267.
- Heinemann, E.G. (1955), Simultaneous brightness induction as a function of inducing and test-field luminances, *Journal of Experimental Psychology*, 50, 89-96.

- Hodgkin, A.L. & Huxley, A.F. (1952), A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *Journal of Physiology*, 117, 500-544.
- Hubel, D. (1994), *L'œil, le cerveau et la vision*, éd. Pour la Science, Paris.
- Hubel, D.H., & Wiesel, T.N. (1962), Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in cat's visual cortex, *Journal of Physiology (London)*, 160, 106-154.
- Hubel, D.H., & Wiesel, T.N. (1974a), Sequence regularity and geometry of orientation columns in the monkey striate cortex, *Journal of Comparative Neurology*, 158, 267-294.
- Hubel, D.H., & Wiesel, T.N. (1974b), Uniformity of monkey striate cortex : a parallel relationship between field size, scatter, and magnification factor, *Journal of Comparative Neurology*, 158, 295-306.
- Irvin, G.E., Casagrande, V.A., & Norton, T.T. (1993), Center/surround relationships of magnocellular, parvocellular, and koniocellular relay cells in primate lateral geniculate nucleus, *Visual Neuroscience*, 10, 363-373.
- Kandel, E.R., Schwartz, J.H. & Jessel, T.M. (1992), *Principles of Neural Science*, 3ème édition, ISBN 0-8385-8068-8.
- Kant, J.-D. (1996), *Modélisation et mise en oeuvre de processus cognitifs de catégorisation à l'aide d'un réseau connexionniste*, Thèse, Université de Rennes 1.
- Kapadia, M.K., Ito, M., Gilbert, C.D., and Westheimer, G. (1995), Improvement in visual sensitivity by changes in local context : parallel studies in human observers and in V1 of alert monkeys. *Neuron*, 15, 843-856.
- Kapadia, M.K., Westheimer, G., Gilbert, C.D. (2000). Spatial distribution of contextual interactions in primary visual cortex and in visual perception. *Journal of Neurophysiology*, 84, 2048-2062.
- Karni, A., & Sagi, D. (1993), The time course of learning a visual skill, *Nature*, 365, 250-252.
- Lee, B.B. (1996), Receptive field structure in the primate retina, *Vision Research*, 36, 631-644.
- Legge, G.E., Foley, J.M. (1980), Contrast masking in human vision, *Journal of the Optical Society of America*, 70, 1458-1471.
- Livingstone, M.S., & Hubel, D.H. (1987), Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth, *The Journal of Neuroscience*, 7, 3416-3468.
- McKee S.P., Klein S.A., Teller D.Y. (1985), Statistical properties of forced-choice psychometric functions : Implications of probit analysis, *Perception & Psychophysics*, 37, 286-298.

- Magnussen, S., Glad, A. (1974). Brightness and darkness enhancement during flicker : perceptual correlates of neuronal B- and D- systems in human vision. *Experimental Brain Research*, 22, 399-413.
- Maloney, Laurence T. (1990), Confidence intervals for the parameters of psychometric functions, *Perception & Psychophysics*, 47, 127-134.
- Mizobe, K., Polat, U., Pettet, M.W., Kasamatsu, T. (2001). Facilitation and suppression of single striate-cell activity by spatially discrete pattern stimuli presented beyond the receptive field. *Visual Neuroscience*, 18, 377-391.
- Morgan, M. J., Dresch, B. (1995). Contrast detection facilitation by spatially separated targets and inducers. *Vision Research*, 35, 1019-1024.
- O'Regan, J.K. & Humbert, R. (1989), Estimating psychometric functions in forced-choice situations : significant biases found in threshold and slope estimations when small samples are used, *Perception & Psychophysics*, 46, 434-442.
- Pins, D. & Bonnet, C. (1996), On the relation between stimulus intensity and processing time : Piéron's law and choice reaction time, *Perception & Psychophysics*, 58, 390-400.
- Polat, U. (1999), Functional architecture of long-range perceptual interactions, *Spatial Vision*, 12, 143-162.
- Polat, U., Mizobe, K., Pettet, M.W., Kasamatsu, T., Norcia, A.M. (1998). Collinear stimuli regulate visual responses depending on cell's contrast threshold. *Nature*, 391, 580-584.
- Polat U., Sagi D. (1993), Lateral interactions between spatial channels : suppression and facilitation revealed by lateral masking experiments, *Vision Research*, 33, 993-999.
- Polat, U., Sagi, D. (1994a). The architecture of perceptual spatial interactions. *Vision Research*, 34, 73-78.
- Polat, U., Sagi, D. (1994b). Spatial interactions in human vision : From near to far via experience-dependent cascades of connections. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 91, 1206-1209.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (1997), *Numerical Recipes in C : the art of scientific computing*, 2d edition, Cambridge University Press.
- Raizada, R.D.S. (2001), *A neural model of attention, perceptual grouping, and context-sensitive processing in the laminar circuits of visual cortex*, Thèse, Boston University Graduate School of Arts and Sciences, 122 pages.

- Raizada, R.D.S., & Grossberg, S. (2001), Context-sensitive binding by the laminar circuits of V1 and V2 : a unified model of perceptual grouping, attention, and orientation contrast, *Visual Cognition*, 8, 431-466.
- Raizada, R.D.S., & Grossberg, S. (2003), Towards a theory of the laminar architecture of cerebral cortex : computational clues from the visual system, *Cerebral Cortex*, 13, 100-113.
- Sagi, D. & Tanne, D. (1994), Perceptual learning : learning to see, *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 195-199.
- Scherrer, B. (1984), *Biostatistique*, éd. gaëtant morin, ISBN 2-89105-093-2.
- Schiller, P.H. (1992). The ON and OFF channels of the visual system. *Trends in Neuroscience*, 15, 86-92.
- Schiller, P.H. (1995). The ON and OFF channels of the mammalian visual system. In *Progress in Retinal and Eye Research, Vol 15*. NN Osborne and GJ Chader (Eds). Oxford, England : Pergamon Press.
- Shapley, R., and Enroth-Cugell, C. (1984), Visual adaptation and retinal gain control. *Progress in Retinal Research*, 3, 263-346.
- Shapley, R., and Reid, R.C. (1985), Contrast and assimilation in the perception of brightness, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 82, 5983-5986.
- Simon, L. (2002), *Adaptation visuelle et connexions courtes distances : comparaison de données psychophysiques et modèles théoriques*, Mémoire de fin d'études, École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, France.
- Solomon, J.A., Watson, A.B., Morgan, M.J. (1999), Transducer model produces facilitation from opposite-sign flanks, *Vision Research*, 39, 987-992.
- Spillmann, L., & Ehrenstein, W.H. (1996), From neuron to gestalt : Mechanisms of visual perception, in *Comprehensive Human Physiology*, Vol.1, chap.43, 861-893.
- Swift, D.J., & Smith, R.A. (1983), Spatial frequency masking and Weber's law, *Vision Research*, 23, 495-505.
- Tolhurst, D.J., Movshon, J.A., & Dean, A.F. (1983), The statistical reliability of signals in single neurons in cat and monkey visual cortex, *Vision Research*, 23, 775-785.
- Treutwein, N. & Strasburger, H. (1999), Fitting the psychometric function, *Perception & Psychophysics*, 61, 87-106.
- Tyler, C.W., Chan, H., & Liu, L. (1992), Different spatial tunings for ON and OFF pathway stimulation, *Ophthalmic and Physiological Optics*, 12, 233-240.

- Tzvetanov, T., Dresch, B. (2002). Short- and long-range effects in line contrast integration. *Vision Research*, 42, 2493-2498.
- Watson, A.B., & Solomon, J.A. (1997), Model of visual contrast gain control and pattern masking, *Journal of the Optical Society of America A*, 14, 2379-2391.
- Wehrhahn, C., Dresch, B. (1998). Detection facilitation by collinear stimuli in humans : dependence on strength and sign of contrast. *Vision Research*, 38, 423-428.
- Westheimer, G. (1998), Lines and Gabors functions compared as spatial visual stimuli, *Vision Research*, 38, 487-491.
- Westheimer, G. (2001), The Fourier theory of vision, *Perception*, 30, 531-541.
- Westheimer, G. & Campbell, F.W. (1962), Light distribution in the image formed by the living human eye, *Journal of the Optical Society of America*, 52, 1040-1045.
- Wichmann, F.A., & Hill, N.J. (2001a), The psychometric function I : fitting, sampling and goodness-of-fit, *Perception & Psychophysics*, 63, 1293-1313.
- Wichmann, F.A., & Hill, N.J. (2001b), The psychometric function II : bootstrap based confidence intervals and sampling, *Perception & Psychophysics*, 63, 1314-1329.
- Wiesel, T.N., & Hubel, D.H. (1974), Ordered arrangement of orientation columns in monkeys lacking visual experience, *Journal of Comparative Neurology*, 158, 307-318.
- Yu C., & Levi D. (1997). Spatial facilitation predicted with end-stopped spatial filters. *Vision Research*, 37, 3117-3127.
- Zapata, L. (2003), *Modélisation du cortex visuel primaire de l'Homme*, mémoire de DEA "Mécanique et Ingénierie" (Option Biomécanique), Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- Zenger, B., Sagi, D. (1996). Isolating excitatory and inhibitory non-linear spatial interactions involved in contrast detection. *Vision Research*, 36, 2497-2513.

Annexe A

Stimuli visuels et lois psychophysiques

Dans cette annexe sont présentés les différents types de stimuli pouvant être utilisés pour des expériences de psychophysique qui étudient l'intégration des contours, et plus spécifiquement les interactions entre éléments avec orientation préférentielle. Les lois psychophysiques associées aux différents paramètres expérimentaux sont présentées.

A.1 Des lignes ou bord de surface

Les stimuli les plus simples sont des segments de lignes ou encore des surfaces avec des bords abrupts. Des exemples sont présentés dans la figure A.1. De par leur simplicité, leur définition par la taille, leur intensité lumineuse et leur polarité, ils permettent d'étudier les caractéristiques les plus simples d'un système visuel donné, ou des interactions entre plusieurs caractéristiques.

Dans le cadre de l'utilisation des stimuli lignes, le contraste généralement utilisé pour présenter les résultats est le contraste de Weber. Il est défini par :

$$C_W = \frac{L_s - L_f}{L_f} \quad (\text{A.1})$$

où L_s est la luminance du stimulus et L_f celle du fond sur lequel est présenté le stimulus. Il faut noter qu'il est aussi possible d'utiliser le contraste de Michelson :

$$C_M = \frac{L_s - L_f}{L_s + L_f} \quad (\text{A.2})$$

qui est une variable qui normalise le contraste du stimulus par rapport à la luminance moyenne autour du stimulus (fond + stimulus). Les deux variables produisent des valeurs de contraste dif-

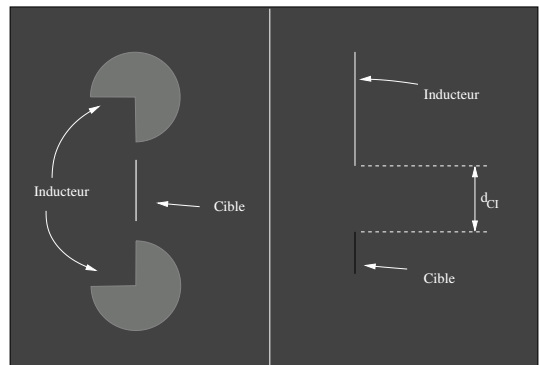


FIG. A.1 – Exemple de stimuli du type bord de surface (à gauche de l'image) et du type ligne (à droite de l'image). L'inducteur est indiqué ainsi que la cible.

férentes et si le fond est varié l'analyse peut être très différente, dépendante du type de variable utilisée.

A.2 Patch de Gabor

Le patch de Gabor a été introduit du fait qu'historiquement, à partir des années 1940, le système visuel a été analysé en utilisant la théorie de Fourier (Westheimer , 2001; Spillmann & Ehrenstein , 1996, pour une introduction historique aux deux méthodes de caractérisation du système visuel voir)).

Le patch de Gabor possède deux caractéristiques : une étendue spatiale limitée et une fréquence spatiale fixe. La première caractéristique a été introduite suite à la découverte du caractère local de la sensibilité d'un neurone (son champ récepteur ne couvre qu'une petite portion du champ visuel). La deuxième correspond au fait que le système visuel est considéré comme analysant les caractéristiques de l'espace de Fourier de l'image. A une sinusoïde correspond un Dirac dans l'espace de Fourier, donc une seule et unique caractéristique.

Ainsi, le patch de Gabor consiste en une sinusoïde dont l'amplitude est maximale au centre du patch et diminue de manière Gaussienne en s'en éloignant. Il peut être écrit, pour un patch avec une orientation préférentielle selon l'axe y :

$$Gabor_1(x, y) = A \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_1^2}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (\text{A.3})$$

où A représente l'amplitude maximale, (x, y) l'espace cartésien de l'image, σ est l'écart type de l'étendue spatiale et λ est la longueur d'onde spatiale en unités de x (si x est en degré λ l'est aussi). À une distance de σ du centre il reste 60.6% de luminosité, à 3σ du centre il reste 1.1% de luminosité. Il faut faire attention, car dans la littérature sur la psychophysique visuelle la définition du patch de Gabor utilisée n'a pas le facteur 2 devant σ^2 dans l'exponentiel. La formule obtenue est :

$$Gabor_2(x, y) = A \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma_2^2}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (\text{A.4})$$

et ainsi à une distance de σ du centre il reste 36.7% de luminosité, à 3σ du centre il reste 0.01% de luminosité. Il faut remarquer que le fait de ne pas avoir la même expression au dénominateur de l'exponentiel ne permet plus de comparer directement les distances en terme de facteur de σ . Pour passer de l'équation A.4 à A.3 il faut multiplier σ_2 par $\sqrt{2}$, donc les distances aussi. Des exemples de patches de Gabor (une cible avec deux inducteurs) sont présentés dans la figure A.3.

Le contraste d'un élément de Gabor est exprimé par la formule de Michelson :

$$C_M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (\text{A.5})$$

avec L_{max} et L_{min} les amplitudes maximales et minimales de la sinusoïde. Pour un élément

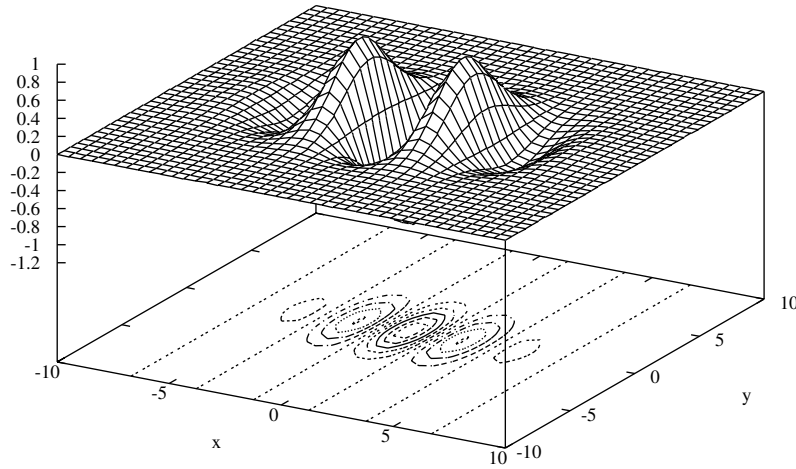


FIG. A.2 – Exemple d'une fonction D6 avec orientation préférentielle selon l'axe y . Les paramètres σ_x et σ_y ont pour valeur 2, l'amplitude A a pour valeur 5.

sinusoïdal, ceci revient au contraste de Weber,

$$C_W = \frac{L_{max} - L_{moyen}}{L_{moyen}}$$

où L_{moyen} est la luminance du fond sur lequel sont présentés les stimuli Gabor.

A.3 Stimulus D6

Ce stimulus consiste en une image qui représente la dérivée 6^{ème} selon l'orientation souhaitée, d'une Gaussienne bidimensionnelle. La Gaussienne bidimensionnelle peut être écrite sous la forme :

$$G(x, y) = A \times \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (\text{A.6})$$

qui dérivée six fois selon la direction x , donc une orientation préférentielle selon y , donne :

$$D6(x, y) = A \times \frac{-15\sigma_x^6 + 45\sigma_x^4 x^2 - 15\sigma_x^2 x^4 + x^6}{\sigma_x^{12}} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right). \quad (\text{A.7})$$

Un exemple de cette fonction est présenté dans la figure A.2.

A.4 Comparaison entre stimuli Gabor et stimuli lignes

Définition de la polarité d'un Gabor

En premier, nous devons définir la polarité des patches de Gabor. Nous nous référons à la polarité de la composante centrale ; soit le pic central est positif, soit il est négatif. Nous parlerons de patch de Gabor blanc pour ceux avec pic central positif, de patch de Gabor noir pour ceux avec pic central négatif.

Définition de la distance entre Gabor

En deuxième lieu, il apparaît que la mesure de la distance séparant deux éléments de Gabor se fait par rapport à leurs centres respectifs. Ceci implique la difficulté de comparaison avec les résultats où les mesures des distances sont effectuées en terme de bord à bord. Deux possibilités peuvent nous permettre cette comparaison :

1. la redéfinition de la distance entre les éléments de Gabor en terme de bord, ce qui implique de bien faire attention à ce que nous considérons comme le bord d'un élément de Gabor et d'en donner une définition claire ;
2. la redéfinition de la distance entre les éléments linéaires de nos expériences en utilisant leurs centres respectifs.

Il apparaît, après considération des deux possibilités, qu'aucune n'est meilleure. La définition centre à centre des lignes et des patches de Gabor est problématique car pour de très courtes distances les stimuli sont partiellement superposés. Mais définir un bord pour les Gabor est aussi problématique. Où considérer le bord en sachant que du point de vue de la perception visuelle, la taille d'un patch n'a pas l'air identique en fonction de son amplitude maximale (contraste des stimuli) et de la formule choisie !

En se basant sur nos perceptions, pour des éléments de Gabor tels que $\sigma = \lambda$ (équation A.4), nous avons décidé de considérer le bord à une distance de σ du centre, ce qui veut dire que pour une séparation de 2σ , deux éléments de Gabor ont l'air adjacent (voir figure A.3, distance 2λ). Ainsi il nous suffit de soustraire aux longueurs centre à centre cette valeur pour avoir une correspondance avec les expériences utilisant des stimuli lignes.

Aspects visuels

Quand des stimuli lignes sont utilisés, ils permettent de sélectionner une direction, une polarité (noire ou blanche) et une intensité. Ainsi les interactions entre polarités devraient être accessibles avec ce type de stimulation visuelle.

Quand des stimuli Gabor sont utilisés, ils ne sélectionnent que la direction d'orientation privilégiée du Gabor. La présence de différentes polarités successives dans le Gabor même ne permet pas de sélectionner directement une composante de ce paramètre car les interactions entre les deux seront beaucoup plus complexes. L'étendue spatiale du patch de Gabor peut aussi introduire une information de surface, non présente avec les stimuli lignes. Ainsi, les

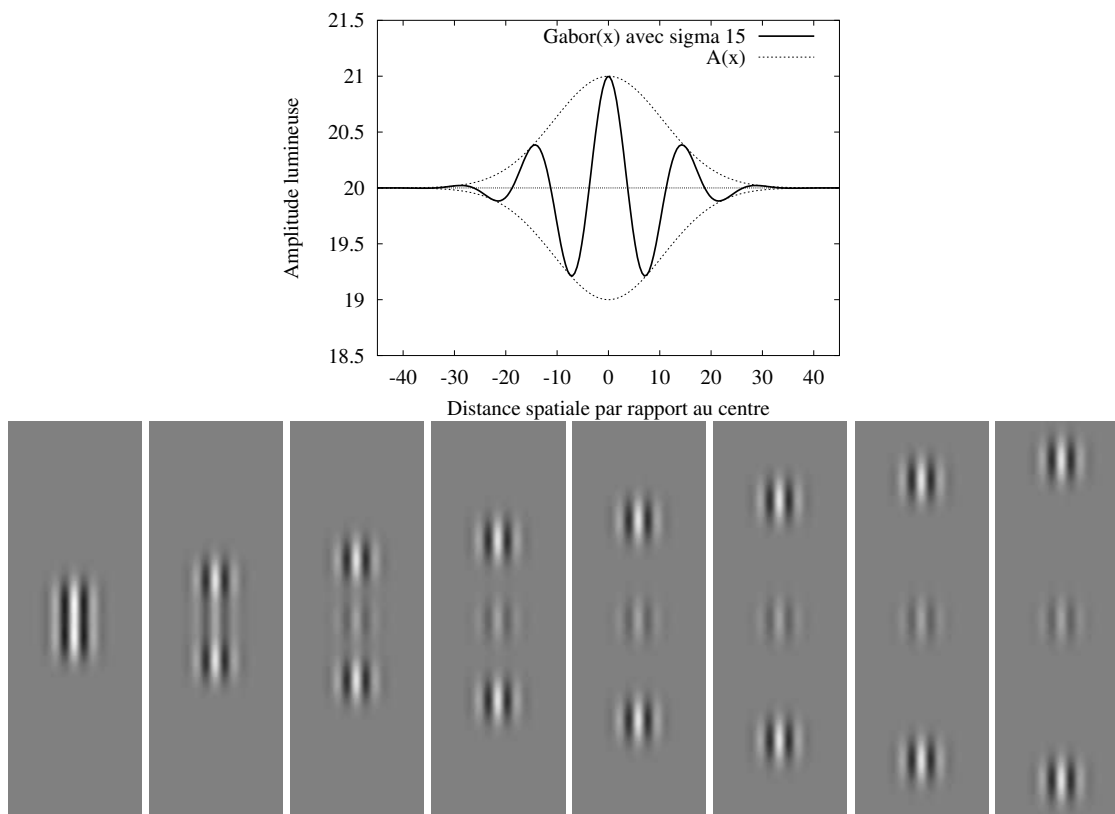


FIG. A.3 – Image du dessus : coupe transversale d'un élément de Gabor suivant la perpendiculaire à son orientation préférentielle pour visualiser les variations de son amplitude par rapport au fond (ici arbitrairement choisi à 20). Image du dessous : exemples de patches de Gabor utilisés dans une partie de la littérature sur la vision pour huit longueurs centre à centre différentes. De gauche à droite, $d_{CI} = 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda, 5\lambda, 6\lambda, 7\lambda$ et 8λ . L'élément cible a pour amplitude 0,3, les inducteurs 0,8. L'équation A.4 est utilisée.

interactions avec des patches de Gabor semblent impliquer plus de critère que ne le souhaiterait l'expérimentateur.

Largeur des lignes

La largeur (ou épaisseur) des lignes est importante car à partir d'une certaine valeur le stimulus va commencer à impliquer un élément de surface. Le problème se pose aussi pour les patches de Gabor car pour les comparer aux stimuli lignes, il faut définir l'équivalent de la largeur chez les stimuli lignes. Nous utilisons pour largeur la moitié de la longueur d'onde ($\lambda/2$) du patch puisque cette valeur correspond à la largeur d'une ligne noire ou blanche dans le patch.

A.5 Lois psychophysiques

Ces lois ont été obtenues pour des conditions expérimentales bien définies. Certaines concernent la variation temporelle du stimulus, d'autre la variation de la luminance ambiante, ou encore la taille du stimulus. Des modèles théoriques (voir van Hateren , 1993) permettent de reproduire les variations observées pour chaque loi. Celles qui sont présentées ne concernent

que le seuil de détection en intensité lumineuse du sujet.

1. Loi de Weber : le seuil de détection d'un stimulus cible (C_c), encore appelé incrément minimal pour détecter la cible, varie de manière linéaire avec l'augmentation de la luminance du fond sur lequel est présenté le stimulus ; $C_c = k_1 \cdot L_f$ avec L_f la luminance du fond et k_1 une constante.
2. Loi de de Vries-Rose : le seuil de détection d'un stimulus cible (C_c) varie de manière non linéaire avec l'augmentation de la luminance du fond sur lequel est présenté le stimulus ; variation approximativement en racine carrée de la luminance du fond : $C_c = k_2 \cdot \sqrt{L_f} = k_2 \cdot L_f^{0,5}$ avec L_f la luminance du fond et k_2 une constante.
3. Loi de Ricco : pour des stimuli de petites surfaces, le seuil de détection (C_c) varie de manière inversement proportionnelle à la surface du stimulus ; $C_c = k_3/S_s$ avec S_s la surface du stimulus et k_3 une constante.
4. Loi de Piper : pour un stimulus de grande surface, le seuil de détection (C_c) varie de manière proportionnelle à la racine carrée de la surface du stimulus ; $C_c = k_4 \cdot \sqrt{S_s}$ avec S_s la surface du stimulus et k_4 une constante.
5. Loi de Bloch : pour de courts temps de présentation du stimulus, le seuil de détection (C_c) varie de manière inversement proportionnelle au temps de présentation du stimulus ; $C_c = k_5/t_s$ avec t_s le temps de présentation du stimulus et k_5 une constante.

La transition entre la loi de de Vries-Rose et la loi de Weber se fait de manière continue (voir Shapley and Enroth-Cugell, 1984, "§2.2 The cone system"). Barlow (1957) a montré que la loi de de Vries-Rose peut être considérée comme de la discrimination pour des niveaux faibles de l'intensité lumineuse du fond. La figure A.4 reprend sa figure 2, où une large gamme de luminance du fond est utilisée. La transition entre les deux régimes, variation en racine carrée et variation linéaire, ne se fait pas pour les mêmes valeurs d'intensité du fond. Pour la plus petite cible avec le plus court temps de présentation (temps : 7,6 ms ; surface : 0,0077°²), les points entre 10⁴ et 10⁷ sont parallèles à la courbe de de Vries-Rose. Pour la cible avec la plus grande surface et le temps de présentation le plus long (temps : 940 ms ; surface : 19°²), les points entre 10⁴ et 10⁷ se trouvent dans un régime intermédiaire entre les deux lois. Pour une luminance du fond suffisamment forte, la loi de Weber est obtenue (voir les deux derniers points de chaque courbe).

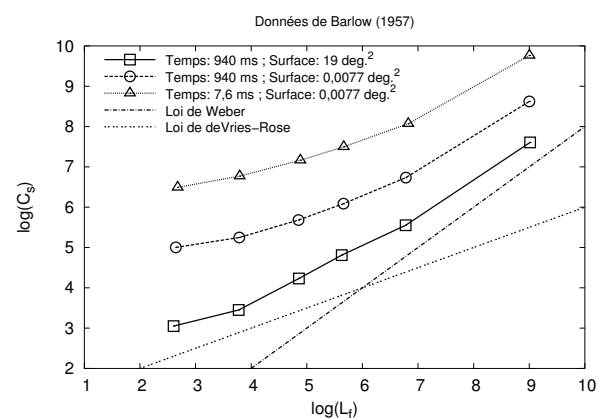


FIG. A.4 – Seuil de détection de la cible (C_c) en fonction de la luminance du fond pour deux surfaces de cible (0,0077 degrés² et 19 degrés²) et deux temps de présentation de la cible (7,6 ms et 940 ms). Les valeurs sont présentées en logarithmes décimaux. Les deux lois qui correspondent à ce type de mesure sont présentées sur le graphique. Données de Barlow (1957) (sa figure 2).

Annexe B

La fonction psychométrique

La fonction psychométrique est utilisée pour modéliser le comportement d'un sujet dans une condition expérimentale précise. Cette modélisation suppose l'existence de deux états extrêmes entre lesquels le sujet peut choisir. Ces deux extrêmes peuvent être notés {0} et {1}.

Par exemple, dans les tâches de détection visuelle, le sujet doit décider si oui ou non il a vu l'objet sur lequel son attention a été portée. Ainsi l'état {0} sera l'état où le sujet répondra tout le temps qu'il n'a pas vu, et l'état {1} l'état où il répondra qu'il voit tout le temps. La transition entre ces deux états est supposée être continue et strictement croissante avec l'augmentation du paramètre expérimental varié (par exemple l'intensité lumineuse du stimulus). On peut déterminer un seuil du sujet à partir duquel il a par exemple une probabilité de 0,5 de décider entre les deux extrêmes. De manière générale, ce seuil est toujours pris au milieu des deux états extrêmes, c'est-à-dire à :

$$\frac{1}{2} (\{1\} - \{0\}) \quad (\text{B.1})$$

avec les deux états extrêmes dépendant de la procédure expérimentale utilisée. Le seuil étant arbitrairement choisi à cette valeur de probabilité 0,5, certaines études utilisent d'autres valeurs de probabilité pour déterminer le seuil. Ici, nous ne considérerons que le seuil au milieu des deux états extrêmes.

Pour les procédures expérimentales où une réponse oui ou non est demandée, où un choix entre deux états possibles est demandé, on associe le nombre de bonnes réponses du sujet à la transition. Ainsi, pour des procédures du type OUI/NON, où il lui est demandé de répondre s'il a vu ou non le stimulus, on associe à chaque valeur du paramètre expérimental la proportion de bonnes réponses du sujet. Elle est égale au nombre de bonnes réponses divisées par le nombre de présentations du stimulus (0 s'il ne voit jamais l'objet, 1 s'il le voit à chaque présentation). Pour les procédures à choix forcé à deux alternatives (temporelles ou spatiales), si le sujet ne sait pas choisir entre les deux possibilités il répondra au hasard et l'état {0} aura ainsi une proportion de bonnes réponses égale à 0,5, et l'état {1} une proportion de bonnes réponses égale à 1.

Il existe deux méthodes pour déterminer le seuil de transition :

- les méthodes adaptatives, qui font varier les intensités du stimulus pendant la procédure

de mesure en fonction des réponses du sujet, et font converger le sujet vers une valeur du paramètre expérimental qui donne une proportion de bonnes réponses fixe ;

- les méthodes à stimuli constants, qui présentent un nombre fixe de stimuli à paramètres légèrement différents pour déterminer la zone de transition, et ensuite en extraire le seuil avec une méthode d'ajustement.

Nous nous intéressons aux méthodes à stimuli constants à choix forcé à deux alternatives, qui sont utilisées dans nos expériences. Pour déterminer le seuil de transition, il est nécessaire d'effectuer un certain nombre de mesures pour des valeurs différentes du paramètre expérimental. Dans le cadre des études visuelles de détection d'un stimulus, ce sont plusieurs intensités du stimulus qui sont présentées, chacune répétées un certain nombre de fois, et la proportion de bonnes réponses du sujet est calculée pour chaque niveau d'intensité lumineuse du stimulus. Ces intensités sont choisies de manière à ce qu'elles permettent de déterminer la zone de transition, avec la réponse du sujet pour la plus faible des intensités étant généralement proche de l'état {0}, et la réponse du sujet pour la plus forte des intensités étant généralement proche de l'état {1}.

La figure B.1 présente un exemple de la proportion de bonnes réponses d'un sujet pour cinq intensités lumineuses du stimulus. Chaque intensité a été présentée 40 fois au sujet, et le nombre de bonnes réponses a été divisé par 40. Les proportions varient entre 0,5 et 1. Pour déterminer exactement le point où la proportion est de 0,75, c'est à dire au milieu des deux extrêmes possibles, il est nécessaire d'ajuster les données avec une fonction théorique. Celle-ci est considérée, à juste titre ou non, représenter la transition théorique et probabiliste entre les deux extrêmes. Une fois les paramètres de la fonction connus, il est aisé de calculer la luminance du stimulus qui devrait donner 0,75 de réponses correctes du sujet.

Pour faire ces expériences, il est supposé que la courbe ne varie pas dans le temps, ou que ses variations temporelles sont lentes par rapport au temps de mesure. Ainsi, on peut considérer que pour chaque niveau de luminance du stimulus, la distribution des réponses du sujet devrait suivre la distribution binomiale attendue dans ce cas avec une proportion de bonnes réponses théorique fixe (entre 0,5 et 1). L'équation B.2 permet de calculer la probabilité d'obtenir k bonnes réponses parmi n essais, en supposant une proportion de bonnes réponses théorique de $P_{BR,theor.}$. La figure B.2 présente quatre graphiques, chacun correspondant à des nombres différents de présentations ($n = 20, 40, 60, 100$) de chaque niveau de luminance du stimulus (ici 5 niveaux). Sur chacun sont présentées les cinq distributions attendues si l'on suppose la proportion de bonnes réponses théorique donnée dans la légende. En pratique, on s'attend à ce que la

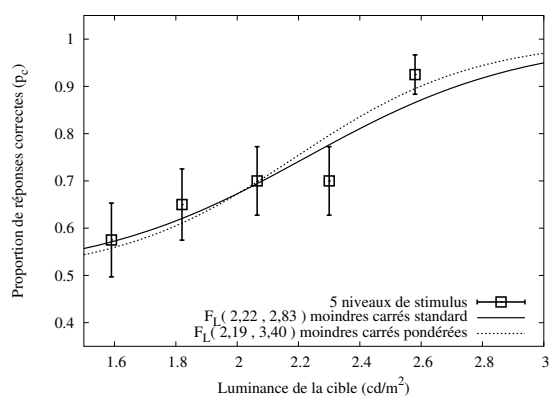


FIG. B.1 – Exemple de données brutes d'un sujet. La proportion de bonnes réponses du sujet est présentée en fonction du niveau de luminance du stimulus.

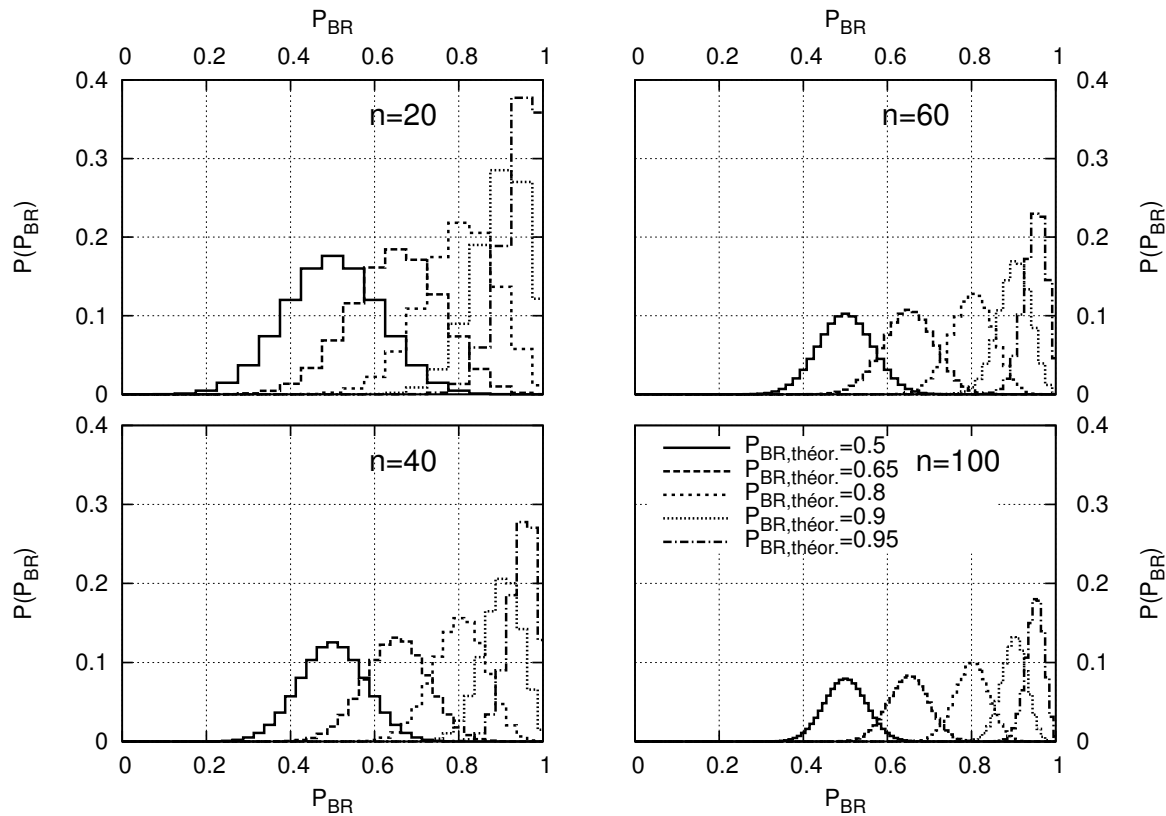


FIG. B.2 – Chaque graphique présente la probabilité (en ordonnée) d’obtenir la proportion de bonnes réponses (en abscisse) étant donné le nombre d’essais (n) et la proportion de bonnes réponses théorique attendue ($P_{BR,theor.}$). Exemple de distributions binomiales pour quatre nombres de présentations de chaque niveau de luminance du stimulus ($n = 20, 40, 60, 100$) et cinq niveaux de luminance du stimulus. Chacun des niveaux devrait donner théoriquement une proportion de bonnes réponses ($P_{BR,theor.}$) de 0,5, 0,65, 0,8, 0,9 et 0,95 dans l’ordre croissant des luminances du stimulus. La légende des différentes distributions est présentée dans le graphique en bas à droite.

proportion de bonnes réponses du sujet augmente avec l’intensité du stimulus. Il est évident que moins d’essais seront effectués (n faible), plus grande sera la probabilité que deux niveaux de luminance du stimulus successifs produisent des valeurs de proportion de bonnes réponses qui ne montrent pas cet effet. Si une courbe théorique doit être ajustée à ces proportions, le nombre d’essais devra jouer un rôle important dans l’estimation des écart-types des paramètres.

$$P(n, k) = \frac{n!}{(n-k)!k!} \cdot (P_{BR,theor.})^k \cdot (1 - P_{BR,theor.})^{n-k} \quad (\text{B.2})$$

B.1 Les fonctions psychométriques théoriques

Plusieurs types de fonctions sont utilisés dans la littérature psychophysique pour extraire le seuil de transition. Le seuil est noté x_{75} et ces différentes fonctions théoriques sont présentées ci-dessous. Nous supposons des niveaux extrêmes de proportion de bonnes réponses de 0 et 1.

Fonction Gaussienne cumulée

La première est la fonction Gaussienne cumulée. Elle correspond à une densité de probabilité de type Gaussien, centrée au seuil de transition de 0,75. La fonction qui est ajustée aux données est la cumulée de la densité, correspondant à l'intégrale :

$$P_{BR}(x) = \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(y - x_{75})^2}{2\sigma^2}\right) dy \quad (\text{B.3})$$

où x représente la luminance du stimulus, et σ l'écart-type de la Gaussienne. La méthode d'ajustement utilisant cette fonction est appelée la méthode des probits.

Fonction logistique

Cette fonction est utilisée principalement pour son caractère symétrique. Il se trouve aussi qu'elle permet de faire une transformation logarithmique des données ce qui simplifie considérablement l'extraction du seuil (voir la méthode logit). La fonction est :

$$P_{BR}(x) = \frac{1}{1 + e^{-b(x-a)}} \quad (\text{B.4})$$

où x représente la luminance du stimulus et (a, b) sont les deux paramètres de la fonction.

Fonction Weibull et apparentées

Cette fonction provient du domaine de la Mécanique. Elle est introduite en psychophysique pour des raisons théoriques. Elle s'écrit :

$$P_{BR}(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{B.5})$$

où x représente la luminance du stimulus et (α, β) sont les deux paramètres de la fonction. Elle peut être écrite sous la forme proposée par Quick :

$$P_{BR}(x) = 1 - 2^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{B.6})$$

ce qui simplifie l'extraction du seuil de transition, puisqu'il se trouve être exactement α .

Méthode logit

La méthode du logit consiste à linéariser les données. Les proportions de bonnes réponses sont transformées par :

$$\text{logit}(x) = \ln\left(\frac{1 - P_{BR}(x)}{P_{BR}(x)}\right) \quad (\text{B.7})$$

avec x la luminance du stimulus. C'est exactement la transformée logarithmique de la fonction logistique. De cette manière, la valeur $\text{logit}(x)$ est supposée varier linéairement avec l'intensité du stimulus. En pratique, elle ne s'avère utilisable que pour des proportions de bonnes réponses

du sujet entre 0,05 et 0,95 (voir Bonnet , 1986). De plus, elle n'est pas valable quand les deux extrêmes ne sont pas 0 et 1. S'ils deviennent 0,5 et 1, la transformation devrait être :

$$\text{logit}(x) = \ln \left(\frac{1 - P_{BR}(x)}{P_{BR}(x) - 1/2} \right) \quad (\text{B.8})$$

et de nouveau les valeurs P_{BR} utilisables avec cette transformation doivent être entre 0,55 et 0,95. Cette dernière transformation est des plus problématiques car en pratique, pour les procédures 2AFC, il arrive souvent que les valeurs du stimulus proche de l'état {0} fournissent des proportions inférieures à 0,5 et le calcul n'est pas faisable pour ces valeurs.

B.2 Fonctions utilisées et ajustement

La brève présentation en introduction de cette annexe a montré que la méthode des stimuli constants, avec la procédure choix forcé à deux alternatives (sigle anglais 2AFC), peut produire des mesures de proportions de bonnes réponses en dessous de 0,5. La méthode du logit est déconseillée, surtout avec les faibles nombres d'essais que nous considérons avoir dans nos expériences. La fonction psychométrique, pour la procédure 2AFC, s'écrit :

$$\Psi(x; \gamma, \lambda, \underline{\theta}) = \gamma + (1 - \gamma - \lambda)F(x; \underline{\theta}) \quad (\text{B.9})$$

avec $F(x; \underline{\theta})$ la fonction théorique que l'expérimentateur utilise, $\gamma = 0,5$ est la borne inférieure et $\lambda = 0$ permet de fixer la borne supérieure à 1. Nous nous intéressons aux deux fonctions Weibull et logistique. Pour ajuster ces fonctions aux données brutes (P_{BR} en fonction du niveau de luminance du stimulus), deux méthodes d'ajustement sont utilisables. La première est la méthode du maximum de vraisemblance, la deuxième est la méthode des moindres carrés pondérés. Les deux impliquent un ajustement non linéaire (voir Press et al., 1997, pour une présentation des deux méthodes et leur implémentations computationnelles). Nous avons choisi la méthode des moindres carrés pondérés, utilisant la routine de minimisation de Levenberg-Marquardt. On effectue la minimisation de la somme :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Psi(x_i) - p_i)^2}{e_i} \quad (\text{B.10})$$

avec les erreurs de mesure e_i utilisées comme poids pour la proportion p_i ; p_i est la proportion de bonnes réponses du sujet au niveau de stimulus x_i , et k est le nombre de niveaux de luminance du stimulus utilisé pour l'estimation de la courbe psychométrique. Nous avons introduit les e_i comme les écart-types de la distribution binomiale de moyenne p_i ($e_i = \sqrt{p_i(1 - p_i)/n_i}$ avec n_i le nombre d'essais pour le niveau de stimulus x_i). En pratique, les points qui sont proches d'une proportion de bonnes réponses de 1 vont donner des poids e_i plus petits. Si la proportion est exactement de 1, le poids est nul et le calcul de l'équation B.10 n'est pas faisable (on divise par zéro). Dans les quelques fichiers où des proportions égales à 1 sont présentes, les poids

de ces proportions étaient fixés à un dixième du poids pour une proportion équivalente de 0,5 ($0,1 \times \sqrt{0,5(1-0,5)/n_i}$).

Une fois les paramètres de la fonction qui minimise cette somme déterminés, il suffit d'extraire le seuil de transition, que nous appellerons plus simplement le seuil, et la pente de la courbe au seuil.

B.3 Seuil et pente à 75% de réponses correctes

Pour calculer le seuil, x_{75} , et la pente, Ψ'_{75} , à 75% de réponses correctes, nous utilisons $\Psi(x_{75}) = \gamma + (1 - \gamma - \lambda)F(x_{75}; \underline{\theta}) = 0,75$. Ceci donne, pour la fonction logistique :

$$x_{75} = a \quad (\text{B.11})$$

$$\Psi'_{75} = \frac{b}{8} \quad (\text{B.12})$$

et pour la fonction Weibull :

$$x_{75} = \alpha (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (\text{B.13})$$

$$\Psi'_{75} = \frac{\beta (\ln 2)^{\frac{\beta-1}{\beta}}}{4\alpha}. \quad (\text{B.14})$$

Ces équations permettent d'obtenir les deux paramètres importants du sujet. La méthode de Levenberg-Marquardt fournit des estimations des écart-types de chaque paramètre. Nous en déduisons les écart-types associés aux seuil et pente dans la section suivante.

B.4 Écart-types dans le cadre du calcul asymptotique

Les écart-types (ETs) sont calculés à partir d'une différentielle totale. Pour la fonction logistique, les ETs des deux paramètres x_{75} et Ψ'_{75} sont obtenus directement.

Pour la fonction Weibull, la transformation, moins simple, est présentée. À partir de l'équation B.13, nous obtenons :

$$dx_{75} = \frac{\partial x_{75}}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial x_{75}}{\partial \beta} d\beta \quad (\text{B.15})$$

$$(dx_{75})^2 = \left(\frac{\partial x_{75}}{\partial \alpha} \right)^2 (d\alpha)^2 + \left(\frac{\partial x_{75}}{\partial \beta} \right)^2 (d\beta)^2 + 2 \frac{\partial x_{75}}{\partial \alpha} \frac{\partial x_{75}}{\partial \beta} d\alpha d\beta \quad (\text{B.16})$$

avec les dérivées partielles suivantes :

$$\frac{\partial x_{75}}{\partial \alpha} = (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$= \frac{x_{75}}{\alpha} \quad (\text{B.17})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_{75}}{\partial \beta} &= \frac{\alpha (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \ln(\ln 2)}{\beta^2} \\ &= x_{75} \frac{\ln(\ln 2)}{\beta^2}. \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

En utilisant $\sigma_\alpha^2 \equiv d\alpha^2$, $\sigma_\beta^2 \equiv d\beta^2$, $\sigma(x_{75})^2 \equiv dx_{75}^2$ et $\text{cov}(\alpha, \beta) \equiv d\alpha d\beta$, l'équation B.16 est transformée en :

$$\begin{aligned} \sigma_{x_{75}}^2 &= \left(\frac{\partial x_{75}}{\partial \alpha} \right)^2 (\sigma_\alpha)^2 + \left(\frac{\partial x_{75}}{\partial \beta} \right)^2 (\sigma_\beta)^2 + 2 \frac{\partial x_{75}}{\partial \alpha} \frac{\partial x_{75}}{\partial \beta} \text{cov}(\alpha, \beta) \\ \left(\frac{\sigma_{x_{75}}}{x_{75}} \right)^2 &= \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\ln(\ln 2)}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta} \right)^2 + 2 \frac{\ln(\ln 2)}{\beta} \frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \frac{\sigma_\beta}{\beta} \text{cor}(\alpha, \beta) \end{aligned} \quad (\text{B.19})$$

où $\text{cor}()$ est la corrélation entre les deux paramètres. Pour la pente, à partir de l'équation B.14, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \sigma_{\Psi'_{75}}^2 &= \left(\frac{\partial \Psi'_{75}}{\partial \alpha} \right)^2 (\sigma_\alpha)^2 + \left(\frac{\partial \Psi'_{75}}{\partial \beta} \right)^2 (\sigma_\beta)^2 + 2 \frac{\partial \Psi'_{75}}{\partial \alpha} \frac{\partial \Psi'_{75}}{\partial \beta} \text{cov}(\alpha, \beta) \\ \left(\frac{\sigma_{\Psi'_{75}}}{\Psi'_{75}} \right)^2 &= \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \right)^2 + \left(1 + \frac{\ln(\ln 2)}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta} \right)^2 \\ &\quad - 2 \left(1 + \frac{\ln(\ln 2)}{\beta} \right) \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \right) \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta} \right) \text{cor}(\alpha, \beta) \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

avec les dérivées partielles suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi'_{75}}{\partial \alpha} &= -\frac{\beta (\ln 2)^{\frac{\beta-1}{\beta}}}{4\alpha^2} \\ &= -\frac{\Psi'_{75}}{\alpha} \end{aligned} \quad (\text{B.21})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi'_{75}}{\partial \beta} &= \frac{1}{4\alpha} (\ln 2)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \left(1 + \frac{\ln(\ln 2)}{\beta} \right) \\ &= \Psi'_{75} \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{\ln(\ln 2)}{\beta} \right). \end{aligned} \quad (\text{B.22})$$

B.5 Algorithme bootstrap

Pour l'algorithme bootstrap, nous avons utilisé la méthode de minimisation de Levenberg-Marquardt. Nous considérons comme distribution autour de la moyenne des données la distribution binomiale avec moyenne $\Psi(x_i)$ ou p_i (la proportion de réponses correctes pour le niveau de stimulus x_i). L'algorithme est implémenté comme suit :

1. Les données sont ajustées avec la fonction psychométrique choisie, et les paramètres seuil

et pentes sont calculés.

2. Un nouveau jeu de données simulées est généré ; pour chaque niveau de stimulus utilisé dans l'expérience, une nouvelle valeur expérimentale simulée est générée, soit :
 - (a) à partir des données brutes : dans ce cas, si le nombre de réponses correctes au niveau de stimulus x_i est par exemple 84%, un nouveau pourcentage de réponses correctes, hypothétique, est généré à partir d'une distribution binomiale avec moyenne 0,84 pour le nombre d'essais donné (*bootstrap non paramétrique*) ;
 - (b) ou soit à partir de la fonction psychométrique ajustée ; dans ce cas, la moyenne de la distribution binomiale, pour générer le nouveau pourcentage de réponses correctes hypothétique, n'est pas le pourcentage obtenu dans l'expérience, mais celui obtenu à partir de la fonction psychométrique ajustée $\Psi(x)$ sur les données brutes (*bootstrap paramétrique*).
3. Les données simulées sont ajustées avec la méthode de Levenberg-Marquardt .
4. Ceci est répété M fois, et ainsi M paramètres simulés sont générés.

Cette méthode permet un calcul rapide des distributions des paramètres autour de leur moyenne. Nous avons généré 10 000 simulations pour chaque fichier analysé. Les paramètres obtenus sont analysés et les moyennes et écart-types calculés.

Annexe C

Analyse de la variance pour la cinquième expérience ¹

L'expérience 3.6 a utilisé un plan expérimental où trois facteurs étaient étudiés. Ces facteurs sont le *sujet*, la *luminance du fond* (encore appelé facteur *fond*), et la *condition expérimentale*. Le facteur *sujet* est associé à une variable aléatoire qui suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type σ . Les deux autres facteurs sont considérés être associés à des variables qui produisent un effet linéaire sur les réponses des sujets. L'amplitude de facilitation/masquage mesurée pour chaque condition expérimentale, luminance du fond et sujet est la valeur dépendante du modèle, que l'on notera Y_{ijk} . Ainsi, le modèle linéaire généralisé qui peut être associé au plan expérimental est :

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + b_j + c_k + d_{jk} + F_{ij} + G_{ik} + E_{ijk} \quad (\text{C.1})$$

où les indices i, j, k correspondent aux trois facteurs présents dans l'expérience (respectivement *sujet*, *fond* et *condition expérimentale*), et les différents termes de l'équation correspondent à :

- μ est la constante additive ;
- A_i est la variable aléatoire pour le facteur aléatoire *sujet*, supposée suivre une loi normale de moyenne zéro et d'écart-type $\sigma : N(0, \sigma)$;
- b_j est la variable pour le facteur *fond*, supposée avoir un effet linéaire ; deux niveaux du fond sont utilisés, b_1 et b_2 , et si l'hypothèse nulle est validée, $b_1 = b_2$, aucun effet du fond ne sera présent ;
- c_k est la variable pour le facteur *condition expérimentale*, supposée avoir un effet linéaire sur les réponses ; quatre niveaux de ce facteur sont utilisés, c_1, c_2, c_3, c_4 , et si l'hypothèse nulle est validée, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4$, aucun effet de la condition expérimentale ne sera présent ;
- d_{jk} est le terme d'interaction entre les facteurs *fond* et *condition expérimentale* ;

¹Je remercie Madame E.Khalili, du Centre d'Etudes Statistiques de l'ULP, pour sa cordiale et généreuse aide sur les définitions et l'utilisation des statistiques. Je remercie Monsieur S.Darnet, ami et collègue doctorant, pour sa disponibilité et son ouverture d'esprit.

- F_{ij} est le terme d'interaction entre les facteurs *sujet* et *fond* ;
- G_{ik} est le terme d'interaction entre les facteurs *sujet* et *condition expérimentale* ;
- E_{ijk} est le terme d'erreur.

Les trois termes d'interactions sont utilisés dans cette équation car l'expérience "Caractérisation du régime longue distance" (section 3.3) a montré une possible interaction entre les trois facteurs de l'expérience. Une analyse de la variance utilisant ce modèle a été effectuée en premier pour vérifier l'existence d'une interaction deux à deux entre les trois facteurs expérimentaux (voir la section 3.6). Le modèle est ensuite simplifié en enlevant les termes d'interactions qui ne montrent pas d'effets combinés de deux facteurs sur les réponses Y_{ijk} (les amplitudes de facilitation/masquage) des sujets. Ceci a permis d'effectuer les comparaisons multiples par le test de Tukey sur les quatre niveaux du facteur *condition expérimentale*, car il s'est avéré qu'il n'interagit pas avec le facteur aléatoire *sujet*. Si une telle interaction était présente, il n'aurait pas été possible d'effectuer les comparaisons. Effectivement, dans les réponses Y_{ijk} une fluctuation aléatoire des réponses aurait été présente à cause de l'interaction avec le facteur *sujet*, dans l'étude du rôle du facteur *condition expérimentale*.

Annexe D

Listing du code source

Listing du programme en langage C, pour le réseau correspondant aux simulations du modèle total de l'aire V1 : Rétine-Bloc1-Bloc2.

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
5 #include <time.h>
#define PI 3.14159265358979
/* ***** NOMBRES DE NEURONES, TAILLES etc... ***** */
#define NB_NEUR_X 30 // NB neurones (X = horizontale)
#define NB_NEUR_Y 60 // NB neurones (Y = verticale)
10 #define NB_K 2 // Nb d'orientation de l'espace codée
#define STOP_dv 1e-4 // Critere de stabilisation du réseau
/* ***** CONSTANTES DE TEMPS ***** */
#define DELTA_t 0.1 // temps d'intégration pour l'équ. diff.
#define delta_v 1.25 // cst de temps LGN
15 #define delta_c 0.25 // cst de temps Couche 6 (Xijk) et 4 (Yijk)
#define delta_m 0.01875 // cst de temps inter-neurones mijk (couche 4)
#define delta_z 0.0125 // cst de temps couche 2/3
#define delta_s 2.5 // cst de temps inter-neurones sijk couche 2/3
/* ***** SIGMAS, COEFFICIENTS ETC... ***** */
20 #define sigma1 1.0 // sigma gaussienne périphérie DOG Rétine
#define sigma2 0.5 // sigma gaussienne Sijk (R et L)
#define gamma 10.0 // coeff. pour les Sijk
#define omega 1.0 // coeff. pour les Sijk (Williamson)
#define alpha 0.5 // coeff. pour les Xijk (Couche 6)
25 #define phi 2.0 // coeff. pour les Xijk (Couche 2/3 vers 6)
#define C_1 1.5 // coeff. pour les Aij
#define C_2 0.075 // coeff. pour les Bij
#define eta_plus 2.1 // coeff. pour les Yijk
#define eta_moins 1.5 // coeff. pour les mijk
30 #define lambda 1.5 // coeff. pour les Zijl
#define psi 0.5 // coeff. pour les Zijl (couche 2/3 interneurons)
#define Gamma_seuil 0.2 // Seuil pour la fonction F(Zijl, Gamma)
#define sigmaHx 0.3 // sigma H() étroit
#define sigmaHy 2.0 // sigma H() large
35 #define sigmaW11x 0.75 // sigma W()l->l étroit
#define sigmaW11y 3.0 // sigma W()l->l large
#define sigmaW12 0.75 // sigma W()l->2 identique dans les deux directions

/* ***** DECLARATION DES FONCTIONS ***** */
40 #define Max(a,b) ( a > b ? a : b )
void stabilise( float uplus[], float umoins[] );
void runge_kutta4( float *vplus, float *vmoins, float *vplustemp,
float *vmoinstemp, float *uplus, float *umoins, float *Sijk,
float *Sijktemp, float *Xijk, float *Xijktemp, float *Aij, float *Bij,
45 float *Yijk, float *Yijktemp, float *Zijl, float *Zijltemp, float *mijk,
float *mijktemp, float *ISijl, float *ISijltemp);
float fonction_LGN( float vlg, float u, float Aij, float Bij );
float fonction_Xijk( float S, float Z );
float fonction_Yijk( float S, float Xijk, float f);
```

```

50 float fonction_Zijl( float Z, float YtoZ, float HtoZ, float T);
float fonction_mijk( float m, float X, float f );
float fonction_ISijl( float IS, float H, float T );
float calcul_H( float *Zijl, int i, int j, int l);
float calcul_T_Zijl( float *Zijl, int i, int j, int l );
55 float calcul_T_ISijl( float *ISijl, int i, int j, int l );
float calcul_f_W( float *mijk, int i, int j, int k, float Ampl);
float calcul_Bij( float Xijk[], int i, int j, int k);
void calcul_S( float vplus [], float vmoins [], float Sijk [],
               int i, int j, int k );
60 void calcul_u( float uplus [], float umoins [], float RETINE []);
void calcul_retine(float RETINE[]);
float gauss( float dx, float dy, float sigma);
float gauss2( float dx, float dy, float sigmax, float sigmay, float A);
float expdecr( float dx, float dy, float sigmax, float sigmay, float A);
65 float gauss3( float dx, float dy, float sigma );
void affich( float temp []);

/* *****
PROGRAMME PRINCIPAL
***** */
70 int main( void )
{
float temps_utilisation;
float RETINE[NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y];
75 float uplus [NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y], umoins[NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y];
srand( (int) time(NULL) ); // initialise la graine sur l'heure...
calcul_retine( RETINE);
calcul_u( uplus, umoins, RETINE);
printf("RETINE[i,j]\n");
80 affich( RETINE );
printf("\n\n");
stabilise( uplus, umoins );
temps_utilisation = (float) clock() / CLOCKS_PER_SEC;
printf("Temps_CPU_pour_faire_un_reseau_%dx%d:_%f\n", \
85 NB_NEUR_X, NB_NEUR_Y, temps_utilisation);
return 0;
}

/* *****
Calcul de l'image sur la retine
***** */
90 void calcul_retine(float RETINE[])
{
FILE *f;
95 char temp[20];
int i, xcib, ycib, lcib, xind, yind, lind;
float acib, aind, afond;
if( ( f=fopen("rezo_params.dat", "r") ) == NULL ){
printf("Probleme_ouverture_du_fichier_:_REZO_PARAMS.DAT\n");
100 exit(1);
}
fscanf(f, "%s_%d_%d_%d_%f", temp, &xcib, &ycib, &lcib, &acib);
fscanf(f, "%s_%d_%d_%d_%f", temp, &xind, &yind, &lind, &aind);
fscanf(f, "%s_%f", temp, &afond);
105 acib /= 100.0;
aind /= 100.0;
afond /= 10.0;
fclose(f);
for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y ; i++){
110 RETINE[i] = afond; // valeur constante du fond
}
for( i = yind ; i < (yind+lind) ; i++){ // place INDUCTEUR
RETINE[i*NB_NEUR_X + (xind)] = aind;
}
115 for( i = ycib ; i < (ycib+lcib) ; i++){ // place CIBLE
RETINE[i*NB_NEUR_X + (xcib)] = acib;
}
return ;
}
120

/* *****
Stabilisation de l'activité du reseau
***** */

```



```

void stabilise( float uplus[], float umoins[] )
125 {
    FILE *f;
    char temp[20];
    int xcib, ycib, lcib, xind, yind, lind;
    float acib, aind, afond;
130 int NB_ITER=0, i, j, k, l;
    float dv = 1e5, t = 0.0; // t=temps d'intégration en unité des EquaDiffs
    int periode = 5; // pour verifier la stabilité du réseau
    float *vplus, *vmoins, *vplustemp, *vmoinstemp; // reponse CGL
    float *Sijk, *Sijktemp; // Les entrees de la couche 4
135 float *Xijk, *Xijktemp; // Couche 6
    float *Aij, *Bij; // Coefficients feedback vers CGL
    float *Yijk, *Yijktemp; // Couche 4
    float *Zijl, *Zijltemp; // Couche 2/3
    float *mijk, *mijktemp; // Interneurones couche 4
140 float *ISijl, *ISijltemp; // Interneurones couche 2/3
    float *vplusref, *vmoinsref, *mijkref, *Zijlref, *ISijlref;
    vplus = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y, sizeof(float));
    vmoins = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y, sizeof(float));
    Sijk = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
145 Xijk = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
    Aij = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y, sizeof(float));
    Bij = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y, sizeof(float));
    Yijk = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
    Zijl = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
150 mijk = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
    ISijl = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));

    /** Matrices temporaires pour l integration */
    vplustemp = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y, sizeof(float));
155 vmoinstemp = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y, sizeof(float));
    Sijktemp = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
    Xijktemp = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
    Yijktemp = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
    Zijltemp = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
160 mijktemp = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
    ISijltemp = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));

    /** Matrices temporaires pour la reference */
    vplusref = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y, sizeof(float));
    vmoinsref = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y, sizeof(float));
165 Zijlref = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
    mijkref = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
    ISijlref = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
    if ( (f=fopen("rezo_params.dat","r")) == NULL ){
        printf("Probleme_ouverture_du_fichier_:_REZO_PARAMS.DAT\n");
170 exit(1);
    }
    fscanf(f, "%s_d_d_d_d_f", temp, &xcib, &ycib, &lcib, &acib);
    fscanf(f, "%s_d_d_d_d_f", temp, &xind, &yind, &lind, &aind);
    fscanf(f, "%s_f", temp, &afond);
175 fclose(f);

    while( dv > STOP_dv ){
        fflush(stdout);
        /******* */
180 /* Calcul des nouvelles valeurs des différentes */
        /* couches dans les matrices temporaires */
        runge_kutta4( vplus, vmoins, vplustemp, vmoinstemp, uplus, \
                    umoins, Sijk, Sijktemp, Xijk, Xijktemp, Aij, Bij, \
                    Yijk, Yijktemp, Zijl, Zijltemp, mijk, mijktemp, \
185 ISijl, ISijltemp );
        /******* */
        /* Transfert des valeurs dans les matrices couches non-temporaires */
        for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
            for( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
190 vplus[j*NB_NEUR_X+i] = vplustemp[j*NB_NEUR_X+i];
                vmoins[j*NB_NEUR_X+i] = vmoinstemp[j*NB_NEUR_X+i];
                Aij[j*NB_NEUR_X+i] = 0.0;
                Bij[j*NB_NEUR_X+i] = 0.0;
                for( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
195 Zijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i] = \
                    Zijltemp[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i];
                ISijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i] = \

```

```

        ISijltemp[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i];
    }
200   for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
        Sijk[ k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i) ] = \
            Sijktemp[ k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i) ];
        Xijk[ k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i) ] = \
            Xijktemp[ k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i) ];
205   Aij[j*NB_NEUR_X+i] += C_1 * \
            Xijktemp[ k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i) ];
        Bij[j*NB_NEUR_X+i] += C_2 * calcul_Bij( Xijktemp, i, j, k);
        Yijk[ k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i) ] = \
            Yijktemp[ k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i) ];
210   mijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i) ] = \
            mijktemp[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
    }
}
}
215 /* Calcul de la variation des couches au niveau de la      */
/* cible et transfert des valeurs dans les matrices          */
/* couches de reference                                     */
if( NB_ITER % periode == 0 ){
    dv = 0.0;
220   for( i = xcib - 4 ; i <= xcib + 4 ; i++){
        for( j = ycib - 2 ; j < ycib + 6 + 2 ; j++){
            dv = Max( fabs( vplustemp[j*NB_NEUR_X+i] - \
                vplusref[j*NB_NEUR_X+i] ), dv );
            dv = Max( fabs( vmoinstemp[j*NB_NEUR_X+i] - \
225   vmoinsref[j*NB_NEUR_X+i] ), dv );
            vplusref[j*NB_NEUR_X+i] = vplustemp[j*NB_NEUR_X+i];
            vmoinsref[j*NB_NEUR_X+i] = vmoinstemp[j*NB_NEUR_X+i];
            for( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
                dv = Max( fabs( Zijltemp[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i] - \
230   Zijlref[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i] ), dv );
                dv = Max( fabs( ISijltemp[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i] - \
                    ISijlref[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i] ), dv );
                Zijlref[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i] = \
                    Zijltemp[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i];
235   ISijlref[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i] = \
                    ISijltemp[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + j*NB_NEUR_X+i];
            }
            for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
                dv = Max( fabs( mijktemp[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] - \
240   mijkref[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] ), dv );
                mijkref[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i) ] = \
                    mijktemp[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
            }
        }
    }
245   printf("%f_ %f\n", t, dv);
}
t += DELTA_t;
NB_ITER++;
250 }
printf("u+[i, j]\n");
affich( uplus );
printf("\n\n");
printf("u-[i, j]\n");
255 affich( umoins );
printf("\n\n");
printf("V+[i, j]\n");
affich( vplus );
printf("\n\n");
260 printf("V-[i, j]\n");
affich( vmoins );
printf("\n\n");
for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
    printf("S[i, j, %d]\n", k);
265   affich( Sijk+k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) );
    printf("\n\n");
}
for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
    printf("X[i, j, %d]\n", k);
270   affich( Xijk+k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) );
    printf("\n\n");
}

```

```

    }
    printf("A[i,j]\n");
    affich( Aij );
275   printf("\n\n");
    printf("B[i,j]\n");
    affich( Bij );
    printf("\n\n");
    for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
280     printf("Y[i,j,%d]\n", k);
        affich( Yijk+k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) );
        printf("\n\n");
    }
    for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
285     printf("m[i,j,%d]\n", k);
        affich( mijk+k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) );
        printf("\n\n");
    }
    for( k = 0 ; k < NB_K ; k++){
290     printf("Z[i,j,%d]\n", k);
        affich( Zijl+k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) );
        printf("\n\n");
    }
    for( k = 0 ; k < NB_K ; k++){
295     printf("IS[i,j,%d]\n", k);
        affich( ISijl+k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) );
        printf("\n\n");
    }
    printf("Temps_d'intégration : %.1f\n", t);
300 /* ***** Désallouage de la mémoire ***** */
    free( ISijltemp );
    free( mijktemp );
    free( Zijltemp );
    free( Yijktemp );
305   free( Xijktemp );
    free( Sijktemp );
    free( vmoinstemp );
    free( vplustemp );
    free( ISijl );
310   free( mijk );
    free( Zijl );
    free( Yijk );
    free( Bij );
    free( Aij );
315   free( Xijk );
    free( Sijk );
    free( vmoins );
    free( vplus );
    return ;
320 }

/* *****
   Intégration par méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, récupéré
   de Numerical Recipes. Les matrices "??temp" sont là que pour
325   sauvegarder l'intégration a la fin.
   ***** */
void runge_kutta4 ( float *vplus , float *vmoins , float *vplustemp ,
    float *vmoinstemp , float *uplus , float *umoins , float *Sijk ,
    float *Sijktemp , float *Xijk , float *Xijktemp , float *Aij , float *Bij ,
330   float *Yijk , float *Yijktemp , float *Zijl , float *Zijltemp , float *mijk ,
    float *mijktemp , float *ISijl , float *ISijltemp )
{
    int i , j , k , l ;
    float hh , h6 , YtoZ=0.0 , ZtoX=0.0 , tempH ;
    float *d_vplus_m , *d_vplus_t , *vplus_t ;
335   float *d_vmoins_m , *d_vmoins_t , *vmoins_t ;
    float *d_Z_m , *d_Z_t , *Z_t ;
    float *d_m_m , *d_m_t , *m_t ;
    float *d_IS_m , *d_IS_t , *IS_t ;
340   d_vplus_m = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y , sizeof(float));
    d_vplus_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y , sizeof(float));
    vplus_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y , sizeof(float));
    d_vmoins_m = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y , sizeof(float));
    d_vmoins_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y , sizeof(float));
345   vmoins_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y , sizeof(float));

```

```

d_Z_m = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
d_Z_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
Z_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
d_m_m = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
350 d_m_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
m_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K * 2, sizeof(float));
d_IS_m = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
d_IS_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
355 IS_t = (float *) calloc( NB_NEUR_X * NB_NEUR_Y * NB_K, sizeof(float));
hh=DELTA_t*0.5;
h6=DELTA_t/6.0;
////////// Première intégration : k1
for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
  for( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
360 vplus_t[j*NB_NEUR_X+i] = vplus[j*NB_NEUR_X+i] + delta_v * hh * \
fonction_LGN( vplus[j*NB_NEUR_X+i], uplus[j*NB_NEUR_X+i], \
Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i]);
vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i] = vmoins[j*NB_NEUR_X+i] + delta_v * hh * \
fonction_LGN( vmoins[j*NB_NEUR_X+i], umoins[j*NB_NEUR_X+i], \
365 Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i]);
for( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
  tempH = calcul_H( Zijl, i, j, l);
  if( l == 0 ){
    YtoZ = lambda * ( \
370 Max( Yijk[0*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
Max( Yijk[2*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
  } else if( l == 1 ){
    YtoZ = lambda * ( \
375 Max( Yijk[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
Max( Yijk[3*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
  }
Z_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
Zijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + delta_z * hh * \
fonction_Zijl( Zijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
380 YtoZ, tempH, calcul_T_Zijl( Zijl, i, j, l ) );
IS_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
ISijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + delta_s * hh * \
fonction_ISijl( ISijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
385 tempH, calcul_T_ISijl( ISijl, i, j, l ) );
}
for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
  m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
mijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + delta_m * hh * \
fonction_mijk( mijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
390 Xijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
calcul_f_W( mijk, i, j, k, 7.0 ) ); // 7.0 pour W-
}
}
}
395 ////////////// Deuxième intégration : k2
for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
  for( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
    d_vplus_t[j*NB_NEUR_X+i] = fonction_LGN( vplus_t[j*NB_NEUR_X+i], \
    uplus[j*NB_NEUR_X+i], Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i]);
400 d_vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i] = fonction_LGN( vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i], \
    umoins[j*NB_NEUR_X+i], Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i]);
    for( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
      tempH = calcul_H( Z_t, i, j, l);
      if( l == 0 ){
405 YtoZ = lambda * ( \
Max( Yijk[0*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
Max( Yijk[2*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
      } else if( l == 1 ){
        YtoZ = lambda * ( \
410 Max( Yijk[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
Max( Yijk[3*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
      }
      d_Z_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
fonction_Zijl( Z_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], YtoZ, \
415 tempH, calcul_T_Zijl( Zijl, i, j, l ) );
      d_IS_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
fonction_ISijl( IS_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
tempH, calcul_T_ISijl( IS_t, i, j, l ) );
    }
  }
}

```

```

420     for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
        d_m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
            fonction_mijk ( m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
                Xijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
                calcul_f_W ( m_t, i, j, k, 7.0 ) ); // 7.0 pour W-
425     }
    }
}
for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
    for( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
430     vplus_t[j*NB_NEUR_X+i] = vplus[j*NB_NEUR_X+i] + \
        delta_v * hh * d_vplus_t[j*NB_NEUR_X+i];
    vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i] = vmoins[j*NB_NEUR_X+i] + \
        delta_v * hh * d_vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i];
    for( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
435     Z_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
        Zijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + \
        delta_z * hh * d_Z_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
    IS_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
        ISijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + \
440     delta_s * hh * d_IS_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
    }
    for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
        m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
            mijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + \
445     delta_m * hh * d_m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
    }
}
}
////////      Troisième intégration : k3
450 for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
    for( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
        d_vplus_m[j*NB_NEUR_X+i] = fonction_LGN( vplus_t[j*NB_NEUR_X+i], \
            uplus[j*NB_NEUR_X+i], Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i]);
        d_vmoins_m[j*NB_NEUR_X+i] = fonction_LGN( vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i], \
455     umoins[j*NB_NEUR_X+i], Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i]);
        for( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
            tempH = calcul_H( Z_t, i, j, l);
            if( l == 0 ){
                YtoZ = lambda * ( \
460     Max( Yijk[0*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
                Max( Yijk[2*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
            } else if( l == 1 ){
                YtoZ = lambda * ( \
465     Max( Yijk[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
                Max( Yijk[3*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
            }
            d_Z_m[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
                fonction_Zijl( Z_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], YtoZ, \
                tempH, calcul_T_Zijl( Zijl, i, j, l ) );
470     d_IS_m[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
                fonction_ISijl( IS_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
                tempH, calcul_T_ISijl( IS_t, i, j, l ) );
        }
        for( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
475     d_m_m[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
            fonction_mijk ( m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
                Xijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
                calcul_f_W ( m_t, i, j, k, 7.0 ) ); // 7.0 pour W-
        }
    }
}
}
for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
    for( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
485     vplus_t[j*NB_NEUR_X+i] = vplus[j*NB_NEUR_X+i] + \
        delta_v * DELTA_t * d_vplus_m[j*NB_NEUR_X+i];
    vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i] = vmoins[j*NB_NEUR_X+i] + \
        delta_v * DELTA_t * d_vmoins_m[j*NB_NEUR_X+i];
    d_vplus_m[j*NB_NEUR_X+i] += d_vplus_t[j*NB_NEUR_X+i];
    d_vmoins_m[j*NB_NEUR_X+i] += d_vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i];
490     for( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
        Z_t[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
            Zijl[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + \
            delta_z * hh * d_Z_m[l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
    }
}
}
}

```

```

495     d_Z_m[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] += \
        d_Z_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
        IS_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
        ISijl[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + \
        delta_s * hh * d_IS_m[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
500     d_IS_m[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] += \
        d_IS_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
    }
    for ( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
        m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
        mijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + \
505     delta_m * hh * d_m_m[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
        d_m_m[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] += \
        d_m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
    }
}
510 }
//////////      Quatrième intégration : k4
    for ( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
        for ( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
515     d_vplus_t[j*NB_NEUR_X+i] = fonction_LGN( vplus_t[j*NB_NEUR_X+i], \
        uplus[j*NB_NEUR_X+i], Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i]);
        d_vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i] = fonction_LGN( vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i], \
        umoins[j*NB_NEUR_X+i], Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i]);
        for ( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
520     tempH = calcul_H( Z_t, i, j, l);
            if ( l == 0 ){
                YtoZ = lambda * ( \
                    Max( Yijk[0*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
                    Max( Yijk[2*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
            } else if ( l == 1 ){
525     YtoZ = lambda * ( \
                Max( Yijk[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
                Max( Yijk[3*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
            }
530     d_Z_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
        fonction_Zijl( Z_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], YtoZ, \
        tempH, calcul_T_Zijl( Zijl, i, j, l ) );
        d_IS_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
        fonction_ISijl( IS_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
535     tempH, calcul_T_ISijl( IS_t, i, j, l ) );
        }
        for ( k = 0 ; k < 2*NB_K ; k++){
            d_m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
            fonction_mijk( m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
            Xijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
540     calcul_f_W( m_t, i, j, k, 7.0 ) ); // 7.0 pour W-
        }
    }
}
}
//////////      Calcul final de la valeur
545     for ( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
        for ( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
            vplustemp[j*NB_NEUR_X+i] = vplus[j*NB_NEUR_X+i] + h6 * \
            ( fonction_LGN( vplus[j*NB_NEUR_X+i], uplus[j*NB_NEUR_X+i], \
            Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i] ) + \
550     d_vplus_t[j*NB_NEUR_X+i] + 2.0* d_vplus_m[j*NB_NEUR_X+i] );
            vmoinstemp[j*NB_NEUR_X+i] = vmoins[j*NB_NEUR_X+i] + h6 * \
            ( fonction_LGN( vmoins[j*NB_NEUR_X+i], umoins[j*NB_NEUR_X+i], \
            Aij[j*NB_NEUR_X+i], Bij[j*NB_NEUR_X+i] ) + \
            d_vmoins_t[j*NB_NEUR_X+i] + 2.0* d_vmoins_m[j*NB_NEUR_X+i] );
555     for ( l = 0 ; l < NB_K ; l++){
                tempH = calcul_H( Z_t, i, j, l);
                if ( l == 0 ){
                    YtoZ = lambda * ( \
                        Max( Yijk[0*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
560     Max( Yijk[2*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
                } else if ( l == 1 ){
                    YtoZ = lambda * ( \
                        Max( Yijk[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) + \
                        Max( Yijk[3*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], 0.0 ) );
565     }
                Zijltemp[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
                Zijl[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + h6 * ( \

```

```

fonction_Zijl( Zijl[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
YtoZ, tempH, calcul_T_Zijl( Zijl, i, j, l ) ) + \
570 d_Z_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + \
2.0 * d_Z_m[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i) ]);
ISijltemp[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] = \
ISijl[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + h6 * ( \
575 fonction_ISijl( ISijl[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
tempH, calcul_T_ISijl( ISijl, i, j, l ) ) + \
d_IS_t[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + \
2.0 * d_IS_m[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i) ] );
}
for( k=0 ; k<2*NB_K ; k++){
580 if( k==0 || k==2){
ZtoX = Zijl[0*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
} else if( k==1 || k==3){
ZtoX = Zijl[1*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)];
}
585 calcul_S( vplus, vmoins, Sijktemp, i, j, k);
Xijktemp[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)] = \
fonction_Xijk( Sijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)], ZtoX);
Yijktemp[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)] = \
fonction_Yijk( Sijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)], \
590 Xijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)], \
calcul_f_W( mijk, i, j, k, 1.0 ) ); // 1.0 pour W+
mijktemp[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)] = \
mijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)] + h6 * ( \
595 fonction_mijk( mijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
Xijk[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)], \
calcul_f_W( mijk, i, j, k, 7.0 ) ) + \
d_m_t[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i)] + 2.0 * \
d_m_m[k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(j*NB_NEUR_X+i) ] );
}
600 }
}
free( IS_t);
free( d_IS_t);
free( d_IS_m);
605 free( m_t);
free( d_m_t);
free( d_m_m);
free( Z_t);
free( d_Z_t);
610 free( d_Z_m);
free( vmoins_t);
free( d_vmoins_t);
free( d_vmoins_m);
free( vplus_t);
615 free( d_vplus_t);
free( d_vplus_m);
}

/* *****
620 Calcul du terme dans Zijl inhibiteur due aux interneurones
***** */
float calcul_T_Zijl( float *Zijl, int i, int j, int l )
{
float a=0.0;
625 float Tplus[2][2];
int ll;
Tplus[0][0]=0.9032; // récupérées du rapport technique
Tplus[1][0]=0.1384; // CAS/CNS TR-2000-008 et de la thèse de Raizada
Tplus[0][1]=0.1282;
630 Tplus[1][1]=0.8443;
for( ll=0 ; ll<NB_K ; ll++){
a += Tplus[ll][1] * Zijl[ll*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)];
}
return a;
635 }

/* *****
Calcul du terme dans ISijl inhibiteur des autres interneurones
***** */
640 float calcul_T_ISijl( float *ISijl, int i, int j, int l )
{

```

```

float a=0.0;
float Tmoins [2][2];
int ll;
645 Tmoins [0][0]=0.2719; // récupérées du rapport technique
Tmoins [1][0]=0.0428; // CAS/CNS TR-2000-008 et de la thèse de Raizada
Tmoins [0][1]=0.0388;
Tmoins [1][1]=0.2506;
for( ll=0 ; ll<NB_K ; ll++ ){
650 a += Tmoins [ll][1] * ISijl [ll*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i)];
}
return a;
}

655 /* *****
Calcul du terme dans mijk pondéré par la Gaussienne (inhibition
latérale courte-distance) W- ou W+. Le dernier paramètre fournit
à la routine (Ampl) doit être égal à 1.0 pour les W+, et 7.0 pour
les W-
***** */
660 float calcul_f_W( float *mijk, int i, int j, int k, float Ampl)
{
float sigma; // Coeffs pour la gaussienne du W()
float a = 0.0, dx, dy, AmplW = 0.6;
665 float mu = 2.0, nu = 1.1, nn = 6.0; // coeff fonction sigmoïde
int ii, jj, kk, m, n;
sigma = Max( sigmaW11x, sigmaW11y);
sigma = Max( sigma, sigmaW12);
for( ii = i - (int)(sigma) ; ii <= i + (int)(sigma) ; ii++){
670 if( ii < 0 ){
m = ii + NB_NEUR_X ;
} else if( ii >= NB_NEUR_X ){
m = ii - NB_NEUR_X ;
} else {
675 m = ii ;
}
for( jj = j - (int)(sigma) ; jj <= j + (int)(sigma) ; jj++){
if( jj < 0 ){
n = jj + NB_NEUR_Y ;
680 } else if( jj >= NB_NEUR_Y ){
n = jj - NB_NEUR_Y ;
} else {
n = jj ;
}
685 dx = (float) ( ii - i );
dy = (float) ( jj - j );
for( kk = 0 ; kk < 2* NB_K ; kk++){
if( (k == 0 && kk == 0) || (k == 2 && kk == 2) ){
a += Ampl * gauss2( dx, dy, sigmaW11x, sigmaW11y, AmplW ) * \
690 mijk [kk*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(n*NB_NEUR_X+m)] ;
} else if( (k == 1 && kk == 1) || (k == 3 && kk == 3) ){
a += Ampl * gauss2( dx, dy, sigmaW11y, sigmaW11x, AmplW ) * \
mijk [kk*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(n*NB_NEUR_X+m)] ; // inversion x et y
} else if( ( ( (k + 1) % 2 != 0) && ( (kk + 1) % 2 == 0) ) ||
695 ( ( (k + 1) % 2 == 0) && ( (kk + 1) % 2 != 0) ) ){
a += Ampl * gauss3( dx, dy, sigmaW12 ) * \
mijk [kk*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(n*NB_NEUR_X+m)] ;
}
}
}
700 }
a = mu * pow( a, nn) / ( pow(nu, nn) + pow( a, nn) );
return a;
}

705 /* *****
Calcul du terme dans Zijl pondéré par l'exponentielle (excitation
horizontale longue-distance). ATTENTION : pour changer les directions
verticales et horizontales, ce sont les largeurs sigmax et sigmay
710 qui sont intervertis. Ce qui est fait par la première boucle if()
***** */
float calcul_H( float *Zijl, int i, int j, int l)
{
float sigmax, sigmay, Ampl = 0.9; // Coeff pour la gaussienne H()
715 float a = 0.0, dx, dy, sigx, sigy; // sig pour la borne de calcul de H()

```



```

int ii , jj , m, n;
if ( l == 0 ){ // si direction verticale alors H() vertical
    sigmax = sigmaHx;
    sigmay = sigmaHy;
720    sigx = 1.0;
    sigy = 2.0*sigmaHy;
} else { // si direction horizontale alors H() horizontal
    sigmax = sigmaHy;
    sigmay = sigmaHx;
725    sigx = 2.0*sigmaHy;
    sigy = 1.0;
}
for( ii = i - (int)(sigx) ; ii <= i + (int)(sigx) ; ii++){
    if( ii < 0){
730        m = ii + NB_NEUR_X ;
    } else if( ii >= NB_NEUR_X ){
        m = ii - NB_NEUR_X ;
    } else {
735        m = ii ;
    }
    for( jj = j - (int)(sigy) ; jj <= j + (int)(sigy) ; jj++){
        if( jj < 0){
            n = jj + NB_NEUR_Y ;
        } else if( jj >= NB_NEUR_Y ){
740            n = jj - NB_NEUR_Y ;
        } else {
            n = jj ;
        }
        dx = (float) ( ii - i );
745        dy = (float) ( jj - j );
        a += expdecr( dx , dy , sigmax , sigmay , Ampl ) * \
            Max( ( Zijl[ l*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y)+(n*NB_NEUR_X+m)] - Gamma_seuil ),0.0);
    }
}
750 return a;
}

/* *****
   Calcul de la réponse Xijk pondérée par la Gaussienne
755 ***** */
float calcul_Bij( float Xijk [], int i , int j , int k )
{
    float a = 0.0 , dx , dy;
    int ii , jj , m, n;
760    for( ii = i - (int)(3.*sigma1) ; ii <= i + (int)(3.*sigma1) ; ii++){
        if( ii < 0){
            m = ii + NB_NEUR_X ;
        } else if( ii >= NB_NEUR_X ){
            m = ii - NB_NEUR_X ;
765        } else {
            m = ii ;
        }
        for( jj = j - (int)(3.*sigma1) ; jj <= j + (int)(3.*sigma1) ; jj++){
            if( jj < 0){
770                n = jj + NB_NEUR_Y ;
            } else if( jj >= NB_NEUR_Y ){
                n = jj - NB_NEUR_Y ;
            } else {
                n = jj ;
775            }
            dx = (float) ( ii - i );
            dy = (float) ( jj - j );
            a += gauss( dx , dy , sigma1 ) * \
                Xijk [k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (n*NB_NEUR_X+m)] ;
780        }
    }
    return a;
}

785 /* *****
   calcul des entrées Sijk pour les neurones de la couche 4
   ***** */
void calcul_S( float vplus [], float vmoins [], float Sijk [],
               int i , int j , int k )

```

```

790 {
    int ii , jj , m , n ;
    float R , L , teta , d_teta , temp , dxplus , dyplus , dxmoins , dymoins ;
    d_teta = sigma2/2.0 ;
    R = 0.0 ;
795 L = 0.0 ;
    teta = PI * k/NB_K ;
    for( ii = i - (int)(3.*sigma2) ; ii <= i + (int)(3.*sigma2) ; ii++){
        if( ii < 0){
            m = ii + NB_NEUR_X ;
800 } else if( ii >= NB_NEUR_X){
            m = ii - NB_NEUR_X ;
        } else {
            m = ii ;
        }
805 for( jj = j - (int)(3.*sigma2) ; jj <= j + (int)(3.*sigma2) ; jj++){
        if( jj < 0){
            n = jj + NB_NEUR_Y ;
        } else if( jj >= NB_NEUR_Y){
            n = jj - NB_NEUR_Y ;
810 } else {
            n = jj ;
        }
        dxmoins = (float) ( ii - ( i - d_teta * cos(teta) ) ) ;
        dymoins = (float) ( jj - ( j - d_teta * sin(teta) ) ) ;
815 dxplus = (float) ( ii - ( i + d_teta * cos(teta) ) ) ;
        dyplus = (float) ( jj - ( j + d_teta * sin(teta) ) ) ;
        temp = gauss( dxmoins , dymoins , sigma2 ) - \
            gauss( dxplus , dyplus , sigma2 ) ;
        R += ( Max( vplus[n*NB_NEUR_X+m] , 0.0 ) - \
820 Max( vmoins[n*NB_NEUR_X+m] , 0.0 ) ) * Max( temp , 0.0 ) ;
        L += ( Max( vmoins[n*NB_NEUR_X+m] , 0.0 ) - \
            Max( vplus[n*NB_NEUR_X+m] , 0.0 ) ) * Max( -temp , 0.0 ) ;
    }
}
825 Sijk [ k*(NB_NEUR_X*NB_NEUR_Y) + (j*NB_NEUR_X+i) ] = gamma * \
    Max( ( R + L - omega * fabs( R - L ) ) , 0.0 ) ;
return ;
}

830 /* *****
    Calcul de la réponse sortie de la retine uij.
    ***** */
void calcul_u ( float uplus [ ] , float umoins [ ] , float RETINE [ ] )
{
835 int i , j , k , l , m , n ;
    float temp , dx , dy ;
    for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
        for( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
            uplus[j*NB_NEUR_X+i] = RETINE[j*NB_NEUR_X+i] ;
840 umoins[j*NB_NEUR_X+i] = -1.0*RETINE[j*NB_NEUR_X+i] ;
            for( k = i - (int)(3.*sigma1) ; k <= i + (int)(3.*sigma1) ; k++){
                if( k < 0){
                    m = k + NB_NEUR_X ;
                } else if( k >= NB_NEUR_X){
845 m = k - NB_NEUR_X ;
                } else {
                    m = k ;
                }
            }
            for( l = j - (int)(3.*sigma1) ; l <= j + (int)(3.*sigma1) ; l++){
850 if( l < 0){
                n = l + NB_NEUR_Y ;
            } else if( l >= NB_NEUR_Y){
                n = l - NB_NEUR_Y ;
            } else {
855 n = l ;
            }
            if( ( k != i ) || ( l != j ) ){
                dx = (float) (k-i) ;
                dy = (float) (l-j) ;
860 temp = gauss( dx , dy , sigma1 ) ;
                uplus[j*NB_NEUR_X+i] -= temp * RETINE[n*NB_NEUR_X+m] ;
                umoins[j*NB_NEUR_X+i] += temp * RETINE[n*NB_NEUR_X+m] ;
            }
        }
    }
}

```

```

    }
865   }
    }
    }
    return;
}
870
/* *****
   f(t,Y[]) pour la couche LGN
   ***** */
float fonction_LGN( float vlgN , float u , float Aij , float Bij)
875 {
    float a;
    a = - vlgN + (1.0 - vlgN)*Max(u,0.0)*(1.0+ Aij) - (1.0+vlgN)* Bij;
    return a;
}
880
/* *****
   f(t,Y[]) pour la couche 6 : Xijk
   ***** */
float fonction_Xijk( float S , float Z)
885 {
    float a;
    a = ( alpha * S + phi * Max( ( Z - Gamma_seuil ) , 0.0 ) ) / \
        ( 1.0 + alpha * S + phi * Max( ( Z - Gamma_seuil ) , 0.0 ) );
    return a;
890 }

/* *****
   f(t,Y[]) pour la couche 4(Y) : Yijk
   ***** */
float fonction_Yijk( float S , float Xijk , float f )
895 {
    float a;
    a = ( S + eta_plus * Xijk - f ) / ( 1.0 + S + eta_plus * Xijk + f );
    return a;
900 }

/* *****
   f(t,Y[]) pour la couche 2/3 : Zijl
   ***** */
float fonction_Zijl( float Z , float YtoZ , float HtoZ , float T)
905 {
    float a;
    a = - Z + (1.0-Z) * ( YtoZ + HtoZ ) - ( Z + psi ) * T;
    return a;
910 }

/* *****
   f(t,Y[]) pour les interneurons de la couche 4(Y) : mijk
   ***** */
float fonction_mijk( float m , float X , float f )
915 {
    float a;
    a = - m + eta_moins * X - m * f;
    return a;
920 }

/* *****
   f(t,Y[]) pour les interneurons de la couche 2/3 : ISijl
   ***** */
float fonction_ISijl( float IS , float H , float T )
925 {
    float a;
    a = - IS + H - IS * T;
    return a;
930 }

/* *****
   Réponse d'une gaussienne bidimensionnelle a une distance
   (dx) et (dy) du centre. Elle est normalisée par rapport
   au coefficient sigma...
   ***** */
float gauss( float dx , float dy , float sigma)

```

```

{
  float a;
940 a = (1.0 / ( 2.0 * PI * sigma * sigma ) ) * \
      exp( - (float)( dx * dx + dy * dy ) / (2.0 * sigma * sigma) );
  return a;
}

945 /* *****
   Réponse d'une gaussienne bidimensionnelle avec des coefficients
   différents selon les deux directions. L'amplitude doit être
   fournis
   ***** */
950 float gauss2( float dx, float dy, float sigmax, float sigmay, float A)
{
  float a;
  a = A * exp( - ( dx * dx / (2.0 * sigmax * sigmax) + \
                 dy * dy / (2.0 * sigmay * sigmay) ) );
955 return a;
}

/* *****
   Réponse d'une exponentielle décroissante avec des coefficients
   différents selon les deux directions. L'amplitude doit être
   fournis (Pour H(x,y))
   ***** */
960 float expdecr( float dx, float dy, float sigmax, float sigmay, float A)
{
965 float a;
  a = A * exp( - fabs(dx) / sigmax - fabs(dy) / sigmay );
  return a;
}

970 /* *****
   Reponse des poids W+/W- pour des directions différentes :
   1-2, 2-1, 2-3, 3-2 etc...
   ***** */
975 float gauss3( float dx, float dy, float sigma )
{
  float a;
  a = 0.25 - 0.1 * exp( - dx * dx / ( 2.0 * sigma * sigma ) ) - \
      0.1 * exp( - dy * dy / ( 2.0 * sigma * sigma ) );
980 return a;
}

/* *****
   Affichage de la matrice passée à la routine.
   ***** */
985 void affich( float temp[] )
{
  int i, j;

  for( j = 0 ; j < NB_NEUR_Y ; j++){
990   for( i = 0 ; i < NB_NEUR_X ; i++){
      printf( "%8.5f", temp[j*NB_NEUR_X+i] );
    }
    printf( "\n" );
  }
995 return;
}

```

Annexe E

Publications

Articles :

- T.Tzvetanov & B.Dresp, "Short- and Long-range mechanisms in line contrast detection", 2002, *Vision Research*, 42, 2493-2498.

Résumés de Poster dans les conférences à comité de lecture :

- T.Tzvetanov & B.Dresp, "Long range spatial interactions between orientations are affected by changes in background luminance", 2003, *Perception*, 32, p.160 (European Conference on Visual Perception, 2003).
- B.Dresp & T.Tzvetanov, "Modelling short- and long-range detection facilitation with col-linear targets and inducers", 2001, *Perception*, 30, p.27 (European Conference on Visual Perception, 2001).