

Stephen E. PALMER*

Les théories contemporaines de la perception de Gestalt**

Cet article examine quatre théories modernes qui ont pour objectif de déterminer comment des effets contextuels holistes peuvent avoir lieu dans la perception de figures géométriques simples. Ces théories modernes sont toutes étroitement apparentées aux idées originales des théoriciens de la Gestalt. Les trois premières théories cherchent à spécifier les facteurs qui produisent dans le stimulus la structure émergente caractéristique des phénomènes de gestalt. La quatrième approche est une tentative beaucoup plus spéculative de spécification d'un mécanisme pour les effets de gestalt sous la forme de réseaux "connexionistes" dynamiques. Ces théories modernes offrent des approches prometteuses pour la construction de nouvelles théories pour rendre compte des phénomènes de gestalt.

Mots-clés : holisme, figures géométriques, Gestalt, émergence, mécanisme, connexionisme dynamique.

Modern Theories of Gestalt Perception. *This paper examines four modern theories that address the problem of how holistic contextual effects might occur in the perception of simple geometric figures. These modern theories are all closely related to the original ideas of Gestalt theorists. The first three theories attempt to specify the stimulus factors that produce the emergent structure characteristic of Gestalt phenomena. The fourth theoretical approach is a much more speculative attempt to specify a mechanism for Gestalt effect in the form of dynamic "connectionist" networks. It is argued that these modern theories offer a promising approach for constructing new theories to account for Gestalt phenomena.*

* Département de psychologie - Université de Californie, Berkeley, CA 94720 USA

** La version originale de cet article est parue dans la revue *Mind and Language* Vol. 5 n° 4, 1990, pp. 289-323, sous le titre "Modern Theories of Gestalt Perception". Nous remercions Blackwell Publishers de nous avoir donné l'autorisation de le reproduire ici.

Key words: *holism, geometrical figures, Gestalt, emergence, mechanism, dynamic connexionism.*

INTRODUCTION

Quelques-uns des phénomènes les plus intéressants de la perception visuelle furent découverts par les psychologues gestaltistes au début de ce siècle. La plupart concernent des aspects holistes de la perception, tels que les lois bien connues des groupements et des relations figure/fond. Les progrès considérables qui ont été faits récemment dans les études computationnelles, psychophysiques et physiologiques de la vision laisseraient penser qu'aujourd'hui des problèmes aussi fondamentaux devraient être bien compris. En fait, la plupart des phénomènes de gestalt demeurent des énigmes.

Dans cet article, j'examinerai quatre théories modernes qui ont pour objectif de déterminer comment des effets contextuels holistes peuvent avoir lieu dans la perception de figures géométriques simples. Les trois premières théories cherchent à spécifier les facteurs qui produisent dans le stimulus la structure (émergente) caractéristique des phénomènes de gestalt. Ces trois théories du stimulus affirment que le facteur dominant est (1) l'axe majeur (Marr et Nishihara 1978 ; Palmer 1975), (2) les axes de la symétrie par réflexion (Brady 1983 ; Palmer 1983, 1985), ou (3) l'orientation pour laquelle les fréquences spatiales basses sont les plus puissantes (Ginsburg 1971 ; Janez 1983). Chaque théorie sera décrite en détail dans la suite de cet article, ainsi que des expériences testant les prédictions importantes faites par chacune de ces théories. La quatrième approche théorique est une tentative beaucoup plus spéculative de spécification d'un mécanisme pour les effets de gestalt sous la forme de réseaux "connexionnistes" dynamiques (par exemple Hopfield 1982, 1984). Après avoir expliqué le fonctionnement de réseaux de ce type, je montrerai que ces théories modernes sont étroitement apparentées aux idées originales des théoriciens de la Gestalt et qu'elles offrent une approche prometteuse pour la construction de nouvelles théories pour rendre compte des phénomènes de gestalt. Avant d'examiner en détail ces approches modernes de la perception de gestalt, il paraît utile de resituer les théories actuelles dans un contexte historique approprié grâce à un rapide aperçu des idées de gestalt.

UNE BREVE HISTOIRE DE LA THEORIE DE LA GESTALT

La fondation du mouvement de la Gestalt au début de ce siècle fut l'un des événements les plus importants dans l'histoire de la perception. Conduit par Max Wertheimer, Kurt Koffka, et Wolfgang Kohler, ce groupe de psychologues mettait en question la position théorique dominante, le "Structuralisme" et réussit largement à la dépasser. Le structuralisme reposait sur deux hypothèses théoriques majeures. La première, l'atomisme ou l'élémentarisme, affirmait que des percepts complexes pouvaient être réduits par l'analyse à des expériences sensorielles locales, indivisibles. La seconde, l'empirisme ou associationnisme, affirmait que ces atomes sensoriels étaient liés par des associations mentales engendrées par leur contiguïté dans l'espace et le temps. L'approche structuraliste est parfois appelée "la chimie mentale" à cause des ressemblances évidentes existant entre ses idées et celles qui sous-tendent la théorie atomique de la chimie.

Les gestaltistes rejettent ces deux hypothèses et les remplacent par des hypothèses de leur propre conception. A la place de l'atomisme, ils préconisent l'holisme : l'idée selon laquelle un tout perceptuel est différent de — et non réductible à — la somme de ses parties. A la place de l'associationnisme, ils proposent le concept d'organisation : la notion selon laquelle l'expérience visuelle est intrinsèquement structurée par la nature du stimulus lorsque ce dernier est en interaction avec le système nerveux visuel. Ces idées engendrent et constituent une nouvelle façon de concevoir la perception visuelle qui a conduit à une remarquable série de découvertes sur la perception. Les exemples les plus familiers pour les psychologues contemporains sont les lois du groupement et de l'organisation figure/fond, aujourd'hui exposées dans tous les manuels introductifs. Toutefois, beaucoup d'autres phénomènes perceptuels, aussi divers que ceux des constances perceptuelles, des mouvements apparents, et tout un ensemble d'autres effets contextuels, peuvent être rapportés au mouvement de la Gestalt. Ces démonstrations ont convaincu la plupart des psychologues que les hypothèses sous-jacentes du Structuralisme étaient intenable et devaient être remplacées par une conception théorique plus adéquate.

Malgré leur capacité à trouver les défauts fatals pour les théories adverses, les théoriciens de la Gestalt furent nettement moins heureux dans la formulation d'une théorie de remplacement viable. Les principes abstraits du holisme et de l'organisation qui guidèrent

les gestaltistes dans leur recherche de phénomènes ne constituèrent pas en eux-mêmes une théorie cohérente capable d'expliquer la perception avec précision. Wolfgang Kohler essaya de combler cette faille en 1920 en proposant de considérer que le cerveau était constitué de ce qu'il appelait une "gestalt physique" : un système physique holiste dont le comportement est gouverné par une interaction dynamique. Un des meilleurs exemples d'un tel système de gestalt est celui de la bulle de savon. Les bulles de savon possèdent la propriété fascinante suivante : leur forme, quelle qu'elle soit au départ, évolue toujours dans le temps jusqu'à devenir une sphère parfaite. La distribution des résistances et des tensions locales à la surface de la bulle de savon sont propagées dans les régions voisines de sorte qu'elles sont finalement dispersées uniformément sur l'ensemble de la surface. Au final, la bulle de savon entière atteint un état de stabilité globale lorsque les forces sur sa surface atteignent un minimum d'énergie physique. Kohler affirmait qu'il y avait beaucoup d'autres "gestalts physiques" possédant ce caractère général — des systèmes qui évoluent dynamiquement vers un état d'énergie minimale stable — et que le cerveau est l'une d'entre elles. Il pensait que le fonctionnement du cerveau consistait à atteindre un compromis optimal entre les contraintes imposées par les données sensorielles d'entrée et ses propres contraintes internes, ces dernières visant à réaliser des organisations holistiquement bonnes.

Les mécanismes spécifiques proposés par Kohler pour rendre compte de la perception (ainsi que de tous les autres événements mentaux) étaient des champs électriques à l'intérieur du cerveau. Ils possédaient toutes les propriétés importantes des gestalts physiques et étaient jugés physiologiquement plausibles à l'époque de Kohler. Pendant de nombreuses années, il n'existait aucun moyen de tester directement et physiologiquement cette idée, mais en 1940 Kohler et Held ont obtenu des enregistrements de l'épicroâne de courants électriques directs qui étaient corrélés avec la perception d'un point se déplaçant en ligne droite. Le rôle de ces champs restait néanmoins confus : jouaient-ils un rôle causal dans la détermination de la perception, comme l'affirmait Kohler, ou étaient-ils des effets secondaires causalement inefficaces d'événements causaux réels qui avaient lieu dans le cerveau, à savoir l'excitation des neurones ?

Plusieurs expériences physiologiques importantes ont été menées pour tester la théorie des champs de Kohler. Dans une étude,

Lashley, Chow et Semmes (1951) ont étendu des bandes de feuille d'or sur le cortex visuel de singes et inséré des pointes d'or dans la région maculaire. Sachant que l'or est un excellent conducteur du courant électrique, ils ont fait l'hypothèse que les bandes perturberaient fortement le passage du courant électrique supposé produire la perception. Dans une autre expérience, Sperry et Milner (1955) insérèrent des bandes de mica dans le cortex visuel des singes. Parce que le mica est un isolant du courant électrique, les bandes étaient supposées interrompre et détourner le courant électrique. Dans ces deux expériences, l'or et le mica furent implantés, après que les animaux aient appris un problème de discrimination d'une forme visuelle. Après l'opération, les singes ont été testés avec le même problème de forme afin de découvrir si les champs électriques perturbés avaient perturbé de manière équivalente les perceptions. Contrairement à la prédiction de la théorie des champs, les résultats ne montraient pas une diminution significative dans la performance. Bien que Kohler ait par la suite affirmé que de sérieuses objections pouvaient être soulevées à l'encontre de ces expériences, elles furent généralement considérées comme décisives par la communauté des psychologues, sonnant ainsi le glas pour sa théorie de l'interaction du cerveau à travers les champs électriques.

Bien que la théorie gestaltiste des champs ne soit pas restée intacte au fil des années, la plupart des phénomènes de gestalt ont survécu. De plus, par la suite, la littérature sur la perception a été accrue par l'apport de nombreuses démonstrations des effets holistes et organisationnels qui confortent la conception de la Gestalt et l'idée selon laquelle une approche non-atomiste et non-associationniste est nécessaire. Malgré leur importance théorique, ces phénomènes de gestalt continuent d'être peu compris. Dans les dernières années, cependant, de nouvelles propositions ont été faites. J'en décrirai quatre qui ont été récemment appliquées à un phénomène particulier de gestalt, que j'ai étudié ces dernières années : les effets contextuels dans le cas de la direction perçue de triangles ambigus. Après avoir décrit les phénomènes primaires intéressants, je décrirai les théories et certains tests expérimentaux que mes collègues et moi-même avons construit à partir de leurs prédictions.

LES EFFETS CONTEXTUELS DANS LA DIRECTION PERÇUE DE TRIANGLES AMBIGUS

Pour tester la théorie de la Gestalt, nous avons utilisé les effets de gestalt qui apparaissent dans le phénomène de la direction perçue de triangles ambigus (Bucher et Palmer 1985 ; Palmer 1980, 1985 ; Palmer et Bucher 1981, 1982 ; Palmer, Simone et Kube 1988). Ce phénomène correspond à la perception ambiguë que l'on a des triangles équilatéraux, au sens où ils peuvent être perçus comme pointant dans n'importe laquelle des trois directions, mais seulement dans une à la fois (Attneave 1968). Ainsi, le triangle dans la figure 1A peut être vu comme pointant soit vers 3, 7, ou 11 heures et peut parfois être perçu comme pointant tour à tour dans l'une des trois directions. La figure 1B montre que des triangles équilatéraux assemblés de manière inorganisée (random) pointent tous ensemble dans la même direction en même temps et qu'ils changent tous de direction en même temps. Toutefois, le phénomène qui m'intrigue le plus est l'effet de configuration semblable à un effet de gestalt qui résulte du placement de plusieurs triangles dans des configurations bien structurées. Comme nous le voyons dans la figure 1C, lorsque plusieurs triangles sont alignés le long de leur axe de symétrie, la perception est fortement biaisée par le fait de les voir pointant dans une direction qui coïncide avec la ligne de configuration. Lorsqu'ils sont alignés le long d'un de leurs côtés (figure 1D), ils sont vus comme pointant dans une direction perpendiculaire à leur ligne de configuration. Ces deux effets ont été vérifiés expérimentalement en utilisant des mesures de compte-rendu personnel (self report) et des techniques de performance perceptuelle (Palmer et Bucher 1981).

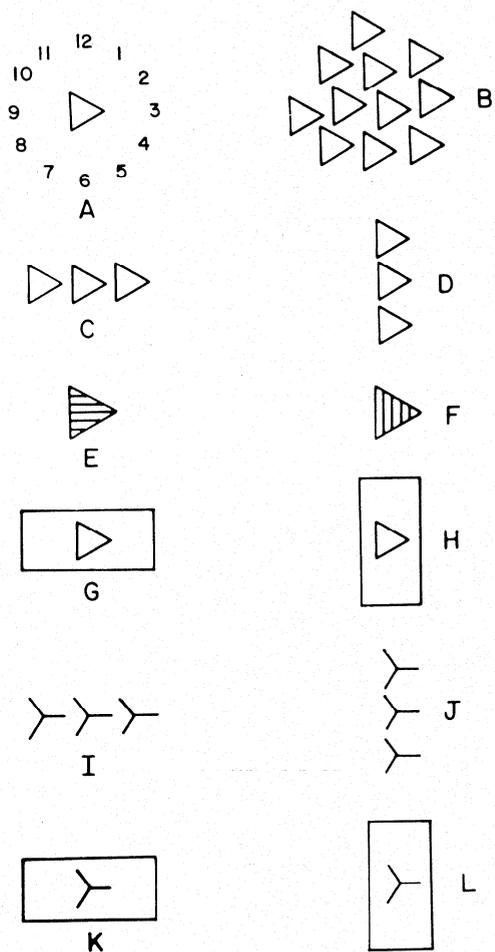


Figure 1

Dans une série d'expériences ultérieures nous avons montré que l'on peut produire des effets de biais qualitativement similaires en plaçant des rayures de texture à l'intérieur d'un triangle unique (figures 1E et 1F). Les rayures parallèles à un axe de symétrie biaisent la perception dans la direction de l'axe alors que les rayures parallèles à un côté biaisent la perception dans la direction perpendiculaire à l'axe de symétrie (Palmer et Bucher 1982). Des effets moindres, mais similaires, ont été trouvés lorsque les rayures sont sur le fond perceptuel. La présence d'un cadre rectangulaire qui entoure le triangle (figures 1G et 1H) est un autre facteur contextuel qui produit ce type d'effets. La perception du triangle est à nouveau biaisée et il est perçu comme pointant dans le sens de la longueur du rectangle lorsque celui-ci est aligné avec l'un des axes du triangle et

comme pointant dans une direction perpendiculaire à la longueur lorsqu'elle est parallèle à l'un des côtés du triangle.

Ces effets contextuels, même s'ils ont été découverts longtemps après que les psychologues gestalt aient fait leur travail de sape, constituent néanmoins de bons exemples des phénomènes de gestalt. Ils sont holistes au sens où la perception de chaque triangle individuel est fortement influencée par la perception de la structure spatiale qui les entoure. Le fait que tous les triangles soient vus comme pointant dans la même direction dans la figure 1B démontre presque directement ce fait. Ces effets contextuels exhibent également l'organisation intrinsèque parce que la façon dont les triangles affectent tous les autres semble dépendre de manière importante de la structure du tout perçu. Ceci est démontré dans les figures 1C et 1D par la nette influence exercée par l'orientation globale de l'ensemble des configurations sur la perception de la direction dans laquelle le triangle pointe.

LES EXPLICATIONS DES EFFETS CONTEXTUELS PAR LE CADRE DE REFERENCE

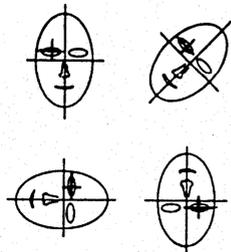
Avant de discuter des théories spécifiques de ces effets contextuels, il serait utile de considérer rapidement l'approche théorique générale qui semble la plus adaptée pour en rendre compte : c'est-à-dire, les cadres perceptuels de référence. Ce concept a été lui aussi introduit par les psychologues de la Gestalt. Par exemple, Karl Duncker (1929) l'a utilisé pour expliquer un phénomène appelé "mouvement induit". Le mouvement induit a lieu lorsqu'un point de lumière unique et immobile est entouré par un rectangle lumineux qui se déplace en avant et en arrière dans une pièce par ailleurs sombre. Dans ces conditions, les observateurs perçoivent le rectangle en déplacement comme immobile et le point immobile comme se déplaçant, c'est-à-dire tout à fait le contraire de ce qui se passe réellement. Notre perception de la lune se déplaçant à travers un nuage immobile, alors qu'en réalité c'est le nuage qui se déplace devant la lune immobile est un exemple quotidien de mouvement induit. Duncker a affirmé que le système perceptuel sélectionne la grande figure qui forme le contour comme le cadre de référence immobile pour percevoir la figure plus petite qui est entourée comme si l'objet entourant tenait lieu de l'environnement immobile.

Le concept de cadre de référence a également été appliqué à la perception de l'orientation, notamment par Ash et Witkin (1948). Par exemple, lorsqu'un observateur se tient à l'intérieur d'une pièce légèrement décalée, il percevra de manière caractéristique la pièce comme droite et se percevra lui-même comme un peu décalé ! Ici le cadre de référence de la pièce semble définir ce qui est vertical et ce qui est horizontal. Ainsi, la pièce devient le cadre de référence par rapport auquel l'orientation des autres objets, incluant le corps de l'observateur, est jaugée.

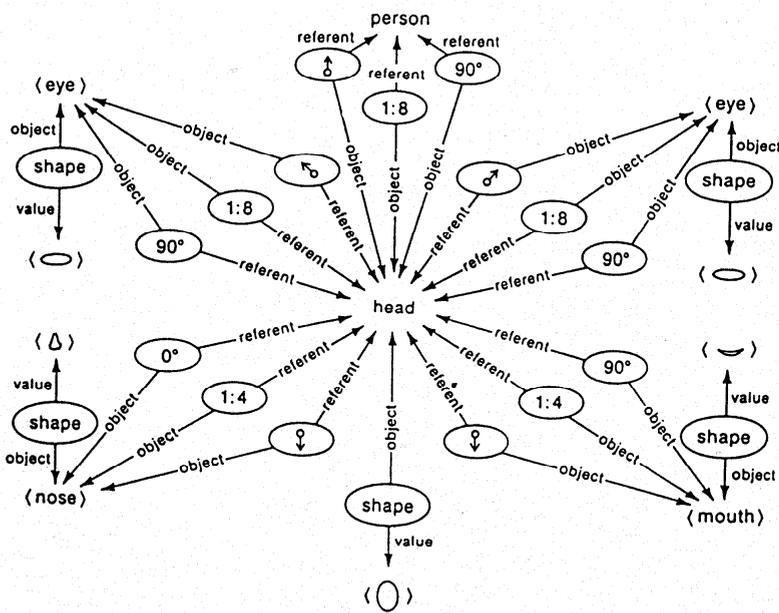
Bien que le stimulus que nous considérons ici ne ressemble pas tellement à l'exemple la chambre décalée, l'utilisation des cadres de référence dans le cas de triangles orientés est relativement évidente. On voit les triangles pointer dans une direction parce le contexte entourant l'ensemble de la composition induit un cadre de référence par rapport auquel les orientations des triangles sont perçus. Ainsi, une rangée entière de triangles pourrait définir l'orientation du cadre de référence, et chaque triangle individuel serait alors perçu comme pointant dans la direction de l'un des axes de ce cadre perceptuel, s'ils étaient alignés ainsi.

La raison pour invoquer le concept des cadres de référence perceptuels dans les théories contemporaines de la vision tient à l'avantage computationnel important pour comprendre la perception de la forme et de l'orientation qu'ils offrent (Marr et Nishihara 1977 ; Palmer 1975). Ils résolvent le problème de savoir comment coder la forme d'un objet indépendamment de son orientation. Ceci permet de percevoir un même objet comme conservant la même forme lorsqu'il est vu dans des orientations différentes. C'est un aspect important de la constance perceptuelle, même si, comme Rock (1973) l'a montré, toutes les formes ne restent pas constantes lors de changements d'orientation. L'intuition fondamentale apportée par la théorie des cadres de référence est que si l'on encode la forme de l'objet relative à une orientation de référence qui coïncide avec une propriété d'orientation de l'objet lui-même invariante — tel que l'axe majeur et l'axe de symétrie — alors la forme peut être décrite d'une façon qui est invariante par rapport à l'orientation (Palmer 1975). La figure 2 montre comment cela peut se produire dans le cas d'un visage humain schématique. Le visage dans son ensemble est représenté comme approximativement ovale, son centre et son axe majeur définissent, respectivement, la position et l'orientation de ce cadre de référence intrinsèque. Pareillement, chaque partie du

visage est représentée à l'intérieur de son propre cadre de référence, et ces cadres partiels sont reliés au cadre du visage par des transformations de similarité (c'est-à-dire, des translations, rotations et dilatations). Ces transformations sont symbolisées dans le réseau hiérarchique par des ovales à l'intérieur desquelles les vecteurs indiquent des translations, l'ouverture des angles indique des rotations, les rapports de taille indiquent des dilatations. Notons que ces relations de cadre restent invariantes lorsque l'orientation du visage dans son ensemble change.



A



B

Figure 2

L'utilisation des cadres de référence pour maintenir la constance parmi les orientations dans un visage schématique.

A montre l'invariance de la relation entre le cadre de la tête et celui de l'œil dans différentes orientations. *B* montre une représentation propositionnelle en réseau d'un visage (un schéma de visage) qui spécifie les relations de transformation entre le cadre du visage et les différents cadres des traits du visage.

(Extrait de S.E. Palmer, *Visual perception and world knowledge*, in D.A. Norman et D.E. Rumelhart (Eds.), *Explorations in Cognition*, San Francisco : Freeman 1975, Figure 11.4, page 290.)

(Pour une discussion plus complète du rôle des cadres de référence dans la perception de la forme et de l'orientation, le lecteur peut se référer à Palmer 1989, et à Rock 1990).

Marr et Nishihara (1977) ont fait des propositions similaires à propos de l'usage des cadres de référence pour obtenir un effet de constance. Ils ont élargi cette idée afin d'englober les formes tridimensionnelles et construit une théorie explicite de la représentation de l'objet fondée sur un ensemble particulier de formes primitives. Ils ont notamment proposé que les objets tridimensionnels puissent être représentés dans des "coordonnées centrées sur l'objet" au moyen d'une description hiérarchique en termes de formes primitives (appelés "cylindres généralisés") à différents niveaux de résolution, comme le montre la figure 3. Parler de "coordonnées centrées sur l'objet" suggère que la forme de l'objet soit décrite relativement aux propriétés intrinsèques de l'objet lui-même — tel que son axe majeur — plutôt que relativement à l'observateur ou à l'environnement qui l'entoure. Les "cylindres généralisés" constituent simplement un élargissement de l'idée habituelle des cylindres afin d'y inclure les cas où l'axe est courbe (comme dans le cas d'un tube en forme de C ou de S) et où le diamètre du cylindre peut varier le long de son axe (comme dans le cas d'une forme de clepsydre ou de cloche). Parce que chaque cylindre généralisé possède son propre axe intrinsèque, cet axe peut être utilisé pour définir l'orientation de référence relativement à laquelle l'objet peut être représenté, fournissant ainsi une description invariante du point de vue de l'orientation, qui peut être utilisée pour identifier l'objet. La figure 3 montre la manière dont Marr et Nishihara proposent de représenter la forme tridimensionnelle du corps humain en termes de cylindres généralisés à différents niveaux

de résolution. (Le lecteur intéressé peut se référer à Marr et Nishihara (1977) et Marr (1982) pour des descriptions plus détaillées).

Ainsi, les théoriciens computationnels modernes affirmeraient que les effets de cadre de référence ont des occurrences dans la perception visuelle parce qu'ils aident à résoudre le problème de l'invariance de la forme perçue au travers des changements d'orientation, et d'autres variables également (Palmer 1989). Le cas en question, dans lequel les effets contextuels influent sur la direction dans laquelle les triangles pointent, serait compris comme un produit de ce mécanisme important. Si c'est ainsi, nous pouvons mieux comprendre la nature de ce mécanisme en étudiant cet effet en détail.

Bien que nos expériences initiales sur ce sujet aient été menées en grande partie de manière empirique, notre travail le plus récent a été accompli dans l'optique de tester différentes théories explicites à propos de ces effets de cadres de référence. Je vais à présent décrire trois théories qui ont tenté de spécifier les variables de stimulus qui contrôlent ces effets — l'axe majeur, les axes de symétrie, et la faible puissance de fréquence spatiale — et quelques expériences qui testent leurs prédictions.

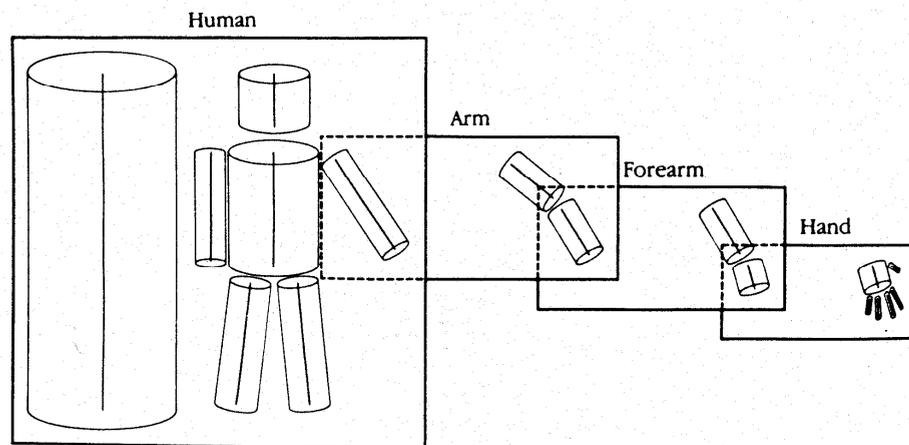


Figure 3

Le modèle hiérarchique à cylindres d'un corps humain proposé par Marr et Nishihara.

La personne est grossièrement modélisée comme un cylindre unique d'orientation, de taille et de forme appropriée. Au niveau plus bas, celui-ci est décomposé en six cylindres représentant la

tête, le torse, les bras et les jambes. Les médaillons montrent le bras et la main à des niveaux de résolution plus fins.

(Extrait de D. Marr : Vision, San Francisco Freeman, 1982, Figure 5.3, p. 306. Reproduit avec permission.)

LA THEORIE DE L'AXE MAJEUR

En essayant de rendre compte des effets de contexte décrits ci-dessus, j'ai d'abord eu tendance à penser que la structure spatiale qui produisait ces biais était l'allongement global des stimuli. Il semblait en effet possible de croire que le système visuel était fortement biaisé de sorte qu'il construisait le cadre de référence perceptuel suivant l'axe le plus long de la figure, tel que l'axe majeur d'une ellipse ou d'un rectangle. Cette notion a sa genèse dans certains de mes travaux théoriques antérieurs sur la représentation perceptuelle des objets (Palmer 1975), mais s'est répandue lorsque Marr et Nishihara (1977) ont présenté cette idée comme une partie constitutive de leur théorie computationnelle de la reconnaissance d'objet. La psychologie renforce également quelque peu cette idée puisque c'est un facteur important pour accéder aux descriptions intrinsèques des formes (Humphreys 1983 ; Wiser 1981).

En appliquant cette idée aux phénomènes présents, on ne voit pas très bien pourquoi un stimulus allongé peut produire un biais le long d'une direction perpendiculaire à son axe majeur, particulièrement car l'effet perpendiculaire est tout aussi puissant que celui qui est parallèle à cet axe majeur. Ce problème peut être résolu simplement en postulant un cadre de référence interne qui contienne deux axes perpendiculaires, comme dans un système cartésien classique de coordonnées (par exemple Janez 1983 ; Palmer 1980 ; Palmer et Bucher 1981). Si on suppose que l'allongement parallèle à l'orientation donnée conduit à appliquer le processus de sélection du cadre à des cadres dont l'axe s'aligne sur l'axe majeur, tant les effets parallèles que les effets perpendiculaires peuvent être facilement expliqués.

LA THEORIE DE L'AXE MAJEUR A L'EPREUVE

Nous avons décidé de tester la théorie de l'axe majeur avec des méthodes identiques à celles que nous avons développées précédemment pour étudier d'autres effets de contexte sur la perception de triangles ambigus (par exemple Palmer et Bucher 1981). Dans notre paradigme, on demandait aux sujets de distinguer

dans quelle direction (parmi deux ou plus) on pouvait voir pointer un triangle équilatéral. Ces directions coïncident habituellement avec des orientations extrinsèques saillantes telle que la direction gravitationnelle horizontale ou verticale. Par exemple, on demande aux sujets de déterminer si les triangles pointaient directement à droite (vers 3 heures) ou directement à gauche (vers 9 heures), ignorant toutes les autres directions possibles dans lesquelles ils pourraient sembler pointer.

Par exemple, les sujets peuvent — afin d'accomplir la tâche — voir le triangle dans la figure 1A comme pointant directement à droite (vers 3 heures) plutôt qu'obliquement (vers 7 ou 11 heures). Le temps pris par les sujets pour construire ce percept est mesuré en leur demandant de donner une réponse directionnelle simple aussitôt qu'ils peuvent déterminer dans laquelle des directions désignées le triangle présenté pointe. Le temps de réaction (TR) est considéré comme la première mesure de la difficulté à construire le percept demandé pour des conditions de stimuli différentes. Le taux d'erreur est lui aussi mesuré, mais la corrélation avec TR est si forte qu'il fournit peu d'informations supplémentaires.

Toutes les études que je décrirai sont fondées sur le raisonnement suivant. Si le triangle cible est présenté dans un contexte dont l'orientation a un effet de biais sur la perception de la direction dans laquelle le triangle pointe de sorte que la direction est cohérente avec la réponse directionnelle requise — vers 3 heures dans les figures 4A et 4D — alors le TR sera plus rapide que si le même triangle est présenté dans un contexte dont l'orientation a un effet de biais sur la perception de la direction dans une direction incohérente avec la réponse requise — vers 11 heures dans les figures 4B et 4E ou vers 7 heures dans les figures 4C et 4F. La grandeur du biais perceptuel introduit par un type de structure contextuelle peut être calculée comme la différence marquée entre les temps de réponse dans les conditions correspondantes, cohérentes et incohérentes. De sérieuses différences de ce type ont pu être obtenues dans de nombreuses expériences antérieures utilisant des stimuli variés (Palmer 1985 ; Palmer et Bucher 1981, 1982 ; Palmer, Simone et Kube 1988). Le "paradigme de l'interférence" ici présenté a été préféré à une méthodologie plus directe dans laquelle les sujets indiquent simplement la direction dans laquelle ils ont d'abord vu le triangle pointer (Palmer 1980), parce qu'il est moins sujet à des variations d'interprétations en termes de "caractéristiques de la

demande" ou d'autres "processus perceptuels optionnels" qui pourraient contaminer les résultats.

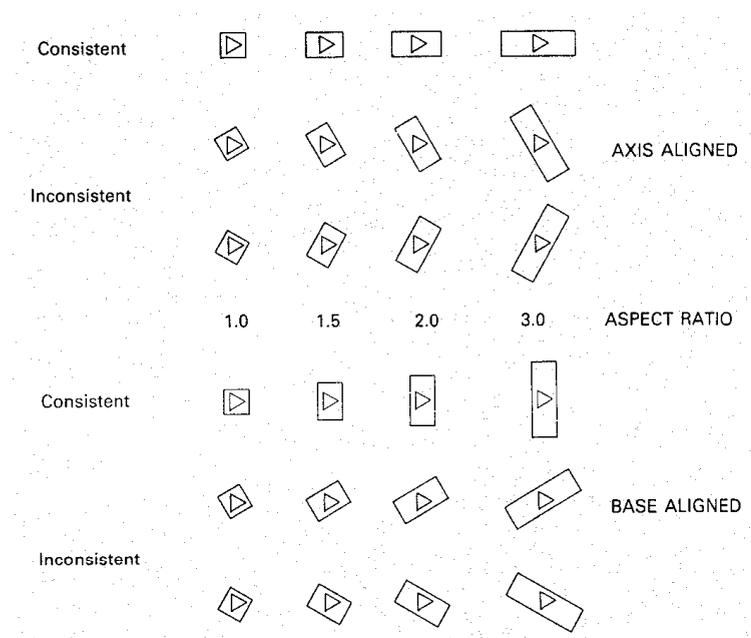


Figure 4

Les stimuli dans l'expérience de l'allongement du cadre.

Les cadres rectangulaires alignés sur l'axe et sur la base avec des rapports d'aspect de 1.0, 1.5, 2.0, et 3.0 sont présentés dans des orientations cohérentes ou incohérentes avec la réponse requise.

Les conditions dans lesquelles les triangles pointent à droite sont toutes montrées. Les conditions de l'image-miroir où les triangles pointent à gauche ont également été incluses.

Il y a une manière évidente de tester la théorie de l'axe majeur en utilisant des cadres rectangulaires comme contexte d'orientation : il suffit de mesurer l'effet produit par le changement de leur rapport d'aspect (entre longueur et largeur). Si l'hypothèse de l'axe majeur est correcte, il ne devrait pas y avoir d'effets de biais pour des cadres carrés, parce qu'ils ne sont pas allongés globalement. En outre, la grandeur de l'effet de biais devrait augmenter uniformément lorsque le rapport d'aspect entre longueur et largeur augmente avec l'unité. La structure perpendiculaire du cadre cartésien supposé prédit en outre que les effets d'allongement seront égaux pour des cadres alignés sur l'axe ou sur la base.

Les stimuli pour cette expérience consistent en des triangles équilatéraux uniques entourés par des cadres de largeur constante et des rapports d'aspect variables : 1:1 (carrés), 1.5:1, 2:1, et 3:1 (voir figure 4). Les triangles sont orientés de sorte que chacun puisse être vu comme pointant soit directement à gauche (vers 9 heures) soit directement à droite (vers 3 heures). On apprend aux sujets à distinguer entre ces deux cas aussi rapidement et correctement que possible en appuyant sur le bouton de réponse de droite avec leur main droite pour les triangles pointant vers la droite, et sur le bouton de réponse gauche avec leur main gauche pour les triangles pointant à gauche. Pour un tiers des essais, le cadre d'orientation était cohérent avec le percept requis. Dans les conditions cohérentes avec alignement sur l'axe (figures 4A), l'axe long du cadre coïncidait avec l'axe de symétrie qui était bissecteur pour l'angle du triangle pointant à droite ou à gauche. Dans la condition cohérente avec un alignement sur la base (figure 4D), l'axe long du cadre était parallèle avec le côté du triangle opposé à l'angle pointant à droite ou à gauche du triangle. Les réponses pour ces essais cohérents devaient être rapides et précises, étant donné que le cadre possédait un rapport d'aspect élevé. Pour les deux autres tiers des essais, l'orientation du cadre était incohérente avec le percept requis. Pour chacune des deux autres directions possibles il y avait des cadres incohérents alignés sur l'axe comme sur la base. Ces cadres étaient définis en des termes semblables pour les deux autres angles comme le montrent les figures 4B, 4C, 4E, et 4F. Les réponses pour ces essais auraient dû être plus lentes et/ou moins précises selon la taille du rapport d'aspect. Dans les cadres carrés (dont le rapport d'aspect est 1.0) l'axe et l'alignement des conditions sont identiques, et la théorie de l'axe majeur ne prédit aucune différence entre les orientations de cadre cohérentes et les orientations de cadre incohérentes.

Les TR moyens dans des conditions cohérentes et incohérentes sont montrés dans la figure 5 comme étant une fonction d'allongement de la structure (rapport d'aspect). Ils montrent qu'aucune des deux prédictions critiques de la théorie de l'axe majeur n'est confirmée. Contrairement à la prédiction selon laquelle les schémas carrés n'auraient pas d'effet de biais, ils produisent un effet de biais assez solide : les réponses dans le cas de structures carrées incohérentes prennent presque 150 ms de plus que les réponses dans le cas de structures cohérentes. Quant à la prédiction selon laquelle les effets de biais pour des structures s'allongeant de

façon croissante augmenteraient de manière linéaire, il ne semble pas que les TR aient une quelconque tendance à augmenter pour des structures plus grandes, en particulier pour les structures alignées sur la base. Même la différence entre les rapports les plus extrêmes ne présente pas de signification statistique. Il semble prudent de dire que la variation mesurée dans les interférences (les TR incohérents moins les TR cohérents), due aux différences dans l'allongement de la structure, sont peu marquantes par rapport à l'ensemble des interférences pour la structure carrée non-allongée. Nous concluons donc que l'allongement global n'est pas un facteur majeur, du moins pour cet effet contextuel particulier.

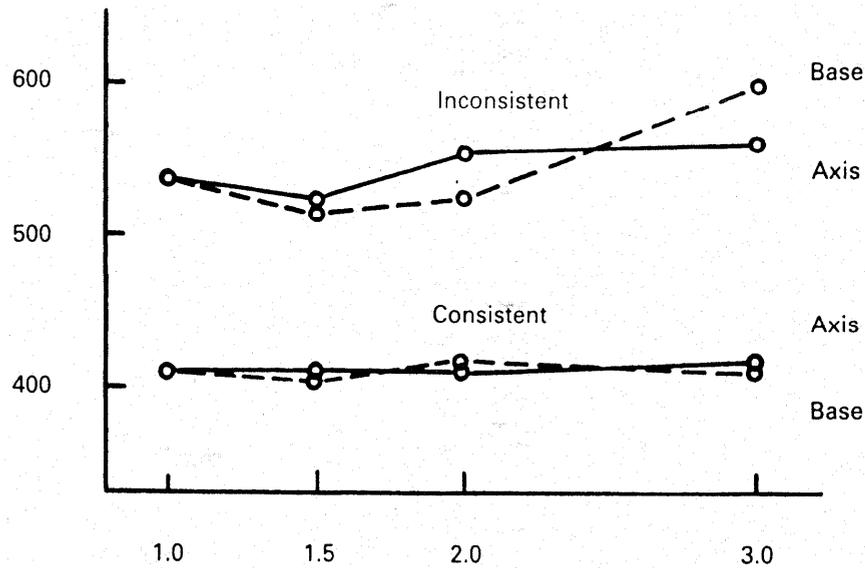


Figure 5

Les résultats de l'expérience de l'allongement du cadre.

Les TR moyens sont reportés pour les cadres alignés sur l'axe et ceux alignés sur la base dans des orientations cohérentes et incohérentes comme une fonction du rapport d'aspect.

LA THEORIE DE LA SYMETRIE

Une seconde théorie fut avancée pour rendre compte des effets contextuels concernant la perception de la direction dans laquelle pointent les triangles ambigus. Elle est formulée en termes de conditions de symétrie (Palmer et Bucher 1982 ; Palmer 1983, 1985).

L'hypothèse revient, en gros, à supposer que le système visuel utilise, pour sélectionner l'orientation du cadre de référence, la symétrie plutôt que l'allongement comme principal type de structure spatiale¹. Dans le cas présent cependant, la théorie est un peu plus élaborée et fait un certain nombre de prédictions intéressantes qui se sont révélées être vraies. Ce qui suit est une brève description d'une théorie qualitative qui tente de rendre compte de la manière dont plusieurs phénomènes contextuels pourraient naître de la structure symétrique, et de la manière dont ils sont reliés l'un à l'autre.

Comme avec toutes les explications qui s'appuient sur un cadre de référence, nous commençons par supposer que les gens perçoivent la forme d'un triangle relativement à un cadre de référence intrinsèque et orienté, et son orientation par la relation de ce cadre à un cadre de référence environnemental plus grand. Nous supposons en outre que le système visuel a une forte tendance à établir l'orientation du cadre de référence par réflexion le long d'un axe de symétrie s'il existe. Les triangles équilatéraux possèdent trois axes de cette sorte dans leur sous-groupe de symétrie, le groupe dièdre D_3 (Weyl 1952). De cette façon, la théorie explique pourquoi les triangles équilatéraux sont tridirectionnellement ambigus pour l'orientation perçue et pour la direction dans laquelle ils pointent : le percept dépend de l'axe de symétrie sélectionné pour le cadre d'orientation (figure 6). La forme du triangle n'est pas ambiguë de manière correspondante car toutes ses propriétés géométriques sont invariantes par rapport aux transformations qui relient des cadres alternatifs (c'est-à-dire, les

¹ Une objection majeure faite à l'hypothèse de la symétrie tient au fait qu'elle s'applique seulement à des stimuli géométriquement symétriques, et que ceux-ci constituent un ensemble très restreint. Néanmoins, l'hypothèse de la symétrie concerne le codage visuel de la symétrie qui, je le montrerai, devrait être vue comme une dimension continue plutôt que comme un attribut binaire. D'un point de vue géométrique, une figure est symétrique par rapport à une ligne donnée ou ne l'est pas. D'un point de vue perceptuel, cependant, il y a sans aucun doute des degrés de symétrie. En fait, peu de choses que nous considérons comme symétriques - comme les visages - sont réellement symétriques au sens strictement géométrique. Je présume que le système perceptuel calcule la symétrie au moyen d'une procédure qui fournit une variable continue (ou au lieu de cela, une approximation) comme produit. Lorsque des jugements explicites à propos de la symétrie sont demandés, des seuils peuvent alors être attribués à cette variable à divers niveaux critiques afin de déterminer des résultats binaires. Néanmoins, je suppose que si le mécanisme de cadre de référence utilise la symétrie comme base, il opère avec la représentation continue du "degré de symétrie" plutôt qu'avec la représentation binaire que quelqu'un rapporterait dans une tâche de choix forcé. Néanmoins, la nature quantitative précise d'une telle théorie de la symétrie continue n'a pas encore été formulée.

rotations à l'intérieur d'un angle de 120 degrés et ses multiples entiers).

Lorsque la composition est augmentée d'éléments additionnels, leurs symétries peuvent, ou non, s'aligner avec celles du triangle d'origine. Dans les cas présents — les lignes de configuration, les rayures de texture et les cadres rectangulaires — les facteurs créateurs de biais possèdent tous un sous-groupe de symétrie binaire (le groupe dièdre D_2) comme le montre la figure 6B pour un cadre rectangulaire. L'intersection de ces deux ensembles de transformations est le sous-groupe de symétrie de la configuration composée qui en résulte. La structure des deux groupes composant D_2 et D_3 explique pourquoi leur intersection peut contenir, au plus, une transformation, qui est une réflexion sur un axe global de symétrie. La théorie suppose que l'orientation de référence est établie le long d'un axe de symétrie, si celui-ci existe (figure 6C). Les deux axes de symétrie purement locaux du triangle auront donc moins de chance d'être choisis, et le triangle aura tendance à être vu comme pointant dans une direction parallèle à la ligne de la symétrie par réflexion globale. Notons que cette analyse s'applique de la même manière aux trois types de biais — dus aux configurations, aux rayures de texture, et aux cadres rectangulaires — et à la fois pour la version alignée par rapport à l'axe et pour celle alignée par rapport à la base de chacun des types. Il n'y a pas besoin de faire d'autres hypothèses à propos des interactions parmi les orientations perpendiculaires pour les cas que nous avons considérés. En outre, cette analyse prédit clairement des effets de biais aussi bien pour les cadres carrés que pour les cadres rectangulaires, comme les résultats de l'expérience sur les rapports d'aspects des rectangles l'ont montré.

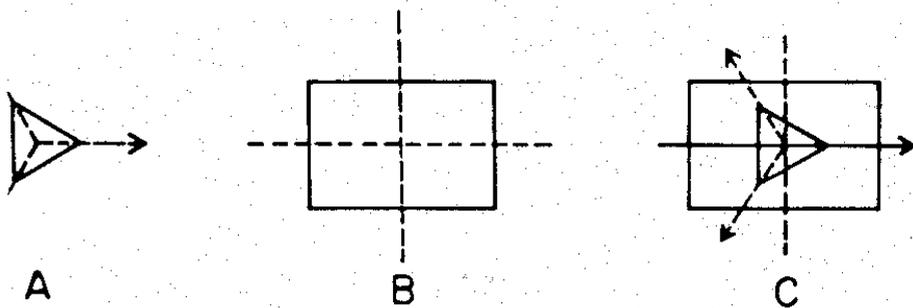


Figure 6

Une analyse symétrique des effets de biais dans la perception de la direction dans laquelle pointe un triangle ambigu.
(Voir le texte pour les explications.)

Cette théorie a pour vertu d'être facilement extensible à d'autres cas car elle fait uniquement appel à la structure symétrique des stimuli composants. Elle devrait donc pouvoir être appliquée de la même manière à toute autre composition mixte dont les composants possèdent les mêmes sous-groupes de symétrie, D3 et D2. Les figures II à IL montrent une extension de ce type aux figures en forme de Y (le groupe de symétrie D3) organisées selon des lignes de configurations ou à l'intérieur de cadres rectangulaires (groupe de symétrie D2). Ces Y comme les triangles équilatéraux sont ambigus en ce sens qu'ils sont vus "pointant" dans l'une des trois directions. Ils peuvent également être biaisés afin de pointer dans une direction parallèle aux axes de symétrie globale à l'intérieur des configurations linéaires et des cadres rectangulaires.

Un second avantage qu'offre cette explication est qu'elle peut être étendue à d'autres structures symétriques analogues. La figure ambiguë du carré/diamant discutée par Mach (1897/1959) est un exemple important de cette possibilité d'extension. La forme d'un carré décalé à 45 degrés peut être aussi bien perçue comme celle d'un diamant droit ou d'un carré décalé, selon l'axe de référence considéré (voir Figure 7). Cette ambiguïté pour la forme du carré/diamant est analysée en termes de structure symétrique comme suit. Cette figure possède une symétrie quadruple (le groupe dièdre D4), et il y a donc quatre façons de choisir ses axes de référence. Néanmoins, il y a seulement deux descriptions de forme possibles de cette figure à l'intérieur de ces quatre cadres de référence possibles. Les propriétés géométriques de cette figure sont identiques pour des cadres partageant des axes identiques — parce que les carrés sont symétriques par rotation pour un angle de 90 degrés et ses multiples entiers. Il n'y a donc que deux ensembles de figures qui importent réellement : les cadres bissecteurs des côtés et les cadres bissecteurs des angles. Les propriétés de la figure diffèrent entre ces deux ensembles de cadres, et la forme de la figure est donc ambiguë en deux sens. Dans la description produite par les cadres bissecteurs des côtés, les côtés sont parallèles et perpendiculaires aux axes des cadres. Lorsqu'on sélectionne un cadre de ce type, la forme perçue est un "carré". Dans la description de la forme produite par les

cadres bissecteurs des angles les côtés sont obliques par rapport aux axes des cadres. Lorsqu'on sélectionne un cadre de ce type, la forme perçue est un "diamant".

La théorie de la symétrie prédit en outre qu'ajouter des figures contextuelles avec des axes de symétrie qui s'alignent sélectivement avec un ensemble de cadres, et non avec l'autre, devrait biaiser sélectivement les percepts de forme correspondants. C'est, en effet, le cas, comme l'illustrent les figures 7A à 7F. Les carrés alignés sur une diagonale à 45 degrés (figure 7C) sont généralement vus comme une colonne de diamants décalée, et les diamants alignés sur une diagonale à 45 degrés sont généralement vus comme une colonne de carrés décalée (Attneave 1968 ; Palmer 1985).

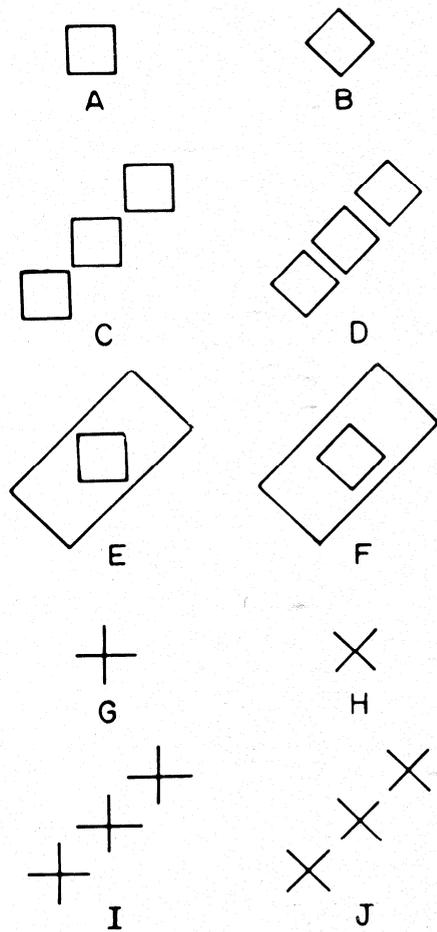


Figure 7

Le carré/diamant ambigu et le +/x dans des conditions contextuelles qui ont des effets de biais sur la forme perçue.

Le psychologue de la Gestalt, Kopfermann (1930), a montré il y a de nombreuses années des effets similaires dus à des cadres rectangulaires (figures 7E et 7F). L'explication en termes de symétrie présentée ici prédit en outre que des effets analogues devraient être produits pour d'autres figures dont la structure de symétrie est identique à celle du carré/diamant ambigu. On peut aisément observer dans les figures 7G et 7H qu'un '+' et un 'x' sont également des percepts ambigus pour la même forme. Ils peuvent aussi être biaisés par une configuration alignée sur une diagonale à 45 degrés ou par des cadres rectangulaires décalés à 45 degrés (Palmer, 1985). Ainsi, la théorie de la symétrie semble corroborée par la confirmation de plusieurs de ses prédictions. Dans la section suivante, je décrirai quelques recherches qui ne sont pas encore publiées et que nous avons récemment effectuées pour tester plus rigoureusement la théorie de la symétrie.

LA THEORIE DE LA SYMETRIE A L'EPREUVE

La stratégie évidente à adopter pour tester une théorie fondée sur la symétrie est d'examiner les conditions dans lesquelles les symétries sont systématiquement détruites. Si la symétrie est un facteur clé, alors les effets de biais de configuration devraient disparaître, ou au moins être réduits de manière significative, lorsqu'on détruit l'axe de symétrie à partir duquel on devrait déduire le processus de sélection du cadre de référence. Plusieurs expériences ont été menées pour fournir de nombreux tests différents pour mettre à l'épreuve cette prédiction. Je n'en décrirai que deux ici.

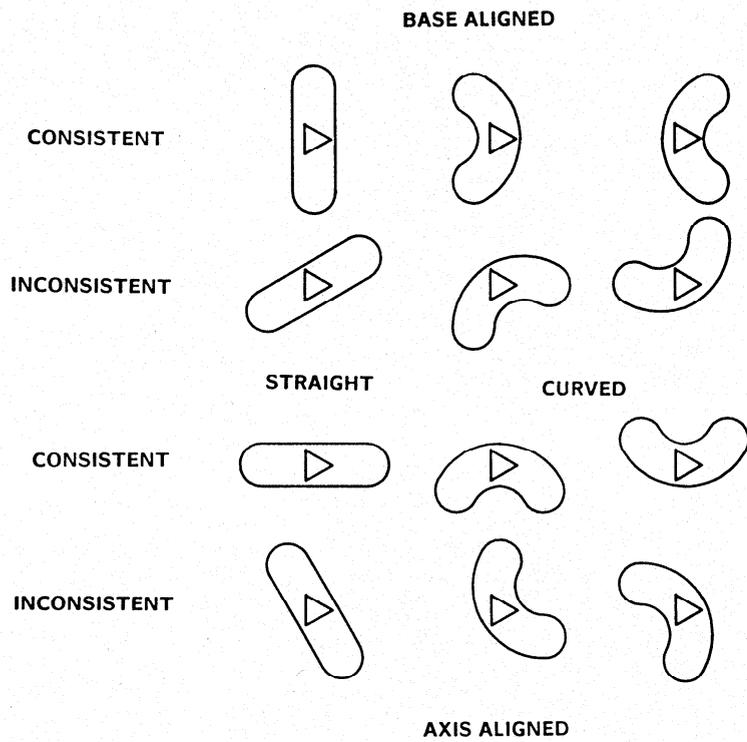


Figure 8

Un exemple de stimuli utilisés dans l'expérience des cadres arrondis.
 Le fait de recourber un cadre le long de son axe long préserve
 la symétrie des conditions d'alignement sur la base mais brise la
 symétrie des conditions d'alignement sur l'axe.

Des cadres arrondis. Dans une expérience, on brise la symétrie d'une cadre rectangulaire en le recourbant sur son axe long. Ceci a eu pour effet de briser la symétrie alignée sur l'axe (la symétrie par rapport à l'axe long) alors que la symétrie alignée sur la base (celle par rapport à l'axe court) est préservée. Ce résultat permet de faire une prédiction très intéressante : les effets de biais produits par les cadres "rectilignes" sur un triangle interne devraient être approximativement égaux, que leur orientation soit alignée sur l'axe ou sur la base, alors que l'effet de biais produit par les cadres arrondis alignés sur la base devrait être nettement supérieur à celui produit par les cadres arrondis alignés sur l'axe. Ce résultat s'explique simplement par le fait que l'axe de symétrie aligné sur la base reste intact une fois le cadre décalé, alors que la symétrie

alignée sur l'axe est brisée. Cette prédiction a été clairement confirmée, comme le montre la figure 9.

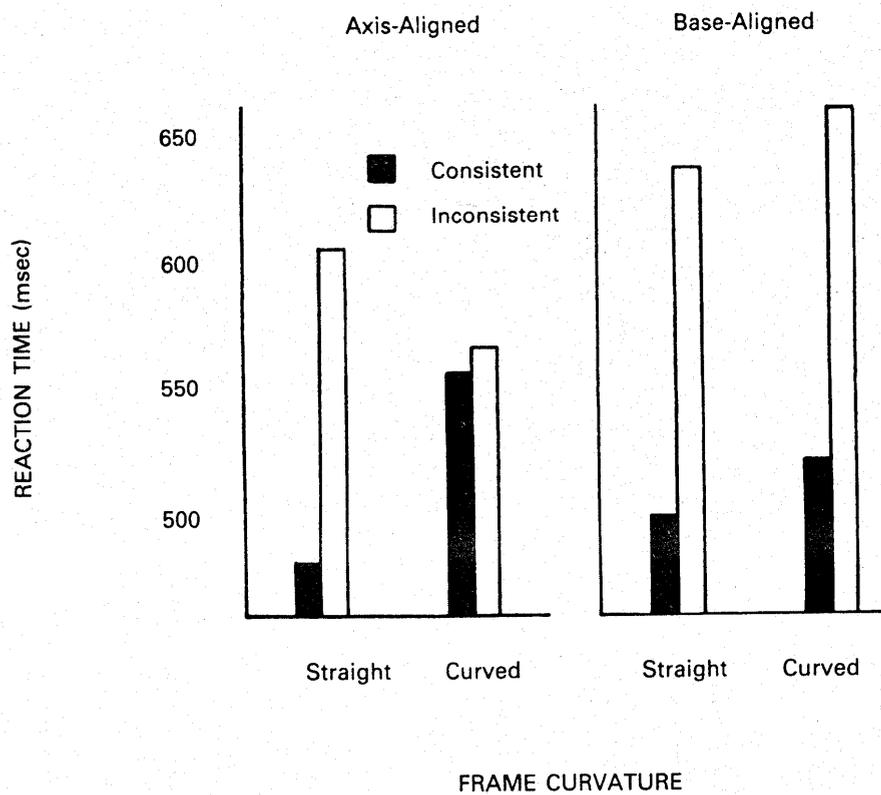


Figure 9

Résultats de l'expérience des cadres arrondis.

Le fait de recourber les cadres alignés sur l'axe élimine les effets de biais, tandis que le fait de recourber les cadres alignés sur la base ne les élimine pas, comme le prédit la théorie de la symétrie.

D'autres expériences ont été effectuées dans lesquelles la symétrie des compositions contenant un triangle ambigu était détruite avec différentes méthodes. La plupart ont fourni une preuve substantielle en faveur de la prédiction proposée par l'hypothèse de la symétrie (voir Palmer 1989). Parmi les expériences effectuées pour tester la théorie de la symétrie, les expériences les plus instructives sont néanmoins celles qui ne confirmaient pas l'hypothèse. C'est pourquoi, je vais à présent décrire l'une de ces expériences.

Parties d'un cadre. Cette expérience fut, à vrai dire, effectuée dans un but légèrement différent des expériences citées précédemment, mais elle a finalement fourni un test intéressant pour l'hypothèse de la symétrie. L'idée était d'étudier la compositionnalité de l'effet de cadre en mesurant les effets de biais produits par ces côtés individuels et toutes leurs combinaisons possibles : les paires, les trios, et le cadre carré complet (voir Figure 10). L'ensemble des stimuli ainsi défini possède la propriété de détruire systématiquement les symétries du cadre dans certains cas alors qu'il les préserve dans d'autres. L'hypothèse de la symétrie pure et simple prédit que les cas de symétrie produiront des effets de biais fiables alors que les cas d'asymétrie n'en produiront pas.

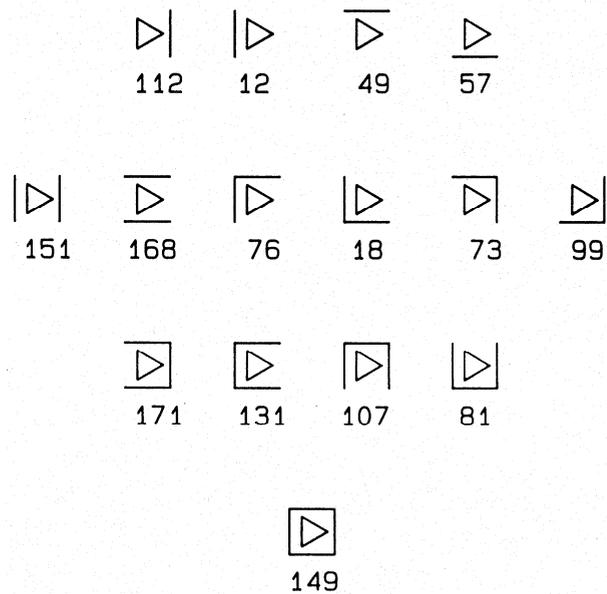


Figure 10

Des exemples de stimuli et les résultats de l'expérience des parties d'un cadre.

Toutes les combinaisons possibles des côtés d'un cadre carré ont été mesurées afin de déterminer la quantité d'interférence qu'ils produisaient. Les nombres sous chaque stimulus montrent les résultats : les TR incohérents - les TR cohérents = l'interférence (en ms).

L'expérience, telle qu'elle fut conçue, envisageait 15 conditions de configuration montrées dans la figure 10 où l'on trouvait des orientations cohérentes et incohérentes pour les triangles pointant vers la gauche ainsi que pour ceux pointant vers la droite. On montrait chaque condition trois fois à chaque sujet, et on mesurait

les TR pour distinguer les triangles pointant vers la droite de ceux pointant vers la gauche.

Les résultats sont montrés sous chaque stimulus en termes de TR d'interférence (les TR incohérents moins les TR cohérents). Il y a de bonnes nouvelles et de mauvaises nouvelles pour la théorie de la symétrie. Les bonnes nouvelles sont que les conditions avec les plus grands effets de biais sont systématiquement associées avec des configurations symétriques : en fait, les six scores de biais les plus élevés viennent tous des figures symétriques. Les mauvaises nouvelles sont de deux sortes. Tout d'abord, toutes les configurations asymétriques sauf une produisent des ensembles de biais statistiquement fiables. Deuxièmement, la configuration qui produit le plus petit biais de toutes est en fait une configuration symétrique.

Il y a de nombreuses façons de tenter d'adapter ce schéma de résultats en modifiant l'hypothèse de la symétrie. Par exemple, le seul cas dans lequel une configuration symétrique produit un minuscule effet pourrait bien être dû au fait qu'il ressemble au premier coup d'œil à un triangle bien plus grand. Malheureusement, cette observation n'apporte pas de lumière pour les effets souvent substantiels des configurations asymétriques. Il serait prématuré de rejeter la théorie de la symétrie sur la base des résultats de cette seule expérience. Ils tendent cependant à diminuer notre croyance que cela soit la seule explication.

LA THEORIE DE LA FREQUENCE SPATIALE BASSE

Une troisième théorie fut proposée par Luis Janez (1983) pour rendre compte de la sélection du cadre de référence. Cette théorie est basée sur une proposition faite à l'origine par Arthur Ginsburg (1971, 1986). Ginsburg affirmait que les phénomènes de gestalt, comme les effets de contexte que nous avons étudiés, peuvent s'expliquer par le contenu des images à basses fréquences spatiales. La théorie de Ginsburg se fonde sur une idée originellement formulée et testée par Campbell et Robson (1968), d'après laquelle les premiers stades dans le système visuel humain contiennent des canaux séparés pour traiter l'information à différentes fréquences et orientations spatiales. L'idée est la suivante : malgré l'apparente unité des percepts spatiaux complexes, le système visuel les décompose en réalité en un ensemble particulier de configurations spatiales primitives (appelés "grilles sinusoïdales") dans lesquelles la quantité de lumière varie comme une onde sinusoïdale dans une

direction. La figure 11 présente quelques exemples de grilles sinusoïdales. C'est un fait mathématique prouvé par Fourier dans un théorème bien connu, que tout modèle bidimensionnel peut être analysé en la somme de beaucoup de grilles de cette sorte à différentes fréquences spatiales, orientations et amplitudes. Par exemple, on voit dans la figure 12 comment un modèle de grille en onde carrée peut être construit pour additionner plusieurs grilles sinusoïdales. Il y a à présent des preuves solides, aussi bien en psychophysique qu'en physiologie, qui confirment l'hypothèse selon laquelle le système visuel décompose les images rétiniennes en réponses à l'intérieur des canaux visuels définis par la fréquence spatiale et l'orientation (DeValois et DeValois 1980).

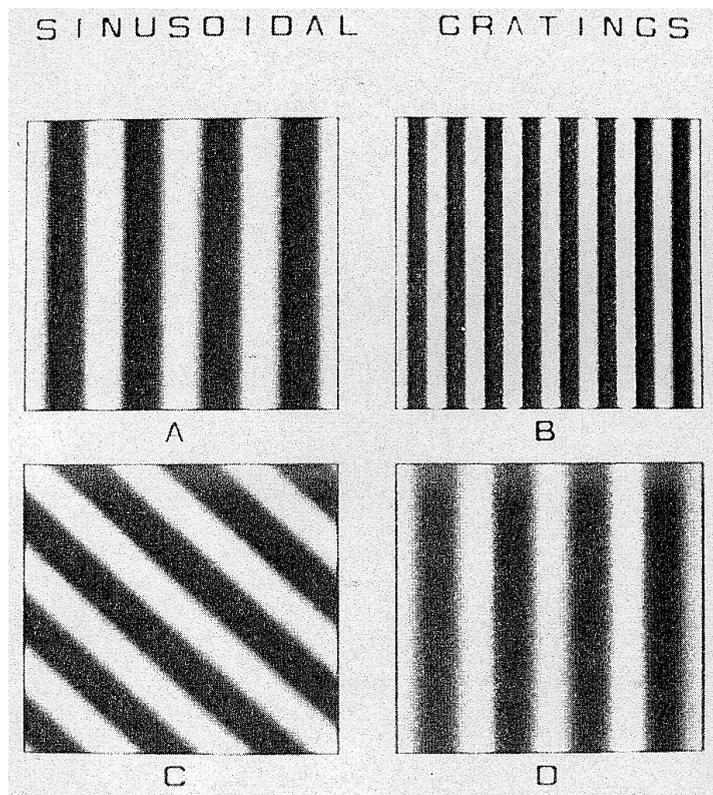


Figure 11

Quelques exemples de grilles sinusoïdales qui varient en fréquence spatiale (A versus B), en orientation (A versus C), et en amplitude (A versus D).

"La fréquence spatiale" fait référence à l'inverse de la largeur du cycle lumière/obscurité de la variation de luminance, les fréquences basses correspondant aux grilles larges. "L'amplitude" fait référence au degré

de contraste entre les parties les plus claires et les parties les plus sombres de la grille, la faible amplitude correspondant à un faible contraste.

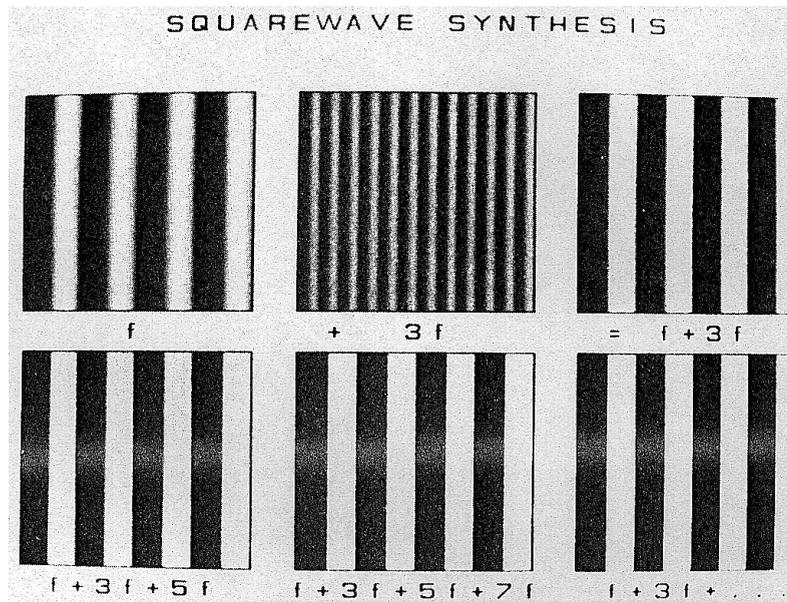


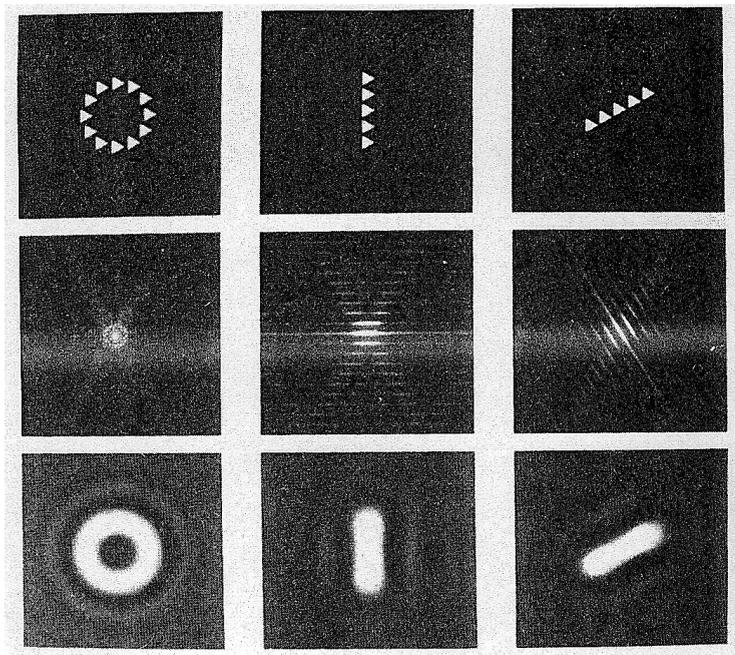
Figure 12

La synthèse d'une grille d'une onde à angle droit à partir de la somme des composants sinusoidaux.

L'image en haut à gauche montre la grille sinusoidale à la fréquence spatiale primitive (f) de l'onde à angle droit à une amplitude maximale. L'image en haut au milieu montre la troisième harmonique comme correspondant à trois fois la fréquence spatiale primitive ($3f$) avec un tiers de l'amplitude. L'image en haut à droite montre la somme de ces deux grilles ($f+3f$). La rangée inférieure d'images montre le résultat obtenu en additionnant des harmoniques impaires supplémentaires — la cinquième harmonique ($f+3f+5f$) à un cinquième de l'amplitude, la septième harmonique ($f+3f+5f+7f$) à un septième de l'amplitude, et ainsi de suite ($f+3f+\dots$) — afin de construire une grille en forme d'onde à angle droit avec des bords tranchants plutôt que flous.

Ginsburg a proposé l'hypothèse selon laquelle les effets de configuration de gestalt correspondent à la structure des productions émises par les canaux visuels à basses fréquences spatiales. Comme preuve, il a montré que lorsque des images sont filtrées à basse fréquence, de sorte que seules les grilles composantes restent à des fréquences spatiales basses, les propriétés émergentes auxquelles les théoriciens gestaltistes se

réfèrent sont souvent explicitement présentes dans les images filtrées. Quelques exemples consistant en des configurations circulaires et linéaires de triangles sont présentés dans la figure 13. La rangée du haut montre les modèles spatiaux initiaux, la rangée du milieu montre leur spectre² de puissance bidimensionnelle, et la dernière rangée montre le résultat du filtrage à basse fréquence : on a enlevé toute la puissance des fréquences spatiales élevées dans les modèles correspondants dans la rangée du haut de sorte que seules les fréquences spatiales basses demeurent. Notons que la forme globale de la configuration est préservée alors que les éléments qui la composent sont complètement perdus. Sur la base de faits de cette sorte, Ginsburg a affirmé que les propriétés de gestalt correspondent à l'information dans des canaux de basse fréquence spatiale dans le système visuel humain.



² Les images montrant le spectre de puissance sont interprétées comme suit. La luminosité de chaque point représente la quantité de puissance donnée pour l'orientation et la fréquence spatiale. Elle est indiquée par ses coordonnées polaires (indiquées respectivement par la direction et la distance du point par rapport au centre). Ainsi, les basses fréquences spatiales sont proches du centre et les fréquences plus élevées sont loin du centre. Les orientations sont représentées de sorte que les grilles verticales (les grilles avec des rayures verticales) produisent des points lumineux le long de l'axe horizontal, et les grilles horizontales produisent des points lumineux le long de l'axe vertical.

Figure 13

Exemples d'images filtrées à basse fréquence afin d'illustrer la théorie de la fréquence spatiale basse pour les phénomènes de gestalt.

La rangée du haut montre des images qui contiennent des configurations circulaires et rectilignes de triangles. La rangée du milieu montre leur spectre complet de puissance. La rangée inférieure montre les images qui résultent de l'usage de la seule information venant des fréquences basses; celles-ci préservent la forme de la configuration mais non pas les éléments individuels qui composent les images.

LA THEORIE DE LA FREQUENCE SPATIALE BASSE A L'EPREUVE

Janez (1983) a développé un modèle particulier de la théorie de Ginsburg et l'a appliqué avec un succès notable aux résultats de plusieurs de nos premières expériences publiées sur la direction dans laquelle pointaient les triangles ambigus (Palmer et Bucher 1981, 1982) et la forme perçue de l'ambigu diamant/carré (Palmer 1985). Nous avons reporté ces résultats dans le cadre d'une simulation indépendante sur ordinateur et nous avons obtenu des coefficients de corrélation généralement supérieurs à 0, 90 pour les données qu'il a incluses dans son modèle. Ainsi, l'explication par la fréquence spatiale semble suffisamment prometteuse pour que des tests expérimentaux soient nécessaires. Nous avons donc fait plusieurs tests différents. Je n'en présenterai qu'un ici.

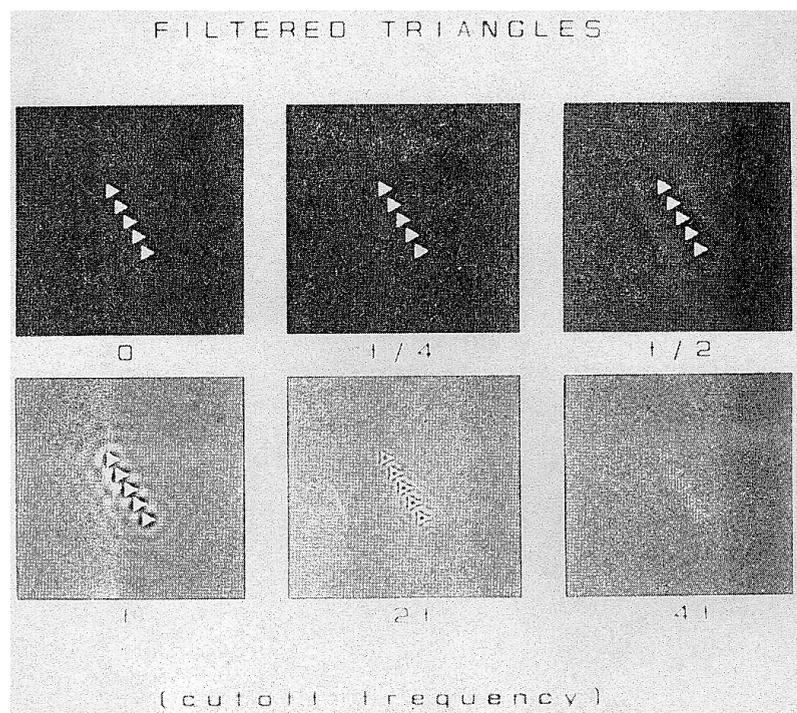


Figure 14

Des exemples de configurations de triangles filtrées à haute fréquence.

Toutes les fréquences spatiales en dessous de la fréquence limite spécifiées (en cycles/côté) ont été éliminées du spectre avant la nouvelle synthèse des images.

Les images filtrées à haute fréquence. Si les canaux de basse fréquence spatiale sont vraiment responsables des effets de gestalt, alors il devrait être possible de les éliminer ou de les diminuer fortement, simplement en enlevant l'information contenue dans les basses fréquences spatiales. Cette opération s'appelle le "filtrage à haute fréquence". Nous pouvons alors utiliser les techniques behavioristes décrites plus haut pour comparer ces stimuli filtrés à haute fréquence avec leurs analogues non-filtrés de façon à déterminer expérimentalement à quel point les effets de configuration se maintiennent après élimination des fréquences spatiales basses. La figure 14 montre des exemples de stimuli filtrés de sorte que seules les fréquences au-dessus d'une fréquence limite spécifiée sont présentes dans les images : 0 (pas de filtrage), 1/4, 1/2, 1, 2, et 4 cycles par rapport au côté du triangle. ("Un cycle par côté"

devrait correspondre à la grille sinusoidale qui va d'un cycle complet lumière-obscurité dans l'intervalle spatial égal à la longueur du côté du triangle.) La conception complète du stimulus dans l'expérience consistait en la combinaison indépendante de quatre facteurs : l'alignement de la configuration (alignement sur l'axe versus alignement sur la base), les biais de configuration (deux orientations cohérentes versus deux orientations incohérentes), fréquence limite du filtre passe-haut (0, 1/4, 1/2, 1, 2, ou 4 cycles) et la direction dans laquelle le triangle pointe (gauche versus droite).

Les résultats montrent que le filtrage des fréquences spatiales basses n'a aucun effet (voir Figure 15). C'est-à-dire, la différence de temps de réaction entre les conditions cohérentes et incohérentes est aussi grande que celle existant dans les images les plus fortement filtrées (lorsque toutes les fréquences en dessous de quatre cycles par côté sont supprimées). La théorie de Janez (1983) spécifie au contraire que tous les effets de configuration devraient disparaître si l'on fixe la limite à deux cycles par côté. Ces résultats constituent une preuve solide du fait que l'information dans les canaux de fréquence spatiale basse — en fait, même dans des fréquences spatiales relativement élevées — n'est pas nécessaire pour l'apparition de cet effet de gestalt. Cependant, il devrait être suffisant pour produire de tels effets, et nous effectuons actuellement des expériences supplémentaires pour tester cette possibilité.

Cette expérience et d'autres, construites pour tester spécifiquement la théorie des effets de gestalt à partir de la fréquence spatiale basse, indiquent clairement que des modèles de cette sorte expliquant ces effets à partir de la fréquence spatiale globale ne sont pas des candidats solides pour expliquer les effets contextuels que nous avons examinés dans nos expériences. Alors que plusieurs expériences fournissent un appui significatif à la théorie de la symétrie et qu'elle semble avoir de meilleurs résultats que les modèles de fréquence spatiale sur plusieurs points, isolément, elle ne semble pas non plus être complètement adéquate. Nous sommes maintenant dans une position embarrassante où nous avons émis de sérieux doutes à propos de tous les modèles actuellement disponibles. La dernière étape devrait donc consister en l'exploration de nouvelles directions théoriques.

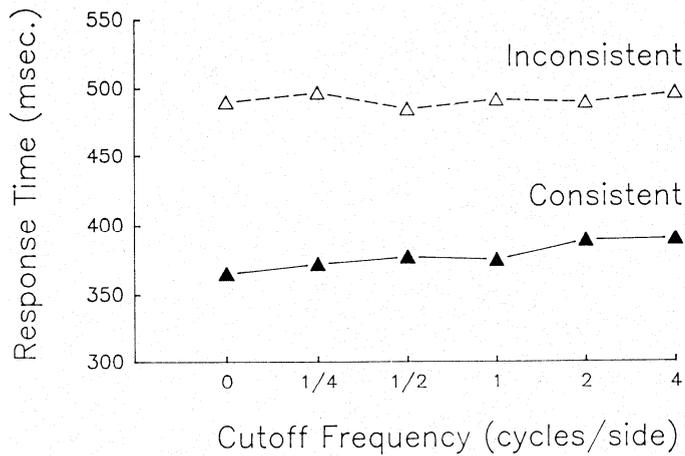


Figure 15

LES THEORIES CONNEXIONNISTES DE LA SELECTION DU CADRE

Il se peut que la voie la plus prometteuse pour les nouveaux développements théoriques sur les phénomènes de gestalt soit proposée par les modèles "connexionnistes" ou de "processus distribués en parallèle (PDP)" ou des "réseaux neuronaux" (Rumelhart et McClelland 1986 ; McClelland et Rumelhart 1986). Ce sont des arrivants relativement nouveaux parmi les théories sur les phénomènes perceptuels complexes, bien que les réseaux neuronaux aient été précédemment proposés pour expliquer un certain nombre de phénomènes visuels de bas niveaux comme les bandes de Mach et des effets de contrastes variés (Cornsweet 1970). L'approche connexionniste que nous allons examiner est assez différente des trois théories discutées précédemment. En effet, elle a pour principal objet les mécanismes sous-tendant les phénomènes perceptuels, alors que l'objet des théories précédentes était la structure du stimulus qui est responsable de la production de ces phénomènes. Naturellement, il faut, pour obtenir une compréhension complète du phénomène à modeler, spécifier les deux effets. Mon expérience des réseaux neuronaux m'a conduit à penser qu'ils pouvaient élargir notre perspective sur la manière dont on pouvait expliquer les phénomènes de gestalt dans des directions importantes qui ne sont pas abordées par les théories de la structure du stimulus.

Les modèles connexionnistes se fondent sur l'hypothèse selon laquelle l'information est représentée par des modèles d'activation

d'unités semblables à des neurones. Les unités sont liées à l'aide de connexions de type synaptique qui peuvent être excitatrices ou inhibitrices, à des degrés variables. Certaines unités — appelées unités d'entrée — sont excitées directement par la structure dans l'environnement, et les autres unités — appelées unités de sortie — représentent directement les réponses du système. Entre les deux, on peut trouver de nombreux niveaux d'unités cachées qui mettent en œuvre le processus d'information requis pour mettre en relation les unités d'entrée et les unités de sortie. Les boucles de rétroaction parmi les unités expliquent pourquoi les systèmes de ce type présentent un comportement dynamique qui conduit le système à "s'établir" dans le modèle d'activité le plus compatible avec la force des connexions entre les unités.

Les propriétés de ces réseaux de neurones parallèles, densément connectés, sont conformes à certaines idées avancées il y a de nombreuses années par les théoriciens de la Gestalt. La relation entre la théorie Gestalt et les réseaux dynamiques connexionnistes est établie par le biais du concept abstrait de "gestalts physiques" proposé par Kohler (1920). Comme nous l'avons vu, il identifiait une gestalt physique avec un système dynamique qui se fixe dans un état d'équilibre d'énergie minimale, de même qu'une bulle de savon se déforme en une sphère parfaite ou peut-être, comme Kohler le suggérait, comme le cerveau construisant un percept organisé. Sa version propre de cette hypothèse abstraite affirmait que le cerveau fonctionnait par l'interaction de champs électriques complexes mais, comme mentionné ci-dessus, plusieurs expériences ont montré que ce n'était pas le cas (Lashley, Chow et Semmes 1952 ; Sperry et Milner 1957). Néanmoins, la discussion précédente des réseaux connexionnistes dynamiques suggère que Kohler avait peut être raison d'un point de vue abstrait et tort uniquement dans le cas de figure.

L'analyse du comportement temporel des réseaux de neurones dynamiques montre que ce sont des exemples modernes des gestalts physiques. Ils sont initialement activés par un stimulus externe qui affecte quelques-unes des unités d'entrée et cette activation est alors propagée par des connexions excitatrices et inhibitrices à travers le réseau jusqu'à ce qu'il "s'installe" dans un état d'équilibre après lequel aucun autre changement n'a lieu. John Hopfield (1982, 1984) a prouvé mathématiquement que, si les connexions entre les unités sont symétriques, l'état d'équilibre du réseau peut être caractérisé

par un minimum dans une fonction d'énergie explicite définie sur la totalité du réseau, et que le système convergera inexorablement vers cet état d'énergie minimale. L'état d'énergie minimale représente un compromis optimal entre l'information introduite dans le réseau par une stimulation externe et l'information encodée dans les interconnexions entre les unités. Bien que la "fonction d'énergie" minimisée dans le comportement de convergence de tels réseaux ne soit pas une énergie physique réelle — elle est simplement analogue à l'énergie physique —, de tels réseaux connexionnistes dynamiques sont clairement semblables au concept de Kohler des *gestalts physiques* ; ils n'avaient tout simplement pas encore été inventés.

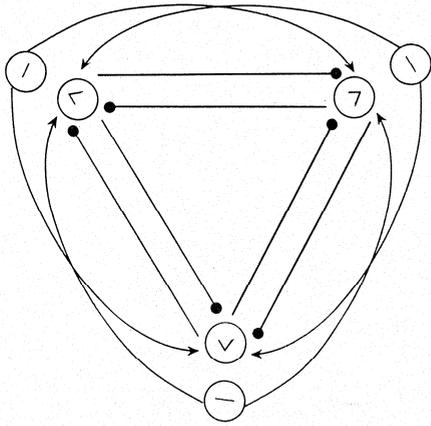


Figure 16

Considérons à présent comment construire un réseau connexionniste simple qui pourrait rendre compte de certains phénomènes dans la perception de la direction dans laquelle pointent les triangles équilatéraux. Pour commencer, supposons qu'un triangle est vu comme pointant dans une direction particulière lorsque la perception d'un de ces angles (sommets) domine celle des deux autres. Ceci peut être modélisé dans un réseau simple comme le montre la figure 16. Les unités sont représentées comme des cercles et leurs connexions par des segments de droite entre elles. Les droites avec des flèches indiquent les connexions excitatrices et les droites terminées par des points indiquent des connexions inhibitrices. Dans le réseau d'un seul triangle ambigu, il y a trois unités d'entrée représentant les trois côtés du triangle. Ces unités forment les connexions excitatrices des unités représentant les

angles auxquels elles appartiennent. Parce que ces unités d'angle s'inhibent mutuellement dans le réseau, elles produisent quelque chose appelé le comportement vainqueur ("winner-take-all") : plus un angle est activé, plus il supprime l'activation des deux autres unités d'angle, de sorte que finalement un des trois angles dominera complètement les deux autres. Ainsi, il y a juste trois états stables dans lequel le réseau des angles atteint un équilibre, chacun correspondant à la domination sur les autres de l'une des trois unités d'angle. Ceci pourrait rendre compte de l'ambiguïté à trois volets dans la perception du triangle : le triangle semble pointer dans la direction de la bissectrice de l'angle dont l'unité domine le réseau vainqueur, et l'une des trois seulement dominera à un moment donné.

Le comportement dynamique de ce simple réseau et sa relation aux formulations "d'énergie minimum" peuvent être mieux compris si l'on considère l'espace des états du système consistant en trois unités d'angle. Si l'activation de chaque unité d'angle peut varier entre 0 et 1, alors l'état d'activation de ce système de trois unités peut être représenté à un moment particulier à l'aide d'un seul point dans un cube d'unités tridimensionnel (voir figure 17A). Les trois états stables du réseau sont indiqués dans la figure 17A par les trois cercles aux coins de l'espace désignés par $(1,0,0)$, $(0,1,0)$, $(0,0,1)$. La dynamique du système peut être représentée par des vecteurs à chaque point (représentés par des flèches dans la figure 17B) qui montrent comment l'état du système — c'est-à-dire, les activations des trois unités à la fois — changera après un petit moment. Le diagramme a été simplifié afin de pouvoir être représenté dans une figure à deux dimensions. La figure 17B montre donc seulement les vecteurs dynamiques pour des états du système qui se situent dans le plan défini par les trois points représentant les états stables. (Ceci équivaut à contraindre le système de sorte que son activation totale est maintenue constante harmonieusement). Les vecteurs montrent que tous les états, excepté les trois points d'équilibre, sont instables sur ce plan au sens où ils tendront à changer inexorablement dans la direction de l'état d'équilibre le plus proche : $(1,0,0)$, $(0,1,0)$ ou $(0,0,1)$. Dans le langage des systèmes dynamiques, ces trois états stables d'équilibre sont des "pôles d'attraction" vers lesquels le système converge inévitablement. Le comportement dynamique du système peut ainsi être décrit par le "chemin" qu'il prend au cours du temps à travers cet espace d'états, et tous les chemins possibles

mènent à l'un de ces trois états correspondant au fait de voir le triangle pointer dans l'une de ces trois directions possibles.

Les dynamiques de ce système simple à trois unités peuvent aussi être capturées par la topométrie de chaque point dans l'espace d'états. Nous ne nous intéresserons pas ici à la forme mathématique de cette fonction d'énergie (voir Hopfield 1982, 1984) mais, qualitativement parlant, des états de haute énergie peuvent être instables et avoir tendance à se diriger vers des états adjacents de basse énergie, comme dans les systèmes thermodynamiques, jusqu'à ce que le système atteigne un état stable d'énergie minimale. Si nous restreignons à nouveau la situation au système à trois unités dont l'activation totale est fixée harmonieusement, la surface d'énergie décrivant les dynamiques du système est tracée dans la figure 17C. Le comportement dynamique du système peut maintenant être décrit approximativement comme le comportement d'une balle placée sur cette surface à un point correspondant à l'état initial du système : la balle roulera jusque dans le creux — c'est-à-dire le "bassin d'attraction" ou "l'état d'énergie minimum" — le plus près possible de son point de départ. Cette analogie avec des systèmes dynamiques tendant vers le minimum (minimum-seeking) devrait être à présent parfaitement claire : ces réseaux sont en effet des exemples de gestalts physiques.

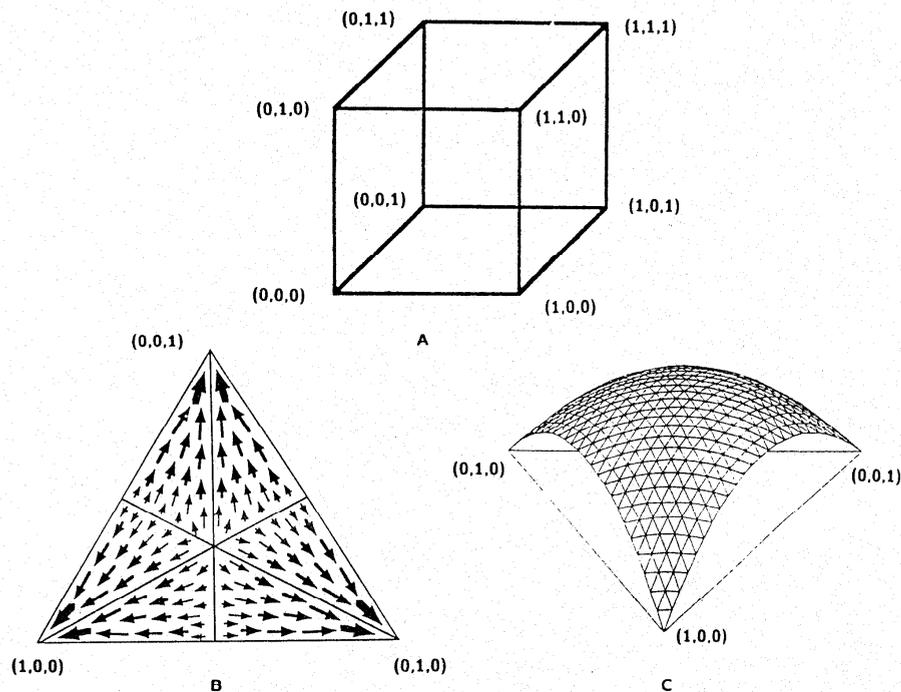


Figure 17

Représentations des dynamiques de l'activation pour le réseau montré dans la figure 16.

L'activation habituelle des trois unités d'angle définit l'état du système à l'intérieur de son "espace d'états" (A). La manière dont cet état change à travers le temps peut être représentée par des vecteurs à l'intérieur de l'espace d'états (comme le montre le sous-espace en B) et peut être déterminée par une "surface d'énergie" définie sur l'état d'espace (comme le montre le sous-espace en C).

Une propriété importante de la perception des triangles ambigus est leur stabilité multiple : la direction dans laquelle ils pointent tend à changer dans le temps dans un sens puis dans un autre. Ceci peut être modélisé dans un réseau connexionniste en parallèle en faisant l'hypothèse que les unités d'angles, comme les neurones se fatiguent lorsqu'ils sont activés pendant une période étendue, diminuant ainsi leur temps de réponse dans le temps. Cette réduction diminuera finalement suffisamment l'activation de l'unité de l'angle dominant de sorte que tôt ou tard l'une des autres unités viendra à dominer. Par conséquent, si ce réseau connexionniste est composé d'unités se fatiguant, cela générera le type de comportement multistable observé dans la perception de triangles ambigus.

Comment des aspects plus complexes des phénomènes de gestalt peuvent-ils être modélisés dans les réseaux connexionnistes ? Si de nombreux triangles sont présents dans la composition, il y aura bien sûr de nombreux réseaux correspondants, et les effets de gestalt naîtront des interactions parmi ces réseaux. Par exemple, considérons le fait que des triangles arrangés au hasard, tels que ceux présentés dans la figure 1B, pointent toujours dans la même direction plutôt qu'au hasard dans des directions différentes. Ceci pourrait avoir lieu si les réseaux de triangles étaient interconnectés de sorte que les unités d'angle soient connectés de manière excitatrice aux autres unités d'angle qui ont la même direction, et de façon inhibitrice aux autres unités d'angle qui ont des directions différentes. Ces interconnexions peuvent être immédiates ou réalisées par l'intermédiaire de quelques unités plus centrales et sélectives du point de vue de l'orientation. Dans chaque cas, les réseaux de triangles seraient alors en interaction les uns avec les autres de sorte que le réseau-de-réseaux dans sa totalité serait installé avec une solution d'énergie minimum. Il se trouve qu'il y a trois minima globaux dans cet espace d'états plus grand, et qu'ils correspondent aux états dans lesquels tous les triangles pointent dans la même direction. Ainsi, si le plus grand réseau-de-réseaux converge vers l'une de ces solutions optimales, il mimera le couplage perceptuel observé parmi un groupe de triangles rangés au hasard.

Des résultats plus complexes encore peuvent apparaître en modélisant les effets de configuration telles les flèches linéaires dans la figure 1C et 1D. En effet, elles sont trop complexes pour faire ici l'objet d'un examen détaillé, on peut néanmoins considérer rapidement quelques possibilités intéressantes. L'une des possibilités envisageables est que les connexions excitatrices entre les unités d'angle ayant la même direction soient plus fortes pour les angles qui pointent dans une direction parallèle ou perpendiculaire à la ligne de configuration. Quoique le pourquoi d'un tel effet ne soit pas clair — il peut être basé sur des considérations telles que la symétrie globale ou locale —, l'effet désiré sera cependant obtenu, c'est-à-dire que le comportement dynamique du réseau sera biaisé vers un minimum global unique qui correspond à la direction perceptuellement biaisée. L'espace d'états d'un tel réseau pourrait bien sûr être beaucoup plus complexe que celui illustré dans la figure 16, et il aurait de nombreux minima locaux aussi bien qu'un minimum global unique. Le minimum global correspondrait à l'état dans lequel tous les triangles sont vus comme pointant dans la

direction parallèle ou perpendiculaire à la ligne de configuration. Les minima locaux les plus proéminents correspondraient aux deux autres états dans lesquels tous les triangles pointent dans la même direction, mais qui n'est pas la direction parallèle ou perpendiculaire à la ligne de configuration. La différence d'énergie entre les minima globaux et locaux devraient correspondre à la grandeur de l'effet d'interférence de configuration tel qu'il est mesuré par les procédures expérimentales définies précédemment dans ce chapitre. La taille de cette différence d'énergie devrait également varier avec les types de facteurs explorés dans nos expériences.

Personne ne sait pour le moment à quel point une théorie de ce type pourra rendre compte des nombreux faits connus à propos des effets contextuels sur la perception de la direction dans laquelle pointent les triangles ambigus, ou comment faire pour la tester. Le modèle particulier pour les triangles multiples que nous venons de décrire présente un problème majeur : il ne se généralise pas à d'autres formes apparentées d'effets de cadre de référence. Tel qu'il est décrit, il ne peut pas, par exemple, rendre facilement compte de l'influence des cadres rectangulaires, ni de celle des rayures de texture sur la perception des triangles ambigus (voir Figures 1E et 1H) ; il ne peut pas non plus rendre raison des effets de configuration ou de cadre pour les "Y" ambigus (voir figures 1I à 1L). L'un des problèmes, tout du moins, est qu'il semble trop dépendant des "unités d'angle" et de leurs interactions. Je doute toutefois que cela soit un désavantage essentiel des modèles connexionnistes de ces phénomènes, car le comportement global de ce système dépend très peu du choix de ces unités représentationnelles spécifiques. Par exemple, la théorie pourrait facilement être généralisée par l'introduction d'unités défectueuses de symétrie qui auraient des interactions similaires à celles décrites ci-dessus. Les réseaux définis ainsi auraient des comportements dynamiques semblables à ceux décrits aussi longtemps que leurs surfaces d'énergie dans leurs espaces d'états respectifs seraient similaires, puisque ce sont elles qui déterminent leur comportement. Ainsi, l'essentiel c'est seulement qu'il y ait un réseau-de-réseaux consistant en sous-réseaux vainqueurs à trois unités, interconnectés de manière appropriée. Il reste à trouver les unités primitives permettant de répondre au bon type de structure spatiale dans l'environnement. Ceci n'est pas un problème facile, c'est certain, mais

c'est un problème qui pourrait logiquement être indépendant de la structure globale du réseau-de-réseaux.

Il reste encore à examiner si une théorie connexionniste de ce type peut être cohérente avec tous les faits connus, du moins la plupart, sur les effets de cadre de référence. Il reste encore beaucoup de problèmes inabordés, et encore moins résolus, à l'intérieur de théories de réseaux de ce type, et elles constituent des modèles réputés pour être difficiles à utiliser. Tout ce qu'on peut dire sur ce point c'est que les réseaux connexionnistes dynamiques représentent une direction prometteuse pour les futures théorisations sur les phénomènes de gestalt tels que ceux que nous avons considérés dans cet article.

RESUME ET CONCLUSION.

Nous sommes à présent presque revenus à notre point de départ. Notre discussion des théories modernes de la perception de gestalt a débuté par une brève description de la théorie, aujourd'hui discréditée, de l'interaction corticale due aux champs électriques. Nous avons ensuite décrit trois théories computationnelles récentes d'un phénomène de gestalt particulier qui a fait l'objet d'une étude complète dans notre laboratoire : les effets de contexte sur la perception de la forme et de l'orientation de figures géométriques simples. Les différences majeures parmi ces trois modèles tiennent à la nature de la structure du stimulus proposé pour diriger la sélection des cadres de référence perceptuels : l'orientation de l'allongement maximal, la symétrie ou la puissance de basse fréquence spatiale. Chaque théorie semblait initialement plausible et avait obtenu un certain succès empirique, mais aucune n'a survécu à la vérification expérimentale de ses prédictions critiques. Notre recherche d'un modèle de remplacement nous a conduit finalement à un examen des réseaux de neurones dynamiques. Nous avons trouvé des preuves solides montrant qu'ils peuvent être considérés à l'intérieur du cadre de la théorie de la Gestalt, en particulier en se plaçant dans la perspective de la description abstraite par Kohler des gestalts physiques. Enfin, nous avons montré que de nombreux aspects concernant la direction dans laquelle pointe un triangle peuvent être capturés par des réseaux de neurones relativement simples composés d'unités se fatiguant, ou par des interactions plus complexes parmi de nombreux réseaux de cette sorte. Si la promesse initiale de tels modèles peut être réalisée, une nouvelle ère pourrait

s'ouvrir pour la théorie de la Gestalt dans laquelle la vieille notion d'interaction à travers des champs électriques est remplacée par un nouveau modèle d'interaction à travers des réseaux de neurones dynamiques.

Remerciements

Cette recherche a été pour partie financée grâce aux subventions de la National Science Foundation BNS-83-19630 et BSN-87-19934 pour l'auteur et à la subvention de la Fondation Alfred P. Sloan pour l'Institut de Sciences Cognitives de l'Université de Californie, Berkeley. J'aimerais remercier Nancy Bucher, John Kruschke, et Paul Kube pour leurs nombreuses contributions intellectuelles au projet de recherche décrit dans ce chapitre. Ephram Cohen et Jack Gallant ont fourni une aide précieuse pour les logiciels utilisés dans les expériences, et Paul Kube a écrit seul tous les logiciels pour l'analyse de Fourier et la synthèse d'images, incluant le modèle de basse fréquence spatiale de Janez. Je remercie également Craig Fox pour ses remarques utiles sur la première version de cet article.

(Traduction de Anne Laure Fayard)

Bibliographie

- Asch, S. E. and Witkin, H. A. (1948) *Studies in Space Orientation: I. Perception of the Upright with Displaced Visual Fields*. *Journal of Experimental Psychology*, 38, 325-7.
- Attneave, F. (1968) *Triangles as Ambiguous Figures*. *American Journal of Psychology*, 81, 447-53.
- Brady, M. (1983) *Criteria for Representation of Shape*. In J. Beck, B. Hope and A. Rosenfeld (eds.), *Human and Machine Vision*. New York: Academic Press.
- Bucher, N. M. and Palmer, S. E. (1985) *Effects of Motion on the Perceived Pointing of Ambiguous Triangles*. *Perceptions and Psychophysics*, 38, 227-36.
- Campbell, F. W. and Robson, J. G. (1968) *Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings*. *Journal of Physiology*, 197, 551-6.
- Cornsweet, T. N. (1970) *Visual perception*. New York: Academic Press.
- DeValois, R. L. and DeValois, K. K. (1980) *Spatial Vision*. *American Review of Psychology*, 31, 309-341.
- Duncker, K. (1929) *Über induzierte Bewegung*. *Psychologische Forschung*, 12, 180-256. (Condensed in W. Ellis (ed. and trans.), *Source Book of Gestalt Psychology*. New York: Humanities Press, 1950).
- Gibson, E. J. (1969) *Principles of Perceptual Learning and Development*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Ginsburg, A. (1971) *Psychological Correlates of a Model of the Human Visual System*. Unpublished master's thesis. Air Force Institute of Technology.

- Ginsburg, A. (1986) *Spatial Filtering and Visual Form Perception*. In K. R. Boff, L. Kaufman and J. P. Thomas (eds.), *Handbook of Perception and Human Performance, Volume II: Cognitive Processes and Performance*. New York: John Wiley and Sons.
- Hopfield, J. J. (1982) *Neuronal Networks and Physical Systems With Emergent Collective Computational Properties*. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 79, 2554-8.
- Hopfield, J. J. (1984) *Neurons with Graded Response Have Collective Computational Properties Like Those of Two-state Neurons*. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 81, 3088-3092.
- Humphreys, G. W. (1983) *Reference Frames and Shape Perception*. *Cognitive Psychology*, 15, 309-341.
- Janez, L. (1983) *Stimulus Control of the Visual Reference Frame: Quantitative theory*. *Informes de Psychologia*, 133-47.
- Koehler, W. (1920) *Die physischen Gestalten in Ruhe und in stationären Zustand*, Braunschweig.
- Koehler, W. and Held, R. (1949) *The Cortical Correlate of Pattern Vision*. *Science*, 110, 414-19.
- Kopfermann, H. (1930) *Psychologische Untersuchungen über die Wirkung zweidimensionaler körperlicher Gebilde*. *Psychologische Forschung*, 13, 293-364.
- Lashley, K. S., Chow, K. L. and Semmes, J. (1951) *An Examination of the Electrical Field Theory of Cerebral Integration*. *Psychological Review*, 58, 123-36.
- Levine, M. W. and Shefner, J. M. (1981) *Fundamentals of Sensation and Perception*. Reading, MA.: Addison-Wesley.
- McClelland, J. L. and Rumelhart, D. E. (1986) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Volume 2: Psychological and Biological Models*. Cambridge, MA.: MIT Press/Bradford Books.
- Mach, E. (1959) *The Analysis of Sensations*. (Translated from the German edition, 1897) New York: Dover.
- Marr, D. (1982) *Vision*. San Francisco: Freeman.
- Marr, D. and Nishihara, H. K. (1977) *Representation and Recognition of the Spatial Organization of Three Dimensional Shapes*. Proceedings of the Royal Society of London, 207, 187-217.
- Palmer, S. E. (1975) *Visual Perception and World Knowledge*. In D. A. Norman and D. E. Rumelhart (eds.), *Explorations in Cognition*. San Francisco: Freeman.
- Palmer, S. E. (1980) *What Makes Triangles Point: Local and Global Effects in Configurations of Ambiguous Triangles*. *Cognitive Psychology*, 12, 285-305.

- Palmer, S. E. (1983) *The Psychology of Perceptual Organization: A Transformational Approach*. In J. Beck, B. Hope and A. Rosenfeld (eds.), *Human and Machine Vision*. New York: Academic Press.
- Palmer, S. E. (1985) *The Role of Symmetry in Shape Perception*. *Acta Psychologica*, 59, 67-90.
- Palmer, S. E. (1989) *Reference Frames in the Perception of Shape and Orientation*. In B. Shepp and S. Ballesteros (eds.), *Object Perception: Structure and Process*. Hillsdale, NJ.: Erlbaum.
- Palmer, S. E. and Bucher, N. M. (1981) *Configural Effects in Perceived Pointing of Ambiguous Triangles*. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 88-114.
- Palmer, S. E. and Bucher, N. M. (1982) *Textural Effects in Perceived Pointing of Ambiguous Triangles*. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 693-708.
- Palmer, S. E., Simone, E. J. and Kube, P. (1988) *Reference Frame Effects on Shape Perception in Two versus Three Dimensions*. *Perception*, 17, 147-63.
- Rock, I. (1973) *Orientation and Form*, New York: Academic Press.
- Rock, I. (1990) *The Concept of Reference Frame in Psychology*. In I. Rock (ed.), *The Legacy of Salomon Asch: Essays in Cognition and Social Psychology*. Hillsdale, N. J.: Erlbaum.
- Rumelhart, D. E. and McClelland, J. L. (1986) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Volume 1: Foundations*. Cambridge, MA.: MIT Press/Bradford Books.
- Sperry, R. W. and Milner, N. (1955) *Pattern Perception Following the Insertion of Mica Plates into Visual Cortex*. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 48, 463-9.
- Weil, H. (1952) *Symmetry*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Wiser, M. (1981) *The Role of Intrinsic Axes in Shape Recognition*. Paper presented at the Third Annual Conference of Cognitive Science Society, Berkeley, CA.