

J.-P. D'ALES, J. FROMENT* et J.-M. MOREL**

Reconstruction visuelle et généricité

L'objet de cet article est de faire le point sur ce que l'on peut appeler le gestaltisme géométrique. Cette doctrine, née dans les années 20, s'est proposée de formaliser la perception visuelle et a développé pendant cinquante ans une méthode expérimentale originale. Nous expliquerons d'abord comment les gestaltistes définissent et expliquent la formation des objets visuels. Leur approche est pratiquement axiomatique et l'hypothèse se dégage de l'existence, comme en physique, d'un petit nombre de principes organisateurs. Nous décrirons les principes gestaltistes les plus importants et nous montrerons qu'ils suffisent à faire de véritables commentaires de figures, qui sont presque formels. Nous montrerons comment la plupart des principes gestaltistes se déduisent d'un principe, plus abstrait et plus mathématisable, de généricité.

Mots-clés : *gestaltisme géométrique, formalisation, objets visuels, généricité.*

Visual Reconstruction and Genericity. *The aim of this article is to review the concept known as geometrical gestaltism. This doctrine, which was born in the 1920's, proposed a formalisation of visual perception and, over a period of fifty years, developed an original experimental method. We shall first explain how the gestaltists define and explain the formation of visual objects. Their approach is practically axiomatic and the hypothesis emerges, as in physics, that there exist a small number of organisational principles. We shall describe the main gestaltist principles and show that they suffice to provide near-formal commentaries on figurative shapes. We show further that the majority of the gestaltist principles derive from an abstract mathematisable principle, namely genericity.*

* PRISME, UFR Mathématiques et Informatique, Université René Descartes, 45 rue des Saints-Pères, 75270 PARIS Cedex 06.

E-mail : froment@math-info.univ-paris5.fr

** CMLA, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 61 av. du Président Wilson, 94235 CACHAN Cedex.

E-mail : morel@cmla.ens-cachan.fr

Key words: *geometrical gestaltism, formalisation, visual objects, genericity.*

1 - INTRODUCTION

La reconstruction visuelle, telle qu'elle est définie par Kanizsa (Kanizsa 1979 et 1980), consiste, à partir d'une image, à détecter les objets présents dans le champ visuel, à déterminer leur degré de rigidité, à distinguer comment ils s'articulent ou se décomposent en parties, ou au contraire comment ils sont regroupés pour former des ensembles perceptifs homogènes, et enfin comment ils sont positionnés dans l'espace. En s'appuyant sur les travaux de l'école de psychologie de la Gestalt (voir par exemple Wertheimer 1923 et Ellis 1939), Kanizsa affirme que la reconstruction visuelle chez l'homme est effectuée en suivant certaines règles ou principes bien définis. Ces lois permettent d'organiser les données sensorielles fournies par les yeux (c-à-d. la quantité de lumière reçue à chaque instant par les cellules de la rétine), et de construire une interprétation cohérente de ces données. Les gestaltistes ont montré que l'application de ces principes organisateurs obéit à une certaine logique, qu'ils ont appelée grammaire ou syntaxe de la vision. En particulier, il peut arriver dans certains cas que l'application des principes gestaltistes conduise à plusieurs interprétations conflictuelles. Deux principes peuvent amener à deux regroupements ou à deux rigidifications contradictoires. Il faut alors savoir gérer ces situations conflictuelles ; l'une de ces interprétations possibles domine-t-elle les autres, et si oui laquelle ? Ou bien y a-t-il apparition d'un compromis entre les interprétations ? Nous verrons que l'application de la grammaire de Kanizsa permet justement de répondre à ces questions.

Il est important de noter que pour Kanizsa aussi bien que pour l'école gestaltiste, cette reconstruction visuelle est effectuée indépendamment de toute connaissance a priori sur le contenu sémantique de l'image. Elle est basée uniquement sur les structures géométriques du champ d'intensité lumineuse (et éventuellement de couleur) qui compose l'image. Une conséquence immédiate de cette remarque est que d'un point de vue théorique, la mise en œuvre informatique de la reconstruction visuelle à partir d'images numériques ne devrait pas poser de problème majeur. La pratique, cependant, a fait surgir des difficultés nouvelles qui n'étaient pas prévues par la théorie.

En effet la grammaire de Kanizsa, ainsi que la théorie de la Gestalt, portent sur des objets élémentaires que sont les points, les

droites, les courbes, les ensembles connexes homogènes du point de vue chromatique, etc... Ce sont d'ailleurs ces mêmes objets qui apparaîtront dans notre discussion tout au long de l'article. Le programme gestaltiste suppose donc que ces objets sont déjà constitués. Or il s'est avéré que toutes les tentatives d'implantation sur ordinateur des principes gestaltistes ont buté sur l'extraction de ces objets élémentaires sur des images réelles. La détection de ces éléments apparemment très simples est une tâche beaucoup plus ardue qu'il n'y paraissait au premier abord. En effet, ce sont des abstractions, et leur réalité physique est parfois difficile à mettre en évidence ; par exemple la détection de la frontière entre deux zones homogènes texturées est un problème délicat en traitement des images.

Nous pouvons décomposer le problème de la compréhension mathématique de la perception visuelle en deux parties :

a) Computer vision : cette discipline s'attache à définir correctement les bords ou les contours, et les régions chromatiquement homogènes¹.

b) La "logique de la vision" telle qu'elle a été définie par Max Wertheimer et commentée par Gaetano Kanizsa. Il s'agit de détecter, à partir des contours présents dans l'image, les objets solides, de comprendre comment ils s'articulent, et quelle est leur position relative dans l'espace.

Nous nous intéressons ici plus particulièrement au point b). Nous nous proposons de reprendre la discussion amorcée par Kanizsa sur les principes gestaltistes. Dans un premier temps, nous reformulerons ces principes, en leur donnant une tournure un peu plus mathématique. Puis nous montrerons que l'application d'une partie de ces lois est elle-même régie par un méta-principe régulateur, que nous appellerons principe de généralité. Ce principe permet en particulier de gérer certaines situations conflictuelles dans l'application des principes organisateurs. Il est en fait multiforme, et il existe plusieurs manières de le définir. Par exemple, il est possible d'interpréter certains principes gestaltistes comme des instanciations du principe de généralité dans des situations bien particulières — nous reviendrons plus en détail sur cette définition dans le paragraphe consacré à ce principe. On peut aussi l'assimiler

¹ Elle correspond à la recherche d'une première esquisse brute, ce que David Marr appelle le raw primal sketch.

au postulat suivant : dans la reconstruction visuelle, il est toujours supposé que les objets présents dans le champ visuel ne sont pas perçus dans une situation ou sous un angle de vue "particulier", mais, au contraire, générique. On entend par générique une vue dont la structure ne change pas quand on modifie légèrement l'angle d'observation.

Afin d'illustrer notre propos, nous allons prendre l'exemple du cube de Necker et de l'illusion de Kopfermann :

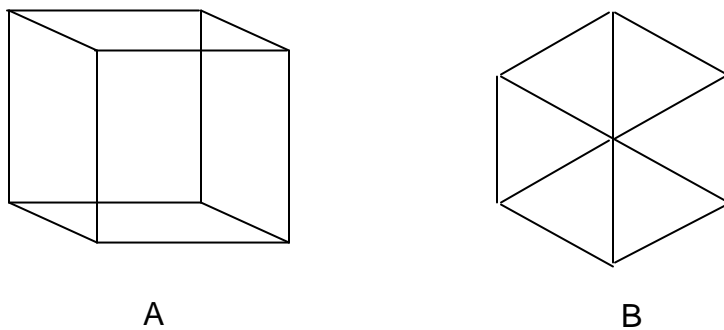


Figure 1

La figure 1.A présente une vue en perspective d'un cube transparent. (Necker remarque que ses faces peuvent être interprétées de deux manières différentes en fonction de la position de l'observateur, situé ou bien en dessus du cube, ou bien en dessous, mais ce n'est pas ce qui nous intéresse ici). Une position particulière de l'observateur par rapport à un cube peut l'amener à voir la figure 1.B, auquel cas le cube n'est plus reconnu comme tel (illusion de Kopfermann) : le principe de généricité en donne la raison.

Nous pouvons interpréter les images 1.A et 1.B comme des prises de vues différentes d'un même cube transparent (dans l'image 1.A nous ne nous intéressons pas au problème classique, qui avait été posé par Necker, de savoir quel sommet est le plus proche de l'observateur). Il y a cependant une différence qualitative essentielle entre ces deux vues : l'une, 1.A, est générique, alors que l'autre, 1.B, est singulière. En effet dans 1.B, deux sommets du cube sont alignés avec l'axe focal de l'observateur. Cette configuration est singulière en ce sens que, si l'observateur modifie très légèrement son point de vue, l'aspect du cube subit un changement qualitatif important. En 1.A

au contraire, un petit déplacement de l'observateur ou du cube ne provoque pas de changement qualitatif notable.

Ceci a pour conséquence que si on présente la figure 1 en masquant la partie 1.A à un observateur, celui-ci ne l'interprète pas spontanément comme la projection d'un cube sur une surface plane, mais plutôt comme un hexagone divisé par trois droites ou six triangles possédant un sommet commun, ou bien encore, si on veut conserver une interprétation perspective, d'une pyramide à base hexagonale vue de haut. L'interprétation ou la reconstruction visuelle en 1.B est donc fondamentalement différente de celle en 1.A, alors que nous sommes partis de deux prises de vues d'un même objet. Cet exemple pourtant très simple montre donc bien l'importance de l'hypothèse de non-dégénérescence dans la reconstruction visuelle.

Nous pouvons dès à présent donner une première version du principe de généralité : dans la reconstruction visuelle, on suppose toujours que les objets sont vus dans une position générique, et que la configuration globale de la scène est elle aussi générique.

Avant d'étudier plus en détail le principe de généralité, nous allons définir de façon plus approfondie les buts de la reconstruction visuelle (section 2), puis nous passerons en revue dans la section 3 les principes organisateurs de la Gestalt, qui indiquent comment on peut atteindre ces buts. Nous serons alors en mesure de répondre dans la section 4 aux questions suivantes : comment se fait-il que dans les images 1A et 1B, nous ne percevions qu'un seul objet, et qu'en 1A, cet objet soit interprété comme la représentation d'un objet tridimensionnel (un cube), alors qu'en 1B une telle interprétation n'a pas lieu spontanément ? Enfin nous montrerons comment le principe de généralité permet d'expliquer un certain nombre de principes organisateurs, de gérer les situations de conflit, et de valider ou d'invalidier une interprétation construite à partir des principes organisateurs.

2 - LES BUTS DE LA RECONSTRUCTION VISUELLE

Nous avons déjà donné dans l'introduction une première définition de la reconstruction visuelle, au sens que Kanizsa donne à ce terme, et évoqué les buts qu'elle est sensée atteindre. L'objet de ce paragraphe est de détailler ces buts.

Il faut préciser que la reconstruction visuelle conduit à la constitution d'objets visuels et non à la reconnaissance. L'hypothèse gestaltiste est que le processus primaire de constitution et celui secondaire de reconnaissance sont indépendants.

Nous avons décomposé le travail d'organisation effectué lors de la reconstruction visuelle en cinq tâches principales bien définies. Nous appellerons ces tâches buts de la reconstruction visuelle. Cette division contient une certaine part d'arbitraire. Elle obéit néanmoins à une certaine logique interne, en ce sens que la plupart des principes indiquent comment atteindre l'un de ces cinq buts, et pas les autres. Nous énumérons ces buts dans un ordre qui nous paraît le plus naturel. Toutefois si nous nous replaçons dans le cadre de la vision humaine, cet ordre logique n'est pas un ordre chronologique. C'est-à-dire que du point de vue opérationnel, ces tâches ne sont sans doute pas accomplies successivement par le sujet, mais, dans une certaine mesure, de manière simultanée.

Le regroupement perceptif ou unification : il arrive que certaines régions dans l'image soient perçues comme un tout homogène. Par exemple dans la figure 2, nous percevons une région noire sur fond blanc.



Figure 2

Le regroupement perceptif : les points du papier noircis à l'encre sont regroupés et unifiés en un objet visuel. Le principe organisateur qui provoque cette unification est l'identité chromatique.

De même, dans la figure 3, nous percevons deux amas de formes ellipsoïdales noires.



Figure 3

Le regroupement perceptif : les petites formes ellipsoïdales noires sont regroupées en deux objets visuels.

Nous appellerons de tels processus d'unification regroupements perceptifs. Remarquons que dans la figure 3, trois regroupements sont effectués de façon récursive : une première unification intervient pour la formation des petites ellipses noires (comme dans la figure 2), puis ces ellipses sont regroupées en des ensembles plus grands. Enfin, les deux ensembles sont eux-mêmes regroupés, car ils ont même forme et même texture. Le regroupement perceptif peut donc s'appliquer aux résultats de regroupements antérieurs.

La "rigidification". Il s'agit d'une forme particulière de regroupement perceptif, dans laquelle on attribue une qualité supplémentaire à l'objet visuel : la rigidité. La région unifiée est assimilée à la trace sur l'image d'un objet tridimensionnel solide présent dans le champ visuel, ou à des parties de cet objet. Afin d'alléger la rédaction, nous nous permettrons un abus de langage en attribuant la qualité de rigidité à l'objet visuel — qui correspond à une région de l'image — assimilé à la trace d'un objet solide sur l'image. Notons que cette phase de rigidification peut s'effectuer indépendamment de toute connaissance a priori sur les objets.

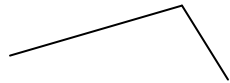


Figure 4

Chaque segment présent dans cette image est rigidifié. L'observateur peut imaginer une rotation d'un segment par rapport à l'autre, mais la séparation des deux segments semble improbable.

L'articulation tout-parties. Ici, le but est de comprendre comment les différentes parties des objets visuels, éventuellement rigidifiés, s'articulent entre elles, et quel est leur rapport avec l'objet visuel qui les englobe. Les figures 2 et 3 donnent à cet égard deux exemples différents d'articulation tout-parties. Dans la figure 2, le tout a complètement occulté les parties. C'est-à-dire que nous ne percevons pas les points noirs qui composent la tache noire. Dans la figure 3 en revanche, des parties (les formes ellipsoïdales noires) sont toujours perceptibles. La figure 4 illustre une autre possibilité de relation tout-parties : l'articulation mécanique non rigide. Chaque segment

devient un objet rigide, et les deux segments peuvent bouger indépendamment autour de leur extrémité commune.

Nous constatons donc que les propriétés des parties sont modifiées lorsqu'elles sont incluses dans un ensemble perceptif qui les englobe. Autrement dit, nous ne percevons pas les petites formes ellipsoïdales noires de la figure 3 de la même façon lorsqu'elles sont isolées et lorsqu'elles sont insérées dans des amas comme ceux de la figure 3. Il s'agit là de l'un des leitmotifs de la théorie de la Gestalt. Le tout influence les parties, et de ce fait les propriétés du tout ne se réduisent pas à la simple addition des propriétés des parties.

L'ordre dans l'espace (ou articulation fond-forme). Il s'agit d'ordonner des objets présents dans le champ visuel par rapport à l'observateur. Schématiquement, cela revient à appliquer une relation d'ordre du type "est derrière" ou "est devant" sur l'ensemble des objets détectés. Un cas particulier important est celui de la distinction fond-forme dans l'image. Un autre cas de figure important est celui où un objet masque partiellement un autre dans le champ visuel. Dans ce cas, le sujet humain a toujours tendance à reconstruire les parties manquantes de l'objet partiellement occulté. Les psychologues appellent ce processus complétion amodale. Il fait aussi partie des buts de la reconstruction visuelle. Nous verrons que cette complétion peut être effectuée à partir des principes organisateurs, indépendamment de toute connaissance préalable de l'objet partiellement occulté.

La reconstruction perspective. La position relative des objets présents dans le champ visuel est déterminée indépendamment de celle de l'observateur. Les distances entre les objets présents dans le champ visuel sont évaluées, ainsi que la distance entre ces objets et le sujet.

Il faut remarquer que l'application des seuls principes gestaltistes permet d'atteindre tous ces buts (à l'exception peut-être de la reconstruction perspective complète), et donc d'effectuer une reconstruction visuelle totale, sans faire appel à l'expérience du sujet, ni à ses connaissances éventuelles sur le contenu sémantique du champ visuel.

Nous appellerons interprétation de l'image le résultat de la reconstruction visuelle. Il s'agit en fait d'un commentaire de figure, où sont spécifiés les objets visuels qui ont été constitués, la façon dont ils s'articulent entre eux, et leur position relative dans l'espace.

Une interprétation d'une image peut bien sûr posséder une cohérence interne mais ne pas correspondre à la configuration réelle de la scène qui est à l'origine de l'image interprétée. Cette remarque est illustrée par l'image 1B, où la scène représentée contient un cube, mais l'interprétation ne le détecte pas.

3 - LES PRINCIPES ORGANISATEURS

3.1 Principe d'identité chromatique

Selon le principe d'identité chromatique, sont unifiées toutes les régions connexes où les niveaux de gris (ou de couleur) sont constants, ou varient lentement (dégradés). Cette unification est souvent accompagnée d'une rigidification, en particulier lorsque les frontières de la région sont régulières (voir plus loin le paragraphe sur le principe de continuité de direction). La région est alors interprétée comme la trace sur l'image d'un objet (ou d'une partie d'un objet) présent dans le champ visuel. La figure 2 donne un exemple simple d'unification par identité chromatique.

Le principe d'identité chromatique peut être considéré comme un principe fondateur de la Gestalt, en ce sens que la vision repose sur la capacité à distinguer les différences de niveau de luminosité ou de couleur entre des points distincts de l'image.

Dans le regroupement perceptif effectué suivant le principe d'identité chromatique, le tout masque les parties. Nous ne percevons pas consciemment les points qui composent la région formée par application du principe, et nous ne décomposons pas non plus spontanément cette région en sous-régions (sauf évidemment si l'application d'autres principes organisateurs induit une telle segmentation).

3.2 Principe de proximité

Le principe de proximité s'applique lorsque la distance entre des objets est faible. Son action consiste alors à unifier les éléments voisins. La taille du voisinage d'un objet visuel est tout à fait relative, et dépend non seulement de la taille de l'objet, mais aussi des distances à tous les autres objets visuels construits sur l'image. Etant donné trois objets visuels A, B et C, A et B sont dits proches ou voisins (sous-entendu par rapport à C) si la distance de A à B est petite comparée aux distances de A à C et de B à C. La figure 3 est un exemple de regroupement perceptif suivant le principe de proximité.

Remarquons que contrairement à ce qui se passe avec le principe d'identité chromatique, le regroupement perceptif suivant le principe de proximité ne masque pas les parties constituantes.

3.3 Principe de similitude

Le principe de similitude stipule que les objets visuels semblables sont regroupés perceptuellement.

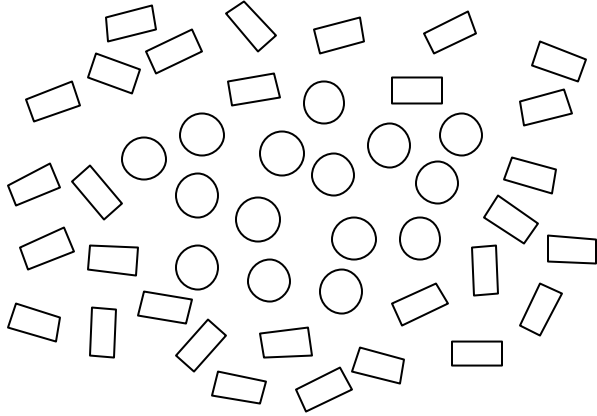


Figure 5

Le principe de similitude permet d'interpréter cette image comme composée de deux régions homogènes : celle centrale des cercles et celle périphérique des rectangles.

Il peut se produire que le nombre des éléments semblables soit très important : il y a alors formation de ce qu'on appelle une micro-texture. La relation tout-parties est alors modifiée, et comme pour le principe d'identité chromatique, les parties ne sont plus perçues spontanément. La région texturée acquiert les mêmes propriétés que les régions de couleur uniforme (Cf. figure 6).

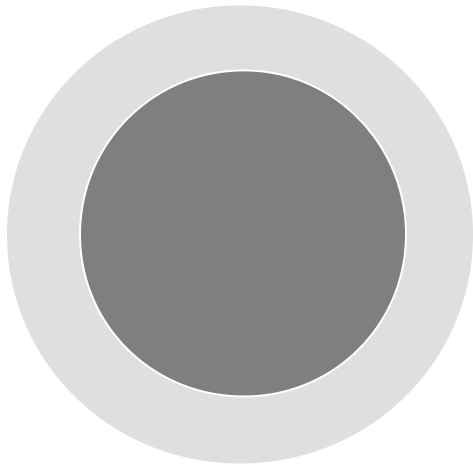


Figure 6

Le principe de similitude permet de distinguer sur cette image deux formes circulaires. Le nombre important d'éléments semblables (les petits carrés) crée un effet de texture. Notons que la forme des éléments constitutants n'est perceptible qu'au prix d'un effort.

3.4 Principe de continuité de direction

Le principe de continuité a pour effet la rigidification des courbes régulières détectées dans l'image. Plus précisément, ce sont en fait les objets visuels qui ont donné naissance à ces courbes régulières qui sont rigidifiés. Par exemple, si une courbe représente une frontière entre deux régions homogènes (figure 2, figure 6), alors au moins une de ces régions est rigidifiée (en 2, c'est la région noire, en 6, ce sont le disque et l'anneau texturés). Les courbes régulières sont créées en général par des contours occlusifs, des contours d'arête (comme dans la figure 1), ou des contours subjectifs (comme les frontières entre les zones texturées de la figure 6).

Les principes de fermeture, de complétion amodale, et de transparence ou ombrage, que nous allons maintenant étudier, peuvent être considérés comme des cas particuliers du principe de continuité de direction.

3.5 Principe de fermeture

Le principe de fermeture permet la rigidification d'éléments visuels. Il s'agit aussi d'un principe important pour l'articulation fond-forme. Lorsqu'une courbe fermée est détectée, la région

entourée par cette courbe est perçue comme un tout indissociable. Les points appartenant à cette région sont automatiquement regroupés et rigidifiés (Cf. figure 7). La région intérieure est assimilée à la trace d'un objet placé devant un fond (la région extérieure) qu'il occulte partiellement.

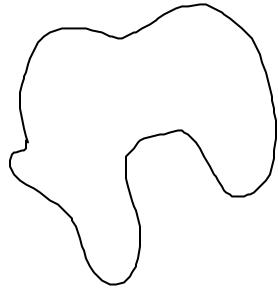


Figure 7

Exemple d'application du principe de fermeture : l'intérieur de la courbe en noir est rigidifié et assimilé à la trace d'un objet. L'extérieur de la courbe est assimilé au fond.

3.6 Principe de complétion amodale

Ce principe s'applique lorsqu'une courbe régulière s'arrête sur une autre. Ce cas de figure est appelé jonction en "T". Ce principe de continuation sous occlusion stipule que la barre du "T" est toujours rigidifiée, et qu'une telle jonction est le résultat de l'occlusion d'un objet par un autre. En général, une jonction en "T" isolée ne permet pas de déterminer l'ordre dans l'espace des trois régions délimitées par la jonction en "T". Cet ordre est en général choisi de façon à obtenir une interprétation globale cohérente de la figure.



Figure 8

Un exemple de jonction en "T" : les courbes formant le T sont ici des frontières entre régions chromatiquement homogènes.

Si dans l'interprétation globale, la région "au-dessus" de la barre du T (la région noire dans la figure 8) est la plus proche, alors cette région occulte partiellement les deux autres régions, et on prolonge alors mentalement ces deux régions, ainsi que le contour qui les sépare (le "pied" du T) sous la région noire. Selon le principe de complétion amodale, ce prolongement doit préserver la régularité du contour visible, c'est-à-dire la continuité de la direction et de la courbure le long du contour (voir figure 9).

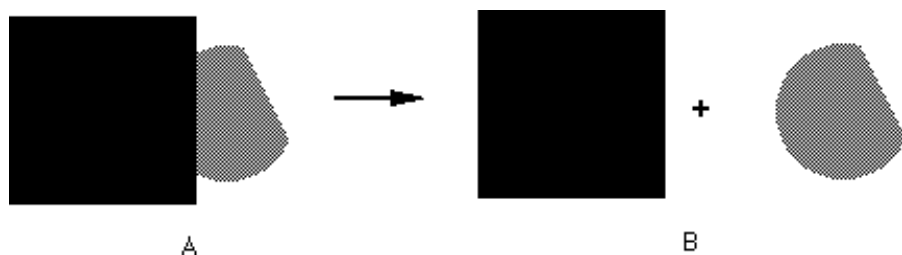


Figure 9

Dans l'image A, l'ordre spatial en profondeur dans l'interprétation dominante est région noire / région grise / fond blanc. Il y a alors "complétion amodale" de la région grise de façon à préserver la continuité de la direction et de la courbure du contour de cette région (image B).

3.7 Principe de transparence

Si deux contours réguliers présents dans l'image se croisent, les quatre régions chromatiquement différentes se regroupent par paires de manière à former deux objets se recouvrant partiellement, l'un étant vu "par transparence" à travers l'autre. Dans la figure 10, les branches **a** et **d** sont interprétées comme le bord de l'un des deux objets, par exemple l'objet transparent. Les branches **b** et **c** sont interprétées comme le bord de l'autre objet.

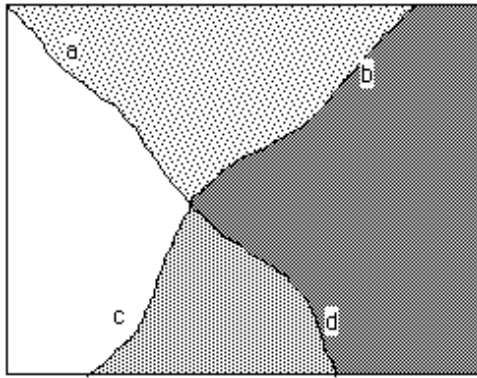


Figure 10

Un cas d'application du principe de transparence et d'ombrage : deux courbes régulières qui se croisent. a est regroupé avec d, c avec b.

3.8 Principe de constance de largeur

La constance de largeur s'observe lorsque deux courbes sont parallèles, c'est-à-dire lorsque l'on peut faire glisser entre elles une boule tangente aux deux courbes (Cf. figure 11). L'application de ce principe rigidifie les deux courbes ainsi que la région intérieure délimitée par elles.

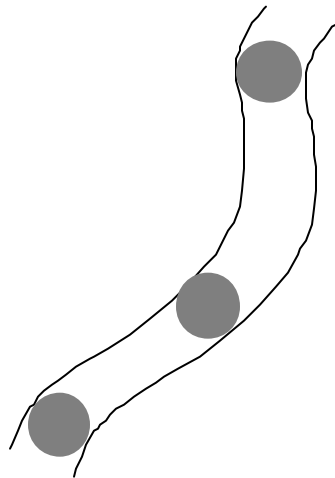


Figure 11

Le principe de constance de largeur s'applique sur ces deux courbes car elles sont parallèles. Notons que chacune de ces courbes se constitue elle-même par application du même principe

de constance de largeur. En effet, toute courbe visible a une épaisseur non nulle et à peu près constante.

Le principe de constance de largeur intervient notamment dans la rigidification des traits noirs que nous avons utilisés abondamment dans nos figures. Un trait est une région noire délimitée par deux contours parallèles. La rigidification des traits est donc le fruit de la collaboration entre principes d'identité chromatique et de constance de largeur.

Remarquons aussi que le principe de constance de largeur s'applique uniquement si les deux courbes ne sont pas trop éloignées l'une de l'autre. La distance entre les deux courbes ne doit pas être trop grande comparée à la longueur des courbes.

3.9 Principe de symétrie

Lorsqu'un ensemble d'objets visuels est invariant par une symétrie axiale, ces objets sont regroupés et forment un ensemble rigide.

Malgré le regroupement et la rigidification des dix points dans la figure 12, on perçoit les deux sous-ensembles de cinq points qui sont symétriques l'un par rapport à l'autre. Ces deux sous-ensembles sont unifiés séparément grâce aux principes de similitude et de proximité, mais ces deux regroupements distincts sont renforcés par le principe de symétrie. Nous avons ici un exemple d'articulation tout-parties, où le tout ne masque pas les parties.

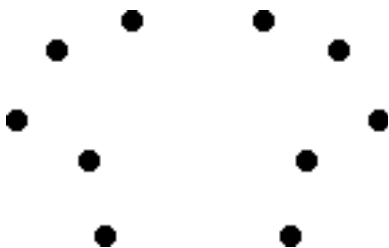


Figure 12
Exemple de regroupement perceptif suivant le principe de symétrie.

Ainsi défini, le principe de symétrie pourrait s'appliquer dans pratiquement toutes les images, puisque tout couple de points admet un axe de symétrie. Il est néanmoins relativement facile de masquer cette symétrie en introduisant d'autres points :

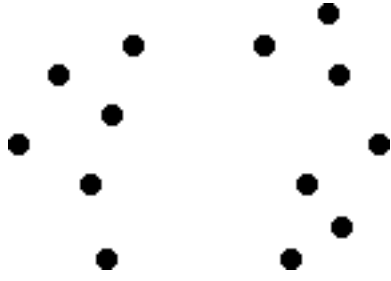


Figure 13
Masquage de la symétrie par ajout de quelques objets.

3.10 Principe de convexité

Le principe de convexité, ou de courbure minimale, favorise l'interprétation d'une image en objets convexes. Tout comme le principe de fermeture, le principe de convexité intervient donc dans la rigidification ainsi que dans l'articulation fond-forme.

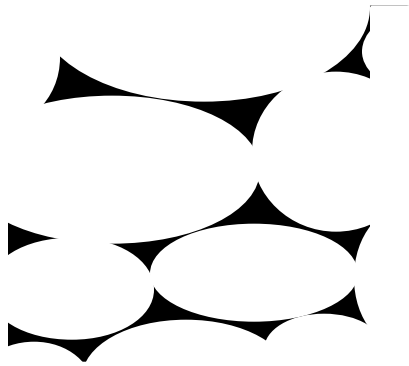


Figure 14
Bien que les principes d'identité chromatique et de fermeture puissent orienter l'interprétation de cette image vers la vision de formes étoilées noires, l'observateur a plutôt l'illusion de formes convexes (ovales) blanches sur fond noir.

3.11 Principe de perspective

Le principe de perspective s'énonce de la manière suivante : trois segments de droites concourants indiquent soit un point de fuite, soit la jonction de trois contours d'arête d'un objet. On suppose que les trois segments de droites sont dans une position générique, c'est-à-dire qu'ils sont contenus dans trois droites distinctes (dans le cas contraire, ces segments forment une jonction en T , qui sort du champ d'application du principe de perspective, et rentre dans le domaine du principe de continuation). Nous appellerons jonction en Y une telle configuration.

D'une manière générale, nous parlerons d'interprétation perspective lorsqu'une figure, ou une image, sera effectivement perçue ou considérée comme la représentation plane d'une scène tridimensionnelle.

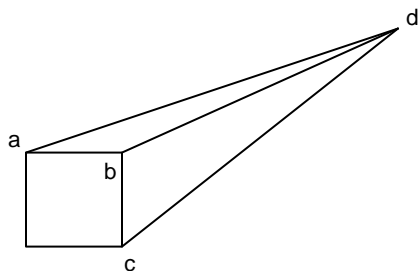


Figure 15

Un exemple d'application du principe de perspective : les quatre jonctions en Y a , b , c , et d permettent une interprétation perspective cohérente.

Sur l'exemple de la figure 15, dans l'interprétation dominante, on voit une poutre de section carrée et de très grande longueur, vue de l'une de ses extrémités. Le principe de perspective s'applique aux quatre jonctions en Y a , b , c et d . Les jonctions a , b , et c sont interprétées comme des points de jonction d'arêtes, et la jonction d comme un point de fuite.

A chaque fois qu'une ligne de fuite est repérée dans l'image, il est possible de percevoir l'éloignement des objets le long de cette ligne, et de les ordonner en profondeur.

Remarquons que l'utilisation du principe de perspective suppose que l'image soit une représentation en perspective centrale (c'est-à-dire une projection centrale sur un plan en termes mathématiques).

Dans ce type de perspective, l'image d'un groupe de droites parallèles est un groupe de droites concourantes en un même point (le point de fuite).

4 - GENERICITE

Le principe de généricité intervient, lors de la reconstruction visuelle, dans les processus de regroupement perceptif et de rigidification. Il s'agit d'un principe multi-forme, et nous présentons maintenant les différentes manières de l'appréhender.

4.1 - Graphe d'aspect

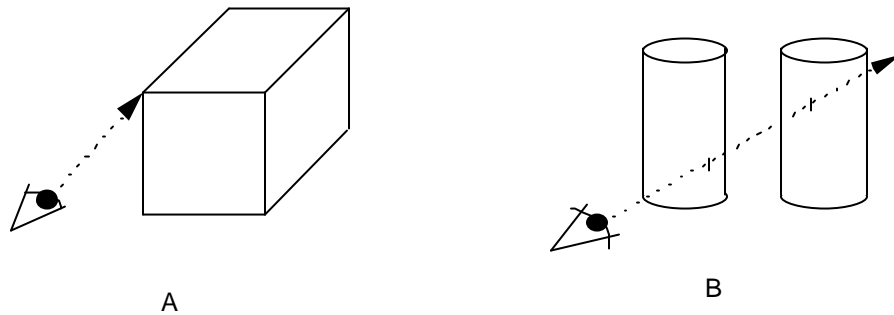


Figure 16

Exemples de configuration dégénérée ou singulière : en A, l'œil est aligné avec une arête du parallélépipède rectangle, et n'en voit donc qu'une face. En B, l'un des plans simultanément tangents aux surfaces des deux cylindres contient l'œil, lequel voit ainsi deux objets collés.

Dans une première approche, on peut considérer le principe de généricité comme un postulat : dans la reconstruction visuelle, on suppose que la configuration des objets présents dans la scène observée est générique par rapport à la position de l'observateur ou du capteur. Cela veut dire par exemple, que si un objet possède un bord d'arête rectiligne, alors celui-ci n'est pas aligné avec le point d'observation, ou bien, plus généralement, que si une droite est tangente en deux points distincts à un même objet, ou bien à deux objets différents, alors cette droite ne contient pas le point d'observation. Ces deux cas de figure sont illustrés sur la figure 16.

Il est possible d'inscrire et de reformuler le principe de généricité dans le cadre de la théorie des graphes d'aspects (voir par exemple

Van Effelterre 1995). Rappelons que l'aspect d'un objet volumique délimité par des surfaces régulières est la projection sur un plan de ses contours de silhouette, ainsi que de ses contours occlusifs internes éventuels. L'aspect d'un objet donné est donc défini par un ensemble de courbes planes. Construire le graphe d'aspect de cet objet consiste à recenser tous ses aspects (correspondants à tous les points de vue possibles), et à les regrouper en classes d'équivalence. Deux aspects sont dans la même classe si leurs propriétés topologiques et différentielles sont identiques. On obtient ainsi une partition de l'espace à trois dimensions en régions où l'aspect est qualitativement le même. Le passage d'une région à une autre est appelé événement visuel. On dira aussi qu'il y a changement qualitatif de l'aspect. Lorsque l'œil est situé sur la frontière entre deux telles régions, nous dirons qu'il est dans une position non générique.

Il est facile de généraliser cette notion à un groupe de plusieurs objets (en spécifiant s'ils sont ou non transparents), et au cas d'objets présentant des arêtes. On peut alors donner un nouvel énoncé du principe de généralité : pour effectuer la reconstruction visuelle, il est supposé que le point d'observation est à l'intérieur (au sens topologique du terme) de l'une des régions homogènes du graphe d'aspect. En d'autres termes, une reconstruction gestaltiste doit être telle qu'aucune petite perturbation de la position des objets reconstruits ou du point d'observation ne crée d'événement visuel. Il faut remarquer que pour la vision humaine, cette hypothèse est tout à fait légitime, car il est facile de valider la reconstruction en effectuant de petits mouvements de la tête.

Notons que les graphes d'aspects n'épuisent pas tous les types de généralité. En particulier, nous verrons que pour la reconstruction visuelle, des propriétés affines telles que le parallélisme ou la symétrie viennent s'ajouter à la topologie et à la différentiabilité.

4.2 - Le principe de généralité est un principe vérificateur

Lorsque les positions du point d'observation ou des objets observés sont légèrement perturbées, de manière que l'aspect de la scène ne soit pas qualitativement modifié, les contours occlusifs, de silhouette, ou d'arête des objets subissent des déformations. Inversement, nous pouvons utiliser cette remarque pour vérifier qu'une interprétation visuelle correspond bien à une situation générique. Etant donné une interprétation d'une figure, construite à

partir des principes organisateurs, on applique des petites déformations indépendantes à chaque contour d'objet solide détecté lors de la reconstruction. Si les propriétés topologiques et différentielles de l'aspect sont modifiées (i.e. si on a un événement visuel), alors l'interprétation est dite non générique (on ne peut pas parler d'interprétation fausse ou mauvaise, car si le point d'observation est effectivement dans une position singulière, alors cette interprétation est la bonne). Par contre, si ces propriétés ne sont pas altérées, alors la reconstruction ou l'interprétation est dite générique.

Le principe de généricité n'est donc pas constructeur, comme le sont les principes organisateurs, mais il peut servir à vérifier la pertinence des principes organisateurs utilisés pour fournir l'interprétation. Il peut aussi servir d'arbitre, lorsque plusieurs interprétations ont pu être construites à partir des principes organisateurs, en éliminant celles qui ne sont pas génériques. Remarquons que dans certains cas, il peut y avoir plusieurs interprétations génériques pour une même figure (on en a un exemple dans la figure 1A avec le cube de Necker). Il peut aussi arriver qu'il n'existe pas d'interprétation générique (voir l'exemple de la fourchette de Penrose, figure 17).

4.3 - Quelques exemples d'application du principe de généricité

Les exemples d'interprétation qui suivent illustrent le fait que l'application des principes gestaltistes fournit une reconstruction visuelle complète à partir de la seule donnée des variations de l'intensité lumineuse dans l'image.

4.3.1 Le cube de Necker

Dans la figure 1A, les principes d'identité chromatique et de constance de largeur induisent une rigidification de chaque segment de droite noir ainsi que leur inclusion dans un ensemble rigide articulé en huit points (les sommets du cubes). Mais le parallélisme entre les segments de droite induit une rigidification de ces points articulés. En outre, ces points sont des jonctions en Y, qui permettent donc une interprétation perspective. Il y a alors deux interprétations génériques, suivant l'ordre des deux carrés dans l'espace.

4.3.2 La fourchette de Penrose

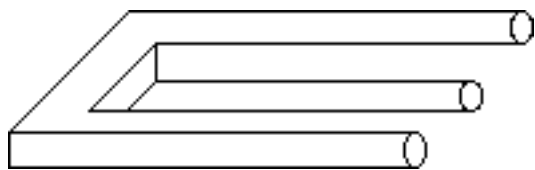


Figure 17

La Fourchette de Penrose : un exemple de figure pour laquelle il n'existe pas d'interprétation générique. Bien que l'objet physique donnant cette image puisse être construit, en fil de fer par exemple, l'observateur considère cet objet comme "impossible".

Sur la figure 17, les principes d'identité chromatique, de constance de largeur et de continuité de direction induisent une interprétation comprenant un seul objet. Si l'attention est focalisée sur la partie droite de la figure (ou bien si on masque complètement la partie gauche), les lignes horizontales sont assimilées aux contours de silhouette de trois objets cylindriques. Cette interprétation est dictée par les principes de fermeture et de perspective, qui coopèrent avec les principes déjà cités. En revanche, si l'attention est portée sur la partie gauche de la figure, les lignes horizontales sont assimilées à des contours d'arête d'un objet parallélépipédique en forme de U. Cette fois, ce sont les principes de complétion amodale et de perspective qui coopèrent avec les trois principes mentionnés précédemment.

Ces deux interprétations partielles, basées sur des considérations locales, sont incompatibles, ce qui explique l'impossibilité de construire une interprétation globale générique. On parle alors d'"objet impossible".

4.4 - Le principe de généralité comme principe premier

On peut aussi voir le principe de généralité comme un principe général de rigidification, dont un certain nombre de principes organisateurs ne seraient que des instanciations.

4.4.1 Principe d'identité chromatique

Si une région où les niveaux de gris sont constants n'est pas rigidifiée, par exemple si elle est divisée en deux parties solides, et si

on écarte légèrement ces deux régions, alors la topologie de la figure est modifiée. La seule interprétation générique possible consiste à rigidifier la région dans sa totalité. Le principe d'identité chromatique est donc une application du principe de généricité.



Figure 18

Le principe d'identité chromatique comme application du principe de généricité au cas des régions à niveau de gris constant.

4.4.2 Principe de continuité de direction

On voit une courbe régulière comme "une" (image 19-A). Pourtant, elle pourrait résulter de la superposition spatiale de deux segments de courbe séparés, ou de la juxtaposition de deux bouts de segments de courbe se touchant aux extrémités et parallèles (image 19-B). Ces deux interprétations correspondent à des positions spéciales ou singulières de l'observateur par rapport aux objets. Elle sont donc à rejeter. Le principe de généricité implique donc le principe de continuité de direction.

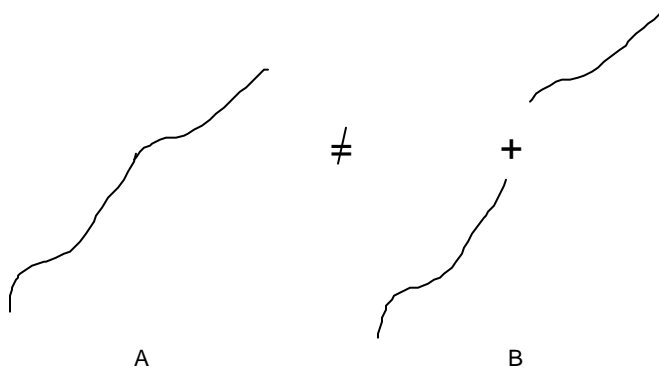


Figure 19

Le principe de généralité implique que l'image A ne peut pas être interprétée comme la juxtaposition particulière de deux portions de courbes, comme en B.

Cas particulier : les segments articulés (continuation non régulière).

Deux segments dont les bouts se touchent (image 20-A) sont interprétés comme un solide articulé : on "permet" mentalement qu'ils bougent l'un par rapport à l'autre (image 20-B), mais en les gardant attachés par leur extrémité commune (l'image 20-C n'est pas permise).

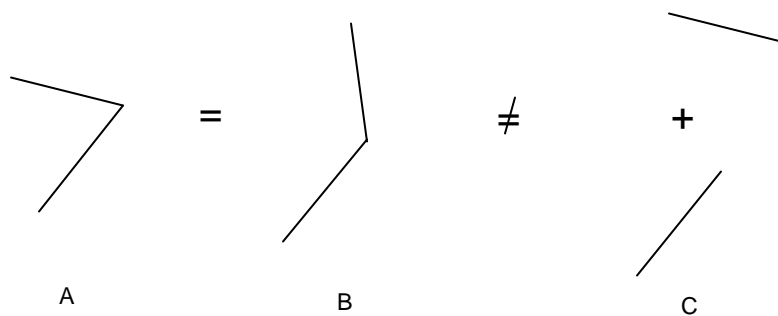


Figure 20

Le point angulaire de la courbe sur l'image A permet de l'interpréter comme étant constituée de deux segments. L'angle entre ces deux segments n'étant pas particulier (ni droit, ni plat) il peut varier librement (image B). Le caractère connexe de la courbe doit par contre être conservé (image C).

Du point de vue de la généralité, on autorise que les deux branches subissent des mouvements indépendants à condition que le point d'articulation soit conservé. Sans cette dernière restriction, nous voyons en 20-C que l'interprétation n'est plus générale. Une autre possibilité est d'appliquer les principes de complétion amodale et de fermeture. On considère alors l'ensemble des deux segments comme le bord d'un objet plat (une feuille par exemple) partiellement occulté. Le mouvement articulé des deux segments reste autorisé, car c'est une déformation possible de l'aspect de cet objet quand la perspective change. Les deux interprétations gestaltistes ainsi proposées n'entrent pas en conflit et sont toutes deux générales.

4.4.3 Principe de transparence

*Le principe de transparence, lorsqu'il est appliqué à une jonction en "X" est aussi un cas particulier du principe de généricité. Dans la figure 10, si **ad** et **bc** ne sont pas rigidifiées séparément, alors l'interprétation n'est pas générique. Du point de vue de la généricité, un regroupement du type **ac** + **bd** correspondrait à une situation dégénérée de l'observateur par rapport aux objets. Le principe de transparence est donc aussi une conséquence de la généricité.*

4.4.4 Principe de complétion amodale

La figure en "T" n'est générique que si la barre verticale du T se prolonge amodalement au-delà de la barre horizontale (figure 21). La complétion amodale nous autorise donc un mouvement relatif des deux barres de la jonction sans changement de topologie.

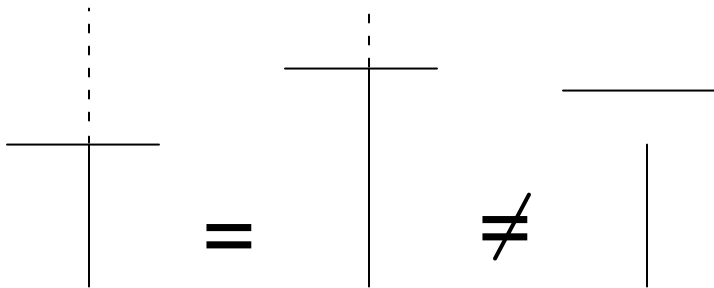


Figure 21

La complétion amodale d'une jonction en T la rend générique : les petits mouvements relatifs des deux barres préservent la jonction.

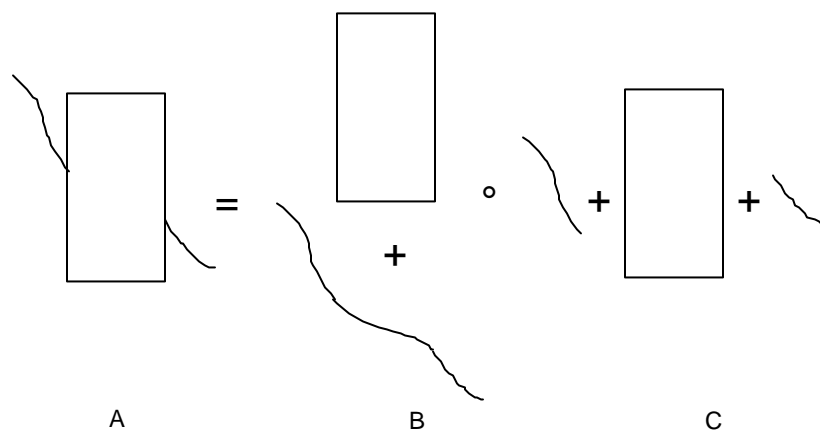


Figure 22

Complétion amodale des courbes formant les pieds du T : un exemple est donné en B, où l'interprétation qui place le rectangle devant la courbe est générique.

4.4.5 Principe de fermeture

Une courbe fermée unifie les points situés à l'intérieur de cette courbe et crée ainsi une région. Pourtant, une telle région peut ne pas avoir de réalité physique comme l'illustre la figure 23 : elle peut se former à cause d'une position particulière de l'observateur par rapport aux objets. Ici encore, nous pouvons appliquer le raisonnement utilisé pour l'identité chromatique à propos de la généricité.

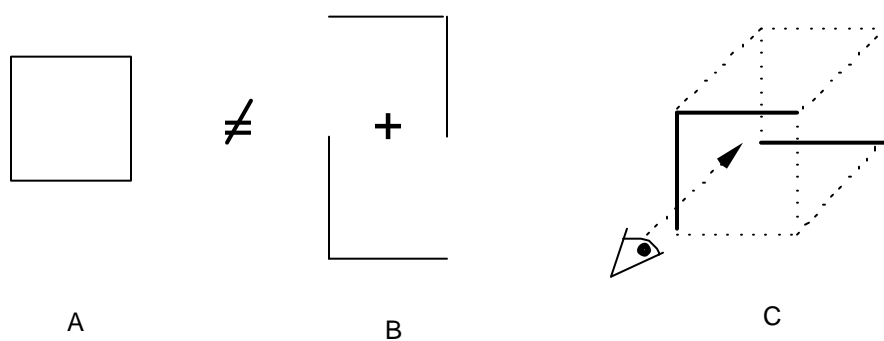


Figure 23

Le principe de fermeture amène à interpréter l'image A comme un unique objet rigide et non pas, par exemple, comme deux équerres qui paraîtraient s'ajuster à leurs extrémités (image B). Cela pourrait cependant être la bonne interprétation, comme

l'illustre la figure C, mais cette interprétation n'est pas générique car elle suppose une position particulière de l'observateur.

4.4.6 Constance de largeur, ou parallélisme

Si deux segments sont parallèles sur une figure, on ne les interprète pas comme des représentants de segments en position non parallèle dans l'espace. Cela impliquerait une position spéciale de l'observateur et du plan de l'image (Cf. figure 24).

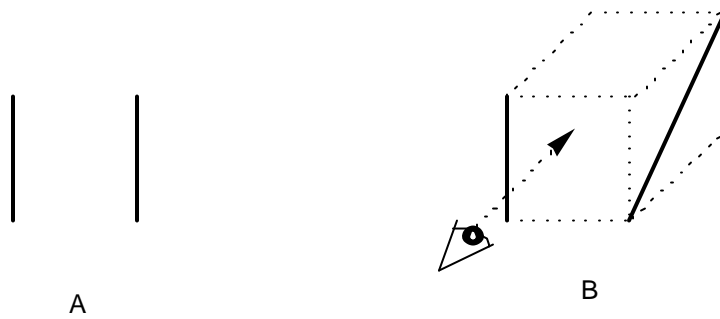


Figure 24

Le principe de constance de largeur est un cas particulier du principe de généricité. Dans A, les deux segments parallèles sont interprétés comme les arêtes d'une même face d'un même objet. Toute autre interprétation (comme celle donnée en B) serait non générique car elle supposerait une position particulière de l'observateur et de l'angle de vue.

Du point de vue de la généricité, les propriétés de la figure ou de l'aspect qui doivent être conservées après déformation séparée des parties rigides ne sont plus seulement les propriétés topologiques ou de régularité des courbes, mais incluent aussi le parallélisme entre ces courbes (cette dernière propriété n'est pas prise en compte dans les graphes d'aspect).

Remarquons que dans le cadre de la perspective centrale (que nous avons utilisée pour définir le principe de perspective) le principe de constance de largeur ne peut s'appliquer puisque deux arêtes ou deux contours parallèles dans l'espace ne sont généralement pas représentés par des courbes parallèles sur l'image. Toutefois, si la distance relative des objets considérés n'est

pas trop grande, le principe de constance de largeur est approximativement valable.

4.4.7 Principe de symétrie

La présence d'un axe de symétrie dans une image constitue une structure géométrique importante. Selon le principe de généralité, cette symétrie est une propriété des objets observés, et non le résultat fortuit du choix de la position du point d'observation par rapport à la scène observée. Il est donc légitime, du point de vue du principe de généralité, de rigidifier une figure symétrique.

5 - CONCLUSION

Les gestaltistes ont prouvé l'existence d'un petit nombre de principes expliquant la formation des objets visuels. Nous avons vu que l'axiomatique gestaltiste est assez complète pour permettre une véritable explication par principes d'une figure simple. Mais nous avons également vu que les principes gestaltistes relèvent pour l'essentiel d'un principe mathématique de généralité. Cette analyse nous conduit à espérer le développement d'outils mathématiques (puis informatiques) d'analyse des images. Un développement mathématique que, plusieurs fois, les gestaltistes ont appelé de leurs vœux.

REMERCIEMENTS

De nombreux éléments présentés dans cet article sont issus des réflexions d'un groupe de travail qui s'est réuni à l'Université Paris IX-Dauphine, et qui était composé de, outre les auteurs, Mariko Arisawa, Frédéric Benqué, Isabeau Birindelli, Antonin Chambolle, Laurent Cohen, Julio Esclarin, Hervé Hamy, Martin Lefébure, Marcella Mairota, Nicolas Mathieu, Lionel Moisan, Denis Pasquignon, Patrice Prez.

Nous remercions également la Fondation des Treilles pour son accueil.

Bibliographie

- Arnheim, R. (1954) *Art and visual perception : a psychology of the creative eye*.
- Ellis, W.D. (1939) *A source book of Gestalt theory*, New-York, Harcourt Brace.
- Fuchs, W. (1923) "Experimentelle Untersuchungen über das simultane Hintereinandersehen auf der selben Sehrichtung", *Zeitschrift für Psychologie*, 91, 154-253.
- Kanizsa, G. (1979) *Organization in Vision*, N.Y. Praeger.
- Kanizsa, G. (1980) *Grammatica del Vedere, Il Mulino, Bologna*. Traduction française par Antonin Chambolle, *La Grammaire du Voir*, éditions Diderot, 1997.
- Kanizsa, G. (1991) *Vedere e pensare, Il Mulino, Bologna*.
- Marr, D. (1982) *Vision*, New-York, W.H. Freeman and Co.
- Metzger, W. (1975) *Gesetze des Sehens*, Waldemar Kramer, Frankfurt am Main.
- Nitzberg, M., and Mumford, D. (1990) "The 2.1 Sketch", in *Proceedings of the Third International Conference on Computer Vision, Osaka*.
- Van Efferterre, T. (1995) *Calcul Exact du Graphe d'Aspect de Solides de Révolution*, Thèse de Doctorat, Université de Rennes I.
- Wertheimer, M. (1923) "Untersuchungen zur Lehre der Gestalt, II", *Psychologische Forschung*, vol. 4, pp.301-350.