

Réalisme et représentation de la réalité

Frédo Durand
MIT LCS Graphics Group

Résumé

Cet article traite de la représentation de la réalité sur un support bidimensionnel, ou plus simplement “image”. Cette étude est placée sous le triple signe de la synthèse d’images, de l’histoire de l’art et de la psychologie expérimentale. Nous commençons par souligner les limites de la notion de reproduction passive et parfaite. Nous définissons ensuite les éléments qui entrent en jeu dans la chaîne production-observation d’une image (réalité, artiste, technique, médium 2D, observateur). Nous présentons le fonctionnement du système visuel humain, préalable indispensable à la compréhension des images. Nous décrivons ensuite les limites qu’impose le médium, ainsi que les techniques qui permettent de les compenser. Nous dressons enfin une taxonomie des éléments de la technique picturale.

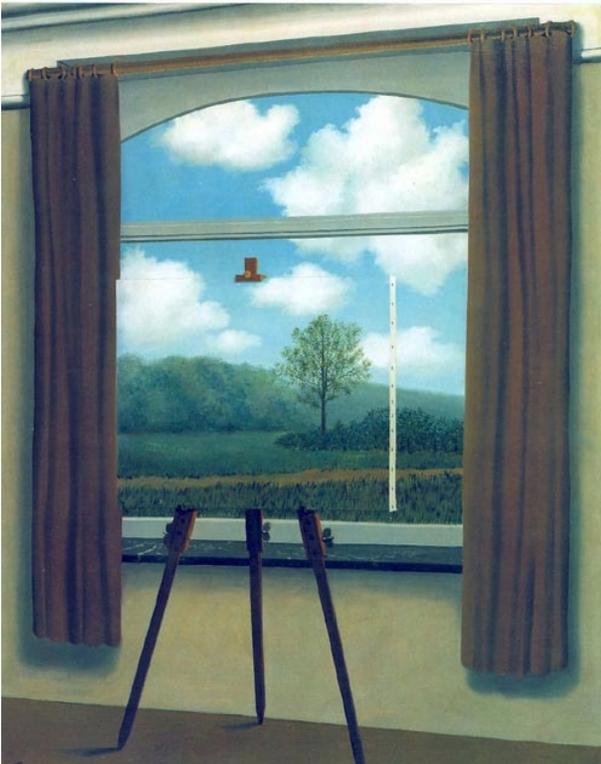


FIG. 1 – René Magritte *La condition humaine*, 1933.

1 Introduction : la quête du réalisme

On ne trouvera dans cet article aucune nouvelle technique, seulement une tentative de prendre du recul vis à vis de la synthèse d’images afin de la replacer dans le contexte plus large des images et des arts visuels. Nous espérons ainsi en explorer les mécanismes, les contraintes et la richesse.

Le *réalisme* est traditionnellement l’un des grands défis de la synthèse d’images. Que ce soit pour la modélisation, le rendu ou



FIG. 2 – Tiré de [SCCZ00].

pour l’animation, “réalisme” est bien souvent le mot d’ordre absolu. C’est surtout pour le rendu que cette soif de “vérité” s’est le plus exprimée, à travers une simulation s’appuyant sur la physique des transports lumineux, les interactions matière-lumière et les théories mathématiques de l’intégration et des éléments finis. Aujourd’hui, le but semble proche, comme en attestent les effets spéciaux époustouflants que nous assèment les films à succès.

L’histoire de l’art a elle aussi longtemps consisté en une recherche toute scientifique du réalisme, particulièrement de la Renaissance au XIXe siècle. Des artistes comme Léonard de Vinci, Dürer ou Constable ont laissé de nombreux témoignages de leur approche systématique vers une représentation toujours plus fidèle. Les historiens de l’art ont longtemps décrit l’évolution des styles comme une marche vers un réalisme parfait. Les styles plus anciens étaient alors considérés comme conséquence de la maladie de leurs auteurs.

L’avènement du Daguerrotypage et de la photographie a pu sembler clore la question. La photographie est d’un intérêt tout particulier pour nous, puisqu’elle est en générale prise comme étalon du réalisme, ainsi que le sanctionne le terme “photoréalisme”. Cependant, si elle a profondément changé le monde de l’image et la pratique artistique, la photographie n’en reste pas moins un art qui nécessite un savoir-faire pour obtenir les meilleurs résultats. Les photos que nous prenons sont bien souvent décevantes et faillent à reproduire les scènes qui paraissaient si belles à nos yeux. Quand Talbot, l’un des inventeurs de la photographie, parlait d’elle comme du “pinceau de la nature”, il entendait souligner la perfection de l’enregistrement. Nous verrons que la métaphore va plus loin qu’il ne le pensait et qu’elle s’étend aux limites de la peinture.

Cet article part d’une discussion autour du réalisme. Peut-on atteindre un réalisme parfait ? Le veut-on ? Pourquoi et comment une image parvient-elle à nous évoquer une réalité ? La notion de rendu “non photoréaliste” [LS95, Rey00, Gre99] a-t-elle un sens ? Une utilité ?

D’une manière plus générale, notre but est d’introduire les mécanismes de reproduction de la réalité sur un support bidi-

mensionnel : toile, photo, impression, écran, etc. Nous pensons que la synthèse d'images a beaucoup à apprendre du savoir-faire que les artistes ont accumulé au cours des siècles et de la compréhension que nous en offre aujourd'hui la psychologie expérimentale. Nous nous attacherons plus à introduire les problématiques qu'à leur apporter des solutions. L'article traitera plus particulièrement de l'image statique (et donc la composante rendu de l'image de synthèse), mais nous essayerons d'élargir le propos par des références à l'image animée.

La discussion portera beaucoup sur l'image "artistique", avant tout en raison du nombre d'études qui lui sont consacrées, mais aussi parce que l'image artistique fait partie des plus vieilles activités de l'humanité [Gom95b]. Nous ne nous attaquerons pas aux questions philosophiques de la "Beauté" et de l'"Art" qui sont bien au-delà de notre sujet. Que l'on ne nous fasse cependant pas de procès en sorcellerie : si nous ne traitons de l'image artistique qu'en tant que représentation de la réalité, nous ne prétendons pas qu'elle se réduit à ce simple rôle. De plus, nous ne nous limiterons pas à l'image esthétique, puisque l'un de nos buts est d'embrasser la notion d'image en général, qu'elle soit artistique, fonctionnelle ou documentaire.

Nous introduirons les limites de la notion d'enregistrement "passif et parfait" en tirant nos illustrations de la pratique photographique et du cinéma. Nous nous attacherons à comprendre ce qu'est une image et quels sont les éléments qui président à sa conception et à son observation. Nous verrons qu'une compréhension du système visuel humain et du caractère actif de notre vision est indispensable. Nous soulignerons ensuite les limites du médium, leurs conséquences sur le réalisme des images et les compensations possibles. Pour finir, nous dresserons une taxonomie des éléments de la technique picturale.

Par manque de place et de connaissances, les sujets ne seront qu'effleurés. Nous espérons au moins convaincre le lecteur de l'intérêt de ces pistes de recherche.

2 La pellicule : machine à capturer la réalité ?

Pour atteindre le sacré Graal du photoréalisme, la synthèse d'images s'est attachée à simuler de manière toujours plus précise la réalité. Cependant, si l'on regarde de plus près les techniques des professionnels de la photographie et du cinéma, on s'aperçoit qu'ils sont bien souvent amenés à contourner et à modifier les conditions que la réalité offre spontanément.

2.1 Photographie : l'artifice plus réaliste que la réalité ?

Photographier signifie "écrire avec la lumière". Le photoréalisme s'est donc attaché à reproduire avec fidélité la physique des transports lumineux et de l'interaction lumière-matière. Cependant, l'une des clefs de l'art photographique est la maîtrise de l'éclairage [Low99]. Qu'il se contente de l'éclairage présent ou qu'il installe ses propres sources, le photographe n'est jamais passif vis-à-vis de la lumière. En extérieur, le lever et le coucher de soleil sont recherchés pour leur qualité de lumière. Pour un portrait en lumière naturelle, un coup de flash sera souvent le bienvenu pour "déboucher" les ombres trop dures et bien des photographes ajoutent des projecteurs ou des réflecteurs pour améliorer l'éclairage. Quant à la photo de studio, elle se caractérise par ses nombreuses sources de lumière dont l'agencement est un art [Low99, Mil91] (Fig. 4). On est loin d'une attitude d'utilisation passive de la lumière disponible. Un éclairage de qualité se travaille. Le réalisme passe bien souvent par l'ajout artificiel de sources de lumière.

FIG. 4 – Éclairage à 3 points (tiré de [Mil91]). La lampe *fill* permet d'éclairer les parties dans l'ombre pour réduire le contraste. L'éclairage par l'arrière (*back light*) permet de faire ressortir la silhouette des sujets. Le décor est en général éclairé séparément.

On le sait, les êtres humains restent l'un des points faibles des images de synthèse. La BRDF (fonction de réflectance) de la peau humaine est très complexe, elle varie en fonction de la présence de veines, des épaisseurs des couches qui la composent, de sa tension et de la couche de graisse qui la recouvre. Nous sommes de plus très critiques, notre sensibilité est très fine quant il s'agit de regarder des humains. Mais l'on peut se demander à quoi bon modéliser avec précision la peau humaine, quand la première étape pour un portrait en studio est l'application d'une épaisse couche de maquillage (Fig. 5). La peau avec son maquillage artificiel semble plus "réelle" ou tout du moins plus satisfaisante que la peau réelle.



FIG. 5 – Session de maquillage et photo finale.

Les tirages-photo des machines automatiques sont le plus souvent décevants, surtout en noir et blanc. Le tirage est un art. S'il ne fait pas le tirage lui-même, un photographe reste en général fidèle à son tireur, tant son importance est grande. En jouant sur les composants chimiques, les papiers, les temps de réaction, le tireur contrôle la courbe de reproduction de ton [Hun95, Ada95]. Par exemple, le *Zone-system* est une technique qui consiste à décider, en fonction de l'image, pour chaque niveau d'intensité de la pellicule, quel sera la densité de ton sur le tirage. Le *masquage* utilise des masques de carton pour cacher certaines parties de l'image au tirage afin de les rendre plus claires. La photo n'est même pas une reproduction directe et passive du négatif.

La photographie noir et blanc ne peut prétendre reproduire la réalité, car notre univers visuel est coloré. Cependant, la reproduction de la couleur est une science complexe, loin d'un simple enregistrement colorimétrique [Hun95]. On le sait, certaines couleurs sont impossibles à reproduire par les systèmes de synthèse

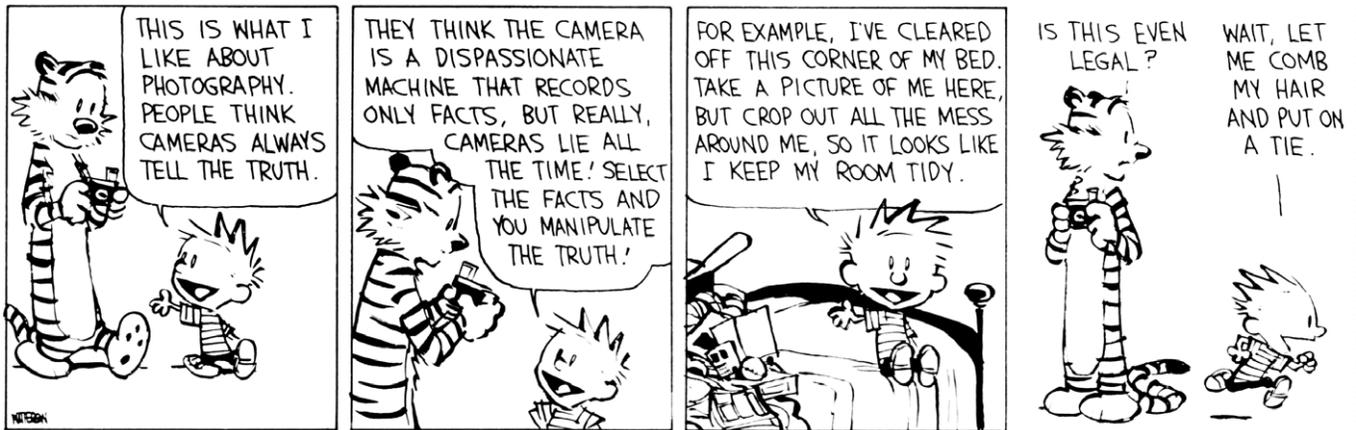


FIG. 3 – Les aventures de Calvin et Hobbes par Bill Watterson (tiré de *The days are just packed*).

classiques, en particulier dans les bleu-vert. À cela s'ajoutent des phénomènes plus complexes : nous préférons bien souvent les peaux bronzées, le ciel bleu et l'herbe vert-vif. Lors de l'observation d'une photo, nous nous référons plus à cette notion idéalisée de la couleur qu'à la colorimétrie des objets [Hun95]. De même, le peintre du XIXe siècle Constable s'insurgea contre l'idée fautive que ses contemporains se faisaient de la couleur de l'herbe [Gom56].

Cela va de soi, mais une photo ne représente qu'un instantané de la réalité. C'est par exemple le choix du "moment décisif" d'Henri Cartier-Bresson. La capacité à figer les mouvements est poussée à l'extrême dans la photographie ultra-rapide d'Harold Edgerton [Edg87] qui nous dévoile des scènes au caractère surréaliste, bien que tout ce qu'il y a de plus réelles (Fig. 6(a)).

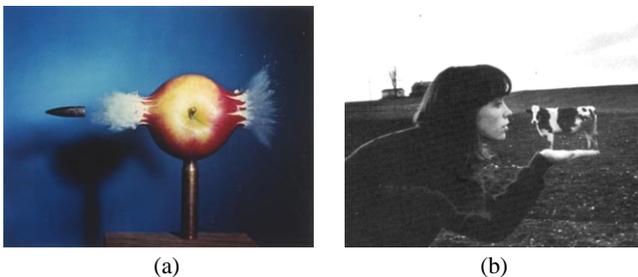


FIG. 6 – (a) Balle traversant une pomme (photo H. Edgerton). (b) Simple effet spécial (photo Scott Johnson).

Le photographe a non seulement le choix du point de vue, mais aussi celui de la perspective. Les photos prises au grand angle présentent une largeur de champ et des distorsions toutes artificielles. Pour obtenir des photographies architecturales satisfaisantes, on utilise des objectifs à décentrement (l'axe optique n'est plus perpendiculaire au film) qui permettent d'obtenir des verticales parallèles sur la photo et des façades rectangulaires parfaites. Pourtant, lorsque l'on regarde un bâtiment d'en bas, du fait du raccourci de perspective, les étages supérieurs occupent vraiment un angle visuel plus petit. Le réalisme devrait imposer des verticales convergentes.

Le plus simple des effets spéciaux consiste à déposer visuellement un personnage lointain dans la main du personnage du premier plan, qui paraît ainsi parler à un lutin (Fig. 6(b)). La photographie représente sur un même plan des objets spatialement distants. Cela est bien entendu lié à la profondeur de champ, que le photographe peut au choix rendre quasi infinie ou au contraire très limitée. Ce choix peut être mis en rapport avec notre capacité à faire la mise

au point sur les objets, mais notre œil ne possède pas la possibilité d'avoir, à un instant donné, toute la scène nette.

2.2 Cinéma : l'espace-temps chamboulé

Le réalisme au cinéma et à la télévision nous offre la plupart des paradoxes énoncés précédemment, mais la dimension temporelle les enrichit et en ajoute quelques-uns.

Tout notre cinéma est organisé autour de la notion de plan ou de séquence [Arn57, Ari91]. Notre conception newtonnienne du temps a beau être continue et linéaire, la caméra change de manière discontinue, le temps est compressé ou omis, voire pire, des *flash-back* en inversent le cours. Un bon montage est à l'opposé d'une retranscription passive et linéaire du temps, il doit être rythmé pour maintenir l'intérêt et l'immersion du spectateur. Même les retransmissions en direct jouent avec le temps : les ralentis permettent de revenir dans le passé et de distordre le temps.

Tout comme pour la photo de studio, l'éclairage de cinéma ou de télévision est loin des conditions habituelles, tous les spectateurs directs rapportent la surprise que leur cause le caractère plat et uniformément lumineux de la scène. De plus, pour apparaître inchangé à l'écran d'un plan à l'autre, l'éclairage doit bien souvent être modifié [Mil91]. Le même éclairage filmé depuis deux points de vue différents apparaîtrait changé. Il faut le modifier par de nouveaux artifices pour que son réalisme paraisse inchangé.

D'autres exemples de divergences peuvent être trouvés dans le placement des acteurs. Par exemple, lors d'un dialogue filmé en gros plan, les acteurs sont excessivement rapprochés pour tenir dans le cadre [Ari91]). Certains mouvements doivent être adaptés afin de les rendre plus "visuels". Les films d'arts martiaux en sont un bon exemple, Bruce Lee a dû changer son style car les mouvements tournants "passent mieux à l'écran". De même, le champion de natation des années 20, Johnny Weissmuller, l'un des meilleurs nageurs de tous les temps, a dû réapprendre à nager pour tourner *Tarzan* car son style, certes efficace, ne donnait pas suffisamment l'impression d'effort viril que l'on attendait de l'homme-singe ! De plus, nous savons tous intellectuellement que la plupart des cascades et effets spéciaux ne sont pas seulement truqués, ils sont bien souvent physiquement strictement impossibles. C'est la magie du cinéma que de nous les rendre crédibles.

Apodaca [AG99] décrit lui aussi les nombreuses "tricheries" qui sont utilisées en production pour adapter le réalisme aux besoins du film. Blinn appelait cela l'art du "*Chi-Ting*" (tricherie) [Bli84].

2.3 Quid de la peinture ?

La source d'Ingres (Fig. 7) nous présente une jeune femme pleine de naturel et de grâce. L'impression de sérénité et d'aisance est renforcée par l'équilibre du tableau. Cependant, si l'on y songe, l'attitude de la jeune femme est tout sauf naturelle, sa position tient du contorsionnisme et est sûrement des plus inconfortables [Arn54]. Pourtant, projetée sur le tableau, la pose semble simple et naturelle. Il en va de même de bien des portrait photographiques.



FIG. 7 – Jean-Auguste-Dominique Ingres, *La Source*, 1856.

Il est même des cas où la peinture révèle sa supériorité. Bien des scènes d'intérieur que les maîtres hollandais du XVII^e siècle ont rendues avec tant de réalisme sont des casses-tête pour la photographie, que ce soit en terme de perspective (par manque de recul) ou d'éclairage (contraste trop élevé, manque de lumière) [Pir70].

2.4 Existe-t-il un enregistrement passif et parfait ?

Une conclusion serait de décréter qu'il existe des scènes ou des réalités "amies-du photographe", pour lesquelles la pellicule enregistrera une image fidèle. On parle ainsi de personnes "photogéniques", on sait que certaines conditions lumineuses sont favorables, etc.

Cependant, nous avons également vu que certaines images extrêmement réalistes sont en fait l'enregistrement d'une configuration très artificielle. Au fond, toute photo est un enregistrement actif : le photographe choisit le point de vue, la focale, l'instant, il modifie l'éclairage.

On est tellement habitué à utiliser la photo comme étalon du réalisme, qu'on finit par en oublier que la photo ne produit quasiment jamais l'illusion de la réalité : on voit bien que l'objet qu'on

regarde est une image plane qui n'a rien de réel. Cependant la photo a cette magie qui nous permet de reconnaître une réalité, sans qu'il y ait pour autant confusion ou illusion totale. Nous reviendrons sur la double nature de l'image, objet bidimensionnel et représentation d'une scène 3D.

Le trompe-l'œil [Mas75] est un cas extrême qui n'est possible que dans des conditions bien particulières, en particulier faible profondeur de champ. Même un chef-d'œuvre aussi saisissant que les plafonds de Pozzo (Fig. 8) ne trompe pas complètement, à cause de la différence de luminosité entre le ciel peint et le ciel visible par les fenêtres [Pir70].



FIG. 8 – Fra Andrea Pozzo, plafond de l'église St Ignazio à Rome, 1693-1700.

On peut pousser l'enregistrement plus loin, en particulier avec les images stéréo, les films de type Imax, etc. On se rapproche alors un peu plus de la *mimesis*, mais le point de vue reste choisi par l'auteur des images, de même que le sujet, etc. Peut-être un jour des techniques telles que le *light field* animé avec retour d'effort et odorama permettront un enregistrement et une immersion quasi parfaite. En ce qui concerne l'image purement 2D, toute représentation de la réalité est par nature imparfaite et partielle.

Comme le souligne Gombrich [Gom82] toute image est un choix, un jugement qui procède par sélection et omission. Le mythe de l'œil innocent est un leurre.

2.5 Relativité du réalisme

Le jugement du réalisme évolue avec le temps et les cultures [Arn54, Gom56]. Ainsi, ses contemporains disaient de Giotto qu'il pouvait imiter la réalité à la perfection. Lorsque l'on observe ses tableaux aujourd'hui, ils nous semblent bien loin d'une photographie, et nul ne risque de céder à l'illusion de réalité. On comprend mieux lorsque l'on compare la peinture de Giotto avec celle de son époque (Fig. 9). Transcender les standards en cours établit la norme de réalisme.

De même, lorsque Conan Doyle et O'Brien montrèrent les premières séquences du *Monde perdu* en 1925 (Fig. 11), le public était médusé, bien des gens pensèrent que Conan Doyle avait trouvé des dinosaures sur un plateau perdu. Pourtant, le public de la première était habitué au monde de l'illusion : il s'agissait d'un congrès de magiciens organisé par Houdini ! Aujourd'hui, ces animations image par image nous semblent excellentes, mais dépassées, le "truc saute aux yeux". Notre critique des effets spéciaux de la version de Spielberg subira-t-elle la même évolution ?

3 Qu'est-ce qu'une image ?

Après ce bref tour d'horizon des relations troubles entre image réaliste et réalité, il est temps de définir avec plus de précision les



FIG. 9 – *La Madonne*. (a) Version de Cimabue (attribuée à Duccio), vers 1275-1280. (b) Version de Giotto, 1310.

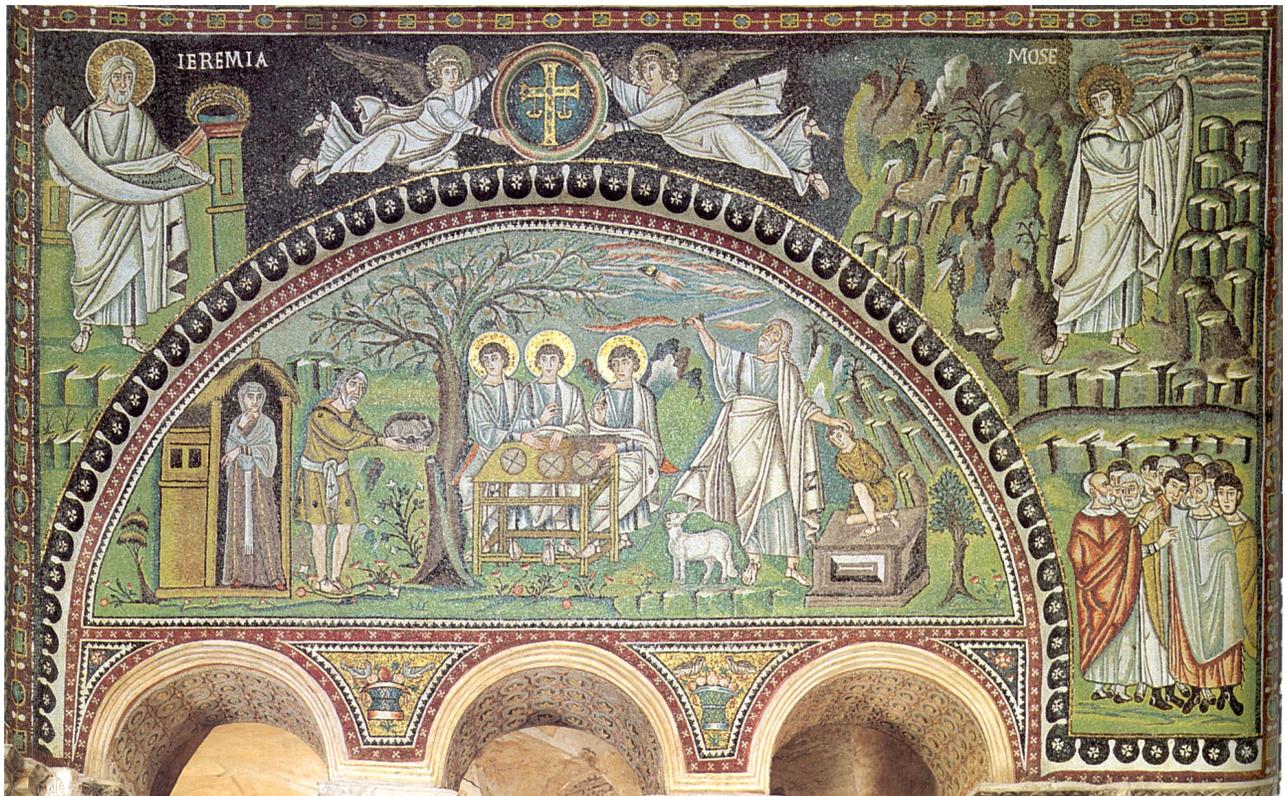


FIG. 10 – *Scènes de la vie d'Abraham*, mosaïque de la basilique de San Vitale à Ravenne, vers 532. Dans cette image, les aspects 2D l'emportent bien souvent sur les aspects 3D : regarder comme l'arbre de gauche se courbe pour suivre la limite de l'image.



FIG. 11 – *The lost world*. (a) L'original de Conan Doyle et O'Brien (1925). (b) La version de Spielberg avec effets spéciaux numériques (1997).

phénomènes qui entrent en jeu lors de la création d'une image et de son observation. Si les exemples précédents étaient centrés sur le modèle photographique, nous nous intéresserons dorénavant aussi aux techniques picturales qui illustrent mieux la liberté de l'artiste.

3.1 La chaîne de représentation de la réalité

On peut distinguer quatre acteurs principaux : la réalité (ou scène), l'artiste, l'image et l'observateur (Fig. 12). L'intermédiaire indispensable est bien entendu la technique ou pratique picturale.

de référence et de base à l'imagination. De même, il est intéressant de noter que bien des choses qui seront dites à propos des images produites par l'homme sont aussi valables de la façon dont nous regardons les "images" formées par les objets naturels comme les nuages ou les constellations.

L'artiste perçoit la réalité à travers son système visuel. Loin d'être le simple enregistrement de la lumière qui frappe la rétine, la vision humaine est un phénomène complexe qui est encore loin d'être entièrement compris. Cet aspect sera traité dans la prochaine section. L'image rétinienne est analysée, reconnue, cogitée et sa perception dépend du contexte personnel, historique, sociologique, etc. Les autres sens peuvent aussi intervenir (chacun sait qu'il est plus beau de photographier une église lorsque les cloches sonnent).

Derrière une image, l'artiste (ou le non-artiste) a toujours un but, une intention, un message.

L'artiste retranscrit ensuite la réalité en fonction de son but ou message sur un médium (toile, papier, photo, écran). Le médium possède ses caractéristiques physiques et visuelles. Il impose des limites, que l'artiste peut vouloir compenser, comme nous le verrons Section 5. Il est à noter que l'image est rarement présente seule, elle est en général placée dans un environnement qui influe sur sa perception.

Pour finir, l'observateur voit l'image à travers un système visuel similaire à celui de l'artiste, mais il possède souvent un tout autre contexte. De même, différents observateurs ne voient pas forcément la même chose dans un tableau donné. L'absence de contexte adéquat peut amener à mal interpréter un tableau. D'où par exemple l'importance des titres, qu'illustre *l'Almanach* de Desproges [Des89] où *Guernica* de Picasso prend des interprétations des plus variées à chaque page! *Christina's world* de Wyeth (Fig. 13) est un autre exemple : le tableau prend un sens très différent lorsque l'on apprend que la jeune femme est paraplégique et que ce tableau représente tout son univers. D'où aussi bien des difficultés à apprécier l'art du passé, ou l'art moderne pour lequel des "clefs" nous manquent. *L'histoire de l'art* de Gombrich [Gom95b] est à ce titre une introduction extraordinaire.



FIG. 13 – Andrew Wyeth, *Christina's world*.

FIG. 12 – Ce qu'est une image.

La réalité se caractérise par des objets et des phénomènes optiques et lumineux complexes dont les problématiques sont aujourd'hui assez bien comprises (si ce n'est résolues!). De ces aspects il ne sera que peu question. La modélisation de la réalité, que ce soit sous un aspect géométrique, photométrique ou celui des phénomènes naturels offre cependant encore des défis formidables [Fou99].

Il faut noter ici que la réalité n'est pas toujours présente directement en tant que modèle, une image ne reproduit pas toujours une scène existante. Cependant, l'observation de la réalité sert toujours

La technique même qui permet à l'artiste de transcrire la réalité en une image bidimensionnelle fera l'objet de la Section 6. Nous y étudierons les différents choix techniques qui entrent en jeu et qui constituent l'une des facettes de l'ineffable notion de *style*.

3.2 Double nature de l'image

L'image possède une double nature : elle est à la fois un objet plat et la représentation d'une réalité tridimensionnelle. Cette dualité entraîne des conflits entre les propriétés de l'objet image et des objets dans l'image, conflits qui sont à l'origine de bien des restrictions, mais aussi de bien des richesses.

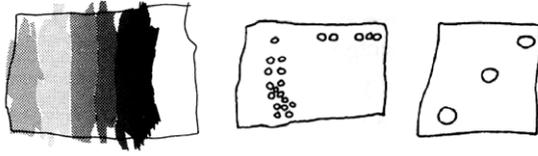


FIG. 14 – Dessins de cubes par des enfants [Wil97]. Le premier cube avait une couleur différente par face : la notion de cube a été transcrite par un rectangle, cependant ce rectangle ne représente pas une vue d'une face mais bien l'intégralité de la notion de cube puisque toutes les couleurs y sont présentes. La notion d'"objet 3D avec des coins" est retranscrite par un "objet 2D avec des coins". De même, le dessin du milieu représente un dé à jouer, le carré unique possède l'ensemble des numéros. Seul le dessin de droite est une vue "correcte".

Un élément de l'image peut être décrit par rapport à la nature 2D de l'image, ou par rapport à la scène 3D représentée. Prenons l'exemple d'un carré vu en perspective. Il peut être décrit comme un quadrilatère dans l'espace 2D de l'image, ou comme un carré dans l'espace-objet. Il y a là plus que la simple notion de perspective, comme l'indiquent les expériences que Willats réalisa avec de jeunes enfants (Fig. 14)[Wil97].

Nous verrons au cours de cet article que l'interaction et la compétition entre ces deux natures est à la base de bien des problèmes et des richesses des images. Face à cela, l'une des attitudes possibles est de choisir la scène et sa projection de manière à ce que 3D et 2D s'accordent, comme ce qui est fait avec la recherche de sujets ou d'éclairage "photogéniques". La technique picturale permet aussi de compenser les divergences et d'harmoniser 2D et 3D. Une autre attitude est de chercher à envenimer le chiasme entre espace-image et espace-objet.

La dualité de l'image est illustrée par le célèbre tableau de Magritte *Ceci n'est pas une pipe* (Fig. 17), ou par l'anecdote suivante [Gom56]. Une dame regardant l'un des tableaux de Matisse lui déclara que le bras d'une des femmes était trop long. Il lui répondit qu'elle faisait erreur, qu'il ne s'agissait pas d'une femme mais d'un tableau.

4 Le système visuel humain

La vision humaine permet de comprendre bien des phénomènes du monde des images. Réciproquement, les techniques artistiques sont des indices de la façon dont fonctionne notre vision [Cav90]. On trouvera de plus amples détails sur la perception visuelle dans [Wan95, BGG96, Pal99, Fer98, CPS00].

4.1 Un ensemble d'analyseurs spécialisés

Dès les plus bas niveaux de notre perception, dans la rétine, l'information visuelle est analysée, en particulier par des mécanismes centre-bord. Les neurones qui suivent les récepteurs sont câblés afin de détecter les zones de contraste, de manière similaire à la détection de contour en vision par ordinateur (Fig. 18 et 19). Ce mécanisme explique l'efficacité du dessin au trait (Fig. 20).

Des mécanismes similaires permettent de traiter les couleurs, les formes plus globales, le mouvement. L'information est assez vite séparée en arêtes, composantes temporelles, couleur, forme, et composantes de plus haut niveau. Ainsi une zone du cerveau semble dévolue uniquement à la reconnaissance des visages.

Les caractéristiques de chacun de ces mécanismes permettent entre autres de comprendre comment les activer afin de produire certaines sensations, certains effets picturaux, comme par exemple le mouvement induit par certaines images statiques [FAH91].



FIG. 15 – Pablo Picasso, *Arlequin assis (Le peintre Jacinto Salvado)*, 1923. La coexistence des deux styles (trait et huile) souligne la dualité entre image et réalité représentée.

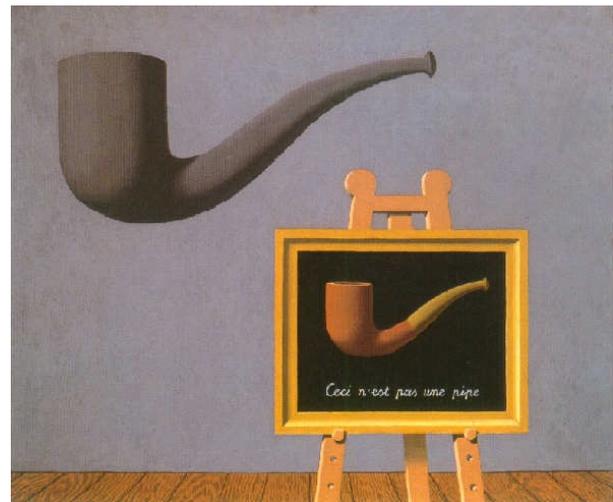
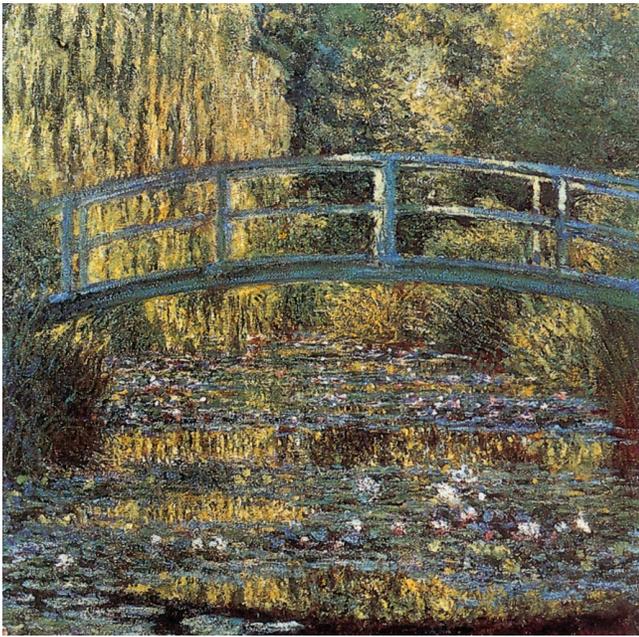


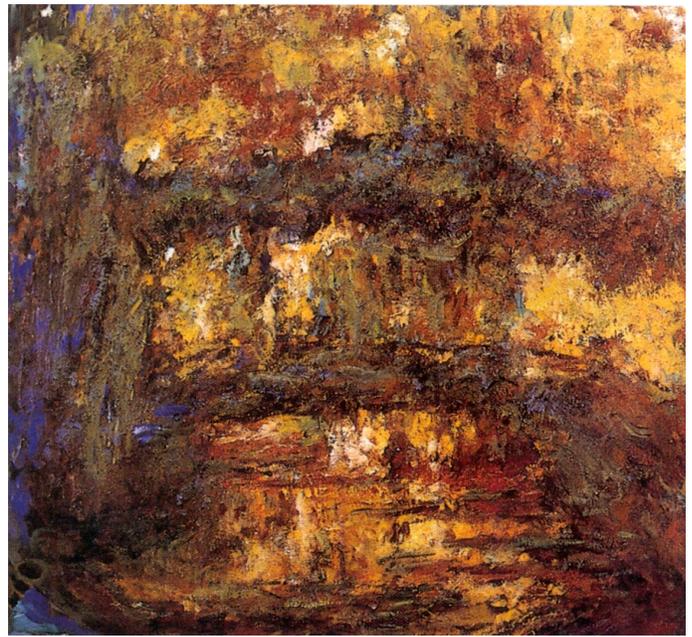
FIG. 17 – *Les deux mystères* (René Magritte).

4.2 La vision, action cognitive

On a longtemps séparé la perception de la pensée. La perception, mécanisme passif, relayait une information visuelle à la pensée consciente, qui elle traitait l'information. Les difficultés de la vision par ordinateur illustrent bien l'erreur de jugement que cela constitue.



(a)



(b)

FIG. 16 – Influence de la cataracte de Monet sur son œuvre. (a) *Le bassin aux nymphéas* peint en 1899, avant la cataracte, présente des tons froids et une image nette. (b) *Le pont japonais* peint en 1922, présente une dominante jaune marquée et des formes imprécises. D'après [Lan00].

FIG. 18 – (a) Grille de Hermann : une illusion de zones sombres apparaît aux intersections. Noter que cet effet fonctionne mieux en vision semi-périphérique (à cause de la résolution rétinienne différente) (b) Principe de l'organisation centre-bord des récepteurs. Chaque signe représente l'entrée provenant d'un récepteur. (c) Beaucoup de récepteurs négatifs activés, signal fort. (d) Signal plus faible (d'après [GG73]).

La vision résout en fait des problèmes [Arn89]. Elle fait des suppositions sur la scène qu'elle voit, elle les vérifie en jetant son regard aux endroits pertinents de la scène.

En effet, la vision n'est précise qu'au centre du champ visuel, correspondant à la *fovea*. Afin d'explorer l'environnement visuel, l'œil scrute continûment la scène avec des fixations d'environ 200ms en moyenne [Sol94, DV00, vH25, Yar67, IBLK98](Fig. 21). Le chemin d'exploration dépend de l'image, des conditions et du but de l'observateur [Yar67].

La vision est comme l'activité scientifique : elle effectue des hypothèses falsifiables et les vérifie par de nouvelles observations [Gom56]. Cette interaction est illustrée Fig. 22 (lire aussi [Sol94]).

Le "raisonnement" de notre système visuel peut être induit en erreur lorsque la scène ne correspond pas à nos présupposés sur une scène "normale". On parle alors d'illusion. La salle de Ames (Fig. 23) en est un parfait exemple : puisque nous supposons qu'une salle doit être constituée de murs perpendiculaires, deux personnes dans cette salle semblent avoir des tailles irréelles.

L'illusion n'est en fait pas une anomalie de notre vision, elle ne

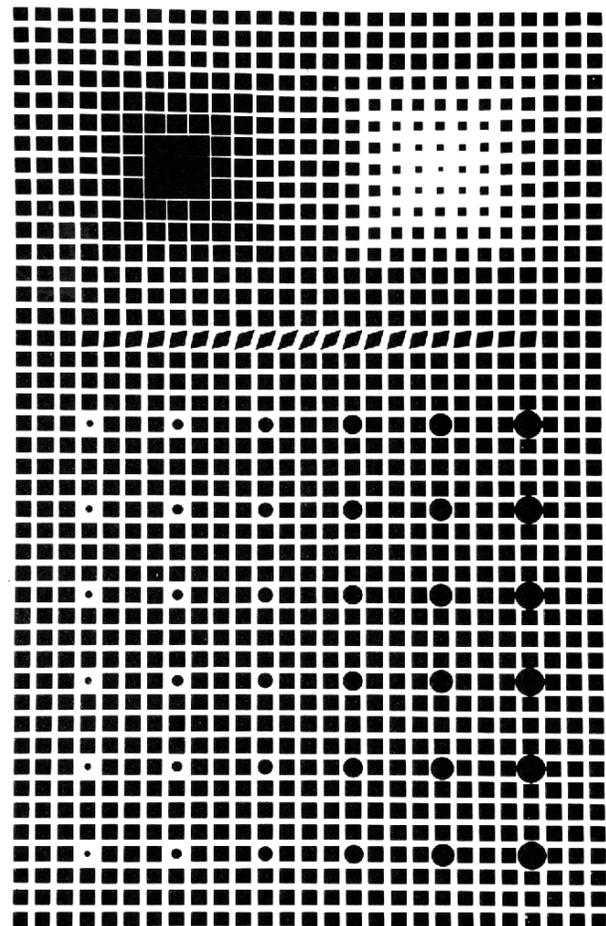


FIG. 19 – Victor Vasarely, un peintre influencé par les théories de la vision. *Supernovae* (inspiré par la grille de Hermann).

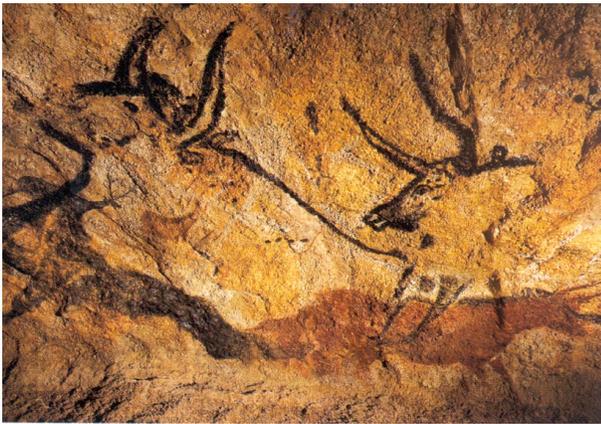


FIG. 20 – Peinture de la grotte d'Altamira en Espagne, environ 10 000 av. J.-C.

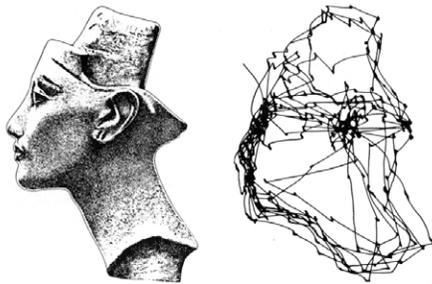


FIG. 21 – Chemin d'exploration d'une image par l'œil. Tiré de [Sol94, Yar67]

fait que révéler son fonctionnement normal. Gombrich pense que l'illusion est le mécanisme qui permet de comprendre le pouvoir des images [Gom56]. Le changement d'état mental qui se produit lorsque l'on bascule d'une interprétation à l'autre pour une image comme la figure 25 [Log00] nous permet de mieux cerner le mécanisme de reconnaissance d'une réalité dans une image.

4.3 Invariants, constance

L'une des caractéristiques fondamentales de notre vision est la capacité à extraire des invariants du flot optique en constant changement [Gib79]. Un même objet peut en effet nous apparaître dans des conditions très différentes : intensité lumineuse, couleur de l'éclairage, distance (et donc angle visuel), angle de vue, etc. La taille, la forme tridimensionnelle et la couleur (au sens de réflectance) des objets font partie de ces invariants.

Nous avons vu que via les mécanismes centre-bord, notre système visuel est plus sensible au contraste local qu'aux luminances absolues. C'est une caractéristique importante pour extraire des invariants lorsque l'éclairage change.

Mieux, notre système visuel semble capable de décomposer ce qu'il voit en différentes couches d'information : réflectance des objets, éclairage, reflets spéculaires, transparence, etc. [BT78, Ade93, Are94, Tum99].

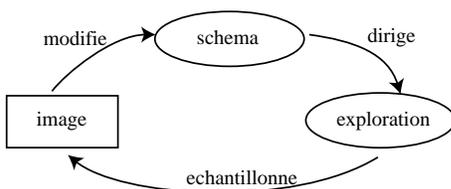


FIG. 22 – Schéma de Neisser (adapté de [WH87]).

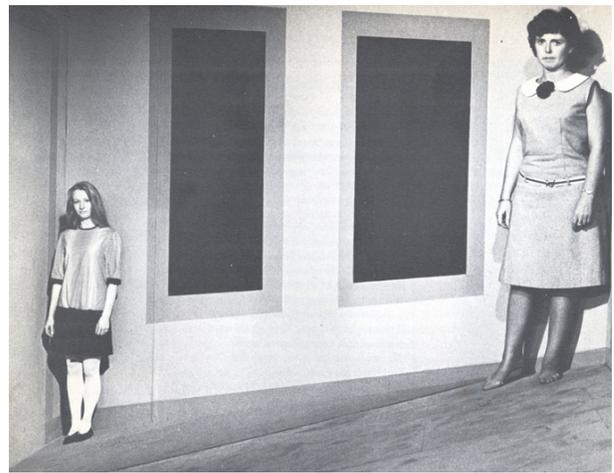


FIG. 23 – Salle de Ames (tiré de [GG73]).

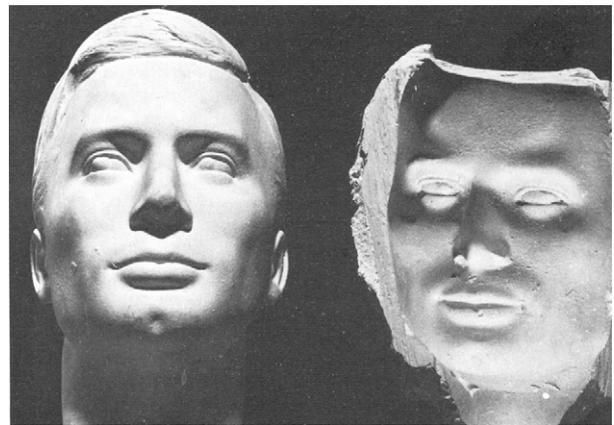


FIG. 24 – La forme négative d'une tête (à droite) nous apparaît comme un visage positif (tiré de [GG73]).

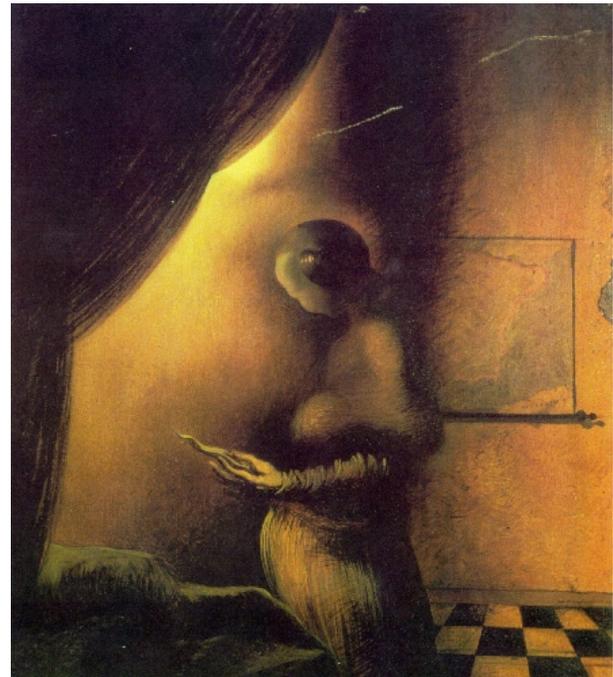


FIG. 25 – Illusion par Salvador Dali. Le tableau peut être interprété comme la tête d'un homme ou comme une jeune femme dans une chambre.

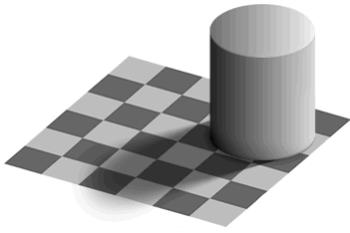


FIG. 26 – Les cases blanches dans l’ombre du cylindre ont le même niveau de gris que les cases noires en pleine lumière. Illusion de Ted Adelson.

On a là encore une dualité entre l’image qui frappe la rétine et les invariants tridimensionnels que notre vision extrait. Il est fondamental de se demander si les mécanismes d’extraction fonctionnent de la même façon lorsqu’ils analysent une scène réelle ou son image. Les réponses à cette question conditionnent la puissance et les restrictions de la représentation picturale. Au cas où l’analyse se révèle différente, l’auteur de l’image peut essayer de compenser les déficiences. Ce sera l’objet de la section 5.

La plupart des manuels de dessin insistent sur l’importance de réapprendre à voir. L’un des défis du dessin est en effet d’accéder à l’information visuelle brute qui arrive à l’œil, et non à l’information de haut niveau qui est moins utile pour dessiner ce que l’on voit.

4.4 Niveau perceptif de représentation visuelle

Les thèses de Marr sur la vision humaine et par ordinateur [Mar83] ont eu une grande influence sur les travaux de Willats [Wil97] et d’autres historiens et psychologues de l’art. Les idées de Marr sont très discutées, mais leur importance est indéniable. En particulier il a popularisé l’idée que la vision est un traitement de l’information.

La théorie de la vision de Marr se base sur le passage d’une représentation centrée sur l’observateur (image rétinienne) vers une représentation centrée sur l’objet (modèle 3D). Marr distingue quatre niveaux : l’image rétinienne (observation extrinsèque), l’ébauche primaire (*primal sketch* qui correspond grossièrement aux discontinuités ou arêtes), l’ébauche 2D et 1/2 (qui contient profondeur, orientation et éclairage) et enfin le modèle 3D (propriétés intrinsèques). Ce schéma se retrouve dans la plupart des systèmes de vision par ordinateur : image, détection des contours, groupement en objets et estimation de la profondeur et autres *shape from shading*, puis inférence du modèle 3D.

Les images peuvent s’interpréter à travers ce schéma. Chaque type d’image correspondrait à l’une des étapes de la chaîne de Marr. La peinture impressionniste correspond à l’image rétinienne (Fig. 27), le dessin au trait à l’ébauche primaire, l’art de la Renaissance à l’ébauche 2D et demi, et le cubisme au modèle 3D.

On peut aussi décrire une gradation depuis ce que l’on voit jusqu’à ce que l’on sait. Ainsi il est courant de dire que les jeunes enfants commencent par dessiner ce qu’ils savent, puis ce qu’ils voient. Cette classification se retrouve pour le rôle des couleurs, comme nous le discuterons plus longuement Section 6.3. Une couleur sur une image peut représenter la couleur de la lumière qui frappe l’œil (couleur de la radiance), mais aussi la réflectance de l’objet vu (invariant de couleur).

L’art occidental de la Renaissance jusqu’aux Impressionnistes s’est focalisé sur l’aspect extrinsèque, négligeant les propriétés plus intrinsèques, contrairement par exemple à l’art oriental. Ainsi la peinture chinoise se refuse-t-elle complètement à représenter les ombres portées, lesquelles ne font pas partie des caractères propres et immuables des objets [Gom95a].

Cependant il faut garder à l’esprit que l’image est elle aussi perçue à travers le système visuel de l’observateur (Fig. 12). Si l’on considère qu’une image au trait correspond à la détection de

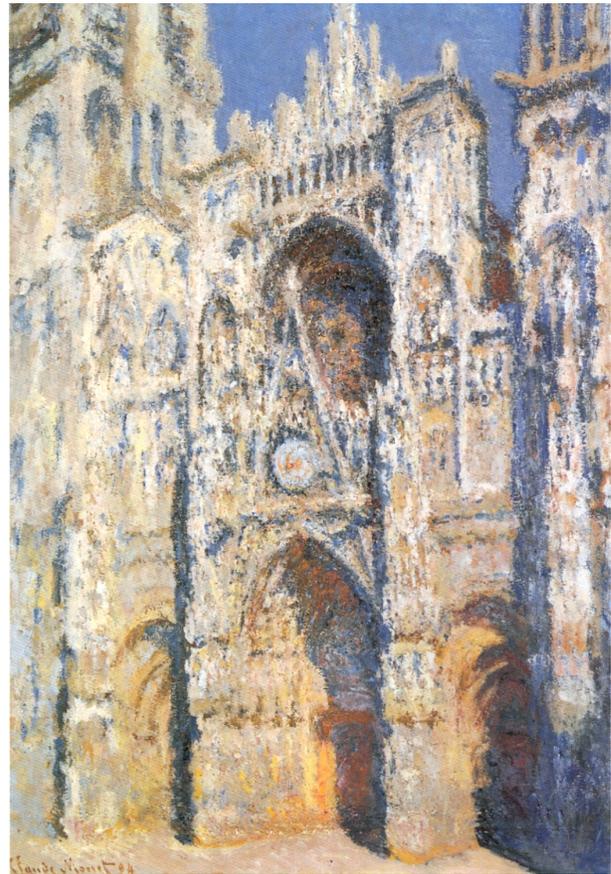


FIG. 27 – Claude Monet, *Le Portail et la tour d’Albane, plein soleil*, 1893-94.

contours par les antagonismes centre/bord (Section 4.1), ces traits passeront à nouveau par ce filtre de détection de contours. La question est donc loin d’être simple.

5 Les riches limites du médium

Qu’il soit huile sur toile, phosphore sur un écran ou graphite sur papier, le médium possède ses caractéristiques physiques qui contraignent la représentation. En nous inspirant des travaux pionniers d’Helmholtz [vH81], de l’étude de Barbour et Meyer [BM92] et des travaux de Cowan [Cowan95], nous nous proposons de souligner ces limites et de brosse quelques techniques utilisées par les artistes pour les compenser.

Bien entendu, différents média auront différentes limites, qui seront à la base de styles différents. On ne fait pas les mêmes images en aquarelle, à la peinture à l’huile, en mosaïque ou en vitrail.

5.1 L’image est plate

L’image est plate, ce qui supprime bien des repères de profondeur : parallaxe, stéréovision et accommodation. D’autres repères demeurent : les occultations (mais voir Fig. 28 pour un contre-pied), le raccourci (les objets lointains paraissent plus petits), la variation des textures, la perspective atmosphérique, les ombres [Sol94].

Afin de compenser la perte de certains repères, l’artiste peut choisir d’accentuer ceux qui restent. Les objets proches qui en occultent d’autres soulignent la hiérarchie des distances ; une perspective dramatique avec des droites convergentes soulignera la profondeur de la scène ; tout comme une texture sur le plan de base ou



FIG. 28 – René Magritte *Le blanc-seing*, 1965.

toute grande étendue (herbe Fig. 29, mosaïque Fig. 30, etc.) ; la couleur et le flou peuvent être modulés par la distance (brouillard Fig. 31, profondeur de champ, lignes plus épaisses pour le premier plan [Wil97]) ; enfin les ombres aident à situer spatialement les objets les uns par rapport aux autres.



FIG. 29 – Claude Monet *Les coquelicots à Argenteuil*, 1873.

D'autres compensations peuvent s'ajouter à cette liste. Une première approche souligne les occultations, en insistant sur le contraste aux silhouettes (par des traits, en choisissant des couleurs qui contrastent entre les objets ou en modifiant les couleurs autour des silhouettes comme Fig. 32 et 33). Une autre approche cherche, à l'exemple de la perspective atmosphérique, à regrouper les objets par distance en leur conférant des propriétés similaires (de couleur, de précision, de style).

L'un des rôles majeurs de l'éclairage est de modeler l'espace

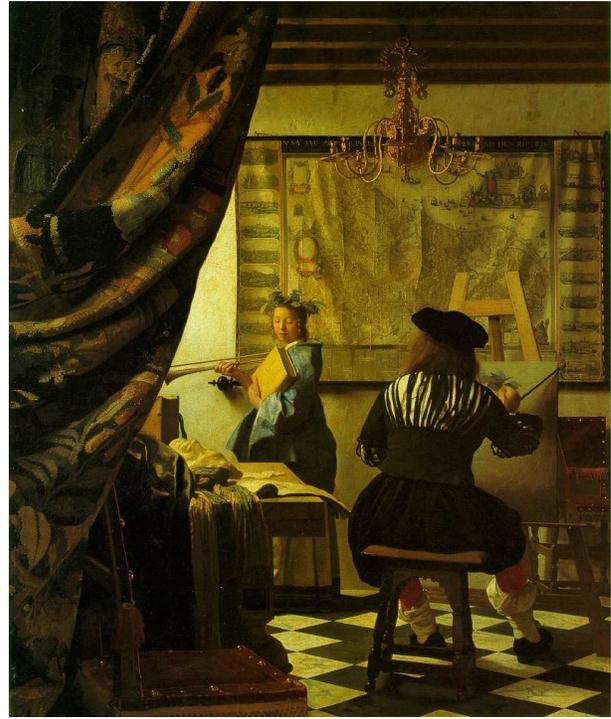


FIG. 30 – Vermeer Van Delft, *Le peintre dans son atelier*, 1666-1673

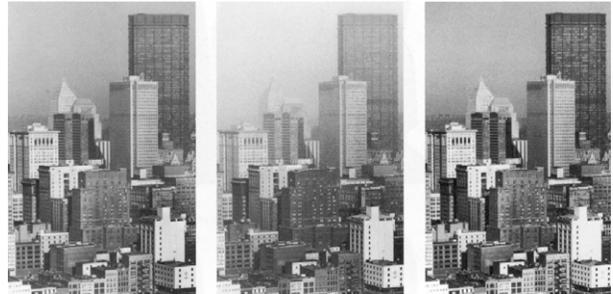


FIG. 31 – L'utilisation de filtres permet de contrôler la quantité de brouillard en photo noir et blanc. À gauche, photo sans filtre. Au milieu, un filtre bleu accentue la brume. À droite, un filtre rouge la supprime (tiré de [Kod81]).

[Mil91, Low99, AG99, Arn54]. Il permet d'accentuer le contraste lors d'une occultation afin de la mettre littéralement en relief (lampe arrière Fig. 4) et les "plans de lumière" regroupent les objets selon leur distance en les éclairant de manière similaire.

La peinture traditionnelle chinoise représente les montagnes par un dégradé, sombres au sommet, plus claires en bas. Comme les images sont en vue de dessus, la partie sombre d'une montagne contraste avec la partie claire de celle qui est derrière. Wang Wu-sheng a su remarquablement traduire ces canons en photographie (Fig. 34).

À l'inverse, certains procédés insistent sur le caractère plat de l'image ; l'utilisation d'or, la présence de lettres dans l'image (affiches en particulier).

5.2 Le point de vue est unique

Conceptuellement tout au moins, la plupart des images correspondent à une vue, dont le point de vue (ou sa généralisation) est unique. Cependant, dans la réalité, nous nous mouvons pour explorer les objets sous toutes les coutures, nous pouvons lever des ambiguïtés en changeant le point de vue (ce qui est lié au parallaxe



FIG. 32 – Titien, *Noli Me Tangere*, 1511. Remarquer comme le ton utilisé pour les maisons est artificiellement modifié pour renforcer le contraste lors des occultations.

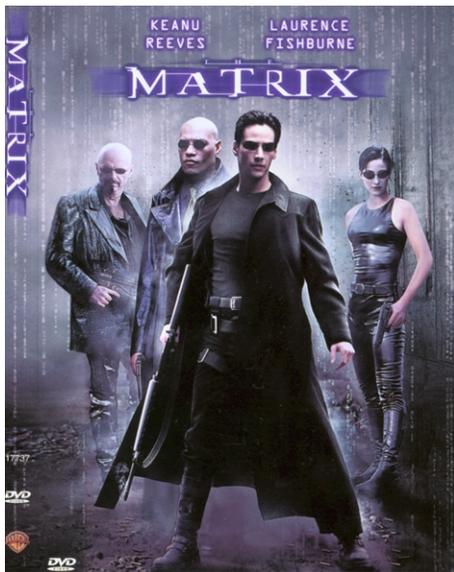


FIG. 33 – Poster du film *The Matrix*. L’occultation du second personnage par le personnage principal est soulignée par le contraste créé par la brume.

discuté précédemment).

Un des problèmes qui se posent au créateur d’images est donc le choix de ce “point de vue” (au sens large) unique. En particulier, la question de vue accidentelle (ou dégénérée) ou vue générale est importante [Wil97]. Une vue accidentelle présente des alignements qui sont purement 2D, par exemple des arêtes différentes de la scène 3D sont alignées ou superposées dans la vue 2D.

On retombe entre autres sur les problèmes de repère de profondeur, une configuration générale sera plus efficace à rendre la spatialité. Ce choix influera également beaucoup sur la compétition entre aspects 2D et 3D de l’image. En effet, un alignement acci-

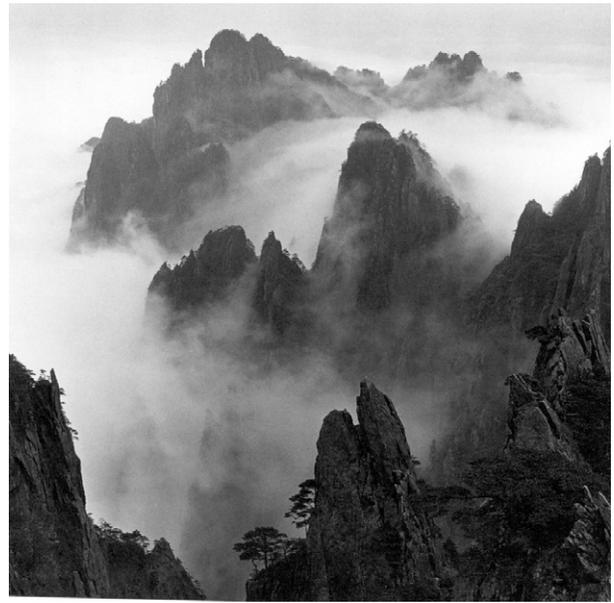


FIG. 34 – Photo de Wang Wusheng. Noter comme l’espace est modelé grâce au contraste créé par la brume. Tiré du livre *Himmelsberge*

dentel par exemple correspond à une propriété 2D, mais à aucune propriété 3D.

Certaines styles utilisent des perspectives divergentes, qui permettent de mieux révéler les diverses faces d’un objet. C’est le cas de l’art byzantin (Fig. 36) ou de certaines images cubistes. Schauler applique ce principe pour une représentation à base d’images [Sch99]. L’art égyptien antique choisit pour chaque partie d’un personnage, la vue la plus caractéristique, ce qui donne une pose surprenante si l’on considère qu’il s’agit d’une vue perspective occidentale (Fig. 35). Le cubisme utilise aussi une approche similaire, quand il compose un tableau à partir de points de vue différents (Fig. 38). Cette approche est à rapprocher des travaux de Rademacher [RB98]. Voir aussi la figure 39. Nous reviendrons sur ces questions en section 6.1.



FIG. 35 – Peinture sur stuc de la XVIIIe dynastie, Egypte.

Insérer des miroirs dans la scène, permet de concilier réalisme à l’occidentale et multiples points de vue (Fig. 40 et lire aussi [Mil98]).



FIG. 36 – Andrei Rublev, *La Sainte Trinité* (entre 1408 et 1425).



FIG. 37 – Photographie avec une perspective divergente (observer le haut et le bas du vase). André Kertész, *Tulipe mélancolique*.

5.3 L'image est finie, elle a un cadre

La plupart de nos images sont des rectangles finis dont le cadre est visible. L'information perçue dans la réalité en vision périphérique est perdue dans l'image. Tout comme le choix du point de vue, le choix du cadrage est fondamental pour le sens et le message portés par l'image [Ber72].

La présence du cadre peut souligner la nature 2D de l'image, mais fournit également des repères aux mécanismes qui permettent de compenser les distorsions dans le cas où l'image est vue obliquement [Hag80, BM92]. Le cadre influe aussi sur la perception des horizontales et verticales dans l'image, en fournissant une référence. L'importance de compenser les verticales obliques en photographies architecturales y est liée.



FIG. 38 – Pablo Picasso, *Femme assise dans un fauteuil rouge*, 1931. Le visage fusionne des vues de face et de profil.

Une coupure a lieu au bord de l'image. Selon le choix de l'auteur, cette coupure peut être plus ou moins brutale, elle peut par exemple tronquer un élément important de l'image (Fig. 42, par opposition à Fig. 10). Cela peut renforcer la vision de l'image comme une fenêtre sur une réalité.

Au dix-neuvième siècle, de vastes panoramas offraient des représentations à trois cent soixante degrés (Fig. 44). Aujourd'hui, les cinémas IMAX, Quicktime VR ou les CAVE [CSD93] permettent ce genre de champ de vision. Les rouleaux chinois permettent eux aussi un champ de vision plus large (Fig. 45).

5.4 L'image est statique

Lorsqu'elle n'est pas animée, l'image est fixe¹. Au choix du point de vue et du cadre s'ajoute donc celui du moment de l'image et de toutes ses implications.

Lorsque l'artiste veut rendre une scène en mouvement sur une image fixe, plusieurs solutions s'offrent à lui [Hag80]. Le sujet lui-même peut suggérer le mouvement, comme c'est le cas d'un avion dans les airs. La pose, en particulier de par son déséquilibre, peut représenter une phase évidente de mouvement (Fig. 46). L'image peut également superposer plusieurs temps successifs, ou plusieurs images peuvent être juxtaposées (Fig. 50) ; la photo stroboscopique en est un archétype (Fig. 47). D'autres méthodes existent : le flou de mouvement (Fig. 48 et 49), l'ajout de lignes selon les directions de déplacement ou l'usage de symboles comme les flèches. La bande dessinée est un excellent paradigme de l'utilisation de toutes ces techniques (Fig. 51).

Le déplacement peut aussi être rendu par un déséquilibre dans la composition 2D de l'image [Arn54]. L'asymétrie de l'image peut

¹Seigneur de la Palice, communication personnelle.



(a)



(b)

FIG. 41 – Le cadrage change le sujet ou le sens de l’image. (a) Boticelli, *Venus et Mars* (allégorie). (b) Le détail devient portrait (d’après [Ber72])



FIG. 45 – Yuan Jiang, *Garden for gazing*, Chine, Dynastie Qing, 1690-1746. La projection orthographique s’accommode mieux du format particulièrement large des rouleaux.

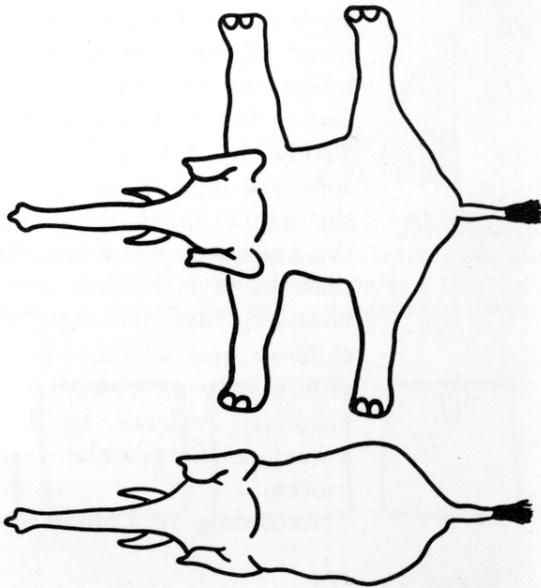


FIG. 39 – Les éléphants de Hudson. Lors d’une étude multiculturelle, les sujets africains ont préféré l’éléphant du dessus alors que les Européens ont préféré la projection orthographique du dessous. Noter que la vue éclatée du dessus rend mieux compte de la structure de l’éléphant (tiré de [GG73]).

alors “attirer” le sujet du côté vide, ou au contraire suggérer qu’il en vient (Fig. 52).

Une approche plus originale consiste à exploiter les caractéristiques de notre vision des mouvements pour la stimuler directement par une image statique [FAH91].



FIG. 40 – Diego Velazquez *Vénus au miroir* 1649-51



FIG. 42 – Edgar Degas, *L’école de danse*, 1874.



FIG. 51 – Les aventures de Calvin et Hobbes par Bill Watterson (tiré de *The days are just packed*). La plupart des procédés de rendu du mouvement sont mis à contribution : multiples positions (en haut à gauche), traits de mouvement et flou du décor (en bas au centre), positions en déséquilibre suggérant des sujets en mouvement, personnages coupés par le cadre (en haut à droite).



FIG. 43 – La métaphore de la fenêtre illustrée par Dürer.

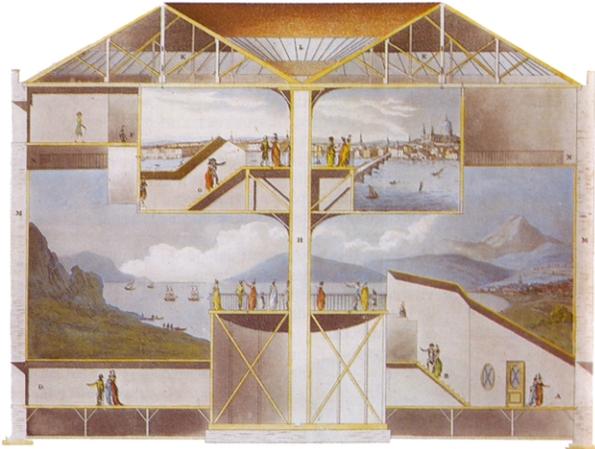


FIG. 44 – Un panorama du XIXe siècle [Com92].

5.5 Limite du contraste

L'œil humain fonctionne pour des intensités lumineuses variant de 10^{-6}cd/m^2 à 10^6cd/m^2 et il est courant qu'une scène présente à un instant donné un contraste de 1 à 100 000. Les média utilisés couramment n'offrent au mieux qu'un contraste de 1 à 300 [Hun95, Ada95, Tum99]. Une image doit donc compresser le contraste, en essayant de conserver des détails dans les zones sombres et dans les zones très lumineuses.

La sensibilité de l'œil aux contrastes locaux plutôt qu'aux valeurs absolues aide beaucoup. La capacité de notre système visuel à séparer éclairage et réflectance est aussi utilisée inconsciemment par les peintres pour réduire l'énorme contraste dû à l'éclairage [Tum99].

Les pellicules photographiques ont une réponse en forme de S, quasi linéaire dans les médiums, avec une compression pour les



FIG. 46 – Théodore Géricault, *Course de chevaux à Epsom*, 1821.

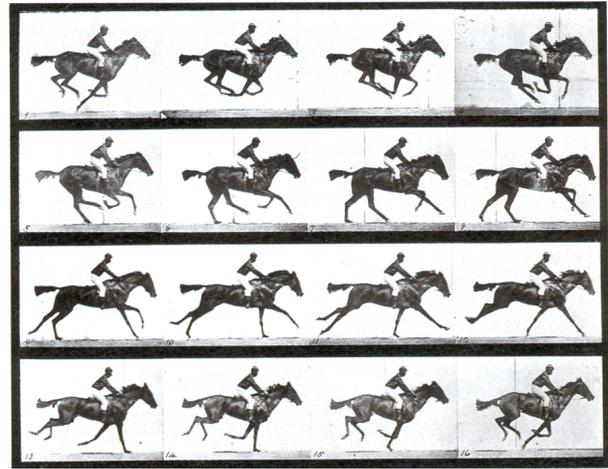


FIG. 47 – Eadweard Muybridge, *Cheval au galop*, 1872. Ces images ont permis de découvrir l'erreur de Géricault et d'autres : à aucun moment le cheval n'a toutes ses pattes déployées en l'air.



FIG. 48 – Diego Velazquez, *Las Hilanderas (Les fileuses)*, 1657. Observer le flou de mouvement de la roue.

zones sombres et élevées, mais sans coupure brusque. L'ajout de halos permet d'augmenter la luminosité subjective des sources de lumière [SSZG95].

L'éclairage vise souvent à réduire le contraste, en particulier en éclairant les parties dans l'ombre (lampe de débouchage Fig. 4) [Mil91, Low99].

De plus, les images sont souvent vues dans un environnement plus sombre que la réalité qu'elles représentent. Or, notre perception de la luminosité subjective est non linéaire et dépend de la luminosité ambiante. Le contraste est affaibli dans un environnement sombre, ce qui est compensé sur les photos et sur les moniteurs



FIG. 49 – Un filtre spécial (à droite) permet de simuler un flou de mouvement (tiré de [Kod81]).

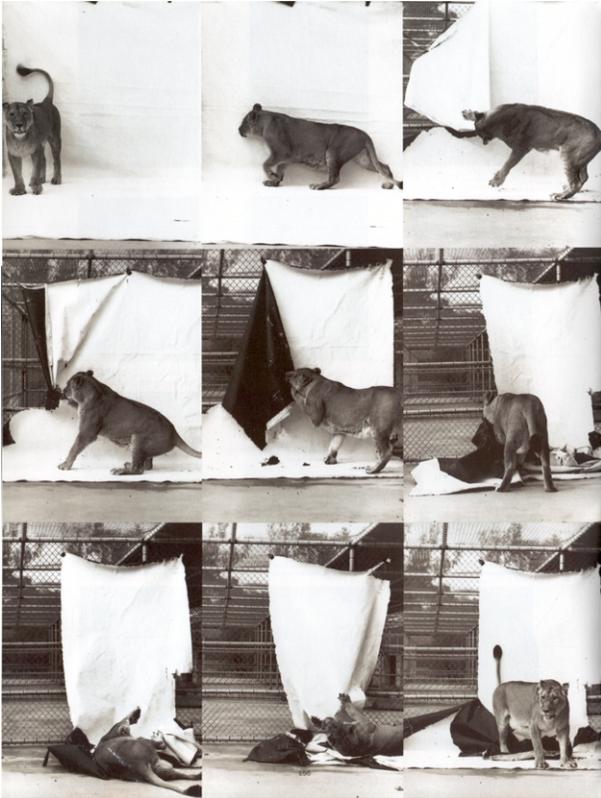


FIG. 50 – Gary Heery *Lion, panthera persica X L leo* (tiré de Zoo).



FIG. 52 – Edgar Degas, *L'étoile*, 1878.

par la correction γ : la partie médiane de la courbe de reproduction que nous avons qualifiée de quasi linéaire est en fait une fonction puissance avec pour exposant γ .

5.6 Une palette limitée

La palette de couleurs disponible est elle aussi souvent limitée. Celle des peintres s'est par exemple enrichie au cours des âges [DG00]. Le contraste simultané permet de renforcer la saturation subjective d'une couleur en lui adjoignant un voisinage avec lequel elle contraste [Roq00]. En informatique graphique, la technique de *gamut mapping* consiste à optimiser l'utilisation d'une palette, en particulier pour l'impression. La sensibilité supérieure de l'œil aux relations entre couleurs plus qu'aux couleurs absolues est à ce titre la bienvenue.

On le sait, la couleur de l'éclairage varie selon les sources de lumière. Dans la réalité, notre système visuel est capable d'éliminer son influence, afin d'obtenir les invariants de couleur. Cependant, lorsque nous regardons une image, cette adaptation chromatique se fait, non pas en fonction des sources présentes dans la scène virtuelle, mais en fonction des conditions dans lesquelles l'image est vue. D'où le besoin de compenser la couleur des sources lors de la prise de photos, et l'existence de films différents pour l'intérieur et l'extérieur, ou l'utilisation de filtres pour compenser (Fig. 53).



FIG. 53 – Photo d'une scène éclairée au néon. (a) Sans filtre. (b) Avec filtre correcteur (tiré de [Kod81]).

6 Techniques de représentation

Nous en arrivons à formaliser les techniques ou systèmes de représentation, c'est-à-dire, les outils ou éléments de style qui entrent en jeu dans la représentation sur un support bidimensionnel. Les deux premières sous-sections s'inspirent largement du livre de Willats [Wil97], mais elles s'en éloignent sur certains points qui seront soulignés. Lire aussi le texte de Riley sur le sujet [Ril00].

Savoir si ces techniques s'appuient sur des conventions acquises ou des caractéristiques innées de notre perception est toujours une question brûlante, que nous ne tenterons pas de trancher (lire cependant [Hag80, GG73] et se référer à la figure 39).

La grande force de la thèse de Willats est de ne pas s'appliquer aux seuls arts visuels occidentaux classiques, mais aussi à l'art oriental, à l'art moderne, à l'illustration technique, à la cartographie, à toute représentation bidimensionnelle d'une réalité. Elle s'appuie grandement sur des expériences réalisées avec des enfants de tout âge. Tout comme l'illusion nous permet de cerner les limites de notre perception, l'étude du développement de l'enfant permet de mettre en lumière des processus distincts.

S'appuyant sur Marr et Nishihara [MN78], Willats [Wil97] distingue deux éléments dans la représentation : le système de des-

sin (*drawing system*) et le système de dénotation (*denotation system*). Le système de dessin, que nous choisirons plutôt de nommer système de projection, concerne les aspects purement géométriques et projectifs de l'image. Le système de dénotation régit les primitives 2D (traits, points, région) utilisées pour représenter la scène 3D, sans tenir compte de leur emplacement précis. Nous ajouterons un système de teinte qui régit tons et couleurs, et discuterons les relations de ces systèmes avec la notion de style.

6.1 Systèmes de projection

Les projections les plus connues sont pour nous la perspective, les projections cavalière (Fig. 45 et 54), axonométrique, isométrique et orthogonale. La perspective divergente est très employée dans l'art byzantin (Fig. 36) et par les cubistes, lesquels utilisent des systèmes de projection parfois très complexes, plusieurs points de vue peuvent être mêlés et ils vont même jusqu'à s'inspirer de la géométrie non euclidienne et quadridimensionnelle [Hen83]. Des travaux ont utilisé ces perspectives non classiques en synthèse d'image [Grö94, BFR95, Lev98, AZM00]



FIG. 54 – Photo de Wang Wusheng. Tiré du livre *Himmelsberge*. La photo de Wusheng respecte parfaitement les canons de la peinture chinoise : vue du dessus en perspective quasi cavalière.

Rappelons que la validité de la perspective linéaire n'est incontestable que si l'image est regardée selon le point de vue correspondant au point de vue virtuel. Dans le cas contraire, des distorsions interviennent, dues à la double application de la perspective, comme l'illustrent les photos de photos. Des mécanismes de notre perception permettent d'en compenser la plupart [Hag80], mais on retrouve assez vite la dualité de l'image : le lien entre scène 3D et image projetée est trouble.

Willats insiste sur la différence que l'on peut faire entre la géométrie primaire (dans l'espace-objet) et la géométrie secondaire (espace-image) des projections. Nous sommes plus familiers avec la géométrie primaire (point de vue, direction de projection) et son expression extrêmement concise en matrice de perspective. Cependant, l'art fonctionne plus en terme de géométrie secondaire, qui permet de plus de décrire une plus grande classe de projections. Certains systèmes de projections s'éloignent même complètement de la perspective et s'attachent aux relations topologiques des éléments de la scène.

La géométrie secondaire peut être vue comme un ensemble de règles : rapetisser les objets lointains, faire converger les parallèles, dessiner des ellipses pour représenter les cercles, etc. On trouvera d'excellents exemples de ce genre de règles dans les manuels de perspective. La description devient certes plus longue, mais elle permet de plus nombreuses variations. En effet, chacune de ces règles correspond à un aspect de notre perception de l'espace. Il peut être important, pour des raisons d'esthétique, d'efficacité ou

autres d'inclure ces effets sélectivement. Par exemple, on peut vouloir représenter les objets lointains plus petits tout en utilisant pour chacun des objets une projection orthographique.

Il est alors important de distinguer, comme le fait l'histoire de l'art, les perspectives à un point de fuite, deux points ou trois points, qui pourtant correspondent à la même géométrie primaire. Cependant, si l'on se réfère aux objets de la scène, la perspective à un point conserve les rectangles perpendiculaires à l'image, la perspective à deux points conserve les lignes verticales alors que la perspective à trois points distord toutes les arêtes. On peut y voir un passage progressif de la dominance de l'aspect 2D de l'image vers un aspect 3D.

En fait, nous proposons que les systèmes de projection et leur géométrie secondaire puissent être décrits comme la satisfaction d'un ensemble de contraintes. Cette idée étend les travaux de Willats [Wil97] et Zorin [Zor95]. Les contraintes proviennent de l'interaction entre la nature 2D de l'image, les propriétés 3D de la scène et la perception humaine. Des exemples de contraintes sont : une droite doit être représentée par une droite, les objets lointains doivent apparaître plus petits, les objets proches doivent occulter ou ne pas occulter les objets plus lointains, on veut représenter le plus de faces possibles d'un objet, les objets situés sur un même plan ne doivent pas être distordus, une sphère doit se projeter sur un disque, etc. Ces systèmes de contraintes sont bien entendu liés aux limites du médium et à leurs compensations présentées dans la section précédente, mais pas uniquement.

La perspective linéaire est une solution simple et puissante qui permet de satisfaire un grand nombre de ces contraintes (alignement, raccourci, etc.) mais qui échoue pour d'autres (les sphères se projettent sur des ellipses, il y a distorsion pour les grands angles). L'utilisation d'objectifs à décentrement correspond à la contrainte de conservation des verticales verticales et parallèles.

Il est à noter que le système de contraintes peut influencer non seulement sur le système de projection, mais aussi sur le point de vue ou la position des objets dans la scène réelle elle-même. Ainsi, un photographe de groupe demandera-t-il aux convives de se déplacer pour obtenir une meilleure composition et voir tout le monde.

De plus, contrairement à ce qui est proposé par Zorin [Zor95], ces contraintes ne doivent pas être forcément prises dans leur globalité pour toute scène possible (ce qui aboutit vite à des impossibilités), mais peuvent être appliquées au cas par cas aux seuls éléments de la scène et même sélectivement à certains. On ne veut pas que toute droite se projette selon une droite, mais que les droites de la scène se projettent en des droites, ou même que certaines droites seulement soient conservées.

L'art égyptien fait un grand usage de contraintes locales pour optimiser l'aspect de chaque partie (Fig. 35 et 55). L'art folklorique américain présente des caractéristiques similaires (Fig. 56).

L'art de M. C. Escher présente un exemple frappant de perspective qui n'est absolument pas linéaire mais qui respecte la plupart des contraintes perceptives liées à la perspective classique (Fig. 60).

L'École d'Athènes de Raphaël (Fig. 57) présente un exemple de perspective qui n'est pas complètement linéaire, puisque la sphère de droite se projette sur un disque et non sur une ellipse [Pir70, dLG59]. Les contraintes intrinsèques de l'objet (rotondité, symétrie) et leur traduction 2D l'ont emporté sur les contraintes de la géométrie primaire de la perspective linéaire.

L'artiste peut aussi choisir volontairement un système de projection visuellement incohérent. On soupçonne ainsi la perspective divergente byzantine de répondre au souci d'éviter l'illusion et donc l'idolâtrie [Wil97]. Les peintres surréalistes cherchent à démanteler l'espace. Dans le cas de de Chirico, il s'agit d'imposer une ambiance de malaise par des perspectives différentes pour tous les éléments (Fig. 59)[Arn54, Wil97]. Les contraintes de projection peuvent aussi provenir de buts autres que géométriques : la taille 2D des personnages dans l'image peut par exemple dépendre de



FIG. 55 – *Le jardin de Nébamou*, vers 1400 av. J.-C., peinture murale d'un tombeau de Thèbes. La projection utilisée respecte des contraintes individuelles où l'aspect 2D prime : les arbres sont perpendiculaires au bassin, le bassin est rectangulaire, les poissons sont représentés de profil car ils sont alors plus reconnaissables.

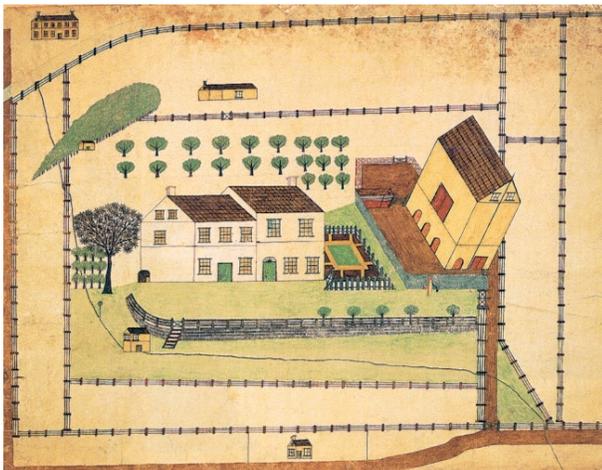


FIG. 56 – Artiste inconnu, Américain, début du XIXe siècle, *Pennsylvania Farmstead with Many Fences*



FIG. 57 – Raphaël *L'École d'Athènes*. La sphère dans l'encadré rouge devrait se projeter selon une ellipse en perspective linéaire.

leur importance ou de leur rang. C'était le cas dans l'art égyptien (Fig. 35) ou dans l'art du Moyen Âge occidental, mais c'est aussi le cas sur la plupart de nos affiches de cinéma (Fig. 58).



FIG. 58 – Affiche de *Autant en emporte le vent*. Remarquer que la taille des divers personnages ou scènes ne doit rien à la perspective linéaire, mais uniquement à leur importance.

Le problème de la projection du monde 3D sur une image 2D est en fait sur-contraint. Il est impossible de satisfaire toutes les propriétés "souhaitables". Prenons l'exemple de deux droites horizontales parallèles à l'image (le haut et le bas d'un mur par exemple). La perspective linéaire les projettera selon deux droites parallèles sur l'image. Chaque droite est projetée selon une droite, le parallélisme est bien rendu. Cependant, perceptivement, l'angle visuel occupé par le mur décroît des deux côtés. Ce fait est évident si l'on tourne la caméra d'un côté ou de l'autre : les parallèles convergent. Lorsque nous explorons visuellement la scène par nos mouvements oculaires, les deux parallèles convergent des deux côtés : une propriété incompatible avec la projection des droites en droites (mais voir Fig. 62 et 61).

Cette impossibilité fondamentale de respecter toutes les contraintes et les paradoxes qu'elle entraîne est à la base de la plupart des querelles liées à la perspective [Pan27, Pir70, Hag86]. Elle est aussi l'une des richesses des arts visuels (tout comme l'impossibilité de réaliser une gamme musicale parfaite est l'une des richesses de la musique).

6.2 Systèmes de dénotation

Rappelons que le système de dénotation régit quelles primitives sont utilisées dans l'image pour représenter la scène. Une primitive est en quelque sorte un élément de base de l'image. Le terme vient de la vision par ordinateur et de la synthèse d'images, où il décrit

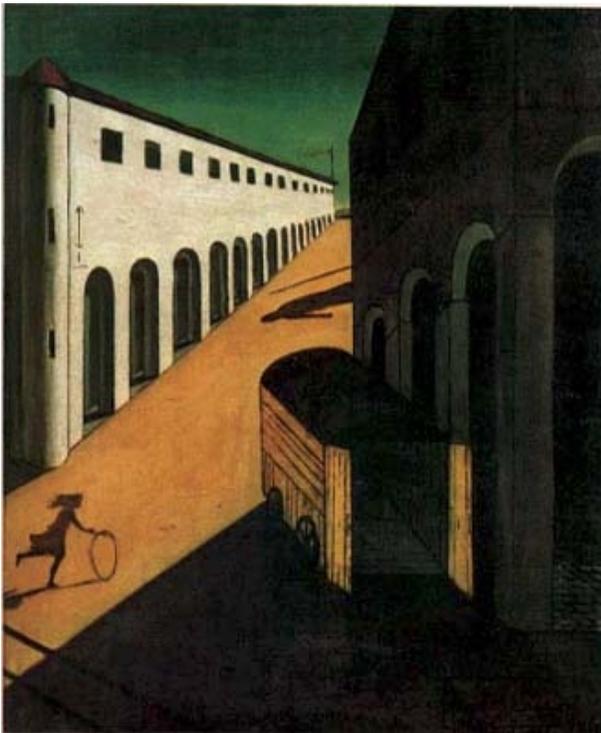


FIG. 59 – Giorgio de Chirico *Mystère et mélancolie d'une rue*.

les éléments géométriques atomiques qui permettent de décrire les objets ou l'image.

Willats [Wil97] propose trois grandes classes de systèmes de dénotation, selon la dimensionnalité des primitives de l'image (points, lignes ou régions). Nous les illustrons par trois œuvres de Picasso, Fig. 64. Le système par silhouette utilise des régions de l'image, le dessin au trait utilise des courbes ou segments et se distingue du précédent par la présence de contours internes au lieu des seules frontières entre intérieur et extérieur. Enfin le système optique utilise des points dont la couleur dépend de l'optique de la scène (mais Willats ne prétend pas pour autant que ces couleurs résultent d'une représentation purement physique des transports lumineux, nous reviendrons sur ce point dans la prochaine section).

On retrouve là des éléments liés à la vision humaine (détection des contours) et aux catégories de Marr.

Willats souligne la différence entre les *primitives* et les *marques* qui ne sont que les traces physiques représentant les primitives. En particulier, l'ombrage obtenu par des hachures l'est par des marques 1D, mais le système de dénotation est toutefois optique puisque la teinte moyenne de chaque point peut être perçue par un effet de fusion des marques.

Cette classification est également à rapprocher des écrits de Wölfflin [Wöl50], l'un des artisans du renouveau de l'histoire de l'art, qui oppose style linéal et style pictural. Cependant, ce rapprochement avec Wölfflin est loin d'être parfait et souligne le caractère non exclusif de ces systèmes. Le tableau *L'École d'Athènes* de Raphaël (Fig. 57), par exemple, est considéré par Wölfflin comme linéale (les traits dominant et dirigent la peinture, les régions sont clairement délimitées par opposition à un tableau de Rembrandt ou plus encore des impressionnistes, où seul le coup de pinceau est visible) alors que Willats le classerait dans un système optique (les points y ont des couleurs différentes qui dépendent de l'optique de la scène). Nous pouvons en fait dire que cette peinture utilise les deux systèmes de dénotation (au trait et optique) à la fois.

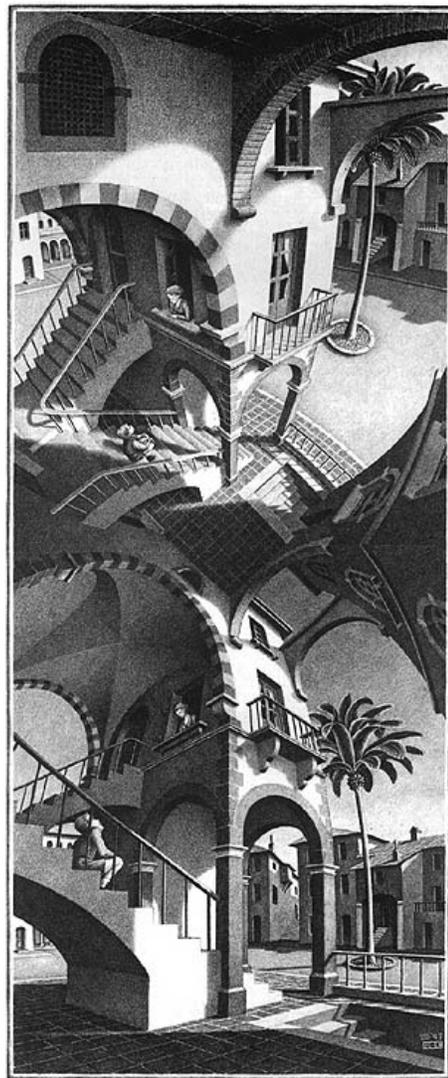


FIG. 60 – M.C. Escher *En haut et en bas*

6.3 Systèmes de teinte

Aux systèmes de projection et de dénotation, nous croyons bon d'ajouter les systèmes de teinte, qui décrivent la couleur, l'intensité que prendront les primitives de la scène. Pour Willats, cette question ne se pose que pour le système de dénotation optique, mais les autres systèmes présentent en fait le même problème : il faut affecter une couleur à une région, un trait possède une épaisseur et une couleur qui contribuent à la teinte perçue. On sait en particulier que l'épaisseur des traits peut rendre des effets d'ombre dans le dessin.

Pour une image "réaliste", la teinte représente le flot lumineux déterminé par les transports de lumière dans la scène [CW93, SP94, Vin89]. On peut ensuite distinguer l'ombrage (au sens de *shading*), les ombres portées, les ombres propres, la perspective atmosphérique ou plus généralement une indication de la distance comme pour le *depth-cueing*. La teinte peut représenter la couleur intrinsèque de l'objet (réflectance), elle peut être symbolique (comme dans l'art byzantin et moyen-âgeux) ou simplement refléter l'importance d'un objet, être tout simplement esthétique (harmonie avec l'ensemble du tableau), contribuer à l'ambiance, dictée par des impératifs de clarté ou des conventions (dans le cas de l'illustration technique), etc.

L'éclairage de cinéma (Fig. 4) peut en fait être vu comme un



FIG. 64 – Pablo Picasso (a) *Le rite du printemps* (silhouette). (b) *Portrait d'Igor Stravinski* (dessins au trait). (c) *Paul en arlequin* (dénotation optique).



FIG. 61 – Jean Fouquet, *Arrivée de Charles IV à la basilique de St Denis*, XVe siècle. Noter la perspective curviligne, comme si l'on suivait l'arrivée en pivotant le regard [Com92].

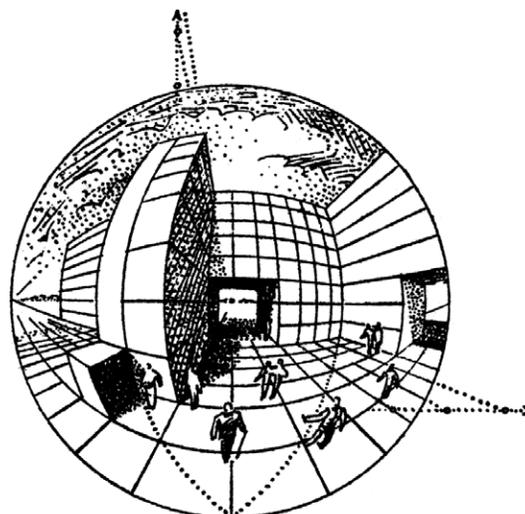


FIG. 62 – Perspective curviligne selon le système de Flocon et Barre [FT63].

détournement de la conception purement réaliste du système de teinte. Le placement des sources de lumière permet de contrôler le contraste, de mettre en avant les personnages principaux, de suggérer une ambiance, etc. Il est intéressant de penser que le cinéma contourne ainsi les contraintes de la réalité pour reproduire des effets offerts par la peinture. On peut donc se demander s'il est toujours pertinent de vouloir utiliser une simulation physique en synthèse d'images, réintroduisant ainsi des contraintes indésirables [Bar97, AG99].

En photographie noir et blanc, outre les techniques de reproduction de ton comme le *Zone system* [SCCZ00], le photographe peut jouer sur les filtres colorés pour contrôler son système de teinte (Fig. 31 et 65).

6.4 Qu'est-ce que le style ?

Définir les styles et leur évolution est au cœur des problématiques de l'Histoire de l'Art. Cependant, ce n'est qu'au cours du XXe siècle qu'on a vu apparaître des approches systématiques et des classifications ne s'appuyant plus sur une seule échelle de valeur liée au réalisme [Wöl50, Gom56, Wil97]. Sur un



FIG. 63 – Deux vues d'une sphère de Dick Termes représentant l'intérieur d'une cathédrale.

plan différent, la synthèse d'images commence à s'intéresser à la séparation du style et du contenu [FTP99, TF97, HS99, BH00].

Le style comporte des aspects temporels, géographiques, personnels, d'ambiance. Nous séparons le style du sujet : il est certain que des artistes, des époques ou des lieux différents se sont intéressés à différents sujets et que l'importance de ces différences est cruciale,



FIG. 65 – Influence des filtres colorés sur la photo noir et blanc. Les visages en couleur sont représentés en haut à gauche, tandis que les trois autres photos montrent l'effet des filtres dont le numéro est indiqué (tiré de [Kod81]).

mais elle doit être distinguée de celle du style qui s'intéresse, une fois le sujet choisi, à la manière de le dépeindre. Si la frontière est parfois ténue, elle est néanmoins d'importance.

Nous ne pouvons prétendre donner réponse à une question qui hante et fascine historiens et psychologues de l'art depuis des décennies. Nous allons juste tenter de dégager certains aspects objectifs du style en partant des catégories de Willats [Wil97]. Nous espérons que cet embryon de taxonomie pourra contribuer à fournir un cadre au domaine du rendu non photoréaliste. Nous nous intéressons à une notion étendue du style, qui englobe, au-delà de l'image artistique, toute représentation picturale.

Les choix faits pour les trois systèmes décrits précédemment sont bien entendu l'un des tout premiers éléments du style. Chaque système définit naturellement un ensemble de caractéristiques du style (caractère du trait, forme et taille des coups de pinceau, motif de remplissage, représentation ou non de certains effets optiques, choix de l'angle de vue, etc.).

Transversale aux éléments précédents, la quantité de détails ou acuité est un aspect fondamental du style. Outre son rôle pour suggérer l'espace, elle permet de guider le regard de l'observateur, de choisir le niveau d'abstraction embrassé par l'image. Souvent, l'omission des détails se fait au profit de marques plus visibles, le coup de pinceau ressort, l'aspect image prend du terrain sur l'aspect réalité (Fig. 66). L'absence de détails stimule également l'imagination du spectateur. Et comme notre vision procède par hypothèses et vérifications, l'absence de détails qui pourraient infirmer une hypothèse favorise les premières interprétations spontanées.

Le style comporte également des aspects purement 2D, qui régissent l'équilibre et la composition de l'image. La psychologie de la Gestalt reste à ce jour l'outil le plus abouti pour les formaliser [Arn54, Zak97].

Tous ces éléments interagissent lors de l'élaboration du style. Certaines combinaisons nous sembleront plus harmonieuses, d'autres choqueront à dessein. L'articulation des composants, leurs motivations ont été parfois effleurées au cours de ce texte, mais rien qui ne permette vraiment de comprendre l'essence des styles. Nous n'avons esquissé que le vocabulaire du style, sa grammaire et sa sémantique restent à explorer.

7 En guise de conclusion

La production d'image peut répondre à des fonctions bien différentes, qui entraîneront des cahiers des charges bien spécifiques, qu'une technique unique ne peut satisfaire. On ne produit pas une image religieuse comme on produit un mode d'emploi



FIG. 67 – Victor Vasarely, un peintre influencé par les théories de la vision. *Figure-ground reversal* (inspiré par les problèmes forme/fond de la psychologie de la Gestalt).

d'aspirateur, une visualisation statistique ou une simulation physique de l'éclairage.

Les créateurs d'images qui nous ont précédés ont développé de nombreuses techniques qui toutes ont leurs qualités, leurs domaines d'application privilégiés. À nous de savoir nous en inspirer pour créer des images plus fonctionnelles, plus esthétiques, plus adéquates.

“Vous voulez que je vous dise ce qu'est l'art ?
Si je le savais, je le garderais pour moi.”
Pablo Picasso

Remerciements

Je remercie Julie Dorsey qui a soutenu cette recherche. Victor Ostromoukhov m'a lancé et accompagné sur ces sujets fascinants, qu'il en soit remercié mille fois. Le syllabus du cours de Marc Levoy a été l'inspiration initiale et la référence de nos discussions sur le sujet. Merci à Clairette Aurialt pour l'exemple de l'église. Xavier Decoret m'a le premier glissé l'idée que la synthèse d'image est illusion. Merci à Raph' et à Cati pour avoir étoffé ma biblio. Merci tout plein à ma maman qui a relu mon français de contrebande.

Je dédie ce texte à la mémoire d'Alain Fournier, qui le premier m'a ouvert les yeux et m'a montré qu'une image n'est pas seulement un tableau de pixels.

Références

- [Ada95] Ansel Adams. *The Camera+The Negative+The Print*. Little Brown and Co, 1995. reprint edition.
- [Ade93] E. H Adelson. Perceptual organization and the judgment of brightness. *Science*, 262 :2042–2044, 1993.
- [AG99] Anthony A. Apodaca and Larry Gritz. *Advanced Renderman : Creating CGI for Motion Pictures*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1999.
- [Are94] L. Arend. Surface colors, illumination, and surface geometry. In A. L. Gilchrist, editor, *Lightness, Brightness and Transparency*. Hillsdale, NJ :Lawrence Erlbaum, 1994.



(a)

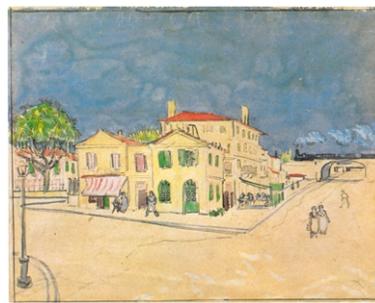


(b)

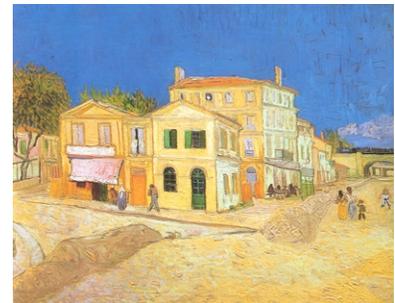
FIG. 66 – Variation de la quantité de détails chez Rembrandt. (a) Auto-portrait peint en 1629. (b) Auto-portrait peint en 1661. Noter aussi, dans le second tableau, comment la concentration des détails dans le visage dirige le regard et donne une vie particulière au tableau.



(a)



(b)



(c)

FIG. 68 – Vincent Van Gogh. *La maison jaune* (*La maison de Vincent*), 1888 (a) Plume et encre de Chine. (b) Aquarelle et roseau. (c) Huile sur toile.

- [Ari91] Daniel Arjion. *Grammar of the Film Language*. Silman-James Press, 1991.
- [Arn54] Rudolf Arnheim. *Art and Visual Perception : a psychology of the creative eye*. University of California Press, 1954.
- [Arn57] Rudolf Arnheim. *Film as Art (le film comme art)*. University of California Press, 1957.
- [Arn89] Rudolf Arnheim. *Visual Thinking (La pensée visuelle)*. University of California Press, 1989.
- [AZM00] Maneesh Agrawala, Denis Zorin, and Tamara Munzner. Artistic multiprojection rendering. In *Eurographics Workshop on Rendering*, Brno, Czech Republic, June 2000.
- [Bar97] Ronen Barzel. Lighting controls for computer cinematography. *Journal of Graphics Tools*, 2(1)(1) :1–20, 1997.
- [Ber72] John Berger, editor. *Ways of seeing*. Penguin Books and BBC, 1972.
- [BFR95] V. Bourgoin, N. Farenc, and M. Roelens. Creating special effects by ray-tracing with non classical perspectives. Technical Report 1995-13, École Nationale des Mines de St Etienne, 1995. <http://www.merl.com/reports/TR99-11/index.html>.
- [BGG96] Vicki Bruce, P.R. Green, and M.A. Georgeson. *Visual Perception : Physiology, Psychology and Ecology*. Psychology Pr, 3rd edition, 1996.
- [BH00] Matthew Brand and Aaron Hertzmann. Style machines. In *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 2000.
- [Bli84] Jim Blinn. The ancient chinese art of chi-ting. In *Image Rendering Tricks*, 1984. Siggraph '84 Course Notes, <http://www.research.microsoft.com/blinn/>.
- [BM92] Barbour and Meyer. Visual cues and pictorial limitations for computer generated photorealistic images. *the Visual Computer*, 9, 1992.
- [BT78] H. G. Barrow and J. Tenenbaum. Recovering intrinsic scene characteristics from images. In A. R. Hanson and E. M. Riseman, editors, *Computer vision systems*. Academic Press, 1978.
- [Cav90] P. Cavanagh. Pictorial art and vision. In Robert A. Wilson and Frank C. Keil, editors, *MIT Encyclopedia of Cognitive Science*. MIT Press, 1990. <http://visionlab.harvard.edu/Members/Patrick/cavanagh.html>.
- [Com92] Philippe Comar. *La perspective en jeu*. Découvertes Gallimard, 1992.
- [Cow95] William Cowan. Rendering with limited means. Jacques Cartier Institute Conference on Imaging (St- Etienne), <http://www.cgl.uwaterloo.ca/~wbcowan/colour/emse.html>, 1995.
- [CPS00] Eric Clopper, John Petersik, and Paraag Shukla. The visual percepzone. <http://library.thinkquest.org/27066/nhome.html>, 2000.
- [CSD93] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, and Thomas A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality : The design and implementation of the CAVE. In James T. Kajiya, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, volume 27, pages 135–142, August 1993.
- [CW93] Michael F. Cohen and John R. Wallace. *Radiosity and Realistic Image Synthesis*. Academic Press Professional, Boston, MA, 1993.
- [Des89] Pierre Desproges. *L'Almanach*. Rivages, 1989.
- [DG00] Francois Delamare and Bernard Guineau. *Colors : The Story of Dyes and Pigments*. Harry N Abrams (Discoveries), 2000. (Les matériaux de la couleur, Découvertes Gallimard).
- [dLG59] J. de La Gourmerie, editor. *Traité de perspective linéaire contenant les tracés pour les tableaux plans et courbes, les bas-reliefs et les décorations théâtrales, avec une théorie des effets de perspective*. Paris : Dalmont et Dunod ; Mallet-Bachelier, 1859.
- [DV00] Andrew Duchowski and Roel Vertegaal. Eye-based interaction in graphical systems : Theory and practice. In *Siggraph '2000 Course Notes*, 2000.
- [Edg87] Harold Eugene Edgerton. *Electronic Flash, Strobe*. MIT Press, 1987.
- [FAH91] W. T. Freeman, E. H. Adelson, and D. J. Heeger. Motion without movement. *Computer Graphics*, 25(4) :27–30, 1991.
- [Fer98] Ferwerda. Fundamentals of spatial vision. In *Applications of visual perception in computer graphics*, 1998. Siggraph '98 Course Notes.
- [Fou99] Alain Fournier. The tiger experience. talk at the Cornell Workshop on Rendering, Perception, and Measurement, <http://www.graphics.cornell.edu/workshop/>, 1999.
- [FT63] Albert Flocon and René Taton. *La perspective*. PUF, Que sais-je ?, 1963.
- [FTP99] W. T. Freeman, J. B. Tenenbaum, and E. Pasztor. An example-based approach to style translation for line drawings. Technical Report 99-11, MERL, February 1999. <http://www.merl.com/reports/TR99-11/index.html>.
- [GG73] R.L. Gregory and E.H. Gombrich. *Illusion in nature and art*. Duckworth, 1973.
- [Gib79] J. J. Gibson. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin, Boston, Massachusetts, 1979.
- [Gom56] Gombrich. *Art and Illusion (L'art et l'illusion)*. Princeton Press, 1956.
- [Gom82] E.H. Gombrich. *The image and the eye : further studies in the psychology of pictorial representation*. Cornell University Press, 1982.
- [Gom95a] E.H. Gombrich. *Shadows : the Depiction of Cast Shadows in Western Art (Ombres portées)*. National Gallery Publications, London, 1995.
- [Gom95b] Ernst Hans Gombrich. *The Story of Art (L'histoire de l'art)*. Phaidon Press, 1995. 16th edition.
- [Gre99] Stuart Green. Beyond photorealism. In *Eurographics Workshop on Rendering*, Granada, Spain, June 1999.
- [Grö94] Eduard Gröller. Nonlinear ray tracing : visualizing strange worlds. *Visual Computer*, 11(5), 1994.
- [Hag80] Margaret Hagen. *The perception of pictures*. New York : Academic Press, 1980.
- [Hag86] Margaret Hagen. *Varieties of Realism : Geometries of Representational Art*. Cambridge University Press, 1986.
- [Hen83] Linda Dalrymple Henderson. *The Fourth Dimension and Non Euclidean Geometry in Modern Art*. Princeton University Press, 1983.
- [HS99] J. Hamel and T. Strothotte. Capturing and re-using rendition styles for non-photorealistic rendering. In *Eurographics '99*, volume 18, pages C173–182, Computer Graphics Forum, 1999.
- [Hun95] Hunt. *The reproduction of Color (5th ed.)*. Kings Langley :Fountain Press, 1995.
- [IBLK98] Laurent Itti, Jochen Braun, Dale K. Lee, and Christof Koch. A model of early visual processing. In Michael I. Jordan, Michael J. Kearns, and Sara A. Solla, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems*, volume 10. The MIT Press, 1998.
- [Kod81] Kodak. *the Kodak Workshop Series : Using filters*. Kodak Editor, 1981.
- [Lan00] Philippe Lanthony. Les peintres et les anomalies de la vision. *Dossier Pour la Science, La Couleur*, pages 88–93, April 2000. <http://www.pourlascience.com/dossiers/dossier-27/sommaire.htm>.
- [Lev98] Jonathan Levene. A framework for non-realistic projections. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [Log00] Nikos Logothetis. La vision : une fenêtre sur la conscience. *Pour la Science*, 268 :80–86, février 2000.
- [Low99] Ross Lowell. *Matters of Light and Depth*. Lowell-Light Manufacturing, 1999.
- [LS95] John Lansdown and Simon Schofield. Expressive rendering : A review of nonphotorealistic techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(3) :29–37, May 1995.
- [Mar83] David Marr, editor. *Vision : A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W H Freeman and Co., 1983.
- [Mas75] Marie-Louise d'Otrange Mastai, editor. *Illusion in art : trompe l'oeil, a history of pictorial illusionism*. New York : Abaris Books, 1975.
- [Mil91] Millerson. *Lighting for Television and Film*, 3rd ed. Focal Press, 1991.
- [Mil98] Jonathan Miller. *On Reflection*. National Gallery, England, 1998.
- [MN78] D. Marr and K. H. Nishihara. Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. In *Proc. of the Royal Society, Vol. B 200*, pages 269–294, 1978.
- [Pal99] Stephen E. Palmer. *Vision Science, Photons to Phenomenology*. MIT Press, 1999.
- [Pan27] Erwin Panofsky. *Perspective As Symbolic Form (La perspective comme forme symbolique)*. Zone Books, 1927.
- [Pir70] Maurice Henri Leonard Pirenne. *Optics, Painting and Photography*. London, Cambridge U.P., 1970.
- [RB98] Paul Rademacher and Gary Bishop. Multiple-center-of-projection images. In Michael Cohen, editor, *SIGGRAPH 98 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 199–206. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, July 1998. ISBN 0-89791-999-8.
- [Rey00] Craig Reynolds. Stylized depiction in computer graphics non-photorealistic, painterly and 'toon rendering. an annotated survey of online resources, <http://www.red3d.com/cwr/npr/>, 2000.

- [Ril00] Howard Riley. Drawing and culturally-conditioned perception. <http://www.lboro.ac.uk/departments/ac/tracey/research/riley/riley.htm>, 2000.
- [Roq00] Georges Roque. *Art et science de la couleur : Chevreul et les peintres, de Delacroix à l'abstraction*. Jacqueline Chambon, 2000.
- [SCCZ00] L. Stroebel, J. Compton, I. Current, and R. Zakia. *Basic Photographic Materials and Processes*. Boston : Focal Press, second edition edition, March 2000.
- [Sch99] G. Schauffer. Image-based object representation by layered impostors. In *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 99–104, 1999.
- [Sol94] R. L. Solso. *Cognition and the visual arts*. MIT Press, 1994.
- [SP94] Francois Sillion and Claude Puech. *Radiosity and Global Illumination*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1994.
- [SSZG95] Spencer, Shirley, Zimmerman, and Greenberg. Physically-based glare effects for digital images. In *Computer Graphics (Proc. Siggraph)*, 1995.
- [TF97] Joshua B. Tenenbaum and William T. Freeman. Separating style and content. In Michael C. Mozer, Michael I. Jordan, and Thomas Petsche, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems*, volume 9, page 662. The MIT Press, 1997.
- [Tum99] Jack Tumblin. *Three methods of detail-preserving contrast reduction for displayed images*. PhD thesis, College of Computing Georgia Inst. of Technology, September 1999.
- [vH81] Hermann von Helmholtz. On the relation of optics to painting. In *Popular scientific lectures*. Appleton, 1881.
- [vH25] H. von Helmholtz. *Treatise on Physiological Optics*. Dover, New York, NY, 1925.
- [Vin89] Leonardo Da Vinci. *Leonardo on Painting : An Anthology of Writings by Leonardo Da Vinci With a Selection of Documents (Traité de la peinture)*. Yale University Pr, 1989.
- [Wan95] B. A. Wandell. *Foundations of Vision*. Sinauer, 1995.
- [WH87] D.M. Willows and H.A. Houghton. *The psychology of illustration*. New York : Springer-Verlag, 1987.
- [Wil97] John Willats. *Art and Representation*. Princeton University Press, 1997.
- [Wöl50] Heinrich Wölfflin. *Principles of Art History ; The Problem of the Development of Style in Later Art (Principes fondamentaux de l'histoire de l'art)*. Dover, 1950.
- [Yar67] A. L. Yarbus. *Eye movement and vision*. New York : Plenum Press, 1967.
- [Zak97] Richard D Zakia. *Perception and Imaging*. Butterworth-Heinemann, 1997.
- [Zor95] Denis N. Zorin. Correction of geometric perceptual distortions in pictures. Master's thesis, California Institute of Technology, 1995.