

# Survol de techniques de rendu non-photoréaliste (NPR)

Victor Ostromoukhov  
Université de Montréal

## 1 Introduction

Depuis trois décennies, l'infographie s'efforce de reproduire l'apparence du monde extérieur avec la plus grande fidélité possible. Ce but est déclaré atteint lorsque l'on n'arrive pas à distinguer l'image artificielle de celle prise par une caméra élaborée – ce qui a donné naissance au terme de photoréalisme, ou réalisme comparable à celui d'une photographie. Cette approche contraste avec l'approche traditionnellement utilisée par les artistes qui, eux aussi, ont toujours reproduit le monde extérieur, mais en transformant la réalité à travers un style personnel qui éloignait souvent leurs œuvres des images qui auraient pu être prises par une caméra. Les raisons d'une telle déviation sont multiples :

- d'ordre esthétique : certaines techniques et styles artistiques paraissent visuellement plus plaisants que d'autres ;
- d'ordre technique : limitations de certaines techniques de reproduction comme par exemple la gravure, le dessin au crayon ou la peinture à l'huile ;
- d'ordre fonctionnel : pour focaliser l'attention du spectateur sur la partie qui mérite plus d'attention que les autres, pour atteindre une meilleure clarté, ou pour mieux illustrer un trait particulier de l'objet représenté ;
- d'ordre historique : c'est souvent la tradition qui dicte le style approprié ;
- d'ordre philosophique : l'artiste représente souvent le monde de son imagination, plutôt que le monde tel qu'il est perçu par l'artiste.

Depuis quelques années, l'infographie s'intéresse de plus en plus aux techniques de rendu non-photoréaliste (NPR) directement ou indirectement inspirées par les arts graphiques traditionnels. Ces nouvelles techniques élargissent considérablement le champ d'action traditionnel des techniques de synthèse d'images. Comme on le verra plus tard dans cet article, certaines techniques NPR augmentent la perception du volume des objets synthétiques. Certaines techniques NPR permettent de visualiser des arrangements volumiques extrêmement sophistiqués, même si aucune vue de caméra virtuelle n'est capable de rendre un tel objet. D'autres techniques NPR rendent les représentations d'objets synthétiques plus jolies, plus expressives, plus laconiques – autant de facteurs qui d'emblée justifient la démarche non-photoréaliste.

Dans ce chapitre, nous analyserons quelques techniques connues dans l'infographie non-photoréaliste. Nous nous efforcerons de comprendre les raisons d'être de chacune,

les moyens techniques spécifiques qu'elles emploient. Nous tirerons les conclusions de l'enseignement apporté par chaque technique particulière, dans l'optique de dégager une approche permettant à certaines de ces techniques d'être utilisées en cartographie.

Le reste du document est organisé de la façon suivante. Dans la section 2, nous établirons la taxonomie du rendu non-photoréaliste : nous en définirons les termes principaux, classifierons les techniques connues et publiées à ce jour. Dans les sections 3, nous survolerons les techniques les plus significatives. Finalement, dans la section 4, nous donnerons en guise de conclusion un aperçu des usages potentiels des techniques NPR en cartographie.

## 2 La représentation réaliste et non-réaliste dans l'art et dans l'infographie

Bien qu'il ne soit pas approprié de donner la définition d'un terme par opposition, le terme de rendu non-photoréaliste (*Non-photorealistic rendering ou NPR*, en anglais) est bel et bien défini par opposition au rendu photoréaliste. Avant de nous pencher sur le sens exact et le domaine d'application du non-photoréalisme, examinons d'abord ce que le terme "photoréalisme" implique.

Le terme de "réalisme" a une longue histoire dans les arts plastiques. Il est souvent associé à la représentation objective et fidèle du monde extérieur. Par fidélité, on comprend la ressemblance sans faille de la représentation à l'objet – ressemblance qui peut être objectivement vérifiée en plaçant côte à côte l'objet physique et l'œuvre qui le représente. Il est important de noter que la signification exacte de la notion de ressemblance a évolué au cours du temps. Par exemple, dans l'art du portrait, avant la Renaissance, la ressemblance physique était souvent considérée comme moins importante que la ressemblance identitaire. A cette époque, il était courant de confondre les mots "portrait" et "effigie" : les deux signifiant "imitation figurée", ils étaient donc identiques à la vague notion d'illustration [Sch94]. C'est pendant la Renaissance, avec le progrès triomphant des sciences physiques et mathématiques, que l'idée même de ressemblance physique et objective a commencé à primer sur la ressemblance plus symbolique. A cette époque, les artistes introduisent la perspective dans la peinture, étudient les effets atmosphériques sur la représentation visuelle de l'espace, développent les instruments qui aident les artistes à accroître la fidélité de reproduction (voir la gravure de Dürer, figure 1).

L'art hollandais est souvent cité comme l'apogée du mouvement d'objectivation des arts plastiques. Par exemple, les tableaux de Vermeer (voir figure 2) représentent la réalité avec un tel degré de perfection, qu'il est possible de reconstruire complètement la scène. Du coup, cette représentation quasi-parfaite a été qualifiée de froide, sèche et dépourvue d'âme par les critiques contemporains et ultérieurs. Le mouvement philosophique des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles s'éloignent de l'idéal d'objectivité et de ressemblance exactement saisie et véritable, propre à la Renaissance. Ainsi, Georg Wilhelm Friedrich Hegel s'indigna des "portraits ressemblants jusqu'à l'écœurement" [Sch94]. Les caractéristiques spirituelles de l'œuvre d'art deviennent alors dominantes et priment sur le réalisme. A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la peinture impressionniste et surtout



FIG. 1 – Gravure de Dürer (1527) représentant un peintre de l'époque travaillant avec un écran de projection qui lui permettait de tenir compte automatiquement de la transformation de perspective découverte quelques décennies auparavant.

expressionniste a bouleversé le mode de représentation de la réalité en mettant l'accent sur la subjectivité de la vision de l'artiste.



FIG. 2 – L'art hollandais du XVI et XVII a été considéré comme un moment fort du mouvement réaliste dans la peinture. Les tableaux de Vermeer peuvent servir de source de reconstitution très exacte de la scène peinte. The Allegory of Painting. Vienna, Kunsthistorisches Museum. 1666-67.

Dans les arts plastiques, le réalisme connaîtra d'autres moments d'épanouissement, souvent liés aux mouvements idéologiques qui attribuaient une plus grande importance au monde physique et objectif qu'au monde spirituel et imaginaire. Faut-il s'étonner que le terme de "réalisme socialiste" soit devenu au XX<sup>e</sup> siècle le symbole même du régime soviétique qui s'opposait ouvertement à l'héritage spirituel du passé ?

Un autre phénomène important – l'avènement de la photographie au cours du XIX<sup>e</sup>

siècle et du cinéma par la suite – a participé à la banalisation de la notion d’objectivité de la représentation visuelle. On aurait pu imaginer que ce phénomène signifie la mort de la peinture. Si un appareil photo est capable de reproduire automatiquement et très fidèlement le monde extérieur, pourquoi alors dépenser tant d’effort pour créer des imitations de la réalité ? Frédo Durand examine les relations entre la réalité objective et ses représentations dans différents modes artistiques. Il écrit : “La photographie 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” [Dur01].

Il est intéressant de constater que les critiques généralement attribuées à l’art réaliste – d’être froid, trop poli, sans âme – trouvent certains parallèles avec les critiques de l’infographie des trois premières décennies, dite infographie photoréaliste. Jusqu’au milieu des années 1990, le photoréalisme, c’est-à-dire l’objectivité et la fidélité des images synthétiques à la réalité, occultait complètement les tendances à chercher d’autres moyens expressifs de reproduction de la réalité. D’une certaine façon, les efforts de l’infographie photoréaliste “classique” peuvent être associés à l’élaboration d’une caméra photo virtuelle, capable de produire des images synthétiques à partir d’une scène virtuelle, exactement comme une vraie caméra photo aurait reproduit des images d’une scène physique.

A partir de la fin des années 1980, mais surtout dans le courant des années 1990, certains travaux en infographie ont été consacrés à la simulation des moyens techniques non-réalistes du passé. De la même manière qu’il y a un siècle, les imitations des effets impressionnistes ont mis l’accent sur le caractère non unique de la représentation de la réalité, et surtout sur le fait que, si ces moyens étendus sont utilisés d’une façon appropriée, la nouvelle imagerie non-photoréaliste devient parfois plus attractive, plus variée, cible mieux ses objectifs que le rendu trop poli, trop réaliste de l’infographie traditionnelle.

On trouvera dans la littérature plusieurs articles qui classifient les techniques de rendu non-photoréaliste [LS95a, Rey00, Gre99]. Teece les classifie selon deux axes orthogonaux : les techniques bidimensionnelles contre celles tridimensionnelles, et techniques automatiques ou semi-automatiques contre celle qui nécessitent une intervention humaine. D’autres auteurs classifient ces techniques selon l’usage qu’on en fait ou selon le média artistique que la technique NPR en question essaye de simuler. Plusieurs auteurs s’accordent sur la nature restrictive et souvent inappropriée du terme “rendu non-photoréaliste”, auquel certains préfèrent celui de “rendu expressif”. Sans vouloir ajouter une classification supplémentaire, nous nous contenterons ici d’énumérer certains travaux en matière NPR, en les groupant selon leur applicabilité potentielle. Cette classification a été inspirée par celle de Craig Reynolds [Rey00] qui a conçu un site web important regroupant l’ensemble des activités NPR menées aux quatre coins du monde.

Le moyen d'expression visuelle peut être intéressant en soi, comme le montrent les résultats du courant de rendu "impressionniste" ou "expressif" [Hae90, Mei96, Lit97, Her98, HP00]. Cette branche du rendu NPR s'intéresse aux images statiques ou animées. L'objectif principal en est d'élargir le rayon d'action du rendu en infographie – faire aussi bien, voire même mieux que les artistes-impressionnistes.

Un autre courant en infographie explore des possibilités de rendu inspirées par les techniques artistiques telles que le dessin, l'aquarelle, la gravure [CAS<sup>+</sup>97, Cur98, Ost99, SB99]. Ici, l'objectif initial est souvent d'être capable de reprendre la technique traditionnelle, en utilisant les moyens informatiques. L'objectif sous-jacent est souvent de développer, en partant d'une technique inspirée par telle ou telle technique connue, de nouveaux moyens expressifs, allant au-delà des techniques existantes, et surtout en utilisant la puissance de calcul de l'ordinateur pour traiter les tâches fastidieuses et pénibles.

En architecture, les croquis expressifs faisaient traditionnellement partie des moyens de visualisation du travail d'architecte. Il était donc naturel d'essayer d'intégrer cette façon de travailler dans une chaîne informatisée, qui s'est imposée par ailleurs pour d'autres tâches d'architecte. Des outils puissants, ainsi que des systèmes commerciaux ont été développés [Ric97]. Par ailleurs, l'illustration technique a été explorée dans [GGSC98, GSG<sup>+</sup>99]. Comme on le verra dans la section consacrée à ce sujet, l'effort principal est porté ici sur l'augmentation des effets volumiques et expressifs propres à cette branche d'illustration, tout en limitant son aspect tape-à-l'œil.

La séparation en représentation photoréaliste et non-photoréaliste n'est pas une séparation en noir-ou-blanc. Même dans l'art photoréaliste par excellence – l'art de la photographie – les facteurs subjectifs et personnels jouent un rôle important. Frédo Durand constate que l'une des clefs de l'art photographique est la maîtrise de l'éclairage, qui nécessite une approche active et personnalisée vis-à-vis de la lumière [Dur01]. Le positionnement de la caméra, des sources de lumière, le choix du "moment décisif", selon Henri Cartier-Bresson, la retouche tonale pendant différentes phases de la création d'une œuvre photographique, font partie de l'arsenal d'un photographe moderne.

Dans cet article, il n'est pas question d'apporter un jugement de valeur sur différentes alternatives de représentation du monde extérieur – plutôt objective (photoréaliste) ou plutôt subjective et expressive (non-photoréaliste). Nous tâcherons d'expliquer les tenants et les aboutissants des différentes techniques NPR connues à ce jour.

### **3 Survol des techniques de rendu non-photoréaliste existantes**

#### **3.1 Techniques de base**

La plupart des techniques explorées dans ce chapitre possèdent un tronc commun de techniques de base. Souvent, il est question d'effectuer le rendu non-photoréaliste sur des objets tridimensionnels. Il faut donc extraire de la description géométrique des objets de la scène les informations utiles pour effectuer le traitement approprié.

Plusieurs articles étudient la façon dont les contours ou les silhouettes peuvent être

extraits de la géométrie. La plupart des auteurs s'accordent sur une question : les lignes de silhouette et les contours véhiculent la plupart de l'information visuelle. Il est donc crucial de traiter ces entités avec toute l'attention nécessaire.

Pour une surface lisse, la silhouette est définie comme le lieu géométrique où la condition suivante est respectée (figure 3) :

$$\mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{C}) = 0$$

où  $\mathbf{n}_i$  est la normale de la surface,  $\mathbf{x}_i$  est le point courant de la surface et  $\mathbf{C}$  est la position du spectateur (ou de la caméra). Cette définition générale est valable pour une surface lisse quelconque, quelle que soit sa représentation. Pour les objets décrits par une maille polygonale, les silhouettes sont exactement les bords des polygones qui connectent les faces orientées vers l'observateur aux faces qui tournent le dos à l'observateur.

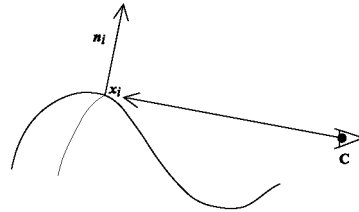


FIG. 3 – Pour une surface lisse, la silhouette est définie comme le lieu géométrique où le vecteur normal à la surface est perpendiculaire à la direction de vue.

Il existe trois types de cas où la discontinuité géométrique peut engendrer un contour, comme le montre la figure 4. Ceci correspond à trois types de changement de visibilité de la surface qui peut (1) passer derrière une autre surface, (2) croiser une autre surface ou un pli, (3) créer une singularité.

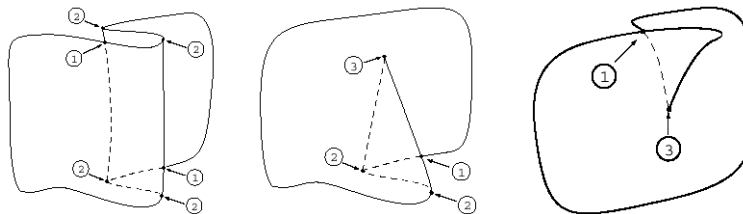


FIG. 4 – Trois types de changement de visibilité de la surface qui engendrent des contours : le label “1” marque une surface qui passe derrière une autre surface (4-valence), le label “2” marque une surface qui croise une autre surface ou un pli (3-valence), et le label “3” marque une singularité (2-valence).

Takafumi Saito et Tokiichiro Takahashi [ST90] introduisent la notion de tampons de géométrie (G-buffers) qui permettent de séparer le traitement destiné à améliorer la détection des entités importantes du traitement proprement géométrique (projection, calcul de visibilité et suppression de surfaces invisibles). La technique se base sur une carte de profondeur qui permet de détecter les silhouettes (frontières entre l'objet et

son environnement) et les contours internes (lignes formées par les discontinuités dans la carte de profondeur). Saito et Takahashi proposent différents styles de dessins pour différents types de contours, ainsi que différents styles de hachures (figure 5). Ce papier a joué un rôle précurseur dans de nombreuses techniques de dessin au trait, poussées beaucoup plus loin depuis. Parmi les papiers qui abordent ces différents aspects, on pourrait citer [DC90, HL94, SPR<sup>+</sup>94, CMZ<sup>+</sup>99, Mar00, MKT<sup>+</sup>97, NM00]

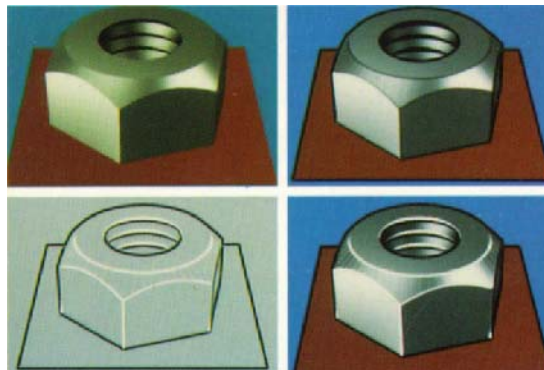


FIG. 5 – Différents types de contours traités par Saito et Takahashi (1990).

Certains systèmes enrichissent les informations obtenues à partir de la carte de profondeur par le biais d'autres informations, obtenues notamment à partir de la carte de normales calculée à partir de la géométrie. Bien que cette technique combinée améliore considérablement la qualité de détection des contours et des silhouettes, elle laisse passer certains cas difficiles comme le montre l'exemple sur la figure 6.

John Lansdown, Simon Schofield et Paul Richens décrivent [LS95b, Ric97] le système Piranesi qui utilise, pour le rendu non-photoréaliste des scènes architecturales, des informations concernant les matériaux, ce qui permet d'appliquer des styles de rendu différents sur diverses parties de l'objet.

### 3.2 Techniques de rendu “impressionniste” ou “expressif”

#### Paint By Numbers

En 1990, Paul Haeberli a présenté son article “Paint By Numbers : Abstract Image Representations” qui a eu une très grande influence sur tout le développement du courant de rendu “impressionniste” ou “expressif” [Hae90]. Dans cet article, Haeberli avance une idée assez simple et naturelle : on peut imaginer un rendu d'image artificielle au moyen de pinceaux et de crayons, exactement comme un artiste l'aurait fait. Il souligne que, dans de nombreux cas, ce type de rendu serait plus approprié que le rendu purement réaliste.

La technique qu'il propose est très simple. Un pinceau possède un certain nombre de paramètres : sa position de début, sa couleur, son épaisseur, sa direction et sa forme. Il suffit de déterminer, à partir de l'image à rendre, l'ensemble des paramètres de chaque trait, pour produire l'effet désiré. On constate que, pour éviter l'effet de flou causé par l'emplacement approximatif des traits par rapport aux transitions brusques

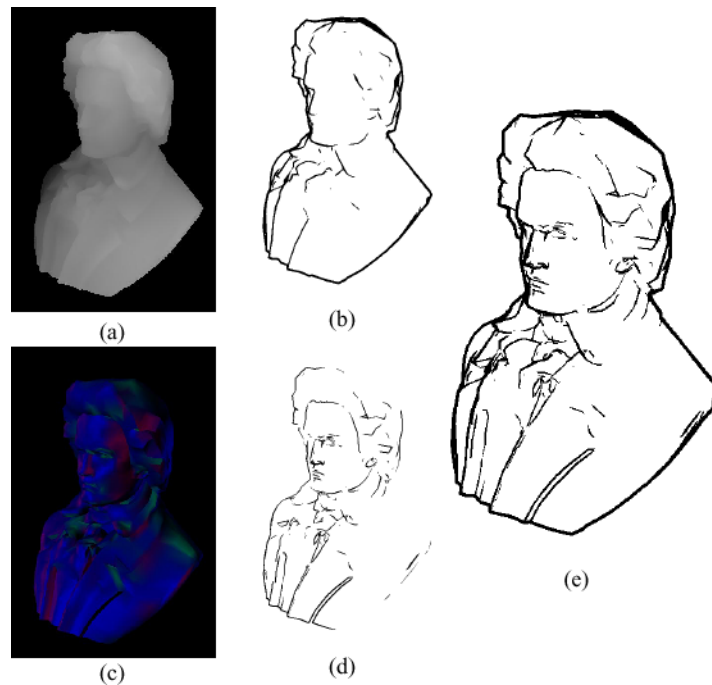


FIG. 6 – La carte de profondeur (a) et les contours obtenus à partir de la carte de profondeur (b); la carte de normales (c) et les contours obtenus à partir de la carte de normales (d); les contours obtenus à partir de la carte de profondeur et la carte de normales (e) (Source : [Her98]).

dans l'image, il faut progressivement raffiner le dessin par des traits de plus en plus petits et précis. Il propose un outil interactif pour répartir la direction des traits sur le tableau. Les résultats présentés sont tout à fait impressionnants, compte tenu de la simplicité de la technique (voir figure 7).



FIG. 7 – Système de rendu “impressionniste” ou “expressif” de Paul Haeberli (1990).



## Rendu “impressionniste” ou “expressif” pour les séquences animées

Barbara Meier a présenté un travail destiné à adapter le style de rendu “impressionniste” ou “expressif” aux séquences animées [Mei96]. Une des deux difficultés principales liées aux animations des séquences non-photoréalistes réside dans l’effet indésirable qu’on appelle “effet de rideau de douche” (*shower door*, en anglais). Il est dû au fait que, lorsqu’un objet bouge, les traits de rendu sont collés à la surface de visualisation, mais pas à l’objet. De ce fait, l’image apparaît comme floue, perçue à travers un rideau de douche semi-transparent. Le deuxième problème lié aux animations consiste en un besoin accru de cohérence entre les traits de rendu du même objet qui bouge. Pour résoudre ces deux problèmes, l’auteur utilise un système de particules. Les traits de pinceau sont considérés comme des particules 3D en liaison avec la scène 3D à rendre, mais ils représentent des objets visuels 2D sur une surface de rendu. La géométrie de la scène, ainsi que les informations obtenues depuis l’éclairage, les propriétés des matériaux qui constituent la scène aident à déterminer le type, la couleur et l’orientation du pinceau. Le trait continue à être cohérent avec l’objet, à travers toute la séquence. Cette méthode s’est avérée assez efficace et produit de jolis résultats (voir figure 8).

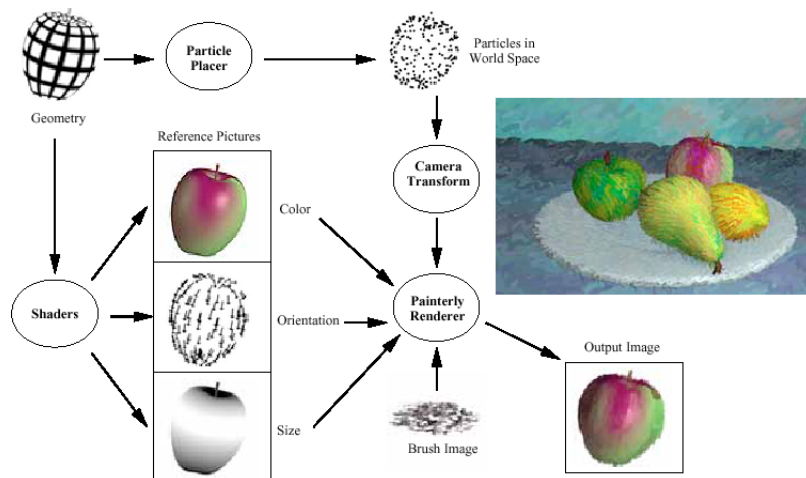


FIG. 8 – Système de rendu “impressionniste” ou “expressif” de Barbara Meier (1996) pour les séquences animées.

Le système de Barbara Meier nécessite tout de même un modèle géométrique de la scène. Peter Litwinowicz, dans son papier publié en 1997 [Lit97], a essayé de résoudre le problème de production entièrement automatique, sans modèle associé. Il utilise à cette fin un champ de gradients, déterminant pour indiquer l’orientation des traits. Lorsque le champ de gradients est mal déterminé – par exemple, dans le cas d’un champ uniforme – il utilise l’information de la zone environnante. Une technique spéciale a été développée, afin de préserver de forts contrastes sur les bords d’une zone à faible gradient. Litwinowicz propose de couper un trait dès qu’il entre dans une zone ayant un gradient au-dessus d’un certain seuil. Le système de Litwinovitz préserve la

cohérence entre les traits des images individuelles, à l'intérieur d'une séquence. Les résultats présentés dans ce papier sont visuellement plaisants (voir la figure 9).



FIG. 9 – Système de rendu “impressionniste” ou “expressif” de Peter Litwinowicz (1997) pour les séquences animées : l'original (à gauche) et le résultat (à droite).

Aaron Hertzmann décrit en 1998 un système multi-résolution pour le rendu “impressionniste” ou “expressif”, qui a fait évoluer la notion de trait de type pittoresque [Her98]. Il centre son travail sur l'idée que les artistes traditionnels utilisent souvent des traits larges et approximatifs, pour représenter la scène grossièrement, et des traits fins et précis pour raffiner le travail. Quoique discutable en soi, cette idée peut être implémentée à travers une analyse multi-résolution de l'image. L'image est rendue couche par couche. A chaque passe, l'information de différence (erreur) entre l'image originale et l'image déjà obtenue ainsi que le champ de gradients dans l'image originale déterminent le type, la taille, la couleur et l'orientation des traits. Techniquement, c'est une amélioration de la technique de Haerberli.

D'autres références sur le rendu “impressionniste” ou “expressif” sont [HP00, SY00, Her01].

### 3.3 Techniques de rendu inspirées par le dessin, la gravure, l'aquarelle et d'autres techniques artistiques

#### Dessin à la plume (Pen-and-Ink)

Une recherche importante en matière d'illustration au trait, et notamment le dessin à la plume, a été menée à l'Université de Washington depuis le début des années 1990 par un groupe d'étudiants de David Salesin.

En 1994, Georges Winkenbach et David Salesin présentent un article [WS94] qui décrit un système permettant de produire automatiquement des dessins au trait, à partir d'une scène 3D. Le système est basé sur une technique nouvelle spécialement développée à cette fin – la texture au trait. Cela signifie qu'une série de textures cohérentes entre elles et représentant différents niveaux d'intensités est produite séparément. Pendant le rendu, la variante appropriée, indexée par le niveau d'intensité désiré, est choisie. Le système préserve la cohérence à travers plusieurs échelles de résolution, il supporte les variations dues à la transformation de perspective et à l'effet d'orientation de l'objet rendu au trait. Une attention toute particulière a été développée pour que le rendu au

trait automatique soit aussi naturel que le dessin au trait classique. Par exemple, un traitement spécial permet d'éviter l'aspect monotone et impersonnel de l'image où on a "trop" fait : où tout espace est rempli de traits (voir figure 10).

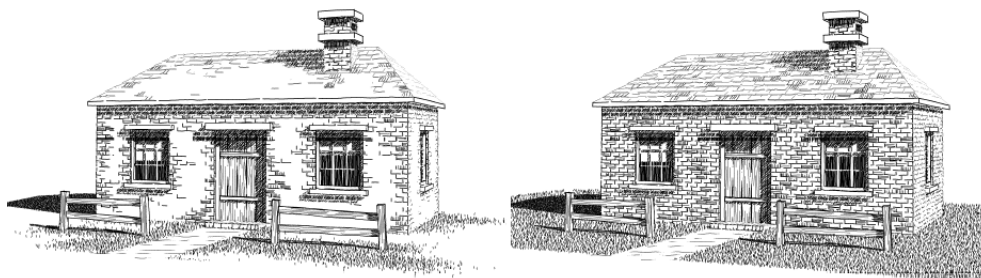


FIG. 10 – Système de dessin à la plume (Pen-and-Ink) de Georges Winkenbach et David Salesin (1994) : avec (à gauche) et sans (à droite) indications sur le placement de texture.

En 1996, Georges Winkenbach et David Salesin élargissent la technique de dessin au trait afin de l'appliquer aux surfaces paramétriques [WS96]. Le problème principal est formulé de la façon suivante : étant donné la surface paramétrable, la transformation de perspective sous laquelle cette surface est observée, la direction des traits par rapport aux axes de paramétrisation, et la fonction de reproduction de ton par rapport au style de traits désiré, trouver la disposition de traits qui satisfasse à la fois la contrainte de direction et la contrainte d'exactitude du ton. Les auteurs présentent une solution astucieuse pour éviter les taches trop sombres lorsque plusieurs traits se rejoignent près du point de singularité, comme par exemple près des pôles d'une sphère, représentée sur la figure 11).

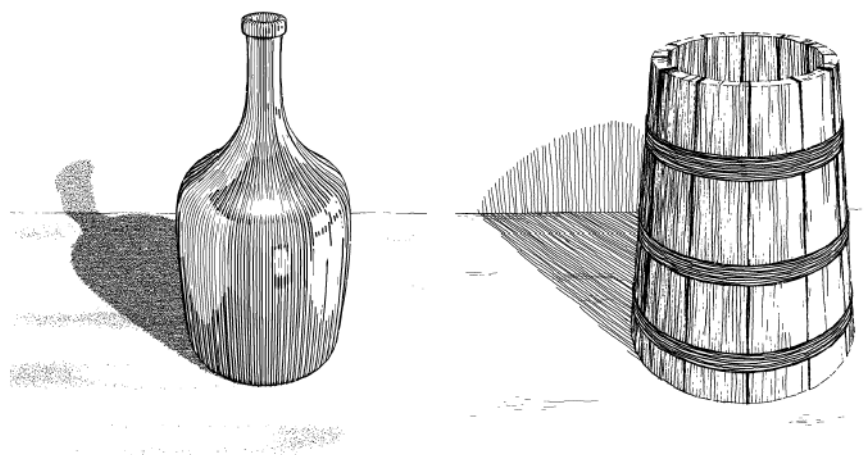


FIG. 11 – Système de dessin à la plume (Pen-and-Ink) de Georges Winkenbach et David Salesin (1996) appliqué aux surfaces paramétriques.

Bien que la technique décrite dans cet article soit illustrée par une série de dessins

aux traits assez convaincants, une des difficultés principales consiste dans la relation non évidente entre un objet de géométrie quelconque et sa représentation par une surface paramétrique, avec une paramétrisation significative par rapport au style de dessin désiré.

Un autre article [SABS94] de Michael Salisbury, Sean Anderson, Ronen Barzel et David H. Salesin explore l'aspect interactif du dessin au trait. Le système agit comme un outil de composition classique, à une différence notable près : le remplissage des surfaces s'effectue selon une texture de trait pré-déterminée et stockée dans une librairie. Le système supporte plusieurs sophistications, comme par exemple un traitement spécial sur le bord des surfaces plates, afin d'éviter que ces surfaces apparaissent trop bien coupées et par conséquent trop "mécaniques" (voir figure 12).

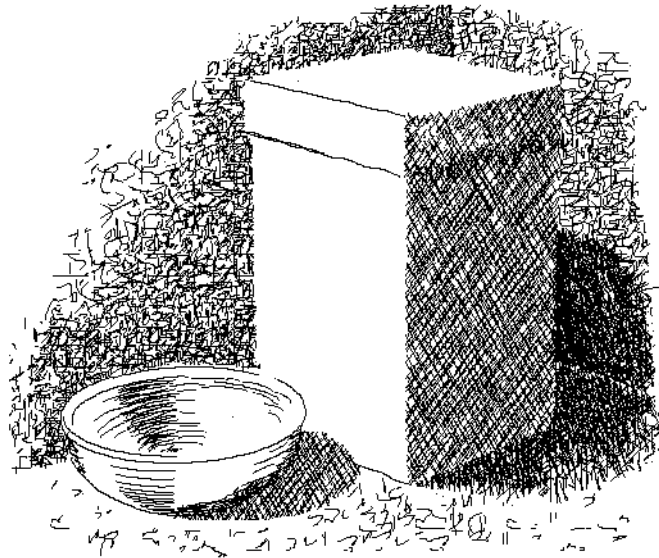


FIG. 12 – Un exemple de rendu par un système interactif de dessin au trait décrit par Michael Salisbury, Sean Anderson, Ronen Barzel et David H. Salesin (1994).

En 1996, Mike Salisbury, Corin Anderson, Dani Lischinski et David Salesin présentent un autre papier [SALS96] : la dépendance du style de rendu au trait par rapport à la résolution y est mise en évidence et traitée en conséquence. L'idée principale de ce papier consiste dans l'observation suivante : le dessin au trait supporte mal l'agrandissement ou le rapetissement proportionnel. Ceci signifie que, lorsque l'objet représenté au trait devient plus petit, la densité de trait doit changer afin de préserver la perception constante de ton. Une heuristique appropriée est présentée qui permet de produire des résultats très convaincants, représentés sur la figure 13).

L'année suivante, Michael Salisbury, Michael Wong, John Hughes et David Salesin présentent un papier [SWHS97] qui fait évoluer davantage le concept de système de composition au trait – il permet notamment d'éditer d'une façon interactive les directions des traits, et, par conséquent, introduit une véritable dimension artistique (voir figure 14). L'utilisateur choisit la direction des traits à certains endroits, et le système

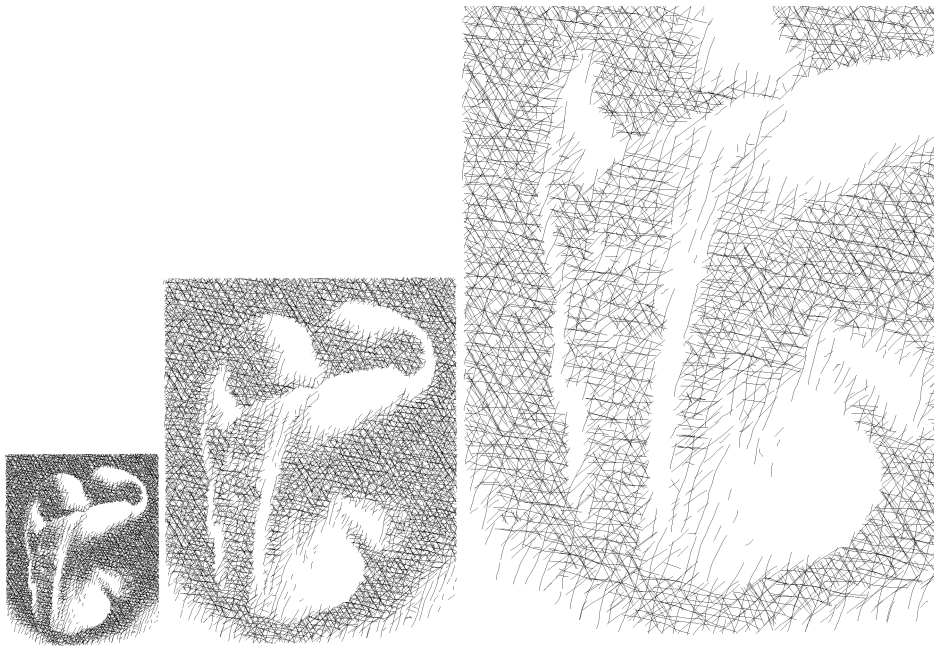


FIG. 13 – Echantillon produit par le système multi-résolution de dessin au trait décrit par Mike Salisbury, Corin Anderson, Dani Lischinski et David Salesin (1996).

produit un champ de traits en interpolant entre ces points de repère. Le système supporte plusieurs résolutions.

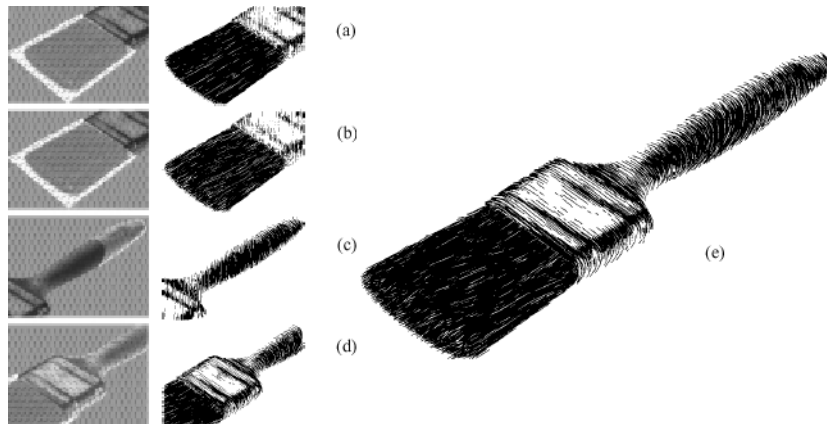


FIG. 14 – Système de dessin au trait à orientation ajustable décrit par Michael Salisbury, Michael Wong, John Hughes et David Salesin (1997).

On peut également signaler le papier de Gershon Elber [Elb95] dans lequel il propose un système de rendu des surfaces représentées en NURBS, au moyen de courbes iso-paramétriques qui simulent les dessins au trait. Dans un papier récent [Elb99], El-

ber approfondit cette technique. Un accent particulier y est mis sur la vitesse de traitement afin de permettre une véritable interactivité du dessin des surfaces polynomiales et rationnelles. Cet article donne des indications solides sur la façon dont les informations concernant les propriétés géométriques de la surface, notamment la courbure principale, peuvent être utilisées pour déterminer la direction des traits de hachage.

Très récemment, Emil Praun et al. ont développé une technique permettant de produire le rendu au trait en temps réel. La technique décrite dans [PHWF01] exploite les possibilités offertes par les cartes graphiques modernes, notamment les projections de textures multiples, les interpolations entre plusieurs niveaux de texture implémentées au niveau du matériel (MIP map).

D'autres références sur le dessin au trait sont [DS00, HZ00]

### **Modélisation du trait de crayon**

Mario Costa Sousa et John Buchanan introduisent un modèle qui permet de simuler le trait de crayon [SB99]. Ils qualifient ce modèle d'observable, car il se base sur les observations microscopiques et macroscopiques des interactions entre les différents types de crayons et de papier.

Le paramètre essentiel qui règle le dépôt des particules de graphite de crayon sur le papier est la proportion entre les composantes de graphite, de colle et de cire qui constituent la mine de crayon normal. Ce paramètre est conventionnellement codé en terme de dureté, allant de très doux (8B) jusqu'à très dur (8H). Le système de Sousa et de Buchanan permet de simuler l'interaction entre n'importe quel type de crayon et une variété de papiers classés selon leur poids et leur rugosité. La forme de la pointe de la mine de crayon va également influencer l'apparence du trait. La forme de la pointe de la mine est modélisée en utilisant un modèle volumique simplifié qui représente la mine. Enfin, la pression de la mine sur papier ainsi que l'inclinaison du crayon entrent en ligne de compte pour le calcul. L'interaction entre différentes couches dessinées avec différents crayons est aussi calculée, en tenant compte de la transparence partielle de certains crayons.

Un autre aspect important de ce modèle est la simulation de la gomme et de divers mixeurs utilisés par les dessinateurs. Ainsi, le système décrit dans ce papier permet-il de simuler avec une grande fidélité les effets de dessin au crayon aussi bien que les effets dus aux effaceurs. Les résultats produits par ce systèmes sont visibles sur la figure 15.

Il faut tout de même souligner que ce système n'offre aucun mécanisme d'amélioration ni d'aide – si le dessinateur est talentueux, il peut dessiner avec ce système de dessins virtuels aussi bien qu'avec du vrai papier et de vrais crayons. Sinon, les dessins seront toujours d'une qualité quelconque. Nous sommes persuadés qu'un système informatique doit fournir davantage de moyens – sinon, pourquoi renoncer aux supports traditionnels que sont le papier, le crayon et la gomme ?

### **Gravure au burin**

En 1999, Victor Ostromoukhov a présenté une technique de rendu non-photoréaliste permettant de simuler certaines techniques de gravure, notamment la gravure au burin

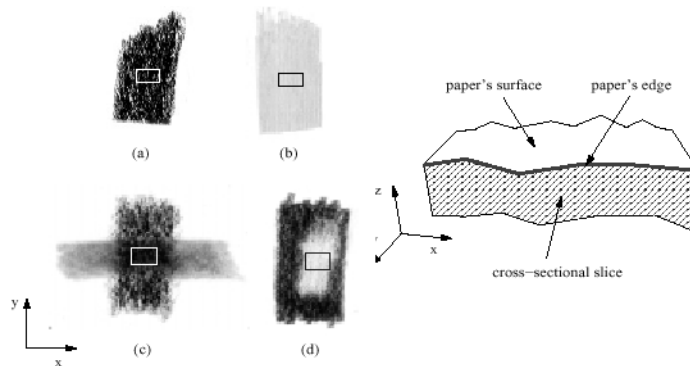


FIG. 15 – Simulation de trait de crayon et des effets dus aux effaceurs décrite par Sousa et Buchanan (1999).

[Ost99]. Parmi les motivations sous-jacentes à ce travail, il cite la volonté de préserver le métier de buriniste, en voie de disparition. Il propose donc d'élaborer une technique informatique qui reprendrait les techniques de gravure, au moyen des conventions et des sophistications présentes dans les gravures traditionnelles. Ce système repose sur l'observation suivante : la technique de gravure au burin présente beaucoup d'analogies avec la technique de rendu en demi-ton traditionnellement utilisée dans la technologie d'impression, ce qu' illustre la figure 16. La technique de rendu en demi-ton (*digital halftoning*, en anglais) utilise une fonction de seuillage analytique ou discrète. Le signal d'entrée est comparé à la fonction de seuillage, produisant un signal de sortie noir ou blanc, en fonction du résultat de cette comparaison (figure 16 à gauche). On pourrait imaginer une plaque de cuivre virtuelle qui, coupée à différentes hauteurs, aurait des sillons de différente largeur et profondeur. En mettant de l'encre dans ces sillons, et en plaquant cette plaque de cuivre contre du papier, on produirait un dessin ayant l'aspect exact de la gravure traditionnelle sillons (figure 16 à droite). D'où cette déduction de l'auteur : l'art de la gravure au burin informatique devient possible dès l'instant qu'on arrive à produire de telles plaques de cuivre virtuelles.

A cette fin, l'article propose la méthode suivante : une plaque finale est composée en fusionnant plusieurs couches, chaque couche étant construite à partir de vagues sinusoidales simples, en appliquant séparément sur chaque couche une transformation de type "morphing". Ensuite, plusieurs couches sont fusionnées afin d'obtenir la structure de seuillage désirée. Cette structure de seuillage permet d'obtenir une version préliminaire de la gravure. Pour obtenir une plus grande qualité de reproduction tonale – élément crucial dans cette méthode – un réajustement fin est appliqué. Ce réajustement fin tient compte, d'une part, de l'original et, d'autre part, de la version préliminaire. A partir de leur différence, la structure de seuillage est modifiée, afin de produire une meilleure version de la gravure. Ce processus itératif conduit à une qualité de courbe de reproduction quasi-parfaite, tout en gardant l'aspect visuel de la gravure au burin. Plusieurs exemples inspirés de technique de gravure au burin ont été présentés, notamment des techniques de hachure croisée, de mélange de structure régulière avec imitation de la technique de mezzotinto, ainsi qu'une extension aux couleurs – voire la figure 17.

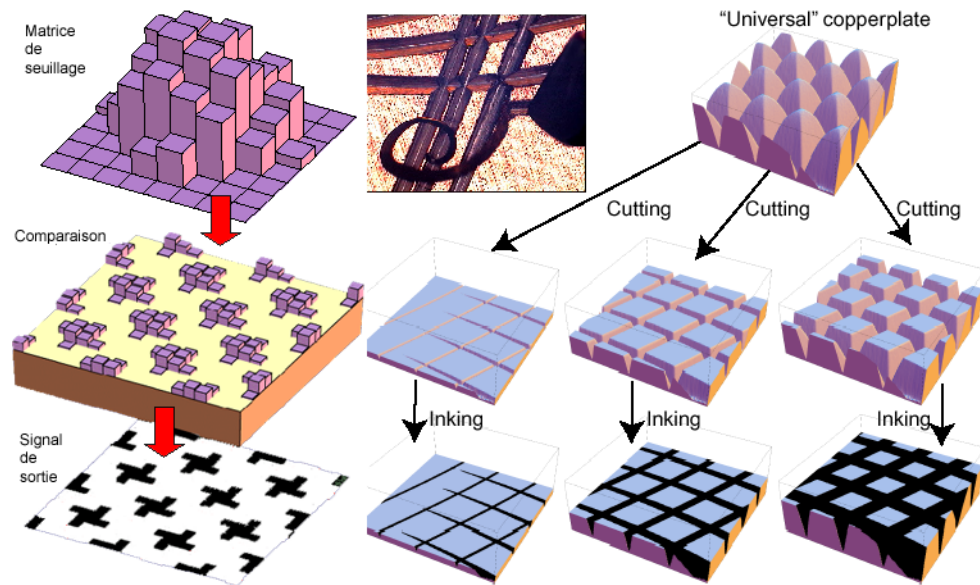


FIG. 16 – Concept principal du système de gravure au burin présenté par Victor Ostromoukhov (1999) – voir dans le texte.

C'est l'un des exemples récents où la puissance de l'ordinateur est destinée à épauler l'utilisateur non-informaticien d'un tel système. Dans un article plus récent [DOM<sup>+</sup>01] Frédo Durand et al. développent d'avantage l'idée de séparation entre le travail fastidieux de rendu effectué par l'ordinateur et le travail de définition stylistique du rendu effectué par l'utilisateur. On peut y voir la définition rudimentaire de la notion de meta-description de paramètres de rendu (ce qui est appelé communément : le style de rendu). Cette notion de meta-description de paramètres de rendu peut s'avérer très utile pour de nombreuses applications de synthèse d'images.

D'autres techniques de gravure ont été présentées par Wolfgang Leister [Lei94] et par [PB94].

## Aquarelle

Un article impressionnant de Cassidy Curtis, Sean Anderson, Josh Seims, Kurt Fleischer et David Salesin introduit une simulation informatique de la technique de dessin à l'aquarelle [CAS<sup>+</sup>97]. Les auteurs se fixent un objectif difficile auquel ils parviennent : produire des dessins indiscernables de vraies aquarelles.

Pour commencer, ils définissent les propriétés inhérentes de l'aquarelle et établissent le catalogue de techniques de base utilisées par les aquarellistes traditionnels. Pour simuler ces effets, les auteurs se servent des équations de Navier-Stokes pour modéliser le mouvement des fluides qui transportent les pigments. L'étape suivante consiste à calculer le dépôt des particules de pigments sur la surface rugueuse du papier. L'eau est par la suite absorbée par la pression capillaire du papier, en modifiant la distribution du colorant. Le modèle composite de Kubelka-Munk permet de calcu-



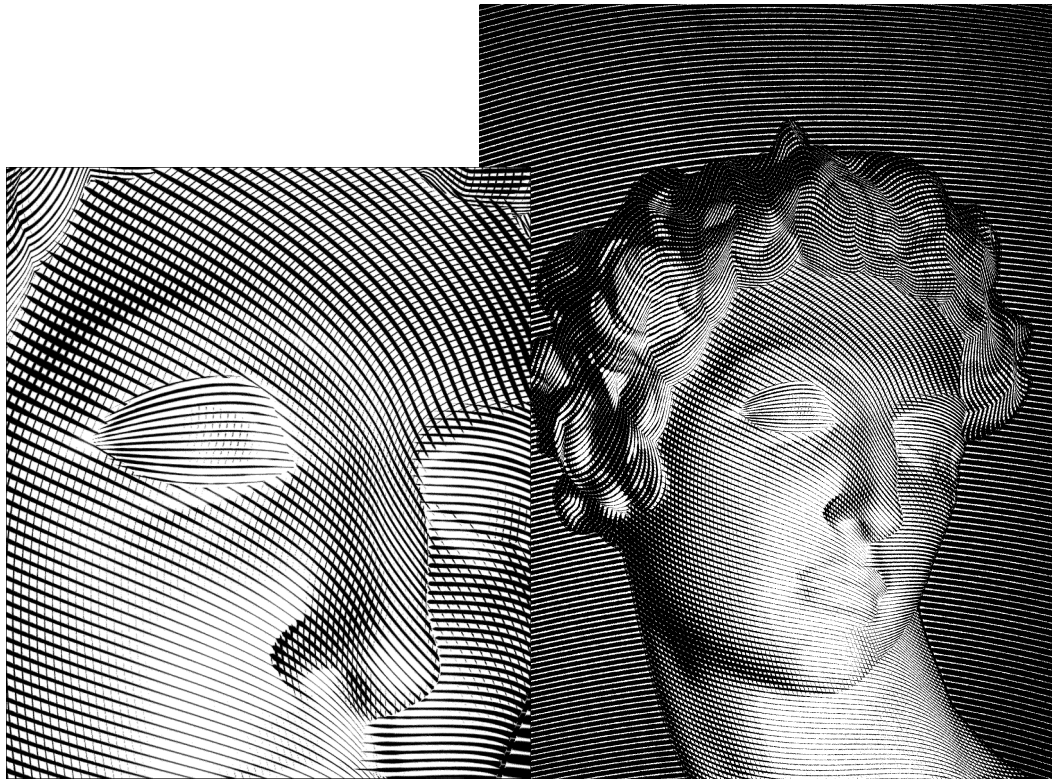


FIG. 17 – Echantillon produit par le système de gravure au burin présenté par Victor Ostromoukhov (1999).

ler l'effet de coloration dû aux diverses couches superposées. Ainsi, l'article décrit la simulation de divers effets importants, par exemple, l'effet du pinceau sec, l'effet d'assombrissement des bords de lavis, l'effet de granulation, l'effet de retour d'eau. Des pigments semi-transparents et complètement opaques sont simulés. Les modèles pour différents types de papier font objet d'une étude séparée. L'article présente une vaste panoplie de simulation de papiers différents utilisés pour l'aquarelle. Côté application, le papier présente un système de dessin interactif, où l'utilisateur décide du positionnement et du mouvement du pinceau. Un choix de couleurs de base est suggéré par le système, sur le fondement des couleurs de l'objet et des pigments virtuels disponibles – ce choix n'étant pas unique, le système donne à l'utilisateur toute liberté de sélection d'après ses goûts personnels. A partir de ces informations, le système calcule les flux du liquide et des pigments – et l'aquarelle est produite ! (figure 18) On peut appliquer potentiellement ce système aux séquences animées exécutées à l'aquarelle. Les auteurs constatent que leur système est numériquement stable, et que les petites différences constatées au niveau des données initiales vont engendrer de minimes différences au niveau du résultat. On préserve ainsi la cohérence entre les photogrammes dans les séquences animées, puisque les images individuelles qui constituent les séquences varient très peu.

La technique présentée dans ce papier est très coûteuse en terme volume de calcul – une image statique de taille modérée pouvant demander plusieurs heures de calcul intensif.



FIG. 18 – Création automatique d'une aquarelle.

### 3.4 Techniques de rendu NPR pour l'architecture

Dans la section 3 , nous avons déjà mentionné le système de dessins architecturaux nommé Piranesi [LS95b, Ric97]. Ce système, expérimental à l'origine, devenu commercial par la suite, fixe des objectifs très ambitieux :

- Offrir à l'utilisateur des moyens visuels plus économiques, plus efficaces et plus significatifs que les moyens offerts par le photoréalisme traditionnel.
- Permettre à l'utilisateur de produire des dessins ayant l' aspect de l'esquisse. C'est une règle du métier d'architecte que leur travail soit représenté de cette manière.
- Permettre de compenser le manque éventuel de détails sur la maquette par une texture visuellement riche – ce qui se fait dans le métier.
- Permettre de faire des montages en incluant dans une même représentation de vraies photos, ainsi que des éléments virtuels rendus d'une façon non-photoréaliste.
- Permettre d'inclure dans la présentation d'une scène architecturale des éléments vaguement définis, ce qui peut stimuler l'élaboration de nouvelles idées pendant différentes phases du projet.
- Permettre une vaste panoplie de résolutions et de qualités, allant du brouillon jusqu'à la présentation de haut niveau.

La clé de voûte du système Piranesi est son interactivité. Cette interactivité est obtenue grâce à un traitement approprié et efficace fondé sur des systèmes de carte de profondeur, carte de normales et carte de matériaux évoqués plus haut, dans la section 3.1.

Côté interface utilisateur, le système offre plusieurs modes de dessin : au pinceau, à l'aquarelle (loin tout de même de la qualité du système présenté dans la section 3.3), à la gouache, à la plume etc.

Le système est interfacé avec la plupart des logiciels de modelage géométrique, afin d'obtenir la géométrie de base. A partir de celle-ci, le système permet de dessiner en perspective, comme si on peignait directement sur les surfaces disposées dans l'espace 3D. En plus, le système offre un large éventail d'outils, permettant de générer des effets spéciaux, comme par exemple le reflet dans la vitre d'un building d'un élément additionnel ajouté comme photographie, ou des ombres projetées par un tel objet photographique sur une scène tridimensionnelle. Les échantillons produits avec ce système présentent une qualité de finition professionnelle – voir la figure 19.

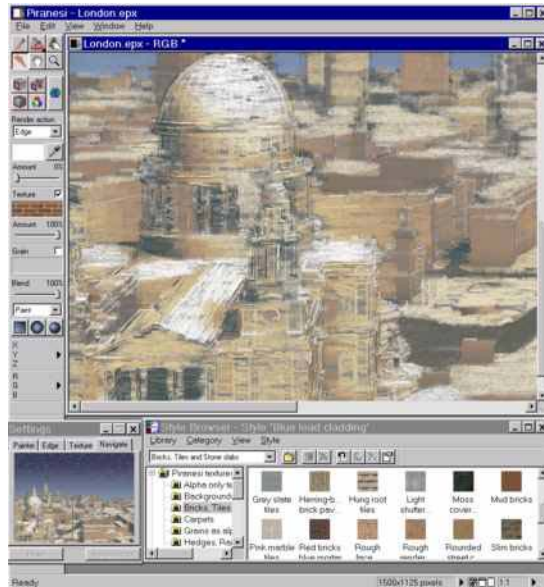


FIG. 19 – Système Piranesi de rendu NPR pour l'architecture.

Plus récemment, Osama Tolba, Julie Dorsey, et Leonard McMillan ont présenté un projet destiné à fournir aux architectes un outil de travail qui est d'une part aussi intuitif et simple qu'un bout de papier, un crayon et une gomme, et de l'autre côté assez puissant et versatile pour intégrer des données graphiques de différentes origines (par exemple, des photos numériques) ainsi que des modèles géométriques sophistiqués. Ce système est destiné aux architectes qui, d'ordre général, évitent l'utilisation de systèmes de modélisation trop compliqués, surtout pendant les premières phases d'un projet, lorsque les idées et les formes ne sont pas encore clairement établies [TDM99].

Le système emploie un modèle du monde 3D projeté sur une sphère unitaire qui entoure le point, d'où la scène est observée. A l'aide des outils interactifs, l'utilisateur de ce système est capable de superposer des éléments – des croquis, des dessins de différentes provenances –, de les ajuster, de les mettre en perspective, et surtout de dessiner par-dessus comme si l'on s'agissait de feuilles de dessin disposées dans un espace

virtuellement créé à partir de ces éléments disparates. Ainsi, pour un coût minime, et sans nécessairement apprendre des concepts et des programmes de dessins compliqués, l'architecte est capable d'esquisser une version préliminaire de sa construction, de se déplacer à l'intérieur, d'y ajouter de nouveaux décors, ou de placer à volonté l'objet en conception dans un environnement déjà existant.

On peut également citer le travail de Maic Masuch and Thomas Strothotte sur la visualisation animée dans l'architecture [MS98].

### 3.5 Illustration technique

#### Modèle d'illumination non-photoréaliste

En 1998, Amy Gooch, Bruce Gooch, Peter Shirley et Elaine Cohen ont publié un papier qui décrit un modèle d'illumination non-photoréaliste [GGSC98]. Ce modèle se distancie par rapport aux modèles d'illumination traditionnellement utilisés en infographie, notamment celui de Phong. Tout d'abord, les auteurs observent que les objets tridimensionnels rendus au moyen de l'infographie traditionnelle sont représentés assez différemment par les artistes et par dessinateurs qui travaillent en utilisant les techniques d'illustration traditionnelles. La notion de justesse de reproduction se mesure par un système assez délicat d'évaluation subjective, à la fois par le dessinateur, et par un observateur, qui, par simple approbation ou désapprobation, influence les options techniques. Dans le domaine de l'illustration technique notamment, les dessinateurs préfèrent obtenir l'effet visuel désiré avec un minimum de moyens. L'usage de la couleur est minimisé, mais, lorsqu'elle est utilisée, elle doit servir à accentuer l'effet tridimensionnel de l'objet. Lignes de contours ou silhouettes sont fortement employées, ainsi que d'autres conventions, notamment pour la visualisation d'objets métalliques et pour l'ombrage. Par ce travail, il s'agissait essentiellement de traduire l'ensemble des conventions du métier de dessinateur technique en langage informatique, afin de permettre de produire automatiquement ou semi-automatiquement des illustrations techniques de bonne qualité.

La technique d'illumination non-photoréaliste que les auteurs proposent est fondée sur la recherche en psychologie de la vision. Se référant à des travaux effectués dans le domaine de la perception des couleurs, les auteurs rapportent que les couleurs chaudes – telles que le rouge, l'orange, le jaune – sont perçues très différemment des couleurs froides – le bleu, le violet ou le vert. Du simple fait que la couleur du soleil est chaude et la couleur du bleu du ciel froide, les objets illuminés par ces deux sources de lumière, donnent naturellement une meilleure perception du volume que l'éclairage par des sources de lumière ayant la même "température" d'éclairage.

En s'appuyant sur cette observation de base, les auteurs proposent une technique d'illumination très simple, inspirée de la technique de Phong, mais qui se divise en deux composantes : chaude et froide :

$$I = \left(\frac{1 + \hat{l} \cdot \hat{n}}{2}\right)k_{cool} + \left(1 - \frac{1 + \hat{l} \cdot \hat{n}}{2}\right)k_{warm}$$

où  $I$  est la couleur de la surface à afficher,  $\hat{l}$  le vecteur de direction du point de surface vers la source de lumière, et  $\hat{n}$  le vecteur unitaire dans la direction normale à la

surface. Les coefficients de pondération  $k_{cool}$  et  $k_{warm}$  définissent la puissance de l'effet désiré. Combinée avec la couleur ambiante traditionnelle, avec les effets d'accentuation des contours et des silhouettes, cette technique produit des résultats visuellement très intéressants, comme on peut le constater sur la figure 20.

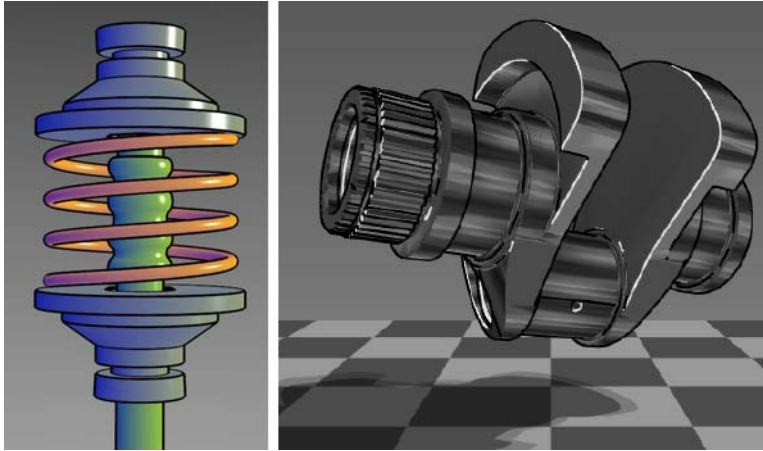


FIG. 20 – Technique d'illumination non-photorealiste avec modèle d'illumination non-standard décrite par Amy Gooch, Bruce Gooch, Peter Shirley et Elaine Cohen (1998).

En ce qui concerne les objets métalliques, la technique d'illustration traditionnelle emploie une méthode de placement sur les surfaces cylindriques de traits sombres alternés avec des traits clairs. Les auteurs simulent cette technique par une approximation triviale, en plaçant des traits d'intensité constante qui varient de manière pseudo-aléatoire autour de l'intensité calculée selon leur modèle d'éclairage.

### Illustration technique interactive

Dans un article publié en 1999 [GSG<sup>+</sup>99], Bruce Gooch, Peter-Pike J. Sloan, Amy Gooch, Peter Shirley et Richard Riesenfeld continuent d'explorer les possibilités offertes par l'infographie dans le domaine de l'illustration technique. Ils soulignent que l'interactivité de manipulation des objets tridimensionnels apporte un élément nouveau et important dans la perception de ces objets. Le photorealisme, dans ce cas, peut être remplacé par le non-photorealisme conventionnel, directement inspiré par les techniques traditionnelles d'illustration technique.

Les auteurs étudient plus précisément comment, à partir d'un modèle 3D polygonal, on peut extraire les bords, les arêtes, les silhouettes, et les représenter automatiquement dans l'illustration technique en utilisant des lignes ayant différents attributs – longueur, épaisseur, couleur. Ensuite, l'effet volumique obtenu peut être accentué davantage en ajoutant de l'ombre douce. Au lieu de calculer l'ombre avec précision – tâche difficile dans l'infographie classique – les auteurs proposent une méthode simplifiée, bien adaptée à la visualisation d'un objet qui plane au-dessus d'une surface. Dans cette approche, l'ombre douce est calculée comme une interpolation linéaire entre plusieurs ombres obtenues en déplaçant le sol (plan récepteur d'ombre) par rapport à l'objet.

Bien que limitée, cette méthode permet de calculer les ombres douces en temps réel. Les illustrations techniques tant dans l'article que sur le site web des auteurs sont très convaincantes.

### 3.6 Techniques pour animations

Dans les sections 3.2 et 3.3, nous avons discuté certaines techniques de rendu de type "impressionniste" ou "expressif" ainsi que la simulation d'aquarelle destinée aux séquences animées. Ici, nous aimerions décrire un système original spécialement conçu pour le rendu non-photoréaliste en style "approximatif" ou "croquis" (*loose and sketchy*, en anglais) [Cur95, Cur98]. Ce système tient compte du modèle géométrique 3D de la scène. A partir de la géométrie et de la carte de profondeur, le système calcule un "gabarit". En utilisant ce gabarit ainsi que le champ de gradients de la carte de profondeur, le système calcule les champs de forces qui vont s'appliquer sur les particules imaginaires déterminantes pour l'apparence finale de traits de dessin 2D. Les particules vont petit à petit s'accumuler autour du contour de gabarit, en constituant une ligne plus ou moins continue. En jouant sur les paramètres de distribution des forces, notamment en ajoutant une composante aléatoire, l'utilisateur d'un tel système peut produire une vaste panoplie de moyens graphiques, comme le montre la figure 21. Cette technique, relativement peu coûteuse, peut être combinée avec d'autres moyens, notamment avec la simulation d'aquarelle, visible sur la figure 18.

Parmi d'autres travaux intéressants destinés à traiter les effets non-photoréalistes pour l'animation, citons [WFH<sup>+</sup>97, CJTF98, PFWF00]. Dans [WFH<sup>+</sup>97], Wood, Finkelstein, Hughes, Thayer et Salesin présentent un système panorama à perspectives multiples. Ce système, inspiré d'une réalisation en dessin animé vieille de 50 ans, utilise toute la puissance de calcul des ordinateurs, afin de concevoir et de rendre des scènes pseudo-3D en ensemble de dessins 2D.

Dans [CJTF98], Wagner Corréa Robert, Jensen, Craig Thayer et Adam Finkelstein présentent un système de projection de texture destiné au dessin animé. Une géométrie très rudimentaire permet de décrire grossièrement un objet dans l'espace où ce dernier évolue. Cette géométrie est utilisée afin de projeter sur l'objet le dessin voulu, comme on le fait dans l'infographie traditionnelle. Les objets gérés par ce système, gardent tout de même leur aspect dessiné, tandis que la projection en question permet d'éliminer beaucoup de travail manuel, et de mieux gérer la cohérence entre les images dans la séquence dessinée.

Plus récemment, dans [PFWF00], Lena Petrovic, Brian Fujito, Lance Williams et Adam Finkelstein ont présenté un autre projet qui va dans la même direction : utiliser les ordinateurs dans les tâches de rendu non-photoréaliste nécessitant beaucoup d'effort humain. Ici, des rudiments de géométrie 3D sont introduits dans une scène 2D dessinée. A partir de cette géométrie, des ombres approximatives sont calculées et ajoutées au dessin. Les personnages dessinés avec des ombres produisent un effet visuel nettement supérieur aux dessins sans ombres.

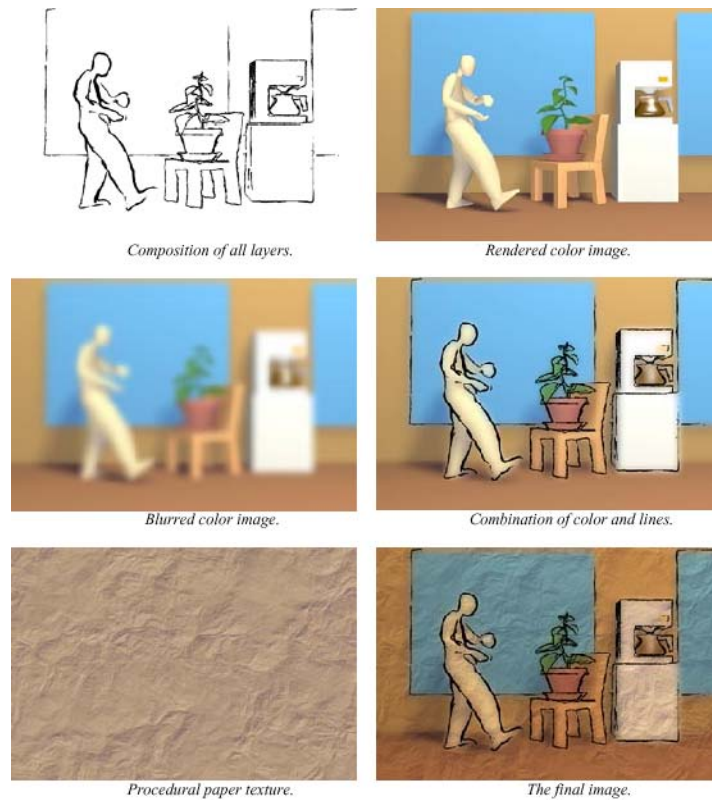


FIG. 21 – Etapes successives de création d’une image d’animation en style “approximatif” ou “croquis” (*loose and sketchy*, en anglais).

### 3.7 Perspective à projections multiples

A l’aube de la Renaissance, les peintres ont souvent utilisé la perspective naïve à projections multiples. Ainsi, divers objets de la scène possédaient différents angles de vue et différents points de fuite. Les connaissances de l’époque ne permettaient pas de vérifier “scientifiquement” le bien-fondé de cette méthode. Les peintres se fiaient à leur intuition pour rendre l’ensemble plus cohérent du point de vue de la composition. Après l’invention de la perspective au XIV<sup>e</sup> siècle, de telles constructions ont été déclarées inexactes. Bien que sur le plan physique la perspective à projections multiples *soit inexacte*, son emploi peut être largement justifié. D’ailleurs, plusieurs artistes du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles ont utilisé ce moyen technique. Agrawala et al. dans [AZM00] énumèrent les raisons techniques qui motivent les artistes d’aujourd’hui à utiliser ce moyen “archaïque” et “anti-scientifique” :

- expression artistique : pour exprimer un sentiment, une ambiance ou une idée particulière. Les auteurs se réfèrent à Willats [Wil97] qui explique comment un arrangement spatial des objets peut influencer le sentiment de leur représentation artistique. L’animation en celluloïd fournit un autre exemple-type de la déviation

volontaire des lois de perspective.

- représentation : la perspective à projections multiples peut améliorer la qualité de représentation ou la compréhension de la scène. Grâce à cet artifice, il est possible d'obtenir de meilleures vues de différents objets de la scène. Par ailleurs, la perspective à projections multiples peut réduire la distorsion des caméras à grand angle.
- visualisation : la perspective à projections multiples permet de mieux communiquer au spectateur la structure spatiale d'une scène complexe. Un exemple-type de cette catégorie est montré sur la figure 22. Dans celui-ci, aucune perspective traditionnelle, ni axonométrique, ni oblique, ne procure de cohérence ni d'unité atteignable par la perspective à projections multiples.

Agrawala et al. présentent un ensemble de moyens techniques permettant d'incorporer la perspective à projections multiples dans le cadre classique de l'infographie. Le premier problème technique auquel ils s'attaquent est la visibilité des objets dans une composition qui comporte plusieurs caméras. Ensuite, ils proposent un système de contraintes qui relient les caméras. Finalement, les auteurs montrent comment les cartes graphiques modernes peuvent être utilisées pour rendre, en temps réel, des scènes utilisant la perspective à projections multiples interactivement.

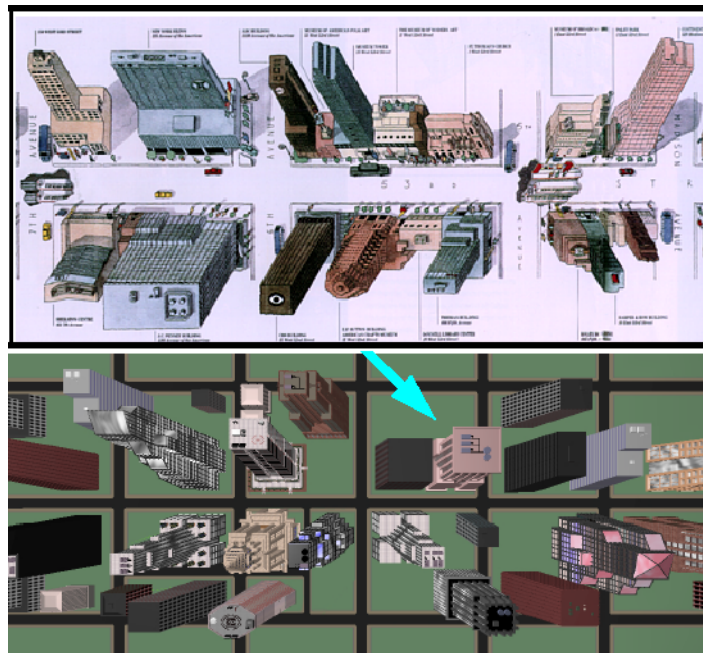


FIG. 22 – Perspective à projections multiples, dessinée à la main (en haut), et à l'aide du système décrit dans [AZM00] (en bas)).



### 3.8 Techniques expérimentales

Un papier récent [CHZ00] décrit un système expérimental de dessin interactif, nommé Harold. Harold est un héros de conte pour enfants qui entre et vit dans le monde qu'il est en train de dessiner. Le système Harold réalise cette parabole : on commence à dessiner un monde virtuel, on peut s'y déplacer, agir activement sur des objets tout en continuant à les dessiner. Le modèle est très simple et intuitif, il est destiné aux personnes qui n'ont pas de connaissance préalable des techniques de dessin ni du système informatique. Le monde de Harold est tridimensionnel. En utilisant des traits de différentes couleurs, épaisseur et transparence, l'utilisateur dessine dans des modes différents. Il se sert d'un mode éloigné pour les objets qui n'influencent pas l'environnement local lors de mouvements, tel que les montagnes ou les buildings éloignés. Il utilise un autre mode pour dessiner des objets proches de nous. Ces objets sont plats, ils sont dessinés sur des panneaux transparents qui se tournent toujours vers le spectateur au fur et à mesure que celui-ci se déplace dans ce monde. Ensuite, l'utilisateur peut dessiner les routes et s'y déplacer, il peut modifier le relief de la scène, le système effectuant les modifications nécessaires, en calculant la visibilité modifiée par le nouveau relief. Enfin, le système permet d'établir des relations entre des objets de différents types qui constituent la scène. Avec des moyens tout à fait modestes, ce système permet d'expérimenter un monde virtuel rendu de façon non-photoréaliste.

## 4 Conclusions

On aura compris, à la lecture de ce chapitre, que le rendu non-photoréaliste a connu ces dernières années une véritable explosion, autant par le nombre des publications que par celui des réalisations significatives. D'ailleurs, il nous était difficile de représenter de façon équitable chaque papier dans un domaine qui grandit sans cesse.

Quel enseignement peut-on tirer de cette abondance d'activités ? Comment ces techniques peuvent-elles être utilisées en cartographie ? Quelques conclusions importantes sont communes à l'ensemble des travaux présentés ci-dessus :

- Le rendu non-photoréaliste possède une dimension purement esthétique. Les images obtenues en utilisant le mode le plus adapté au type de visualisation désiré peuvent être non seulement fonctionnelles, mais aussi agréables à manipuler, belles en soi. Ceci peut contribuer à l'humanisation de l'informatique, donner aux gens envie de travailler avec des objets graphiques de cette qualité.
- Sur le plan fonctionnel, le rendu non-photoréaliste est un moyen de visualisation puissant, permettant d'obtenir un haut degré d'abstraction et focalisant ainsi l'attention du spectateur sur une partie de l'image appropriée.
- Le rendu non-photoréaliste permet de maximiser l'impact visuel des moyens déployés, tout en gardant leur aspect discret.
- Diverses techniques de rendu non-photoréaliste ont été accompagnées d'outils d'interaction homme-machine innovateurs, qui améliorent considérablement l'ergonomie de travail, rendent cette interaction plus rapide, plus précise, plus efficace.
- Certaines méthodes de rendu non-photoréaliste ont démontré que l'ordinateur

peut servir d'outil qui augmente la précision, la qualité et la vitesse d'exécution du travail créatif. Il peut efficacement remplacer les outils traditionnels que les gens ont l'habitude d'utiliser dans les tâches de visualisation.

Dans la cartographie, le rendu non-photoréaliste représente un complément intéressant aux moyens traditionnels. Comme le note Alan M. MacEachren dans son très perspicace livre "How Maps Work" [Mac95], la représentation est un acte de *construction de la connaissance*. MacEachren souligne une grande analogie entre le processus de perception des cartes et d'autres objets visuels, à différents niveaux de la représentation. En se basant sur la théorie de la vision développée par David Marr [Mar82], MacEachren construit une théorie de perception de cartes depuis l'image rétinienne jusqu'au modèle 3D, en passant par le sketch primitif et le sketch 2.5D. MacEachren souligne les mécanismes de notre perception qui "font marcher" la cartographie - accentuation des effets visuels, augmentation de la distinction des éléments, rôle important de la valeur esthétique des cartes. Selon MacEachren, les acquis techniques des arts graphiques et ceux accumulés en cartographie peuvent et doivent s'influencer mutuellement. Puisque les mécanismes de perception sous-jacents aux effets visuels sont de même nature dans les deux cas, il nous paraît évident que la plupart de techniques NPR présentées dans ce document peuvent être réutilisées en cartographie.

La précision et l'efficacité de l'interface homme-machine, propres au rendu non-photoréaliste, représentent un autre atout non-négligeable pour la cartographie. Comme nous l'avons vu, certaines applications NPR mettent l'accent sur l'automatisation de la détection d'entités visuellement significatives - contours et silhouettes. D'autres perfectionnent la représentation des objets tridimensionnels par des traits. Ce bagage est certainement réutilisable en cartographie, où on a toujours utilisé le rendu au trait [Imh82, Rai62, RSMM85, Cro92]

Il est bien connu qu'il n'existe pas de mapping bijectif sans déformation de la surface courbe de la terre vers la surface plate de la carte. De nombreuses techniques ont été développées en cartographie pour palier à ce phénomène [Mal83, FP90]. Il nous paraît intéressant de réutiliser dans ce domaine les techniques avancées proposées en NPR, par exemple la technique de la perspective multiple proposée dans [AZM00] ou dans [WFH<sup>+</sup>97]. L'utilisation de couleurs spécifique pour augmenter la lisibilité des cartes est un autre exemple où la collaboration entre NPR et la cartographie peut s'avérer fertile. Les techniques utilisées en cartographie traditionnelle [Bru87, RSMM85] peuvent être complétées par un modèle d'illumination non-photoréaliste, dans l'esprit du travail de Gooch et al. [GGSC98].

Finalement, la cartographie peut tirer les leçons de l'expérience NPR intégrant dans un système informatique des considérations à la fois fonctionnelles et humaines. Faire le travail avec une machine plus agréable - ne serait-ce pas un objectif intéressant en soi ? N'oublions pas qu'à l'aube de la cartographie, chaque carte était une œuvre d'art. Comme il a été mentionné dans plusieurs livres [DW87, Sze87, Kis80, Pom80], la cartographie a pendant de nombreux siècles été considérée avant tout comme un art. La valeur esthétique des cartes se conjugait avec l'information portée par ces cartes. Tenir compte de la dimension esthétique du rendu, tout en préservant son exactitude et son efficacité - voici ce que la cartographie peut emprunter au NPR.

## Références

- [AZM00] Maneesh Agrawala, Denis Zorin, and Tamara Munzner. Artistic multiprojection rendering. In *Eurographics Workshop on Rendering*, Brno, Czech Republic, June 2000.
- [Bru87] Roger Brunet. *La carte, mode d'emploi*. Fayard/Reclus, Paris, 1987.
- [CAS<sup>+</sup>97] Cassidy J. Curtis, Sean E. Anderson, Joshua E. Seims, Kurt W. Fleischer, and David H. Salesin. Computer-generated watercolor. *Proceedings of SIGGRAPH 97*, pages 421–430, August 1997. ISBN 0-89791-896-7. Held in Los Angeles, California.
- [CHZ00] Jonathan M. Cohen, John F. Hughes, and Robert C. Zeleznik. Harold : A world made of drawings. In *Proceedings of the First International Symposium on Non Photorealistic Animation and Rendering (NPAR) for Art and Entertainment*, June 2000. Held in Annecy, France.
- [CJTF98] Wagner Toledo Corrêa, Robert J. Jensen, Craig E. Thayer, and Adam Finkelstein. Texture mapping for cel animation. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pages 435–446, July 1998. ISBN 0-89791-999-8. Held in Orlando, Florida.
- [CMZ<sup>+</sup>99] Jonathan M. Cohen, Lee Markosian, Robert C. Zeleznik, John F. Hughes, and Ronen Barzel. An interface for sketching 3D curves. *1999 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 17–22, April 1999. ISBN 1-58113-082-1.
- [Cro92] Robert G. Cromley. *Digital Cartography*. Prentice-Hall, 1992. ISBN 0-13-710930-X.
- [Cur95] Cassidy Curtis. Brick-a-brac. Shown at Siggraph '95 Screening Room, 1995. Pacific Data Images.
- [Cur98] Cassidy Curtis. Loose and sketchy animation. Siggraph '98 Technical Sketch, 1998.
- [DC90] Debra Dooley and Michael Cohen. Automatic illustration of 3D geometric models : Lines. *1990 Symposium on Interactive 3D Graphics*, 24(2) :77–82, March 1990. ISBN 0-89791-351-5.
- [DOM<sup>+</sup>01] Frédo Durand, Victor Ostromoukhov, Mathieu Miller, François Duranleau, and Julie Dorsey. Decoupling strokes and high-level attributes for interactive traditional drawing. *Eurographics Rendering Workshop'01 (to appear)*, 2001.
- [DS00] Oliver Deussen and Thomas Strothotte. Computer-generated pen-and-ink illustration of trees. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 13–18, July 2000. ISBN 1-58113-208-5.
- [Dur01] Frédo Durand. *Réalisme et représentation de la réalité, à paraître*, 2001.
- [DW87] ed. David Woodward. *Art and Cartography*. The University of Chicago Press, Chicago, 1987. ISBN 0-226-90722-8.
- [Elb95] Gershon Elber. Line illustrations in computer graphics. *The Visual Computer*, 11(6) :290–296, 1995. ISSN 0178-2789.
- [Elb99] Gershon Elber. Interactive line art rendering of freeformsurfaces. In P. Brunet and R. Scopigno, editors, *Computer Graphics Forum (Eurographics '99)*, volume 18(3), pages 1–12. The Eurographics Association and Blackwell Publishers, 1999.
- [FP90] II Frederick Pearson. *Map Projections : Theory and applications*. CRC Press, Boca Raton, FL., 1990. ISBN 0-8493-6888-X.

- [GGSC98] Amy Gooch, Bruce Gooch, Peter Shirley, and Elaine Cohen. A non-photorealistic lighting model for automatic technical illustration. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pages 447–452, July 1998. ISBN 0-89791-999-8. Held in Orlando, Florida.
- [Gre99] Stuart Green. Beyond photorealism. In *Eurographics Workshop on Rendering*, Granada, Spain, June 1999.
- [GSG<sup>+</sup>99] Bruce Gooch, Peter-Pike J. Sloan, Amy Gooch, Peter Shirley, and Rich Riesenfeld. Interactive technical illustration. *1999 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 31–38, April 1999. ISBN 1-58113-082-1.
- [Hae90] Paul E. Haeberli. Paint by numbers : Abstract image representations. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 90)*, 24(4) :207–214, August 1990. ISBN 0-201-50933-4. Held in Dallas, Texas.
- [Her98] Aaron Hertzmann. Painterly rendering with curved brush strokes of multiple sizes. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pages 453–460, July 1998. ISBN 0-89791-999-8. Held in Orlando, Florida.
- [Her01] Aaron Hertzmann. Paint by relaxation. In *Computer Graphics International 2001*, pages 47–54, July 2001. ISBN 0-7695-1007-8.
- [HL94] Siu Chi Hsu and Irene H. H. Lee. Drawing and animation using skeletal strokes. *Proceedings of SIGGRAPH 94*, pages 109–118, July 1994. ISBN 0-89791-667-0. Held in Orlando, Florida.
- [HP00] Aaron Hertzmann and Ken Perlin. Painterly rendering for video and interaction. *NPAC 2000 : First International Symposium on Non Photorealistic Animation and Rendering*, pages 7–12, June 2000.
- [HZ00] Aaron Hertzmann and Denis Zorin. Illustrating smooth surfaces. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 517–526, July 2000. ISBN 1-58113-208-5.
- [Imh82] Eduard Imhof. *Cartographic relief representation*. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1982. ISBN 3-11-006711-0.
- [Kis80] George Kish. *La carte, image des civilisations*. Seuil, Paris, 1980. ISBN 2-02-005588-0.
- [Lei94] W. Leister. Computer generated copper plates. *Computer Graphics Forum*, 13(1) :69–77, January 1994.
- [Lit97] Peter Litwinowicz. Processing images and video for an impressionist effect. *Proceedings of SIGGRAPH 97*, pages 407–414, August 1997. ISBN 0-89791-896-7. Held in Los Angeles, California.
- [LS95a] John Lansdown and Simon Schofield. Expressive rendering : A review of nonphotorealistic techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(3) :29–37, May 1995.
- [LS95b] John Lansdown and Simon Schofield. Expressive rendering : A review of non-photorealistic techniques. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 15(3) :29–37, May 1995.
- [Mac95] Alan M. MacEachren. *How Maps Work. Representation, Visualization, and Design*. The Guilford Press, New York, 1995. ISBN 0-89862-589-0.
- [Mal83] D. H. Maling. *Coordinate Systems and Map Projections*. Pergamon Press, Oxford, 1983. ISBN 0-08-037234-1.
- [Mar82] D. Marr. *Vision : a Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W. H. Freeman, San Francisco, 1982. ISBN 0-71671-284-9.

- [Mar00] Lee Markosian. *Art-based Modeling and Rendering for Computer Graphics*. PhD thesis, Brown University, May 2000.
- [Mei96] Barbara J. Meier. Painterly rendering for animation. *Proceedings of SIGGRAPH 96*, pages 477–484, August 1996. ISBN 0-201-94800-1. Held in New Orleans, Louisiana.
- [MKT<sup>+</sup>97] Lee Markosian, Michael A. Kowalski, Samuel J. Trychin, Lubomir D. Bourdev, Daniel Goldstein, and John F. Hughes. Real-time nonphotorealistic rendering. *Proceedings of SIGGRAPH 97*, pages 415–420, August 1997. ISBN 0-89791-896-7. Held in Los Angeles, California.
- [MS98] Maic Masuch and Thomas Strothotte. Visualising ancient architecture using animated line drawings. In *Proceedings of the International Conference on Information Visualisation '98*. IEEE Computer Society Press, 1998.
- [NM00] J. D. Northrup and Lee Markosian. Artistic silhouettes : A hybrid approach. In *Proceedings of the First International Symposium on Non Photorealistic Animation and Rendering (NPAR) for Art and Entertainment*, June 2000. Held in Annecy, France.
- [Ost99] Victor Ostromoukhov. Digital facial engraving. *Proceedings of SIGGRAPH 99*, pages 417–424, August 1999. ISBN 0-20148-560-5. Held in Los Angeles, California.
- [PB94] Y. Pnueli and A. M. Bruckstein. Digidürer - a digital engraving system. *The Visual Computer*, 10 :277–292, 1994.
- [PFWF00] Lena Petrovic, Brian Fujito, Lance Williams, and Adam Finkelstein. Shadows for cel animation. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 511–516, July 2000. ISBN 1-58113-208-5.
- [PHWF01] Emil Praun, Hugues Hoppe, Matthew Webb, and Adam Finkelstein. Real-time hatching. *Proceedings of SIGGRAPH'01 (to appear)*, 2001.
- [Pom80] Cartes et figures de la terre, 1980. ISBN 2-85850-058-4.
- [Rai62] Erwin Raisz. *Principles of Cartography*. McGraw-Hill, New York, 1962.
- [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.
- [Ric97] Paul Richens. Beyond photorealism, in architect's journal, no. 12, June 1997.
- [RSMM85] Arthur H. Robinson, Randall D. Sale, Joel L. Morrison, and Phillip C. Muehrcke. *Elements of Cartography*. John Wiley & Sons, New York, 1985. ISBN 0-471-09877-9.
- [SABS94] Michael P. Salisbury, Sean E. Anderson, Ronen Barzel, and David H. Salesin. Interactive pen-and-ink illustration. *Proceedings of SIGGRAPH 94*, pages 101–108, July 1994. ISBN 0-89791-667-0. Held in Orlando, Florida.
- [SALS96] Mike Salisbury, Corin Anderson, Dani Lischinski, and David H. Salesin. Scale-dependent reproduction of pen-and-ink illustrations. *Proceedings of SIGGRAPH 96*, pages 461–468, August 1996. ISBN 0-201-94800-1. Held in New Orleans, Louisiana.
- [SB99] Mario C. Sousa and John W. Buchanan. Computer-generated graphite pencil rendering of 3D polygonal models. In P. Brunet and R. Scopigno, editors, *Computer Graphics Forum (Eurographics '99)*, volume 18(3), pages 195–208. The Eurographics Association and Blackwell Publishers, 1999.

- [Sch94] Norbert Schneider. *L'art du portrait*. Benedikt Taschen Verlag, Cologne, paperback edition, 1994.
- [SPR<sup>+</sup>94] T. Strothotte, B. Preim, A. Raab, J. Schumann, and D. R. Forshey. How to render frames and influence people. *Computer Graphics Forum*, 13(3) :455–466, 1994.
- [ST90] Takafumi Saito and Tokiichiro Takahashi. Comprehensible rendering of 3D shapes. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 90)*, 24(4) :197–206, August 1990. ISBN 0-201-50933-4. Held in Dallas, Texas.
- [SWHS97] Michael P. Salisbury, Michael T. Wong, John F. Hughes, and David H. Salesin. Orientable textures for image-based pen-and-ink illustration. *Proceedings of SIGGRAPH 97*, pages 401–406, August 1997. ISBN 0-89791-896-7. Held in Los Angeles, California.
- [SY00] Michio Shiraishi and Yasushi Yamaguchi. An algorithm for automatic painterly rendering based on local source image approximation. In *Non-Photorealistic Animation and Rendering 2000 (NPAR '00)*, Annecy, France, June 5-7,2000.
- [Sze87] Janos Szego. *Human Cartography*. Swedish Council for Building Research, 1987. ISBN 91-540-4781-1.
- [TDM99] Osama Tolba, Julie Dorsey, and Leonard McMillan. Sketching with projective 2D strokes. In *Proceedings of the 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 149–158, N.Y., November 7–10 1999. ACM Press.
- [WFH<sup>+</sup>97] Daniel N. Wood, Adam Finkelstein, John F. Hughes, Craig E. Thayer, and David H. Salesin. Multiperspective panoramas for cel animation. *Proceedings of SIGGRAPH 97*, pages 243–250, August 1997. ISBN 0-89791-896-7. Held in Los Angeles, California.
- [Wi97] John Willats. *Art and Representation*. Princeton University Press, 1997.
- [WS94] Georges Winkenbach and David H. Salesin. Computer-generated pen-and-ink illustration. *Proceedings of SIGGRAPH 94*, pages 91–100, July 1994. ISBN 0-89791-667-0. Held in Orlando, Florida.
- [WS96] Georges Winkenbach and David H. Salesin. Rendering parametric surfaces in pen and ink. *Proceedings of SIGGRAPH 96*, pages 469–476, August 1996. ISBN 0-201-94800-1. Held in New Orleans, Louisiana.