

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
ANNÉE ACADÉMIQUE 2006-2007

DIPLOME D'ÉTUDES APPROFONDIES EN SCIENCES APPLIQUÉES

ANALYSE DES TECHNIQUES LOGICIELLES DE TRACÉS
DIGITAUX RÉALISTES, EN COULEUR ET EN TEMPS-RÉEL

AURÉLIE JEUNEJEAN

Composition du jury
Monsieur Pierre Leclercq
Monsieur Jacques Verly
Monsieur Justus Piater
Monsieur Luc Demarche
Monsieur Sleiman Azar

Laboratoire de Recherche
LuciD Group – Bât B52
1, Chemin des Chevreuils
4000 Liège (Sart-Tilman)

Sommaire

Sommaire	1
Introduction	3
Couleur	6
Un peu d'histoire	7
Comment voit-on les couleurs ?.....	10
<i>Anatomie de l'oeil</i>	10
<i>Perception des couleurs</i>	11
Modèles colorimétriques.....	12
<i>Modèles avant le XVIIIe siècle</i>	12
<i>Modèle de Newton</i>	16
<i>Modèle de Munsell</i>	17
<i>Modèle CIE 1931</i>	18
<i>Modèle CIE Lab</i>	19
<i>Modèle RVB</i>	20
<i>Modèle CMJ</i>	20
<i>Modèle TSV</i>	21
<i>Modèle TSL</i>	21
<i>Choix d'un modèle</i>	22
Logiciels	23
Critères d'évaluation.....	24
<i>Outils graphiques</i>	24
<i>Autres critères</i>	25
The GIMP, Adobe Photoshop & Illustrator.....	27
ArtWeaver.....	29
Corel Painter™ IX.....	32
ArtRage.....	34
Conclusion.....	37

Littérature	38
Crayons de couleur.....	39
<i>Microscopic Structural Modeling of Colored Pencil Drawings [TF99]</i>	39
<i>Colored Pencil Filter with Custom Color [YMI04]</i>	41
<i>Real-time Pencil Rendering [LKL05]</i>	43
Crayons de cire.....	46
<i>A Bidirectional Deposition Model of Wax Crayons [RMN05]</i>	46
Fusain.....	50
<i>Charcoal Sketching: Returning Control to the Artist [BSM88]</i>	51
Feutres ou marqueurs.....	52
Aquarelle.....	53
<i>Computer-Generated WaterColor [CAS+97]</i>	54
<i>A Paper Model for Real-Time Watercolor Simulation [VLV04]</i>	57
 Discussion	 61
 Annexes	 67
 Références	 77

Introduction

Réalisé au sein du LuciD Group de l'Université de Liège, ce mémoire de D.E.A. constitue non seulement la suite logique de mon travail de fin d'études accompli il y a deux ans [Jeu04] mais également le préambule de mon doctorat. La volonté du LuciD Group, *Lab for User Cognition & Innovative Design*, à travers les différents projets développés en son sein, est d'apporter une solution logicielle re-centrée sur l'utilisateur et basée sur le croquis à main levée dans la phase de conception d'un produit. Cette intention se traduit aussi bien par une approche volontairement hérétique de la problématique du processus de conception que par une implication directe des futurs utilisateurs dans le cycle de développement ou encore par la création d'interfaces homme-machine fonctionnelles, ergonomiques et naturelles.

La contribution essentielle de mon mémoire de fin d'études était d'apporter encore plus de naturel aux esquisses tracées par les utilisateurs. Le résultat de ce travail résulte en un algorithme – temps-réel – de rendu non-photoréaliste des outils de dessin que sont les crayons graphites et la gomme. Ces derniers n'étant pas les seuls présents dans le plumier d'un concepteur, il était nécessaire de poursuivre la tâche entamée par le développement d'outils graphiques tels que les crayons de couleur ou encore les feutres et, par conséquent, un second projet a vu le jour.

L'objectif poursuivi dans ma thèse de doctorat est double: d'une part la simulation réaliste du rendu de différents outils de dessins digitaux et d'autre part la reconstruction tridimensionnelle sur base d'esquisses en perspective. Le lien entre les deux sujets n'est – *a priori* – pas évident. Cependant, sachant qu'à cause d'ambiguïtés spatio-visuelles, les techniques actuelles de reconstruction sont dans l'impasse, nous pensons pouvoir les résoudre en utilisant les caractéristiques intrinsèques des traits: pression appliquée, vitesse et orientation du tracé, etc. Alors que, sur papier, il est évident de distinguer un trait de construction d'un trait mis au net, d'un point de vue informatique, il en est tout autrement puisque jusqu'à présent seules les propriétés géométriques des traits sont prises en compte. Mais comment notre futur utilisateur peut-il savoir que le système considère à la fois son dessin et la manière dont il est réalisé si aucun feed-back ne lui est renvoyé ? D'où le lien manifeste avec le développement informatique d'outils graphiques au comportement et au rendu réalistes.

L'étude des techniques logicielles actuelles en matière de rendu réaliste d'outils graphiques colorés constitue la finalité de ce mémoire de D.E.A. Il s'agit certes d'une tâche moins ambitieuse que le développement de l'application que je serai amenée à concevoir d'ici deux ans mais elle reste une tâche primordiale puisqu'elle orientera ma réflexion. Vu l'éventail des procédés dans le domaine non-photoréaliste, il est impératif de cibler les caractéristiques recherchées.

- **Réalisme** – Les techniques envisagées dans le cadre de ce travail doivent bien évidemment se rapporter au rendu d'outils de dessin dits traditionnels. En effet, la technique du cubisme par exemple fait partie des procédés de rendu non-photoréaliste mais n'a rien d'un outil traditionnel. Le réalisme envisagé ici intervient à la fois dans le choix des outils de dessin analysés et dans la simulation de leur comportement.
- **Outils graphiques** – La future application ne se veut pas un nième logiciel de dessin: le choix des outils développés est volontairement restreint à ceux présents dans le plumier d'un concepteur. Elle a pour but de faire comprendre à une tierce personne l'idée, le concept d'un objet tridimensionnel via le dessin à main levée, en aucun cas de permettre la réalisation d'affiches ou d'une peinture.
- **Couleur** – Les techniques logicielles analysées doivent, d'une manière ou d'une autre, tenir compte des couleurs et de leur mélange. L'impact de ces dernières sur la compréhension d'un croquis complexe n'est plus à démontrer, même si ces considérations psychologiques ne relèvent pas de ma compétence.
- **Interactivité** – C'est l'utilisateur qui trace, qui croque, qui s'exprime: le futur logiciel n'est ni une aide au dessin, ni un procédé de « *beautification* » de l'esquisse et sont, par conséquent, écartées toutes les techniques de rendu *a posteriori*. Le mot « interactivité » est choisi sciemment: l'interactivité implique la notion de temps-réel par contre une technique peut très bien être temps-réel sans être interactive.

Le corps principal de ce document est organisé en quatre parties:

- **Couleur** – La notion de couleur est envisagée sous différents points de vue: historique, composition matérielle, physique et classification.
- **Logiciel** – Évaluation des logiciels graphiques disponibles sur le marché sur base d'une série de critères impératifs pour la future application: l'objectif ici est d'éviter « de réinventer la roue ».
- **Littérature** – Analyse bibliographique des dernières publications dans le domaine du rendu non-photoréaliste de certains outils graphiques.
- **Discussion** – Sans être une description rigoureuse et détaillée de l'implémentation algorithmique du futur logiciel, cette dernière partie rassemble, sous la forme d'une discussion, données récoltées et vision personnelle.

Couleur

« De toutes les qualités d'un objet, la couleur est celle dont il est le plus difficile de parler » déclarait Aristote. Cette assertion est aisément acceptable étant donné que le rouge éclatant d'une rose, le bleu du ciel ou la chaude teinte de l'orange n'existent pas ! En effet, la couleur n'est ni une réalité physique, ni une propriété de la matière comme l'état solide ou liquide, mais « *une sensation produite par la stimulation de la rétine par des ondes lumineuses de longueurs d'onde variables* »¹. La perception des couleurs est, par conséquent, une conception parfaitement personnelle.

Être à même de voir un objet résulte uniquement du fait que sa couleur se détache de celles du fond. Lorsqu'un cube est dessiné au stylo noir, en traçant simplement ses arêtes, il s'agit d'une vue simplifiée: chaque trait représente les limites des faces, endroits où il y a un changement de couleur. Mais l'objet réel, le « vrai » cube, n'a pas de frontières noires: il nous est possible d'en différencier ses faces parce que nous en percevons les différentes couleurs. Notre cerveau fait le reste. Un carré rouge et deux losanges plus clairs: il s'agit probablement d'un cube. Donc, théoriquement, si l'objet et l'arrière-plan sont exactement de la même couleur, l'objet sera invisible. Pourtant, un cube peint d'une seule couleur ne nous paraît pas uniforme, car ses faces réfléchissent la lumière sous des angles différents: certaines faces sont un peu dans l'ombre, d'autres en pleine lumière... Il ne faut donc pas oublier que la couleur d'un objet dépend de la façon dont il est éclairé, et de notre position d'observateur.

La première partie de ce document reprend trois manières différentes d'aborder la couleur. Tout d'abord, un bref point de vue historique sur la fabrication des différentes teintes et leur signification à travers les âges. Ensuite, une approche plus physique, plus humaine avec un rappel ou une explication succincte du phénomène de vision des couleurs chez l'homme. Pour finir, le lecteur trouvera une présentation de différents modèles colorimétriques, certains ayant marqué l'Histoire de par leur caractère original, au sens nouveau du terme, d'autres étant utilisés en infographie à l'heure actuelle. Cette section se termine sur une réflexion sur le modèle chromatique à choisir dans le cadre de ce projet.

¹ Définition du Petit Larousse Illustré

Un peu d'histoire ...

Les premières traces de peintures humaines colorées remontent à la préhistoire, soit il y a plus de 30 000 ans [http1], et peuvent être admirées dans la grotte de Chauvet en France (Figure 1). Ces dessins – représentant principalement des bisons, très peu d'humains – sont de teintes noire et rouge. Le pigment noir provient de l'oxyde de manganèse ou de charbon de bois ou encore d'os. L'hématite, oxyde de fer présent à l'état naturel dans le sol, est à l'origine de la couleur rouge. Ces deux matières, oxyde de manganèse et de fer, sont finalement mélangées à de l'argile ou du talc pour donner une certaine consistance à la peinture ainsi que pour augmenter sa durée de conservation et faciliter son étalement sur les parois rocheuses.



Figure 1 – Grotte de Chauvet, France

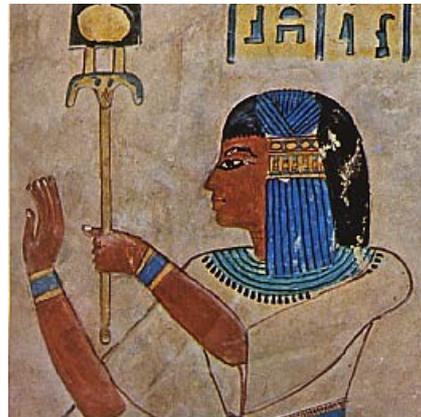


Figure 2 – Le prince Amon-Her-Khophchef

Dans l'antiquité, les deux couleurs dominantes étaient le bleu et le vert égyptiens (Figure 2). La première, symbole du souffle divin, est le résultat du mélange de silice (oxyde de silicium), de cuivre, de natron (sesquicarbonate de sodium naturel) et de produits calcaires, le tout cuit au four pendant plusieurs heures puis broyé avant d'être enfin utilisé. Le vert égyptien, fabriqué selon le même procédé, contient moins de cuivre et plus de sodium. Différents tons peuvent être obtenus selon le temps de cuisson et la finesse du broyage. Il y a donc près de 4500 ans que le premier colorant synthétique a été mis au point par l'homme.

Le vocabulaire relatif aux couleurs c'est quant à lui fortement développé à travers la mythologie grecque. Pour preuve, les vers suivants tirés de l'Illiade: « .. le voile [de la belle Héléne] à bordure d'acanthé de couleur safran ... », « ... les yeux pers de la déesse Athéna ... » ou encore « Après vingt jours, je [Ulysse] n'ai pu que hier échapper à la mer couleur de lie de vin ... ».

Le premier philosophe à dissenter sur les couleurs est Empédocle d'Agrigente, 490 – 435 avant notre ère. Disciple de Pythagore, il soutient que les « *genres des couleurs* » sont nommés le blanc, le noir, le rouge et l'ocre jaune. Il attribue ces quatre couleurs aux quatre éléments que sont le feu, l'eau, la terre et l'air. Les seules liaisons assurées sont celles — pour nous étranges — du blanc avec le feu et du noir avec l'eau. Empédocle explique la diversité des couleurs par le mélange, en différentes proportions de ces quatre éléments.

Au temps des Romains, deux autres couleurs s'opposaient: le pourpre et le bleu. Provenant du murex, un coquillage, la couleur pourpre est le symbole du pouvoir, c'est la couleur officielle de l'empire romain – *color officialis*. Pour les Romains, le bleu compte peu et est même désagréable à l'oeil: c'est une couleur barbare – *caeruleus color*. Or aujourd'hui, partout en Europe, le bleu est de très loin la couleur préférée.



Figure 3 – Le livre des merveilles 1271 – Marco Polo

Du Moyen-Age au XVII^e siècle, les peintres qui s'illustraient n'utilisaient que des pigments naturels pour leurs tableaux et, malheureusement, peu de ces couleurs tenaient à la lumière. Les tableaux représentant des scènes de guerres étaient souvent teintés d'azur et d'or, couleurs qui se rapportaient au commandement et à la dignité du rang élevé de celui qui les porte.

Dans son livre des merveilles, Marco Polo rapporte que le colorant indigo, importé d'Inde et longtemps considéré comme un élément minéral, provenait en réalité d'une plante: l'indigotier. La garance est quant à elle cultivée pour ses racines dont il était possible d'extraire un colorant rouge vif. Le rouge écarlate est préparé à partir des cochenilles parasites des chênes kermès et celles du nopal, donnent le carmin. La sépia est produite par la sèche, le jaune indien est tiré de l'urine de vaches nourries avec des feuilles de manguier. Le jaune est issu de plantes comme le genêt ou la gaude. Enfin, le Nouveau Continent découvert par Christophe Colomb dévoila de nombreuses couleurs inconnues comme le bois de campêche, le mûrier ou le rocou.



Figure 4 – Garance



Figure 5 – Nopal



Figure 6 – Campêche



Figure 7 – Gaude

En 1856, un jeune chimiste, William Henry Perkin (1838-1907) essaya de synthétiser la quinine pour combattre le paludisme qui touchait les troupes anglaises stationnées en Inde. Ces essais l'amènèrent à oxyder un dérivé de l'aniline, l'allyltoluidine. Il obtint un précipité rouge-brun qui n'avait rien à voir avec la quinine mais qui éveilla la curiosité du chimiste. Il venait d'inventer le premier colorant synthétique utilisable par l'industrie, qu'il appela pourpre d'aniline, ou mauvéine. Au XIX^e siècle, les impressionnistes profitent de ces pigments nouveaux issus de la chimie moderne car ils en apprécient les couleurs éclatantes. De nos jours, seuls quelques pigments sont extraits à partir de minéraux, comme les ocres, les autres étant tous d'origine industrielle.

Comment voit-on les couleurs ?

Comme beaucoup de phénomènes naturels, la vision fait partie intégrante de notre vie quotidienne. Pourtant, peu de personnes se posent la question: comment voit-on les couleurs ? En quelques phrases, j'apporte une réponse, volontairement concise, à cette question en expliquant les mécanismes qui permettent la chromatopsie, c'est-à-dire la perception visuelle des couleurs.

Anatomie de l'oeil

En anatomie, l'oeil est l'organe de la vision, capable de distinguer plus d'un million de couleurs en association avec notre cerveau. La figure 8 illustre les différentes structures importantes jouant un rôle dans le phénomène de vision. La partie externe de l'oeil humain est composée de trois couches de tissus. La couche externe, la sclérotique, est une enveloppe de protection. La couche moyenne, la choroïde, est une couche vasculaire en continuité avec le corps ciliaire et l'iris. La couche la plus interne est la rétine, sensible à la lumière.

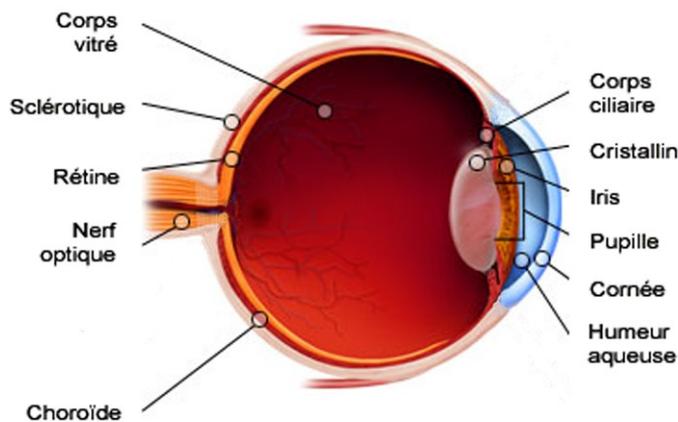


Figure 8 – Anatomie de l'oeil humain

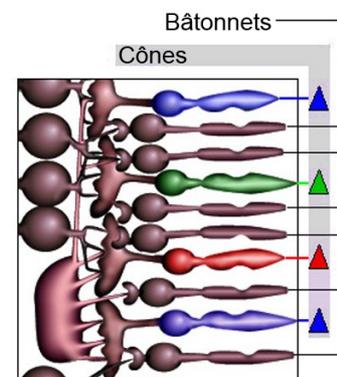


Figure 9 – Coupe de la rétine

La cornée est une membrane solide et transparente à travers laquelle la lumière entre à l'intérieur de l'oeil. Derrière la cornée se trouve une chambre remplie d'un liquide clair, l'humeur aqueuse, qui sépare la cornée du cristallin. L'iris pigmenté se trouve derrière la cornée, en avant du cristallin, et présente une ouverture circulaire en son centre, la pupille. Derrière le cristallin, le corps principal de l'oeil est rempli d'une substance gélatineuse transparente, l'humeur vitrée.

Tapissant le fond de l'oeil, la rétine est le lieu de traduction du message lumineux venant de l'extérieur en signaux nerveux envoyés au cerveau. Elle est formée de deux types de photorécepteurs, les bâtonnets et les cônes (Figure 9). La sensibilité des bâtonnets est liée à un colorant, la rhodopsine, qui blanchit à la lumière du jour, expliquant par là leur insensibilité la journée. Les bâtonnets ne fournissent qu'une réponse photométrique et ne permettent donc pas de déterminer les couleurs: la nuit, tous les chats sont gris. Les cônes fournissent quant à eux une réponse photométrique et chromatique. Il existe trois sortes de cônes qui envoient au cerveau trois sensations différentes, chaque catégorie étant sensible à des fréquences particulières de lumière: celles du bleu, du vert et du rouge. Ils sont donc responsables de la vision des couleurs et à la base de son aspect trichromatique.

Perception des couleurs

Pour expliquer la perception des couleurs chez l'être humain, il faut considérer la lumière comme étant de nature non pas corpusculaire mais ondulatoire: il s'agit d'ondes électromagnétiques visibles dont les longueurs dans le spectre sont comprises entre 400 et 780 nm. Une couleur se réfère donc à une longueur d'onde donnée du spectre visible.

La surface d'un objet absorbe une partie des radiations lumineuses qu'elle reçoit et en réfléchit d'autres. Notre oeil ne capte que les radiations réfléchies, celles qui vont déterminer la couleur de l'objet regardé. Lorsque nous observons une fleur rouge, la fleur absorbe la plupart des ondes qui composent la lumière qu'elle reçoit, à l'exception de celles qui correspondent au rouge. C'est pourquoi c'est cette couleur qui est perçue et pas une autre. Il en est de même pour toutes les couleurs, y compris le blanc et le noir: un objet blanc réfléchit toutes les radiations lumineuses et un noir les absorbe toutes. Par conséquent, il est plus correct, dans ces deux cas, de parler de manque de perception plutôt que d'absence de couleurs.



Figure 10 – Contraste

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, notre oeil ne voit pas toujours la même couleur de la même manière. L'environnement a une forte influence sur notre perception: elle est toujours faussée, parce que l'oeil a tendance à mesurer, à évaluer la couleur d'un objet en fonction de la scène qui l'entoure.

Tout est affaire de contrastes: le carré central de la figure 10 paraît être d'un rose plus vif à droite qu'à gauche. Rappelons enfin que la couleur n'est pas une caractéristique propre d'un objet. Elle dépend de la qualité de la lumière qui l'éclaire: un objet ne sera pas perçu de la même manière à la lumière du soleil qu'à celle diffusée par un néon.

Modèles colorimétriques

Pour pouvoir utiliser les différentes couleurs que notre œil est capable de discerner, il est impératif d'en effectuer un classement, afin de pouvoir les caractériser de manière simple, efficace et indubitable. Tout au long de l'Histoire, les hommes ont essayé de trouver un système de représentation des couleurs à la fois juste et facile à interpréter. Des tous premiers modèles à ceux existants de nos jours dans la colorimétrie, il n'y en a pas moins d'une soixantaine: seuls les plus marquants sont décrits dans cette section. Pour terminer, nous aborderons le problème du choix d'un modèle chromatique dans une application informatique.

Modèles avant le XVIII^e siècle

Aristote fut certainement l'initiateur des réflexions sur le mélange des couleurs. Selon lui, l'univers est conçu comme un tout organique et les couleurs naissent du combat entre l'obscurité de la nuit et la lumière du jour. Les couleurs vont donc, tout au long d'une journée, du blanc au noir. Son modèle chromatique repose sur l'axiome: « Le plus court chemin pour relier deux points est la ligne droite » (Figure 11).



Figure 11 – Modèle chromatique d'Aristote: séquence linéaire des couleurs

Dans un ouvrage² publié au début du XIII^e siècle, Robert Grosseteste différencie, pour la première fois de l'histoire, les couleurs véritables des couleurs « incolores » que sont le noir, le blanc et le gris. En 1611, Aron Sigrid Forsius arrive à la conclusion que les couleurs peuvent être ordonnées spatialement et reprend les concepts de couleurs primaires et secondaires développés par Leonardo de Vinci plus de cent ans auparavant. Il faudra attendre 1631 pour voir apparaître dans une oeuvre de Robert Fludd le premier cercle chromatique (Figure 12). Cet anneau des couleurs comporte sept secteurs, de même angle au centre, et sert à rapporter chaque couleur à la dualité lumière et ombre.

² «De colore», Robert Grosseteste, 1230

Date	Modèles chromatiques	Forme	Couleurs fondamentales	
			Rouge Pourpre Orange Jaune Vert Bleu Violet Noir Blanc	
Antiquité	Pythagore			(1)
	Aristote	Ligne	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	(2)
	Platon		■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	(3)
Moyen-âge, début de la Renaissance	Robert Grosseteste		■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	(4)
	Léon Battista Alberti		■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
	Léonardo de Vinci		■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1611	Aron Sigfrid Forsius	Sphère	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1613	Franciscus Aguilonius	Arcs en berceau	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1629-1631	Robert Fludd	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1646	Athanase Kircher	Arcs	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1686	Richard Waller	Carré	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1706	Isaac Newton	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	(5)
1758	Tobias Mayer	Triangle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1766	Moses Harris	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1772	Johann H. Lambert	Triangle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	(6)
1772	Ignaz Schiffermüller	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1809	James Sowerby	Triangle modifié	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1810	Johann W. von Goethe	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1810	Philipp Otto Runge	Sphère	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1826	Charles Hayter	Triangle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1839	Michel Eugène Chevreul	Demi-sphère, cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1840	Schreiber	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1846	George Field	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1855 – 1860	James Clerck Maxwell	Triangle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1860	Hermann von Helmholtz	Triangle modifié	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	(7)
1868	William Benson	Cube	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1874	Wilhelm von Bezold	Cône et cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	(8)
1874 – 1893	Wilhelm Wundt	Sphère	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
		Cône	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1878	Ewald Hering	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1879	Charles Blanc	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	
1879	Nicholas Odgen Rood	Cercle	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □	

Tableau 1: Modèles chromatiques, première partie

- (1) À chaque couleur correspond un ton
(2) Rouge, orange, jaune, vert, bleu très foncé, violet pourpre, noir et blanc
(3) Rouge, noir, blanc et « brillant »
(4) 7 couleurs fondamentales inconnues à ce jour
(5) Rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo, violet
(6) Cinabre (rouge), jaune d'orpiment et bleu montagne
(7) Rouge, vert et bleu violet
(8) Rouge, vert et bleu violet

Date	Modèles chromatiques	Forme	Couleurs fondamentales
1887	Titchener	Double cône	(9)
1890	Charles Lacouture	Triangle modifié	
1883 – 1897	Aloïs Höfler	Pyramide double	
1902	Hermann Ebbinghaus	Pyramide double	
1912	Robert Ridgway	Cône double	
1905 – 1915	Albert Henry Munsell	Arbre chromatique	
1916 – 1917	Wilhelm Ostwald	Cercle	
1923	Michel Jacobs	Cercle	
1924	Max Becke	Cube	
1929	Arthur Pope	Double cône modifié	
1929	Edwin G. Boring	Pyramide double	
1931	Modèle C.I.E. - 1931	Diagramme	
1927 – 1928	R. Luther, N. D. Nyberg	Corps asymétrique	
1928	C.I.E. - S. Rösch	Montagne chromatique	
1944	C.I.E. - D. MacAdam	Triangle modifié	
1946	C.I.E. - Walter S. Stiles	« Élément linéaire »	
1934	Faber Birren	Cercle	
1937 – 1939	Tryggve Johansson	Cylindre modifié	
1951	Æmilius Müller (I)	Cube	
1952	Alfred Hicethier	Cube	
1953	Sven Hesselgren	Double cône modifié	
1953	Modèle D.I.N	Cône	
1955 – 1976	Modèle ISCC-NBS	Blocs de couleur	
1960	Modèle OSA	Cubo-octaèdre	
1965	Æmilius Müller (II)	Cône double	
1968 – 1969	Modèle N.C.S.	Double cône	
1962 – 1974	Modèle Coloroid	Cylindre modifié	
1972	Küppers	Cube	(15)
1975	J. Frans Gerritsen	Cylindre modifié	
1976	Modèle C.I.E. L*A*B	Cube modifié	
1978	Modèle A.C.C.	Cylindre	
	Modèle R.G.B.	Cube	
	Modèle T.S.V.	Cône	
	Modèle T.S.L.	Cône double	
	Modèle C.M.Y.K.		(16)

Tableau 2: Modèles chromatiques, deuxième partie

(9) Noir, blanc, rouge, orange, jaune, vert-jaune, vert, bleu-vert, bleu, violet

(9) 36 couleurs pures à équidistance visuelle

(10) Rouge, jaune, bleu outremer et vert d'eau

(11) Rouge bleuâtre, jaune et bleu verdâtre

(12) Rouge magenta, jaune et bleu foncé

(13) 48 couleurs fondamentales à distances approximativement équivalentes

(14) Rouge, vert, bleu, cyan, magenta, jaune, noir et blanc

(15) Cercle de base avec 24 « tons colorés » différents dont 4 couleurs primaires

(16) Cyan, magenta et jaune

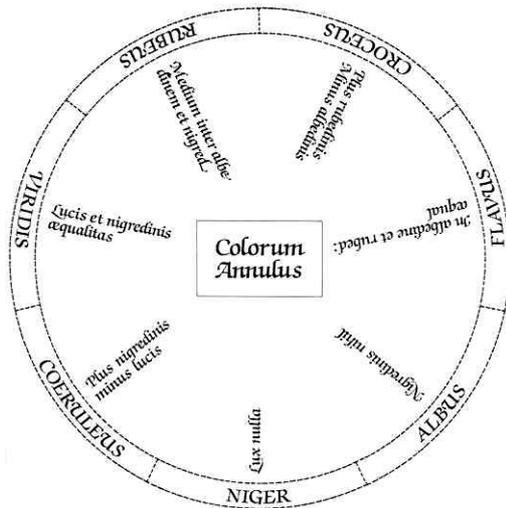


Figure 12 – 1631: Modèle chromatique de Fludd

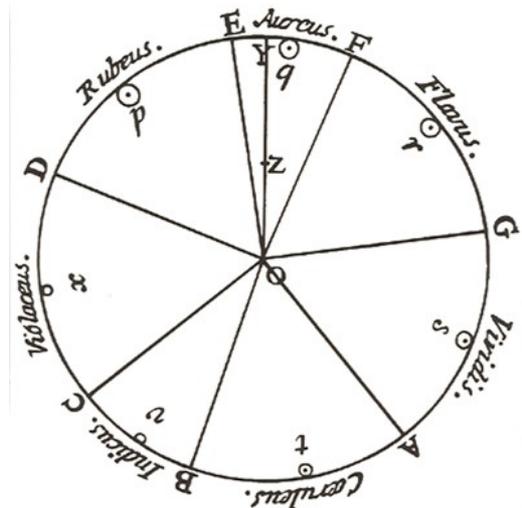


Figure 13 – 1706: Modèle chromatique de Newton

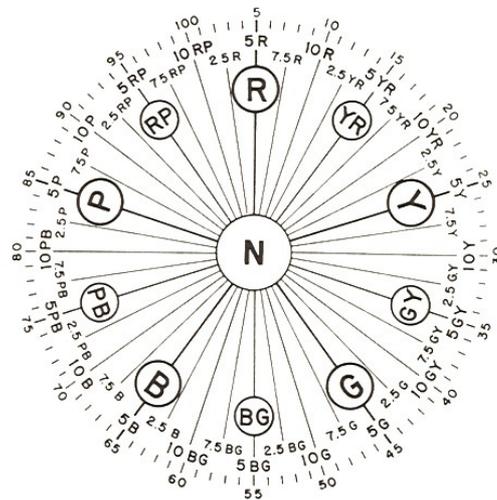


Figure 14 – 1909: Modèle chromatique de Munsell

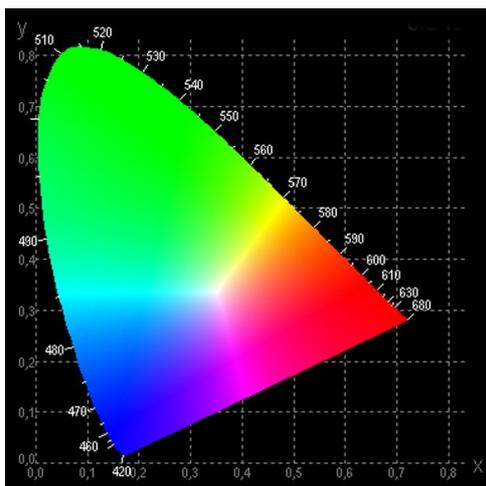


Figure 15 – 1931: Modèle CIE xyY

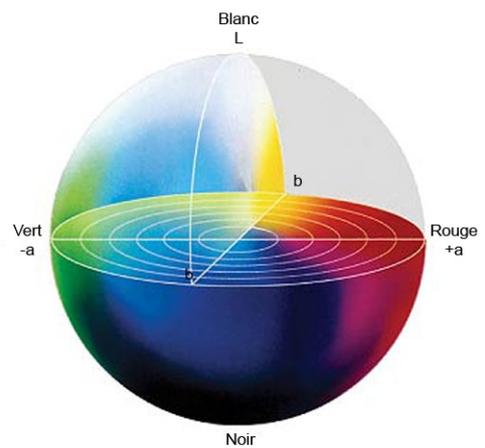


Figure 16 – 1976: Modèle CIE Lab

Modèle de Newton

Au début du XVIII^e siècle, Isaac Newton cherche à comprendre les phénomènes colorés liés à la réfraction de la lumière. Ses travaux se basent, en partie, sur ceux de Descartes qui, quelques décennies auparavant, a mis en évidence la décomposition de la lumière par diffraction à travers un prisme de verre, sans pour autant pouvoir l'expliquer. Newton a alors l'intuition géniale de considérer que la lumière n'est pas « unique » mais composée de plusieurs ondes lumineuses dont le mélange donne la lumière blanche.

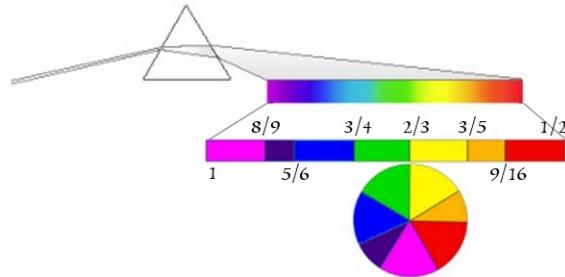


Figure 17– Modèle chromatique de Newton: répartition des couleurs sur le cercle

Il note que le prisme décompose la lumière en sept couleurs principales réparties en bandes plus ou moins larges: magenta, violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge d'où leur nom de couleurs spectrales ou prismatiques. En réalité, il est à noter que le magenta ne fait pas partie du spectre puisque cette couleur ne correspond pas à une seule longueur d'onde, en effet elle peut être perçue en regardant une combinaison de lumières rouge et bleu-violette. La conception de Newton est étroitement liée à la musique: tout comme le rapport 2 à 1 – une corde pincée en son milieu, par exemple – donne le son le plus harmonieux, le rouge représente pour Newton la moitié d'une fréquence fondamentale que nous ne pouvons pas voir. D'autres fraction de cette fréquence fondamentale déterminent les frontières entre les « tonalités » qui nous apparaissent comme des couleurs distinctes.

Newton propose de placer ces couleurs sur un cercle en tenant compte des différentes largeurs de bandes (Figure 17) et démontre ainsi que les couleurs complémentaires sont en opposition. En 1706, dans son livre « Optique » [Ne1706], il publie son cercle chromatique (Figure 13) qui va révolutionner toutes les idées qu'on avait sur la couleur à cette époque.

Quantifier la circonférence du cercle en termes de tonalités et son rayon en termes de niveaux de saturation conduit directement à l'un des modèles chromatiques actuels, le modèle de Munsell.

Modèle de Munsell

Ce modèle, surtout utilisé aux États-Unis, a été inventé par Albert Munsell en 1915. Les couleurs y sont classées selon leur teinte, leur luminosité et leur saturation (Figure 18). La teinte est un code désignant la position, de 1 à 10, sur le cercle des teintes autour d'une teinte de base (position 5). Munsell définit 5 teintes de base (rouge, jaune, vert, bleu, violet) et 5 teintes secondaires (orange, vert-jaune, cyan foncé, bleu violacé, pourpre), comme illustré à la figure 14. Chaque secteur est divisé en 10 intervalles pour donner une roue chromatique de 100 teintes. La luminosité désigne ici le degré de réfléchissement d'une couleur d'un corps, dont la valeur est comprise entre 0 (noir) et 10 (blanc). Le terme saturation se rapporte au degré de coloration, de 0 (gris) à l'infini: les couleurs « normales » ont une saturation pouvant aller jusqu'à 20, mais le système Munsell peut attribuer une saturation de 30 pour des couleurs fluorescentes.

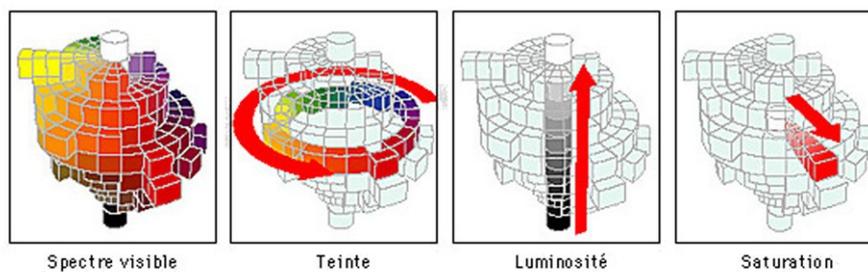


Figure 18 – Modèle chromatique de Munsell: arbre des couleurs

Ce modèle est accepté universellement, car toute couleur peut y être identifiée facilement et précisément. En pratique, il consiste en un atlas [Mu1915] reprenant plus de 1500 couleurs réparties dans des tables, chacune dédiée à une teinte précise, qui permettent d'établir une comparaison visuelle avec l'échantillon. Historiquement, le modèle de Munsell s'apparente plus à un nuancier qu'à un modèle chromatique, mais il a été étendu en utilisant des nombres décimaux afin de pouvoir décrire n'importe quelle couleur.

En 1955, l'*Inter Society Color Council* standardise le nom de 267 couleurs du modèle de Munsell, à la demande du *National Bureau of Standards*, et crée ainsi le modèle ISCC-NBS. Pour ce faire, 10 termes de base ont été retenus: rose, rouge, orange, brun, jaune, olive, vert, bleu, violet et mauve. De ces termes, 28 noms de couleurs ont été créés en couplant des termes de base: orange tirant sur le rouge, vert tirant sur le bleu, etc. Il faut encore ajouter les 3 couleurs « blanc », « gris » et « noir ». Enfin, une liste de 8 adjectifs (vif, brillant, puissant, profond, clair, foncé et pâle) et le superlatif « très » sont utilisés pour traduire les nuances d'une teinte donnée.

Modèle CIE 1931

Dans les années 1920, la CIE – Commission Internationale de l'Éclairage – est chargée de concevoir un modèle chromatique de référence indépendant des marques et des variations des couleurs provenant de l'utilisation de différents moniteurs ou imprimantes. Les expériences menées sont basées sur la possibilité, montrée par Maxwell, d'égalisation visuelle d'un stimulus coloré par un mélange additif de trois couleurs primaires. Elles consistent à comparer deux couleurs: la première était une couleur spectrale pure produite par une source monochromatique et la deuxième était produite par le mélange des couleurs rouge-vert-bleu. Le diagramme des composantes trichromatiques spectrales (Figure 19) résulte de cette expérience. Malheureusement, certaines valeurs sont négatives: il a fallu désaturer certaines couleurs spectrales fortement saturées en leur ajoutant des doses de rouge-vert-bleu complémentaires.

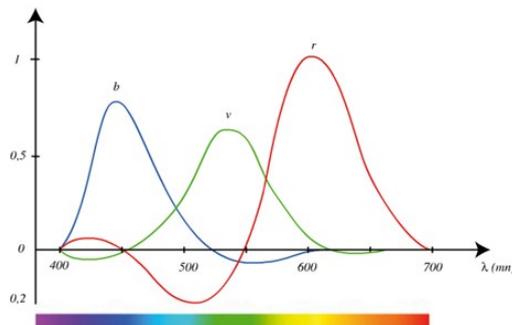


Figure 19– Composantes trichromatiques spectrales

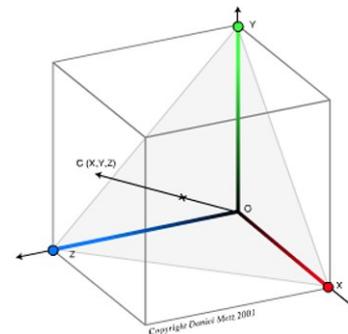


Figure 20 – Modèle CIE XYZ

Datant de 1931, le modèle CIE XYZ (Figure 20) substitue aux primaires rouge-vert-bleu de nouvelles primaires imaginaires, X-Y-Z, afin d'élargir l'espace colorimétrique et ne plus avoir à manipuler des coordonnées négatives. Une couleur c peut être décrite comme la somme des vecteurs de chaque primaire et ainsi trouver sa position dans le cube. Cependant, un problème subsiste: les profils spectraux liés au phénomène de métamérisme ont les mêmes coordonnées !

La même année, le modèle CIE xyY (Figure 15) est développé pour corriger le précédent: le problème lié au métamérisme est résolu et le diagramme ne comporte plus que deux dimensions: une couleur y est définie par sa chromacité $(x, y)^3$ et sa luminance notée Y . Dans ce modèle, les couleurs pures, saturées se retrouvent sur la périphérie courbe du diagramme tandis que les couleurs dites « non-spectrales » résident sur la ligne droite fermant le diagramme, dite « droite des pourpres ». Les couleurs complémentaires sont quant à elles centrées diamétralement autour du « point blanc ».

³ $x = X / (X + Y + Z)$ et $y = Y / (X + Y + Z)$

En 1942, David MacAdam remet une nouvelle fois en question la notion d'espace de couleurs suite aux résultats de ses recherches [Ma1942]. Ces dernières avaient pour objectif de caractériser les erreurs de mesures qui ont lieu lors d'expériences d'égalisation de couleurs. Il considère plusieurs couleurs du modèle CIE xyY et construit le lieu géométrique des points correspondants aux couleurs perceptuellement similaires à la couleur considérée. Le résultat est très étonnant puisque les lieux sont approximativement tous des ellipses dont la taille et l'orientation varient d'un point de mesure à l'autre, révélant ainsi un espace de couleur fortement non linéaire et non uniforme (Figure 21).

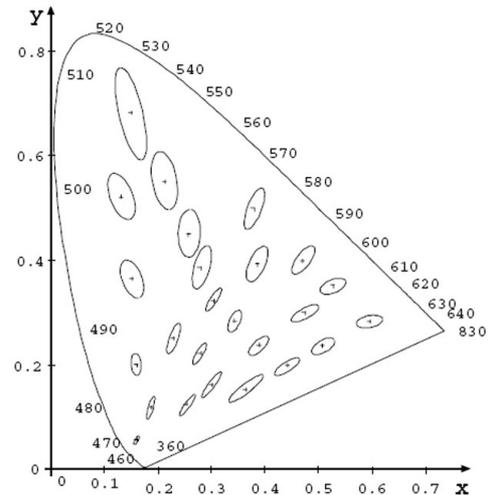


Figure 21 – Les 25 ellipses découvertes par MacAdam dans le modèle CIE xyY, 1942

tous des ellipses dont la taille et l'orientation varient d'un point de mesure à l'autre, révélant ainsi un espace de couleur fortement non linéaire et non uniforme (Figure 21).

Modèle CIE Lab

En 1976, la CIE met au point une nouvelle norme: CIE Lab (Figure 16). Trois paramètres définissent une couleur donnée: L, a, b , respectivement, la luminance, la composante chromatique vert-rouge et la composante bleu-jaune. Ce nouveau modèle résulte d'une transformation mathématique du modèle précédent, à savoir le CIE XYZ:

$$L = 116 \left(Y / Y_n \right)^{1/3} - 16$$

$$a = 500 \left[\left(X / X_n \right)^{1/3} - \left(Y / Y_n \right)^{1/3} \right]$$

$$b = 200 \left[\left(Y / Y_n \right)^{1/3} - \left(Z / Z_n \right)^{1/3} \right]$$

avec X_n, Y_n, Z_n les valeurs XYZ du blanc de référence.

L'objectif de ce nouveau modèle est d'obtenir un espace uniforme en écarts de couleurs, plus simple à interpréter. Il est donc propice à une comparaison des couleurs. Ainsi, la variation totale d'une couleur, ΔE exprimée en unités NBS – *National Bureau of Standards*, est calculée comme la distance Euclidienne entre deux points:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

La littérature mentionne qu'une variation totale de couleur inférieure à 1 NBS n'est pas perceptible à l'oeil nu, mais, dans la pratique, des écarts colorimétriques de l'ordre de 5 NBS sont tolérés.

Modèle RVB

Le modèle RVB (Rouge, Vert, Bleu) ou en anglais *RGB (Red, Green, Blue)* est basé sur la synthèse additive des couleurs (Figure 23). Le principe de cette synthèse peut-être énoncé comme suit: « En additionnant les couleurs de trois sources monochromatiques – rouge, vert, bleu – dites primaires, on obtient le blanc. Toutes les autres couleurs sont obtenues en variant les proportions de ces sources ». Il en résulte que le mélange, deux par deux, des primaires donnera une couleur deux fois plus claire qui est la complémentaire de la troisième.

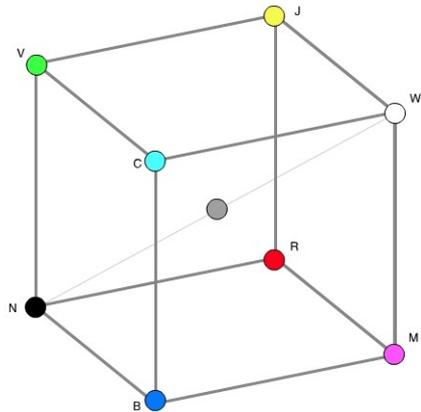


Figure 22 – Modèle RVB

Tous les mélanges de couleurs d'origine lumineuse tels que les spots, moniteurs LCD, scanners ou encore appareils photo numériques s'appuient sur ce principe d'apport de lumière colorée.

Modèle CMJ

A l'inverse du modèle RVB, le modèle CMJ (Cyan, Magenta, Jaune) ou en anglais *CMY (Cyan, Magenta, Yellow)* est basé sur la synthèse soustractive des couleurs (Figure 24). L'absence de couleur, c'est-à-dire le blanc, correspond à la lumière pure; le noir représente quant à lui l'absence de lumière: plus il y a de colorants, moins il y a de lumière. Les mélanges successifs de cyan, magenta et jaune donnent des tons de plus en plus sombres.

C'est sur ce modèle que sont basés les systèmes de peinture, d'imprimerie, etc. Cependant, en pratique, une encre noire est ajoutée au modèle CMJ car il ne génère pas de noir parfait, on parle alors du modèle CMJN ou anglais *CMJK*.



Figure 23 – Synthèse additive des couleurs



Figure 24 – Synthèse soustractive des couleurs

Modèle TSV



Figure 25 – Modèle TSV

Le modèle TSV (Teinte, Saturation, Valeur) ou en anglais *HSV, HSB* (*Hue, Saturation, Value / Brightness*) est une transformation non-linéaire de l'espace de couleurs RVB (Annexe A) et a une représentation graphique semblable à un cône, ce qui a l'inconvénient d'introduire une notation polaire.

La teinte, c'est-à-dire la couleur elle-même, est mesurée par un angle autour d'un cercle chromatique qui décrit les couleurs du spectre. La saturation, ou degré de pâleur de la teinte, est évaluée à partir du centre du cercle vers la circonférence en partant des couleurs neutres vers les couleurs les plus vives. La valeur rend compte de l'éclat d'une couleur, et est mesurée selon l'axe vertical depuis le noir, au sommet du cône, vers le blanc, au centre de la base.

Modèle TSL

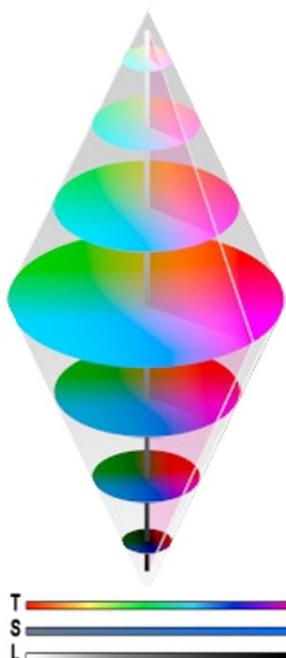


Figure 26 – Modèle TSL

Le modèle TSL, TLS (Teinte, Saturation, Luminosité) ou en anglais *HLS, HSL, HSI* (*Hue, Saturation, Lightness / Intensity*) est représenté graphiquement par un double cône (Figure 26). Cette représentation, adoptée uniquement pour sa simplicité de compréhension, n'a pas d'origine mathématique.

Le modèle TSL est semblable au modèle TSV, mais il reflète mieux la notion intuitive de « saturation » et de « luminosité » puisqu'il considère ces deux paramètres comme indépendants. Plus approprié pour les artistes, il a l'avantage de définir clairement l'échelle des luminosités entre le noir et le blanc.

The GIMP, Paint.NET ou encore la pipette d'Apple ont adopté le modèle TSV. Inkscape, Paint Shop Pro, la pipette Microsoft et la norme CSS3 préfèrent le modèle TSL. Les applications développées par Adobe telles que Photoshop et Illustrator permettent à l'utilisateur de choisir entre les deux modèles.

Choix d'un modèle

Recréer un modèle chromatique artificiel à partir d'un modèle réel dépend autant du mode d'acquisition que de l'éclairage. Dès lors, recréer une image à partir de trois ou quatre couleurs n'est pas chose aisée: cette science relève aussi bien des plus hautes technologies que de notre perception.

Le modèle RVB est certainement le plus souvent utilisé dans la manipulation des images numériques, que ce soit pour leur apporter des corrections ou pour les récupérer depuis différentes sources. Pourtant il n'en reste pas moins difficile à maîtriser, notamment pour les mélanges des couleurs. Bref, il ne sera pas notre référence, mais il est incontournable pour sa souplesse dans le traitement d'images complexes.

Le modèle CMJN sera utilisé pour l'impression, car le procédé sur lequel il repose suppose la réflexion de la lumière par les couleurs, comme c'est le cas des couleurs que renferme une image imprimée sur papier.

Les modèles du type TSL sont intéressants dans le cas qui nous occupe. En effet, il est aisé avec ces systèmes de choisir ou trouver une couleur puisque leurs concepts se basent sur la perception humaine: choix d'une couleur principale (choix de la teinte), ajout de noir ou de blanc (modification de la luminosité), ajout de touches de la couleur de base ou de gris (variation de la saturation), ajout de touches de couleurs différentes (variations de teintes).

Pour terminer cette section, le lecteur intéressé trouvera en Annexe A les équations qui régissent les conversions d'un modèle chromatique à un autre: RVB vers et de CMJ, CMJN, TSV et TSL.

Logiciels

Il est utopique de vouloir effectuer une analyse de tous les logiciels graphiques existants dans le secteur commercial ou dans le monde du logiciel libre, et ce pour deux raisons. Tout d'abord, même si dans un souci de vulgarisation informatique, ils sont regroupés sous une même appellation, tous n'ont pas la même finalité. Certains sont plus spécifiquement dédiés à la retouche d'images, d'autres au dessin vectoriel ou encore à la conception assistée par ordinateur. Deuxièmement, même limitée à un secteur d'activité particulier, l'offre proposée à l'utilisateur reste abondante, voire excessive.

DrawPlus, Expression3, Virtual Painter, Ultimate Paint, Freehand MX, Paint.NET, Graphex3, etc sont à classer dans les applications permettant de retoucher une image, une photographie. Même si un rendu crayonné ou « à l'aquarelle » peut être obtenu dans certains cas par application d'un filtre adéquat sur la zone de travail, ces logiciels ne rencontrent pas l'objectif d'interactivité visé et ne seront, par conséquent, pas tous détaillés. En effet, Adobe Photoshop et GIMP étant les plus connus dans le domaine, leur étude est largement suffisante pour servir de contre-exemple. Inkscape, Zoner Draw 4, Artstream, Sketch, Canvas, Sodipodi, etc font quant à eux partie des logiciels de dessin vectoriel et, par essence, n'implémentent donc aucune interaction entre la feuille de dessin et les outils graphiques. L'analyse d'Adobe Illustrator démontrera que le meilleur rendu qu'ils puissent fournir se limite à l'application *a posteriori* d'un pattern étiré le long du trait. Les logiciels dits de CAO ou de modélisation tridimensionnelle que sont Blender, SketchUp, Wings 3D, Pov-Ray ou encore QCad n'intègrent aucune notion d'interactivité dans le rendu qu'ils proposent et sont donc exclus d'office de l'étude.

Restent les logiciels tels que Corel Painter™ IX, ArtRage ou ArtWeaver, qui sont les plus susceptibles d'éclairer notre réflexion. Cependant, il ne s'agit pas de logiciels libres et les algorithmes qu'ils utilisent ne sont pas disponibles. Seule l'élaboration d'une série de critères, subjectifs il est vrai, permet d'apprécier le rendu de leurs outils graphiques.

Critères d'évaluation

Support de dessin

Notion de support – Soyons clair, le support est toujours présent: au minimum, il s'agit d'un rectangle blanc voire transparent ! Mais ce que je cherche à savoir c'est si, d'une manière ou d'une autre, les concepteurs des différents logiciels tiennent compte du fait que le rendu d'un outil graphique dépend du support, un type de feuille de dessin particulier, sur lequel il est appliqué. Après avoir choisi un type de support, le relief est-il visible ou non à l'écran ?

Génération du support – Dans les cas où la notion de support de dessin est envisagée, de quelle façon est-il généré ? Est-ce une seule image, de grande taille et stockée en mémoire, qui est rognée aux dimensions voulues ? Ou plutôt un pattern, cyclique ou non, appliqué un certain nombre de fois afin de couvrir la surface de dessin ? Ou encore n'est-il pas possible de déterminer la méthode de génération tant le degré de réalisme est grand ? Pour rappel, même si toutes les feuilles de dessin issues d'un même bloc sont visuellement semblables, leur relief n'est pas en tout point identique.

Réaction du support – Lorsque l'utilisateur commence à dessiner, comment réagit le support ? Devient-il invisible, complètement recouvert par les traits ? Ou alors son relief est-il toujours présent ? Y a-t-il saturation des grains de la feuille, dégradation du support dû au passage de l'outil graphique ?

Outils graphiques

Les outils graphiques susceptibles de nous intéresser sont ceux qui possèdent un pendant réel et utilisé par un concepteur au sens large: les crayons graphites, de couleurs ou gras, le fusain, la craie, les pastels, les feutres⁴ ou encore les gommes et mélangeurs. Les duplicateurs, jets d'image et autres outils de distorsion n'ont pas d'équivalent réel et sont par conséquent écartés. L'aérographe, la peinture acrylique, à l'huile, la gouache, les éponges, les couteaux ou la gravure ne se retrouvent pas – *a priori* – dans le plumier d'un concepteur, le but du processus de conception n'étant pas de recouvrir entièrement le support de dessin.

4 Plus précisément, les marqueurs utilisés en architecture

Réalisme du rendu – Comment le rendu de tel ou tel outil graphique est-il obtenu ? Est-ce un pattern unique – ou plusieurs – étiré(s), déformé(s) le long de chaque trait ? Est-ce la surface de contact entre le support et l'outil qui est modélisée puis déplacée le long du trait ? L'objectif premier de ce critère sera de mettre en évidence les écarts de comportement entre les outils réels et ceux qui sont simulés.

Réalisme inter-outils – De quelle manière les outils de dessin interagissent-ils entre eux ? Est-il possible de couvrir un trait dessiné au feutre noir avec un simple crayon de couleur jaune ? Le mélange des couleurs, des pigments et des matériaux est-il pris en compte ?

Autres critères

Prise en charge d'une tablette – Le logiciel peut-il être connecté avec une tablette graphique afin d'alléger le paramétrage des outils de dessin ? Quels sont les paramètres qui sont ainsi fournis au logiciel de manière implicite mais tellement plus naturelle: pression appliquée, angle(s) d'inclinaison, rotation propre de l'outil graphique ?

Ergonomie de l'interface graphique – L'interface graphique est-elle en accord avec la notion de réalisme ? En d'autres termes, est-elle aussi simple, légère et naturelle qu'un plumier vidé sur une table ? Quelle est la proportion de l'écran réservée au dessin en lui-même ? Y a-t-il un effet de surcharge de l'interface dû aux nombreux menus et sous-menus permettant le paramétrage des différents outils mis à la disposition de l'utilisateur ?

Réalisme de l'activité de dessin – Le logiciel est-il, lui aussi, en accord avec la notion de réalisme ? Permet-on à l'utilisateur de tracer un cercle en imprimant un déplacement rectiligne du poignet ? L'application est-elle une aide à la conception ou bien les personnes non-douées en dessin le restent-elles ?

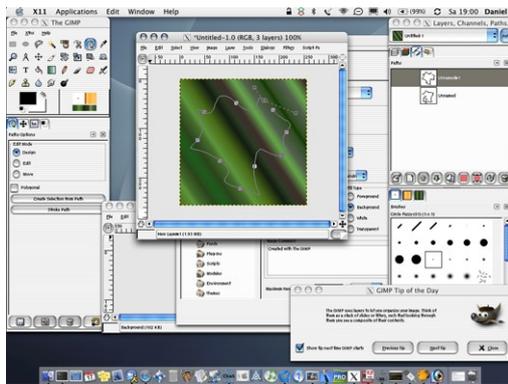


Figure 1 – GIMP 2.2



Figure 2 – Adobe Illustrator CS2

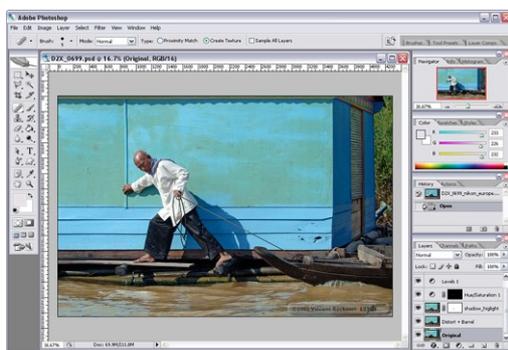


Figure 3 – Adobe Photoshop CS2



Figure 4 – ArtWeaver

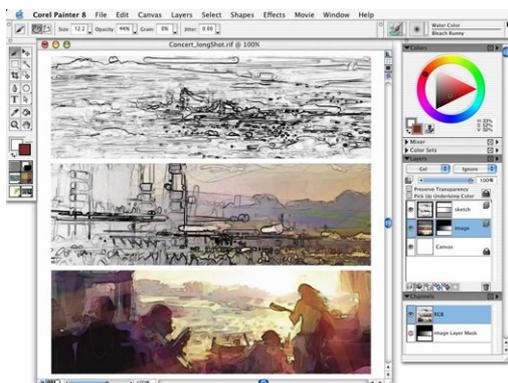


Figure 5 – Corel Painter IX



Figure 6 – ArtRage 2

The GIMP, Adobe Photoshop & Illustrator

Description

The GIMP, *GNU Image Manipulation Program*, est un software de traitement d'images distribué gratuitement. Il est adapté aux tâches telles que la retouche de photographies, la composition ou la présentation d'images. Ses principales fonctionnalités sont les brosses, tampon, ciseaux, outils de sélection et de détournage, gestion avancée des calques, etc. Le logiciel est en constante évolution puisque son architecture permet d'étendre ses capacités par l'intermédiaire de plugins. Adobe Photoshop est le pendant commercial et l'inspirateur de GIMP. Ses possibilités sont donc quasiment identiques.

Adobe Illustrator est le logiciel de création graphique vectorielle de référence dans le milieu des professionnels du graphisme. Complémentaire à Adobe Photoshop, il offre des outils de dessin vectoriel puissants et est adapté aussi bien à la création de documents papiers qu'à celle d'illustrations destinées à être publiées sur le Web.

Évaluation des critères

Notion de support – Aucune notion de support de dessin, l'espace de travail est traditionnel. L'utilisateur a la possibilité de définir la taille, la couleur d'arrière-plan, le mode et le profil colorimétrique ainsi que la forme des pixels. Les autres critères concernant le support de dessin n'ont donc pas lieu d'être évalués.

Réalisme du rendu – Dans aucun logiciel, il n'y a d'outil graphique nommé « feutre » ou encore « pastel »: seul un outil pinceau – ou brosse – paramétrable.

En ce qui concerne Adobe Photoshop, la figure 7 illustre quelques-uns des effets qu'il est possible d'obtenir par variation de la taille, de l'arrondi, de l'opacité, effet bords humides, diffusion, variation du nombre de poils du pinceau, effet texturé, etc. Il revient à l'utilisateur de configurer son pinceau pour obtenir le rendu de tel ou tel outil graphique. Un certain réalisme peut certes être obtenu mais au bout de combien de temps ? GIMP offre le même style de brosses paramétrables (Figure 8), mais le nombre d'éléments variables y est plus restreint: forme, taille, inclinaison, opacité et espacement le long du trait du pattern choisi comme « pointe ».



Figure 7 – Photoshop: brosse

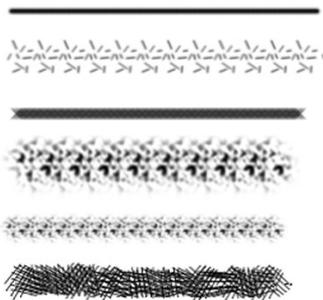


Figure 8 – GIMP: brosse



Figure 9 – Illustrator: brosse

Adobe Illustrator fonctionne différemment sans pour autant faire mieux: une série de patterns pré-définis (Figure 9) sont disponibles et déformés le long d'un trait – une fois celui-ci terminé ! Le manque de réalisme est ici sans appel (Figure 10).



Figure 10 – Illustrator: application d'un pattern le long du trait

Réalisme inter-outils – Les outils graphiques en eux-mêmes ne peuvent être considérés comme ayant un rendu réaliste, il n'y a donc pas de raison de parler d'un réalisme de l'interaction entre les différents types de pinceaux.

Prise en charge d'une tablette – Quand bien même l'utilisateur connecterait une tablette graphique à ce genre de logiciel, elle n'introduirait pas à elle seule le réalisme et le naturel qui font défaut ici.

Ergonomie de l'interface graphique – L'interface graphique est tout ce qu'il y a de plus commun et de moins ergonomique: une fois les boîtes de dialogues permettant de paramétrer les outils graphiques affichées, la surface de l'écran disponible pour le dessin est cachée aux deux tiers.

Réalisme de l'activité de dessin – Il ne fait aucun doute que ces trois logiciels ne peuvent être considérés comme des outils d'expression graphique libre, ils ne sont qu'une aide au dessin, certes très utile dans la création Web ou la retouche de photos. Peut-être est-ce là le secret de leur succès auprès des graphistes, mais dans le cas qui nous occupe il s'agit typiquement du genre d'application à éviter.

ArtWeaver

Description

ArtWeaver est un logiciel gratuit dont l'objectif est de reproduire le plus fidèlement possible les outils de dessin traditionnels tels que crayon, pinceau, plume, feutre, étampe, fusain, éponge, aérosol, etc. Chacun de ces outils peut-être paramétré dans sa forme, sa couleur, sa dureté, sa coupe ou encore son angle. Hormis le dessin, ArtWeaver propose également des fonctions basiques de retouche photo: quelques filtres classiques et les principaux ajustements de couleurs.

Évaluation des critères

Notion de support – La notion de feuille de dessin fait partie intégrante du concept d'ArtWeaver: il n'est pas permis de dessiner sur du papier parfaitement lisse. Pas moins de 8 textures sont proposées à l'utilisateur, mais il est difficile de considérer comme réalistes deux d'entre elles – 2^{ème} et 4^{ème} sur la figure 11. Les échantillons de feuilles de dessin, images en niveaux de gris, peuvent être mis à l'échelle, zoomés, mais perdent alors de leur réalisme. Il est également possible de modifier le contraste et la luminosité du pattern afin d'accentuer le relief. Lorsqu'un type de papier est choisi, il n'est pas visible à l'écran.

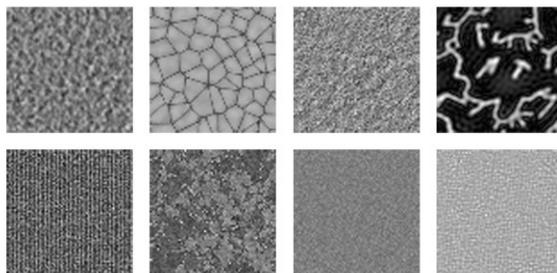


Figure 11 – Artweaver: différents types de papier



Figure 12 – ArtWeaver: effet multi-papier

Génération du support – La feuille de papier se devine sous la plume lorsque l'utilisateur commence à dessiner. Un trait, suffisamment large, tracé de manière uniforme fait apparaître la méthode de génération du support: le pattern, cyclique, est répété autant de fois que nécessaire. De plus, à l'intérieur d'un échantillon donné, des répétitions de motifs sont visibles. Il n'est donc pas possible de conclure à un réalisme satisfaisant du support de dessin. Il est à noter que cette méthode de génération permet l'utilisation sur une même surface de dessin de plusieurs textures de papier différentes

(Figure 12). La question qui se pose alors est de savoir si cet « effet multi-papier », non réaliste, doit être ou non considéré comme une faiblesse de l'application.

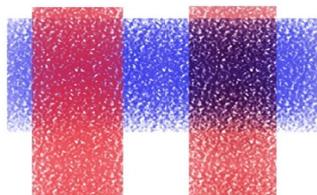


Figure 13 – ArtWeaver: réaction inter-outils (couverture ou build-up)



Figure 14 – ArtWeaver: palette des outils de dessin (les outils grisés ne sont pas pris en compte)

Réalisme inter-outils – Le choix est laissé à l'utilisateur d'opter pour une méthode couvrante (à gauche sur la figure 13) ou une méthode « build-up » qui tient compte des couleurs et des textures déjà présentes sous la plume (à droite sur la figure 13). Au cours d'un même dessin, il est tout à fait possible de passer de l'une à l'autre. Il est évident que la méthode dite « build-up » est celle qui s'approche au mieux du mélange des couleurs induit par le réalisme inter-outils.

Réalisme du rendu – Parmi les 18 outils graphiques mis à la disposition de l'utilisateur (Figure 14), seule la moitié d'entre eux vont retenir notre attention: crayon, marqueur, encre, fusain, craie, pastel, gomme, crayon gras et Conté. Le réalisme du rendu de chaque outil pris séparément est relativement correct, c'est-à-dire en tenant compte du fait que le support n'est pas idéalement modélisé. La technique de rendu utilisée est celle appliquant un pattern tout au long du trait (Figure 15). Même s'il faut avouer que chaque outil est paramétrable dans ses moindres détails, la question qui se pose est justement: n'est-ce pas trop ? En effet, pour un outil graphique donné, l'utilisateur peut intervenir sur la méthode « inter-outils », l'opacité du trait, la taille et la forme de la pointe (Figure 16), le taux d'aplatissement et l'inclinaison de l'outil (Figure 17, 2^{ème} ligne), la distance entre deux répétitions successives du pattern le long du trait (Figure 17, 3^{ème} ligne), l'angle de rotation propre (Figure 17, 4^{ème} ligne), la quantité de matière disponible sur l'outil graphique pour chaque trait, le taux de dispersion du pattern autour de la ligne de trait réelle, etc. Au total plus de 30 paramètres peuvent être contrôlés par l'utilisateur.

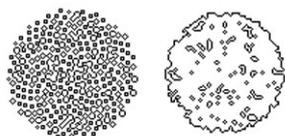


Figure 15 – ArtWeaver: patterns peinture acrylique et Conté

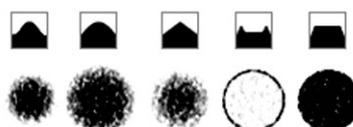


Figure 16 – ArtWeaver: pointes de crayon et leur rendu sur un papier basique

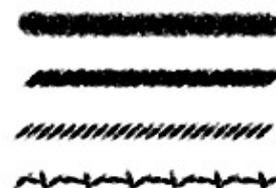


Figure 17 – ArtWeaver: paramètres des pointes

Réaction du support – La réaction du support varie bien sûr selon l'outil graphique sélectionné et la méthode inter-outils choisie. Cependant, le réalisme n'est pas toujours au rendez-vous. La figure 18 illustre la réaction d'un même support suite à plusieurs passages successifs pour chaque outil graphique selon la méthode « couverture » (ligne supérieure) et la méthode « *build-up* » (ligne inférieure). La première constatation qui saute aux yeux est le manque de réalisme de la saturation des grains pour la seconde méthode: il vient un moment où l'accumulation de pigments reflète une couleur noire due au mélange additif des couleurs. Or, cette même méthode était la plus réaliste des deux en ce qui concerne le mélange des couleurs. Le deuxième point négatif est que pour certains outils, comme la craie ou les Contés, aucune « dégradation » du relief de la feuille de dessin n'est visible quelle que soit la pression appliquée et la saturation des grains. En bref, il n'y a pas de réelle modélisation du support de dessin, au mieux un effet de surimpression et, par conséquent, la réaction du support n'est pas toujours adéquate.



Figure 18 – ArtWeaver: réaction du support selon la méthode « couverture » (en haut) et « *build-up* » (en bas) pour les outils graphiques suivants: crayon, marqueur, encre, fusain, craie, pastel, crayon gras et Conté.

Prise en charge d'une tablette – Le logiciel prend en charge les paramètres que renvoie chaque tablette graphique: pression, inclinaison et rotation propre.

Ergonomie de l'interface graphique – C'est le gros point noir de cette application: à force de vouloir permettre une très grande liberté de paramétrage, l'interface graphique en subit les conséquences. Même si les différents menus et sous-menus peuvent être déployés ou non, l'utilisateur est gêné dans son activité de dessin par l'abondance de choix à laquelle il est confronté.

Réalisme de l'activité de dessin – Sans tenir compte des problèmes induits par l'interface graphique, l'activité de dessin en elle-même est tout à fait naturelle. Les outils de formes sont présents mais ne viennent en aucun cas perturber l'utilisateur: il n'est pas possible de combiner l'outil de forme « rectangle » et l'outil graphique « fusain ».

Corel Painter™ IX

Description

Painter™ est un software de type dessin bitmap destiné à la création artistique d'images au look naturel. Painter™ offre un large éventail d'outils graphiques et rapproche ainsi sensiblement médium naturels et numériques. La grande force de ce logiciel est le niveau de performances – vitesse et stabilité – qui est atteint, résultat d'une constante collaboration avec les fournisseurs hardware. La compatibilité avec d'autres applications et matériels offre à l'utilisateur un vaste domaine d'exploitation. Doté de didacticiels élaborés par des artistes, Painter™ se veut être accessible à un large public.

Évaluation des critères

Notion de support – Le dessinateur peut choisir plus d'une vingtaine de textures papiers différentes, certaines plus réalistes que d'autres comme l'illustre la figure 19. De plus, pour chacune d'entre elles, il est possible de régler la luminosité, le contraste, l'échelle et l'orientation des grains du papier. Au début du croquis, la surface de travail est parfaitement blanche: ce n'est que lors du tracé que la texture du support transparait.

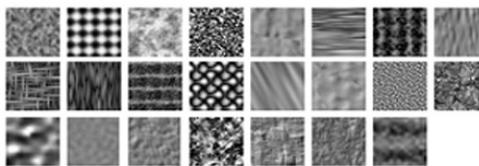


Figure 19 – Painter™: différentes textures papier

Génération du support – La feuille de papier est générée selon la méthode habituelle: un pattern cyclique appliqué autant de fois que nécessaire afin de couvrir la zone de travail. Étant donné que la texture peut être modifiée au cours du dessin, un « effet multi-papier » similaire à celui d'ArtWeaver peut être produit. Signalons encore que la gamme des textures de papier peut être étendue moyennant rétribution: le format de fichier décrivant un pattern est propriétaire.

Réaction du support – Lors d'un croquis, la texture papier du dernier trait supprime complètement les textures déjà présentes au même endroit, ce qui n'est pas le cas pour les couleurs. Le mélange de celles-ci est en effet pris en compte, mais il s'agit à nouveau d'un mélange additif qui vire au noir avec l'accumulation des pigments. La modélisation de la réaction du support de dessin se limite donc à un effet de surimpression.

Réalisme du rendu – Painter™ IX possède la plus vaste palette graphique, soit au total 34 outils de dessin, mais seuls 8 d'entre eux sont intéressants pour notre étude (Figure 20). Chacun des outils graphiques peut être utilisé en mode « main libre » ou « point à point ». De plus, l'utilisateur a la possibilité d'en régler la taille, la forme, l'opacité, le pas de répétition le long du trait, la manière dont les pigments vont interagir ou encore la variation de la position autour du trait d'origine. Sans tenir compte du choix peu judicieux relatif à la saturation des grains de la feuille, le réalisme du rendu est de loin le meilleur de cette étude, et ce quelque soit l'outil graphique considéré. Un bémol est toutefois à signaler: à la différence des autres outils à matières sèches, le rendu des traits des crayons de couleur ne varie pas en fonction de la pression appliquée mais en fonction de la vitesse – plus le tracé est rapide, plus le trait est fin et inversement. Est-ce vraiment là un comportement réaliste ?

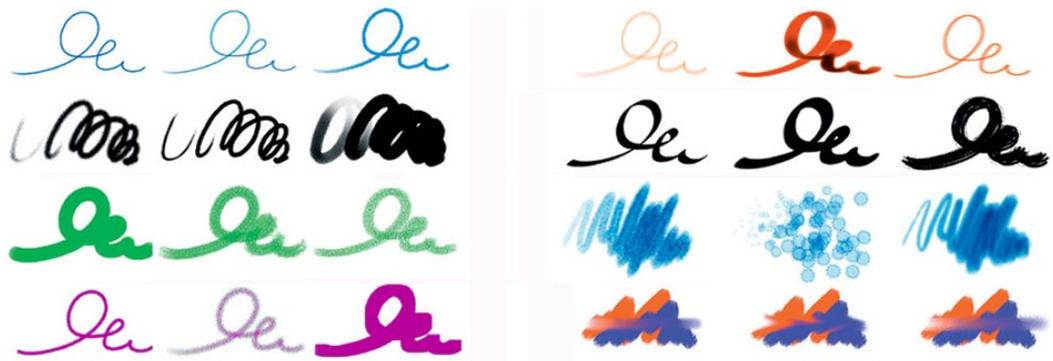


Figure 20 – Corel Painter™: rendu des différents outils (par groupes de trois, de bas en haut et de gauche à droite): crayon, fusain, craie, pastel, feutre, encre, aquarelle et mélangeur.

Réalisme inter-outils – Outre les points déjà abordés dans les critères précédents (suppression des textures sous-jacentes et mélange additif des couleurs), une anomalie de comportement reste à évoquer: l'outil aquarelle s'applique à un calque spécifique permettant aux couleurs de couler, de se mélanger et d'être absorbées par le papier, mais n'accepte pas d'interaction avec les autres outils.

Prise en charge d'une tablette – L'existence d'un partenariat commercial entre Corel et Wacom implique une prise en charge totale des paramètres renvoyés par les tablettes graphiques.

Ergonomie de l'interface graphique – Beaucoup trop de paramètres peuvent être modifiés par utilisateur pour pouvoir conclure à une interface ergonomique ou à une prise en main de l'application aussi évidente qu'annoncée.

Réalisme de l'activité de dessin – Aucun outil de forme ne vient « aider » le dessinateur dans son croquis: il peut s'exprimer librement. L'activité de dessin peut dès lors être considérée comme réaliste.

ArtRage

Description

ArtRage est développé par la société Ambient Design Ltd., spécialisée dans la conception et le développement d'applications et d'interfaces créatrices. ArtRage est décrit comme un «système» de peinture conçu pour fournir un environnement naturel et facile à utiliser pour la création d'art dès l'instant où le logiciel est ouvert. En fournissant des outils réalistes tels que peinture à l'huile et crayon et en simulant la dynamique réelle de ces médias, ArtRage permet à n'importe quel utilisateur de jouer avec l'art sans les inconvénients des outils réels.

ArtRage 1, mis sur le marché comme produit libre en 2004, a gagné un certain nombre de prix, dont celui du concours Microsoft « Does Your App Think In Ink », récompensant des applications développées sur tablette PC. ArtRage 2, qui n'est plus distribué gratuitement, étoffe l'éventail des outils de dessin en permettant à l'utilisateur de peindre au couteau, d'utiliser une pipette ou encore un aérographe.

Évaluation des critères

Notion de support – De toutes les applications, ArtRage est la plus flexible au niveau de la notion de support. En effet, l'utilisateur peut charger, à partir d'un fichier image converti en niveau de gris, sa propre texture de papier et ainsi définir le grain de la feuille de dessin (Figure 21). De plus, il a la possibilité de paramétrer la rugosité du grain, la mise à l'échelle de l'échantillon, l'opacité et la couleur de la feuille de dessin et enfin de donner au papier un aspect métallique. Vus ces trois derniers paramètres, il est évident que la feuille de dessin sera visible avant même le premier trait.



Figure 21 – ArtRage:
feuille de dessin
personnalisée

Génération du support – La méthode de création de la feuille de dessin juxtapose l'échantillon de départ de manière à recouvrir complètement la surface de travail. Aucun traitement particulier n'est réservé aux échantillons de texture non-cyclique comme le montre le haut de la figure 22. L'utilisateur doit donc veiller à choisir son image de base de telle sorte que le réalisme du support de dessin soit optimum.

Réaction du support – Lorsque l'utilisateur commence à dessiner, le relief du support de dessin reste bien visible. Cependant, aucun effet de saturation du grain ou de dégradation de la feuille n'est envisagé. L'impression laissée est plus celle d'une « mise en couleur » d'un objet qu'une réelle sensation de dessin. Au cours d'un même croquis, il est tout à fait possible de changer la texture du support de dessin. L'utilisateur s'attend alors à avoir un « effet multi-papier ». Mais le comportement est tout autre, comme l'illustrent les quatre étapes de la figure 22. Tout d'abord, la feuille de dessin est vierge, puis un trait est esquissé. L'utilisateur décide de changer le type de support et la troisième étape fait apparaître un comportement singulier: les bords du trait ont conservé le premier motif du papier, tandis que le second est appliqué à l'intérieur du trait et au reste de la feuille. Si maintenant l'utilisateur repasse sur son premier trait, comme le montre la dernière étape, la texture initiale de la feuille disparaît complètement. La preuve du manque de réalisme est faite.

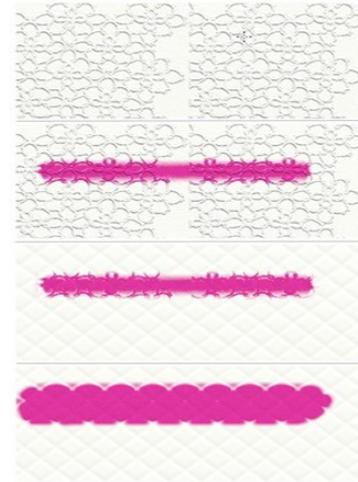


Figure 22 – ArtRage: changement de la texture du support

Réalisme du rendu – La palette graphique est constituée de 12 outils parmi lesquels 5 entrent dans les critères de cette évaluation: le crayon, la craie, le feutre, le crayon gras et la gomme. Le tableau ci-dessous reprend les différents paramètres ajustables pour chaque outil graphique.

	épaisseur	pression	inclinaison	dureté	proportion d'eau
crayon	✓	✓	✓	✓	
craie	✓	✓			
feutre	✓	✓		✓	✓
crayon gras	✓	✓		✓	
gomme	✓	✓		✓	

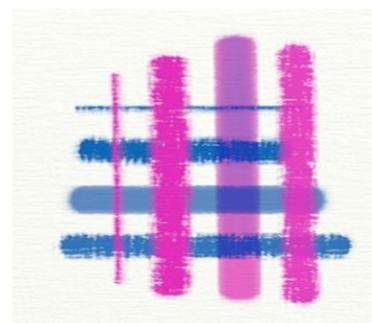


Figure 23– ArtRage: rendu et interaction des différents outils (de haut en bas et de gauche à droite): crayon, craie, feutre et crayon gras.

La figure 23 montre le rendu, de haut en bas et de gauche à droite, du crayon, de la craie, du feutre et du crayon gras, toute autre paramètre que la couleur étant identique. Il est difficile de différencier le rendu du fusain de celui du crayon gras, même en jouant sur la dureté de ce dernier. Dans tous les cas, une variation de la pression entraîne une

variation proportionnelle de l'opacité du trait, à l'exception de celle du feutre: plus la pression est faible, plus le trait est marqué. Est-ce là une erreur de programmation ou un manque de réalisme ? Pour terminer, étant donné qu'un seul angle d'inclinaison de l'outil graphique est pris en compte, lors d'un changement total de direction – par exemple, horizontalement de gauche à droite puis de droite à gauche légèrement plus bas – le comportement du crayon notamment n'est pas prévisible donc peu réaliste, comme l'illustre la figure 24.



Figure 24 – ArtRage: variation totale de la direction du trait

Réalisme inter-outils – En ce qui concerne le crayon, le fusain et le crayon gras, aucune interaction n'est à mettre en évidence: ils ont un pouvoir parfaitement couvrant (Figure 23). Seul le feutre qui déteint selon la couleur des pigments présents en dessous du trait adopte un comportement réaliste.

Prise en charge d'une tablette – ArtRage prend en charge deux des paramètres que renvoient les tablettes graphiques: pression et inclinaison.

Ergonomie de l'interface graphique – C'est à croire que l'objectif premier de cette application n'était pas tellement de concevoir un programme de dessin réaliste tant l'interface est naturelle, intuitive et presque invisible. Cependant, aussi ergonomique et claire soit elle, elle ne doit pas déterminer à elle seule la qualité de l'application.

Réalisme de l'activité de dessin – Aucun outil de forme n'est disponible, permettant ainsi au concepteur de s'exprimer librement: un nouveau point positif pour ArtRage.

Conclusion

Aucun des logiciels étudiés ne rencontre parfaitement l'ensemble des critères définis, même si certains présentent malgré tout des aspects qu'il serait intéressant de reprendre ou d'améliorer dans la future application. Ainsi, l'ergonomie de l'interface d'ArtRage résulte manifestement d'une prise de conscience de l'importance du bien-être de l'utilisateur face à un logiciel, de dessin ou non: c'est l'interface qui doit être adaptée à l'utilisateur, et non l'inverse.

À retenir également, l' « effet multi-papier » développé dans Painter™ et ArtWeaver, qui traduit une intention explicite du dessinateur: la signification des traits avant et après le changement de papier est certainement différente. Que ceux qui reprochent un manque de réalisme à cette fonctionnalité pensent aux effets de texture qu'il est possible d'obtenir en conservant le même support de dessin, mais en plaçant celui-ci sur une autre surface! Évidemment, il faudrait concevoir un algorithme permettant de tenir compte des textures de papier sous-jacentes et ainsi éviter le comportement peu réaliste des logiciels précités. Cette approche nécessite de conserver en mémoire le relief de la feuille, ce qu'aucun des logiciels ne fait.

Le paramétrage excessif des outils de dessin fait partie des erreurs à ne pas commettre. En effet, seule leur forme, taille et couleur sont, dans la réalité, des variables sur lesquels l'utilisateur a un certain contrôle avant de commencer son esquisse. Le réalisme n'en sera pas pour autant affecté mais l'interface graphique y gagnera encore en ergonomie et naturel, surtout si les caractéristiques intrinsèques du tracé – pression, vitesse et orientation – sont quant à elles prises en charge par la tablette graphique.

L'étude des différents logiciels point de vue de la gestion des couleurs montre qu'un simple mélange additif ou soustractif ne simule pas un comportement réaliste. Une solution doit donc encore être trouvée à ce sujet.

Littérature

L'ensemble des articles relatant les méthodes numériques permettant d'obtenir un rendu non-photoréaliste des techniques de dessin traditionnelles se révèle assez important, de l'ordre de 700 documents ces cinq dernières années. Cependant, cette liste se réduit considérablement si l'on ne sélectionne parmi ceux-ci que ceux qui rencontrent simultanément les trois objectifs de ce projet.

Bon nombre d'articles traitent de rendu non-photoréaliste *a posteriori*, c'est-à-dire partant d'une image initiale – photographie ou dessin vectoriel – auquel un « filtre » est appliqué. Ce type de procédé ne peut être assimilé à un outil de dessin réaliste dans le sens où le rendu final d'un trait n'est connu, le plus souvent, qu'à la fin du dessin tout entier! Par conséquent, tout article n'intégrant pas les caractères interactif et temps-réel du rendu présente peu d'intérêt dans le cadre de cette recherche. Toutefois, leur nombre est si élevé qu'il me semble impensable de ne pas informer le lecteur de l'extraordinaire imagination dont font preuve les scientifiques de nos jours. Ainsi, une sélection d'articles parmi les plus pertinents et les plus récents est proposée au lecteur à la section « Rendu a posteriori ».

Crayons de couleur

Dans un dessin aux crayons de couleur, deux effets optiques prédominent lors d'un mélange de teintes: l'effet vitrail et la juxtaposition. L'effet vitrail consiste en une superposition de fines couches de couleurs différentes, la lumière reflétée par une couche inférieure vient modifier la teinte de la couche immédiatement supérieure. Le second effet résulte d'un procédé cérébral: la juxtaposition de traits de couleurs différentes, suffisamment fins et proches les uns des autres sont interprétés par notre cerveau comme une seule et même couleur. L'enjeu d'une simulation sur ordinateur d'un rendu aux crayons de couleur est de reproduire aussi fidèlement que possible ces effets optiques en plus de ceux caractérisant les crayons graphites et ce dans l'unique but de permettre au dessinateur d'exprimer de manière plus précise – plus compréhensible par le système – une forme, une ambiance, une idée.

Trois publications vont être examinées dans cette section. Aucune d'entre elles ne prétend décrire un modèle permettant de simuler un rendu aux crayons de couleur temps-réel et interactif, mais elles apportent toutes un élément supplémentaire à notre réflexion. Le premier article [TF99] établit un lien direct entre le rendu et une modélisation du papier. Lors de mon mémoire, les auteurs du deuxième article [YMI05] en étaient restés à une simulation graphite [MNI02] et il est donc intéressant de voir comme ils ont intégré la couleur. La dernière publication [LKL05] se penche sur l'interaction papier-crayon et laisse entrevoir la possibilité d'une optimisation hardware.

Microscopic Structural Modeling of Colored Pencil Drawings [TF99]

Modélisation du papier – Takagoi *et al.* ont une approche microscopique de la feuille de dessin: le papier est composé d'un réseau de fibres globalement orientées mais distribuées aléatoirement d'un point de vue local et dont les cavités sont remplies de talc⁵ afin de lisser la surface. La feuille de papier est donc modélisée géométriquement par un réseau de cylindres concentriques, de surface irrégulière et mis bout à bout. Quant à la distribution du talc, elle est simulée par un « *Blobby model* » (voir Annexe B).

Distribution des pigments – La distribution des pigments dépend principalement des cavités de la structure du papier et un « seuil d'accessibilité » peut être calculé afin de localiser celles-ci. « ... Ce seuil tient compte de la forme de la pointe du crayon, de la

⁵ Le talc est utilisé dans la fabrication du papier pour lui apporter douceur, porosité et opacité, en plus d'en réduire le coût.

pression appliquée, du trait et de la friabilité des pigments ». D'un point de vue géométrique, la méthode utilisée se base sur un « *Blobby model* » tenant compte des collisions.

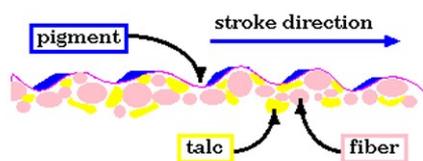


Figure 1 – Microstructure du papier et distributions des pigments [TF99]

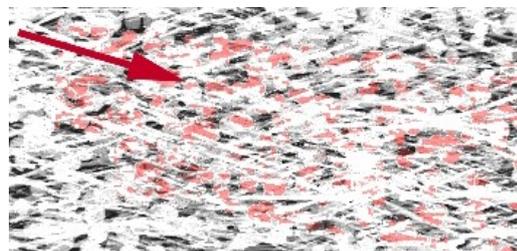


Figure 2 – Rendu des crayons de couleur [TF99]. La flèche indique la direction principale des traits.

Rendu – La microstructure du papier et des pigments est convertie en un modèle 3D qui sera *raytracé* afin de simuler la semi-transparence de la feuille de dessin et les effets de dispersion en surface. Un logiciel de visualisation volumétrique tel que VolVis permettra enfin d'afficher le rendu (Figure 2).

Analyse

L'événement est trop rare que pour ne pas être souligné: parmi tous les articles se targuant de simuler sur ordinateur une technique de dessin traditionnelle, c'est le seul qui met en relation la modélisation de la feuille et la qualité du rendu des dessins « *Étant donné que l'aspect des dessins aux crayons de couleur provient essentiellement de la texture du papier, il est crucial d'en modéliser la structure ...* ».

C'est malheureusement le seul point positif qu'il est possible de retirer de cette publication. L'article ne comporte aucune explication mathématique, montre un seul résultat (Figure 1) et est extrêmement peu détaillé: seules les grandes lignes de la démarche sont données. De plus, il ne renvoie le lecteur vers aucun éclaircissement bibliographique, ce qui m'amène à me demander si les auteurs ont réellement implémenté leur algorithme. J'aurais peut-être mieux fait de simplement traduire l'article ... parce qu'un résumé d'un condensé c'est peu de choses !

Quand bien même les détails d'implémentation seraient connus, le modèle proposé par Takagoi *et al.* serait trop coûteux en terme de volume de calculs pour pouvoir être utilisé dans une application interactive.

Colored Pencil Filter with Custom Color [YMI04]

Tout comme dans leur précédente publication [MNI02], Yamamoto *et al.* fondent leur technique sur le principe de « *Line Integral Convolution* », c'est-à-dire le brouillage sélectif d'une image de référence en fonction d'un champ de vecteur, et obtiennent ainsi un procédé automatisé de conversion pour une image donnée en un dessin aux crayons de couleur. Les différentes étapes de leur algorithme (Figure 3) sont reprises ci-dessous.

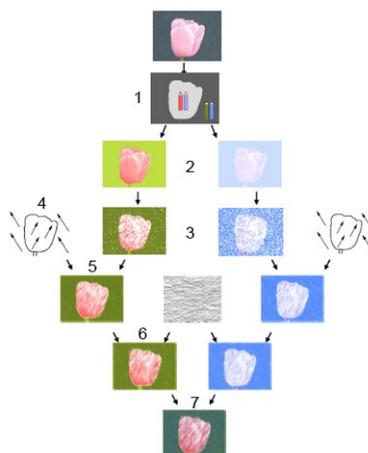


Figure 3 – Algorithme de rendu [YMI04]

- Segmentation de l'image source et choix, interactif ou automatisé, de deux couleurs pour chacune des régions obtenues
- Calcul, pixel par pixel, de la combinaison de couleurs reconstituant la couleur d'origine. Il en résulte deux images représentant pour chacune des régions la densité de chaque couleur.
- Addition de bruit blanc
- Définition d'un champ de vecteur représentant les directions des traits pour chacune des deux images
- Application du procédé de *Line Integral Convolution*
- Correction selon la texture du papier
- Union des deux images résultantes

Seules les deux dernières étapes de l'algorithme nécessitent des explications dans le cadre de ce travail.

Texture du papier – La texture de papier est une image en niveaux de gris d'une vraie feuille de dessin scannée. Partant de l'hypothèse que la matière se dépose plus vraisemblablement sur les zones représentées par des pixels d'intensité plus élevée que la moyenne de la feuille, Yamamoto *et al.* modifient en conséquence l'intensité des images obtenues à l'étape 5. L'opération inverse est appliquée aux zones d'intensité plus faible que la moyenne de la feuille.

Mélange des couleurs – Les équations qui régissent le mélange des couleurs sont celles développées par Curtis *et al.* dans la simulation d'aquarelle sur ordinateur [CAS+97] (voir Section Aquarelle, premier article).

Analyse

À la première étape de l'algorithme, le choix des deux couleurs serait bien évidemment laissé au dessinateur. C'est précisément, selon Yamamoto *et al.*, cette étape qui demande le plus de temps de calcul, toutes les autres étant temps-réel. Cependant, obliger le dessinateur à se limiter à deux couleurs ne serait pas réaliste, il faudrait donc adapter la méthode à plusieurs couleurs et déterminer si le caractère temps-réel persiste.

L'hypothèse de travail pour la texture du papier est simplement énoncée sans aucune explication ou raisonnement. Or, dans [Jeu04], je m'interrogeais déjà quant à l'origine des niveaux de gris d'une image scannée. S'agit-il réellement de cavités – plus profondes et par conséquent moins éclairées – ou s'agit-il de l'ombre des bosses due au balayage du scanner ? La question reste ouverte. Toutefois, cet article met en évidence la nécessité de prendre en compte la texture de la feuille de dessin lorsque l'objectif est de simuler un rendu réaliste.



Figure 4 – Rendu des crayons de couleur [YMI04]

Le procédé de *Line Integral Convolution* ne donne aucun résultat probant lorsqu'il est appliqué à un trait unique: dans notre cas, une autre technique doit donc être mise au point. De plus, le rendu obtenu n'est pas naturel à mon sens (Figure 4). Il est le résultat d'une hypothèse certes intuitive mais trop grossière: lors d'un dessin aux crayons de couleur, seule la technique des « petits coups successifs » est utilisée. Or, il est tout à fait possible d'obtenir, par exemple, un aplat relativement uniforme.

Real-time Pencil Rendering [LKL05]

Cette publication propose une technique de rendu temps-réel aux crayons – graphites et de couleur – d'un objet 3D en quatre phases:

Contours multiples – Cette étape a pour but de simuler une des principales caractéristiques d'un dessin au crayon: le contour d'un objet n'est pas net, il est habituellement esquissé à plusieurs reprises dans des formes légèrement différentes.

Ombre intérieur – La texture crayon utilisée pour remplir les différentes faces de l'objet reflète aussi bien l'intensité que l'épaisseur des coups de crayon: intensité et épaisseur. De plus, elle est orientée selon la direction probable des traits. Cette direction correspond à celle de l'arrête la plus longue. La génération de ces différentes textures est basée sur celle exposée par Webb *et al.* pour le rendu hachuré [WPF+02], à savoir le concept de texture 3D – un volume d'intensité qu'il est possible de couper par un plan quelconque pour en visualiser une tranche et ainsi obtenir une texture 2D. Les deux premières dimensions donnent une texture crayon de base et la troisième code le ton (Figure 5).

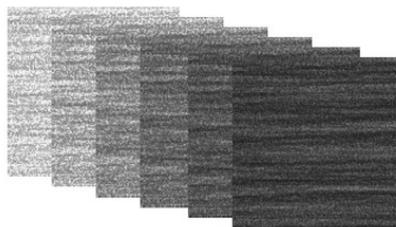


Figure 5 – Concept de texture 3D [LKL05]

L'effet de saturation du grain de la feuille dû au passage répété de la mine de crayon est modélisé par l'intensité des pixels de la texture crayon et déterminé selon:

$$\begin{aligned}c_t' &= c_t - \mu_b c_a \\ c_a &= c_t(1 - c_s)\end{aligned}$$

où c_t et c_t' sont la couleur de la texture papier, respectivement courante et modifiée, c_a est la quantité maximale de noirceur qui peut être ajoutée lors du trait et c_s est la couleur du trait. μ_b détermine la proportion de noirceur ajoutée à la couleur de la texture papier – une valeur comprise entre 0,1 et 0,3 donne les meilleurs résultats.

Lee *et al.* observent également que certains dessinateurs estompent leurs traits pour les parties de l'objet se trouvant en pleine lumière. Dès lors, pour tenir compte de cette particularité, si la couleur de la texture papier est toujours suffisamment lumineuse, elle est diminuée d'un facteur μ_w dont la valeur – toujours déterminée

expérimentalement – est comprise entre 0,3 et 0,5.

Effet du papier – La feuille de papier possède différentes propriétés comme la rugosité ou la texture qui affectent le rendu aux crayons de couleur. Afin de tenir compte de ces effets du papier, Lee *et al.* créent une texture imitant la surface du papier: un champ de hauteurs engendré par une fonction de bruit [CAS+97], champ à partir duquel, ils calculent – dans une phase de prétraitement – le plan des normales (Figure 6).

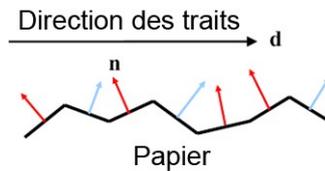


Figure 6 – Plan des normales [LKL05]

Si la direction des traits est opposée à la normale au papier, la couleur de texture de crayon est obscurcie pour simuler une plus grande quantité de pigments. Inversement, la couleur de texture est atténuée si la direction des traits est identique à celle de la normale. Ce raisonnement prend la forme mathématique suivante:

$$c_t' = c_t - \mu_p (-\mathbf{d} \cdot \mathbf{n})$$

où c_t et c_t' sont la couleur de la texture papier, respectivement, courante et modifiée, \mathbf{d} est la direction des traits et \mathbf{n} la normale au papier. Le paramètre μ_p est un facteur de pondération dont la valeur – déterminée expérimentalement – est comprise entre 0 et 0,1.

Rendu – L'image finale est obtenue par fusion de la texture intérieure avec celle des contours multiples, une projection perspective est ensuite appliquée à l'objet pour produire les images 2D (Figure 7 et 8).



Figure 7 – Rendu d'une lampe [LKL05]

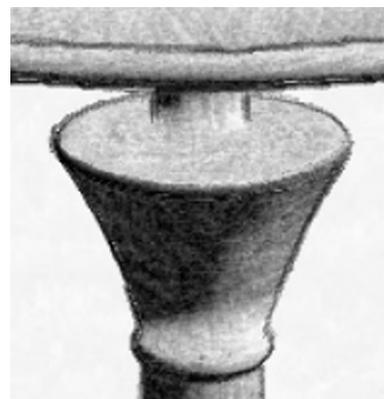


Figure 8 – détail de la figure 7 [LKL05]

Analyse

La qualité et le réalisme du rendu produit par la technique de Lee *et al.* est, il faut le dire, très convaincant. Cependant, le « coup de patte » du dessinateur n'est pas apparent: les traits des croquis sont trop parfaits, trop uniformes. Cette impression est due au fait que l'algorithme exposé ne joue que sur l'intensité des pixels d'une texture crayon donnée. Cette dernière simule bel et bien les différentes propriétés des traits, comme par exemple l'épaisseur, mais ces caractéristiques sont constantes pour chaque variation d'intensité. Or, il n'est plus à prouver que l'intensité et l'épaisseur d'un trait de crayon varient en fonction de la pression exercée. De plus, ce sentiment de dessin trop impersonnel est conforté par la quasi invisibilité des résultats de la phase dite des « contours multiples ».

Il est vrai que la méthode présentée n'est pas un simple plaquage de textures sur un objet 3D: les auteurs tiennent compte de la saturation des grains de la feuille de dessin ainsi que de l'estompage des zones éclairées. Cependant, de là à dire que la technique peut facilement être étendue aux crayons de couleur en choisissant une texture crayon de base colorée, il y a un pas. D'un point de vue personnel, mais aussi au vu des autres articles traitant du mélange des couleurs, je ne trouve pas le raisonnement simpliste. Faut-il encore rappeler au lecteur que l'accumulation de pigments sur un grain du papier ne produit pas le même effet optique que pour le graphite ?

Pour terminer, ce qu'il faut retenir de l'article c'est la possibilité d'une accélération hardware du rendu par le biais des *shaders*. Dernières fonctionnalités de programmation des cartes graphiques, les *shaders* sont des programmes utilisés pour paramétrer une partie du processus de rendu réalisé par une carte graphique: absorption, diffusion de lumière, ombrage ou autres effets. Par définition, les *shaders* sont parfaits pour une exécution parallèle permettant de soulager les unités centrales et ainsi obtenir un résultat plus rapidement. Cependant, le caractère temps-réel de la technique exposée ici est difficilement appréciable: les résultats sont donnés en termes d'images par seconde pour un nombre donné de facettes définissant l'objet et aucune mention n'est faite quant à la résolution de l'image finale.

Crayons de cire

Les crayons de cire, plus communément appelés crayons gras, sont souvent associés, à tort, aux dessins réalisés par les enfants. Le dessinateur expérimenté s'en servira pour leur couleur, légèrement transparente et plus brillante que celle des crayons de couleur classiques. Les crayons de cire sont également appréciés pour les effets de texture qu'ils permettent d'exprimer lors d'un aplat. Plus ils sont foncés, plus ils sont tendres, plus leur teneur en cire devient importante et donc mieux ils couvrent le support de dessin. Enfin, de part leur nature, les crayons gras sont souvent choisis pour mettre la touche finale, la plus forte, à un dessin. En effet, la propriété d'imperméabilisation de la cire qui les compose rend difficile l'utilisation ultérieure d'un autre outil graphique.

La littérature en matière de crayons gras est très maigre. Je n'ai pu recenser que deux articles sur les vingt dernières années, et encore, séparés de deux ans et écrits par les mêmes auteurs, Rudolf *et al.* [RMN03, RMN05]. Le plus récent sera présenté dans cette section. Il est à noter que la partie « *Previous Work* » de ces deux articles, d'ordinaire présente pour confirmer/appuyer les contributions du travail présenté, est relative soit à Adobe PhotoShop, soit à Corel Painter: les auteurs sont d'ailleurs les premiers étonnés d'être des précurseurs en matière de rendu aux crayons de cire.

A Bidirectional Deposition Model of Wax Crayons

[RMN05]

Modélisation du papier – La feuille de dessin est modélisée par un champ statique de hauteurs où chacune d'entre elles représentent un grain du papier, c'est-à-dire le plus petit élément le caractérisant. Dans ce modèle, un grain équivaut à un pixel et peut accueillir un ensemble ordonné de couches de cire définies chacune par 4 paramètres: une hauteur, une couleur, un facteur de dispersion et un facteur de transmission de la lumière.

Génération du papier – Le modèle de papier étant statique, il n'est pas nécessaire de conserver en mémoire la hauteur de chacun des grains de la feuille puisque celle-ci ne varie pas au cours du dessin. La méthode de génération est donc une texture procédurale de type lunaire [vW91], obtenue par convolution d'un quart d'anneau de cercle avec un bruit blanc, et choisie pour le compromis offert entre rugosité et cohérence.

Modélisation du crayon – Le crayon de cire est modélisé par un masque de hauteurs à deux dimensions, représentant la surface de contact avec la feuille de dessin. De par les effets de transfert de particules de cire du papier vers le crayon, ce dernier peut également posséder plusieurs couches de cire, toujours modélisées individuellement par les quatre paramètres cités ci-dessus. Initialement, chaque élément infinitésimal composant le masque du crayon contient une certaine quantité de cire qui sera la couche la plus profonde du modèle.

Interaction papier-crayon – La simulation de l'interaction entre la feuille de dessin et le crayon de cire ne repose pas sur un modèle physique mais bien sur des observations du comportement réel faites au microscope. Pour chaque position du crayon située le long du trait dessiné, l'algorithme développé peut-être résumé en quatre points:

- Compression du crayon en fonction de la pression exercée, du profil de la pointe et des hauteurs du papier en contact avec le crayon,
- Transfert de cire du papier au crayon, dû au déplacement de ce dernier et à la pression exercée,
- Étalement des couches de cire subsistantes sur le papier selon la pression appliquée et le déplacement du crayon,
- Transfert de cire du crayon au papier, c'est-à-dire dépôt d'une nouvelle couche de cire sur la feuille de dessin.

Rendu – La cire est un pigment translucide: les modèles simples de mélange additif ou soustractif des couleurs – RVB ou CMJ – ne conviennent absolument pas. par conséquent, le mélange des pigments est implémenté selon une version simplifiée du modèle de Kubelka-Munk (voir Annexe B).



Figure 9 – Rendu aux crayons de cire
[RMN05]

Analyse

D'un strict point de vue implémentation, l'article semble assez complet: tous les algorithmes y sont donnés dans leur intégralité. Cependant, ils ne sont pas tous clairement expliqués – certains choix faits par Rudolf *et al.* doivent être appliqués sans compréhension de notre part, même après lecture de leur premier article [RMN03] – et certaines données sont omises, volontairement ou non. Citons, par exemple, le cas du pas entre deux applications successives du masque du crayon le long d'un trait.

Dans l'introduction de leur article, les auteurs étaient très clairs: il s'agit d'un modèle basé sur des observations physiques et non d'un modèle physique réel. Or, le calcul de la compression du crayon est expliqué au départ de la loi de Hooke pour laquelle ils ne donnent pas explicitement le module de Young de la cire. Cependant, il est aisé de le re-calculer par combinaison des équations fournies et de trouver une valeur inférieure à celle d'un caoutchouc mou ! Pour rappel, la valeur du module de Young est proportionnelle à la dureté du matériau.

L'ordre choisi pour les étapes dans l'interaction papier-crayon n'est pas justifié dans l'article et me semble être incorrect. En effet, la couche de cire déposée lors de la dernière étape ne subira pas d'effet d'étalement dû au passage du crayon. En d'autres termes, le crayon étale d'abord les couches de cire présentes sur la feuille puis seulement, vient – délicatement – déposer par dessus la cire qui le compose.

Aucune attention n'est prêtée à la variation d'inclinaison du crayon lors du tracé. En effet, le masque modélisant la pointe de cire est fixé au début du trait et ne sera pas modifié au cours de ce dernier. Cette hypothèse de travail – très restrictive – n'est mentionnée nulle part dans l'article.

Dans l'avant-dernière partie de l'article, la section « Résultats », Rudolf *et al.* mentionnent pour la première fois les performances temps-réel de leur modèle: le rendu d'une image de 500 x 500 pixels peut prendre jusqu'à une seconde sur un Pentium 4 2.4GHz ! Il faut reconnaître qu'aucune promesse n'avait été faite à ce sujet, mais, en critiquant le manque d'interactivité des modèles développés par leur prédécesseurs, les auteurs laissaient supposer une meilleure efficacité de leur algorithme. Toujours dans cette section, les besoins en mémoire sont abordés et les auteurs reconnaissent que cela pourrait poser certains problèmes étant donné que chaque pixel demande une capacité mémoire de l'ordre de plusieurs centaines d'octets, dépendant du nombre de couches de cire déposées. Ils suggèrent alors de réduire, sans autre explication, cette capacité mémoire en fusionnant certaines couches de cire. La solution apportée au problème n'en est pas vraiment une !



Figure 10 – Rendu de vrais crayons de cire (en haut) et des crayons simulés [RMN05]

Pour finir, le réalisme du rendu obtenu est excellent du point de vue des couleurs et de leur mélange, mais il est trop régulier du point de vue de la texture des traits formée par le dépôt de cire. Peut-être est-ce dû au pas choisi entre deux applications successives du masque de la pointe du crayon le long d'un trait ou à la forme fixe de cette dernière, les détails d'implémentation sont trop vagues que pour émettre un avis tranché. La figure 10 illustre parfaitement cette sensation de traits trop parfaits: sur la ligne inférieure, le rendu simulé par Rudolf *et al.* et, sur la ligne supérieure, celui de vrais crayons gras.

Fusain

Personnellement, la toute première fois que j'ai dessiné au fusain, je maniais l'outil comme un crayon graphite et le résultat était pitoyable, les traits s'étalant au moindre contact. Mon opinion sur la technique était toute faite: « C'est nul ! ». Or, le secret du fusain réside dans le fait que les quelques traits tracés doivent être travaillés dans leur forme, en ce sens qu'il faut jouer sur la pression exercée et sur l'orientation donnée à l'outil. Le fusain est obtenu à partir du bois du saule, du tilleul ou encore de la vigne. Après séchage, il est carbonisé et différents degrés de dureté sont obtenus en fonction de la durée de combustion. Un fusain de bonne qualité se caractérise par sa couleur noire profonde, sa friabilité et sa souplesse mais ne doit pas s'émietter lors du croquis.

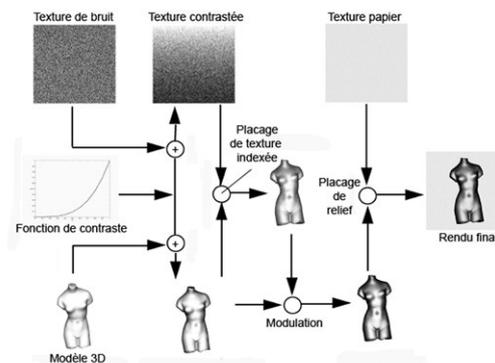


Figure 11 – Algorithme de rendu au fusain [MG02]

La simulation de dessins au fusain ne semble pas être une préoccupation majeure en matière de rendu non-photoréaliste. En effet, sur les vingt-cinq dernières années, seules deux publications sont parues à ce sujet. La plus récente [MG02] propose un algorithme temps-réel de rendu au fusain sur base d'un modèle 3D (Figure 11). Cet article ne sera pas détaillé dans le cadre de ce travail pour deux raisons. Premièrement, l'algorithme ne peut être repris dans une application interactive puisqu'il nécessite en entrée un objet 3D. Le lecteur comprendra donc avec cet exemple – si ce n'était déjà fait – la nuance faite, au début de ce document, entre une application temps-réel et interactive. Deuxièmement, les textures de fusain et de papier utilisées sont générées à partir d'une fonction de bruit à deux dimensions et ne présentent donc en aucun cas un quelconque degré de réalisme.

La deuxième publication [BSM88] exposée dans cette section, date de 1988 mais présente une technique de rendu temps-réel et interactive attendu qu'elle utilisait déjà les paramètres renvoyés par une tablette graphique.

Charcoal Sketching: Returning Control to the Artist

[BSM88]

Cette publication mérite sa place dans ce travail, non seulement parce qu'elle traite du rendu du fusain dans une application interactive mais également parce qu'elle met en évidence le désaccord entre les logiciels graphiques de l'époque et l'activité de dessin. « ... Ils [les logiciels graphiques] entraînent deux discontinuités distinctes

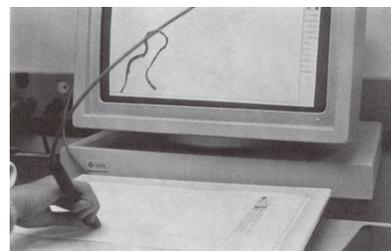


Figure 12 – Tablette graphique [BSM88]

chez l'artiste. La première est physique: l'activité de dessin doit être arrêtée pour indiquer, par exemple, au système le désir d'un outil de taille différente. La deuxième discontinuité est de nature cognitive impliquant le déchiffrement d'un menu et l'exigence d'effectuer un choix. Ces interruptions de l'activité de dessin rendent la concentration de l'artiste sur son oeuvre difficile voire impossible ... »

Rendu – La technique utilisée est la simple application d'un pattern de fusain aux différentes positions renvoyées par la tablette graphique. Différents patterns de fusain sont stockés dans une matrice tridimensionnelle, la pression exercée et les deux angles d'inclinaison déterminant les trois indices nécessaires à l'identification d'un pattern dans cette matrice. La figure 13 illustre la variation des patterns selon la pression exercée (de gauche à droite) et selon l'inclinaison du stylet (de bas en haut), la troisième dimension correspondant à une rotation propre de ceux-ci.

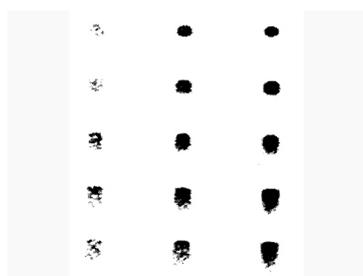


Figure 13 – Patterns de fusain [BSM88]



Figure 14 – Rendu [BSM88]

Analyse

Même si les limitations mémoires de l'époque ont induit un nombre restreint de patterns, le rendu obtenu est impressionnant pour l'époque. Bleser *et al.* ont envisagé d'effectuer une interpolation entre deux positions renvoyées par la tablette, pensant ainsi se débarrasser de la contrainte de lenteur nécessaire au rendu d'un trait continu, mais la puissance de calcul de l'époque ne permettait plus de travail en temps-réel.

Feutres ou marqueurs

Aucun algorithme de rendu de dessins aux feutres ou marqueurs⁶ n'a encore été proposé à ce jour. La technique dite « *Hatching* » pourrait s'apparenter à un dessin réalisé uniquement au fin feutre noir: souvent utilisée pour des illustrations scientifiques, elle consiste à tracer des séries de lignes courtes et parallèles formant une hachure dont les tons varient selon l'espacement et le type des traits (Figure 15). Cependant, comme l'illustre aussi bien la récente publication de Zander *et al.* [ZIS+05] que les plus anciennes, le souci premier est de choisir judicieusement le type et l'intensité des traits de manière à faire ressortir le volume d'un objet tridimensionnel donné en entrée (Figure 16). Il n'y a pas de modèle de la feuille de dessin, ni de la pointe du feutre. Une description des différentes méthodes proposées dans le domaine n'apporterait aucune piste supplémentaire pour la modélisation des feutres. Cependant, le processus inverse, c'est-à-dire déterminer le volume d'objet sur base des différentes hachures utilisées, sera lui très utile pour la partie de la thèse concernant la reconstruction tridimensionnelle.



Figure 15 – Type de traits [ZIS+05]



Figure 16 – Rendu « hatching » [ZIS+05]

À bien y regarder, le rendu des dessins aux feutres, lorsque ceux-ci sont de couleurs, est finalement assez proche de celui obtenu à l'aquarelle: la texture du papier



Figure 17 – Dessin aux marqueurs, Brooke Morgan

reste visible sous les traits qui forment comme un voile transparent coloré (Figure 17). Au vu de cette analogie et de l'absence de littérature concernant les marqueurs colorés, nous allons nous intéresser dans la section suivante à l'aquarelle. Toutefois, il faut garder à l'esprit que le but final de la future application dans le cadre de ce travail, est de permettre à un concepteur d'exprimer une idée, un concept via le dessin à main levée et ce avec les outils présents habituellement dans son plumier, et donc n'est pas forcément de remplir toute la surface de dessin. L'emploi de feutres colorés pour une mise en couleurs du croquis n'est donc pas notre souci premier.

⁶ Un marqueur est, selon le petit Larousse Illustré, un crayon-feutre formant un très large trait

Aquarelle

La peinture à l'aquarelle n'est comparable à aucune autre technique graphique: la transparence de l'aquarelle laisse filtrer le blanc du papier et lui confère cette luminosité et ce brillant inégalés. Mais cette transparence exige un savoir-faire qu'un novice ne saurait maîtriser sans apprentissage. D'une part, avec l'aquarelle, une couleur foncée ne peut être recouverte d'une couleur claire, il faut donc travailler du plus clair au plus foncé. D'autre part, cette contrainte suppose une démarche organisée dont la réussite ne tolère aucune retouche: le seul blanc disponible est celui du papier.

En aquarelle, le papier joue un rôle important mais l'eau n'est pas en reste: elle peut modifier radicalement l'aspect des croquis en fonction de ce qu'elle contient réellement. Tout bien considéré, c'est elle l'ingrédient principal d'une peinture à l'aquarelle ! L'eau du robinet, légèrement chlorée, attaque les pigments et accentue l'impression de matité, de blancheur au séchage même s'il faut reconnaître qu'une exposition prolongée aux ultra-violets a plus d'influence sur la décoloration de l'aquarelle. L'eau distillée, ou du moins l'eau déminéralisée, est à préférer car elle contient moins d'éléments pouvant être source d'altérations. Signalons pour finir qu'il est possible d'augmenter le temps de séchage par addition de glycérine et de le diminuer avec de l'alcool à 90°.

Cette section comporte deux analyses bibliographiques. Tout d'abord, l'article de Curtis *et al.* [CAS+97] qui, bien que ne décrivant pas un procédé temps-réel, fait figure de référence dans le domaine du rendu à l'aquarelle tant la qualité et le réalisme des résultats atteints sont stupéfiants. Ensuite, nous aborderons les travaux réalisés par Van Laerhoven *et al.* [VLV04] qui se fixent comme objectif premier, et ambitieux, de trouver les simplifications nécessaires pour rendre l'algorithme développé par Curtis *et al.* temps-réel sans pour autant perdre en réalisme.

Computer-Generated WaterColor [CAS+97]

Modélisation du papier – Les mécanismes physiques qui régissent l'écoulement des fluides, l'effet de cerne ou encore la granulation dans de vraies aquarelles sont fortement influencés par la structure du papier, puisqu'ils dépendent de la disposition des fibres de papier l'une par rapport à l'autre. Cependant, Curtis *et al.* modélisent la feuille de dessin plus simplement, par un champ de hauteurs représentant le relief de la feuille et généré par une technique procédurale, c'est-à-dire basée sur une fonction mathématique (Figure 18). De plus, à chacune des hauteurs est associée sa capacité de rétention de fluide.



Figure 18 – Textures de papier [CAS+97]

Interaction papier-eau-pigments – Curtis *et al.* modélisent une aquarelle par un ensemble de lavis, fines couches de couleurs délayées dans de l'eau, entremêlés sur une feuille de papier possédant une certaine rugosité. Chaque lavis contient différents pigments en différentes quantités couvrant diverses parties de la feuille et est représenté, de haut en bas, par une couche dite de surface, une autre de dépôt et enfin une couche capillaire (Figure 19).

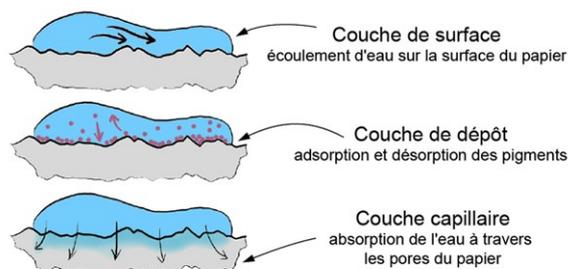


Figure 19 – Différentes couches d'un lavis [CAS+97]

La couche de surface est peu profonde, les pigments et l'eau y flottent au-dessus de la surface du papier dans une région délimitée appelée masque de zone humide. Lors du passage de l'eau, des pigments sont happés de la couche de dépôt, transportés un peu plus loin et enfin redéposés dans la couche de dépôt. La simulation de ce processus requiert de connaître, outre le masque de zone humide, la vitesse, la direction d'écoulement et la pression de l'eau, la concentration en pigments, le gradient du papier ainsi que certaines propriétés physiques des milieux aqueux telles que la viscosité et la traînée de viscosité. Le transfert entre les couches de surface et de dépôt se fait soit par adsorption, soit désorption. Le taux d'échange est affecté par les propriétés physiques des pigments que sont la densité, le pouvoir colorant et la granularité. Enfin, la couche

capillaire absorbe l'eau et la diffuse à travers les pores du papier par capillarité, étendant ainsi le masque de zone humide. Cet accroissement de la zone dite humide tient compte de la saturation du papier en eau et de sa capacité de rétention de fluide.



Figure 20 – Rendu à l'aquarelle [CAS+97]

Rendu – Dès la fin des calculs relatifs au processus de circulation d'eau et des pigments, le rendu optique est déterminé sur base d'une version simplifiée de la théorie de Kubelka-Munk (voir Annexe B). Elle permet l'analyse des phénomènes de diffusion de la lumière à une échelle macroscopique du matériau et explique la formation du spectre réfléchi d'un corps coloré, en se basant sur les fonctions de diffusion et d'absorption propres au matériau, en admettant que la lumière y est diffusée de manière isotropique à l'intérieur. Ainsi, à chaque pigment sont associés deux coefficients, K et S : un d'absorption et un de diffusion. Ces coefficients contrôlent la fraction d'énergie respectivement absorbée et diffusée dans la couche de dépôt par unité de distance. Curtis *et al.* définissent, dans leur modèle, pour chaque composante RVB, des coefficients K et S , soit au total six par pigment. D'ordinaire, ceux-ci sont déterminés de manière pratique au moyen d'appareils de mesure spécifiques. Cependant, il est absurde de laisser cette tâche à l'utilisateur ou de ne fournir qu'une gamme restreinte de couleurs. La solution envisagée dans cette publication est d'inviter l'utilisateur à choisir l'apparence de la couleur voulue d'un pigment sur une surface blanche et sur une surface noire. Ces deux paramètres RGB déterminés, soient R_w et R_b , les valeurs de K et S peuvent être obtenues par simple inversion des équations de Kubelka-Munk.

$$S = \frac{1}{b} \cdot \operatorname{arccoth} \left(\frac{b^2 - (a - R_w)(a - 1)}{b(1 - R_w)} \right)$$

$$K = S(a - 1)$$

$$\text{où } a = \frac{1}{2} \left(R_w + \frac{R_b - R_w + 1}{R_b} \right) \text{ et } b = \sqrt{a^2 - 1}$$

Analyse

Cette publication est d'une manière générale complète et détaillée. En effet, elle passe en revue bon nombre des effets qu'il est possible d'obtenir avec l'aquarelle et tous les algorithmes, ainsi que les explications nécessaires à leur compréhension, y sont donnés. De plus, alors qu'aucun des auteurs ne dit être un aquarelliste – même occasionnel, le vocabulaire utilisé est précis, propre à l'aquarelle: lavis, effet de cerne, granulation, glacis, phénomène d'adsorption ou de désorption, etc. Il n'est dès lors pas étonnant de retrouver cet article comme référence majeure dans toutes les publications ultérieures concernant l'aquarelle.

Cependant, il est nécessaire de faire quelques observations. Ainsi, même si Curtis *et al.* sont bien conscients que leur modèle n'est pas exact d'un strict point de vue physique, mais qu'au vu des résultats obtenus, il peut être considéré comme une approximation physique acceptable, aucune mention n'est faite au sujet de grandeurs comme la traînée de viscosité ou les propriétés des pigments que sont la densité, le pouvoir couvrant et la granularité. Les valeurs correspondent-elles réellement aux grandeurs physiques: mêmes unités et ordres de grandeur ? Sont-elles déterminées de manière empirique, laissées à l'utilisateur ou fournies par les fabricants qui en refusent la publication ?

Pour finir, notons que toute la partie algorithmique concernant l'écoulement des fluides et le mélange physique des pigments au sein d'un même lavis ne peut être exécutée en temps-réel, rendant son utilisation au sein d'une application interactive impossible. C'est pourquoi je n'ai pas jugé utile de la détailler dans le cadre de ce travail. De plus, depuis la date de publication de cet article, d'autres scientifiques se sont penchés sur le problème et, nous le verrons plus loin, tentent par simplification d'en améliorer les performances. Il faut tout de même souligner que la composition optique de plusieurs couches de glacis selon la théorie de Kubelka-Munk est quant à elle tout à fait temps-réel et apporte une solution au problème du mélange des couleurs rencontré par certains logiciels étudiés dans la section précédente.

A Paper Model for Real-Time Watercolor Simulation

[VLV04]

Partant du constat que les techniques de simulation d'aquarelles développées jusqu'à présent ne conviennent pas pour des applications interactives puisqu'elles ne peuvent être exécutées en temps-réel, Van Laerhoven *et al.* se proposent d'améliorer les performances des algorithmes qui régissent le phénomène d'écoulement des fluides dans [CAS+97] sur base du récent travail de Stam [Stam01, Stam03] à ce sujet.

Modélisation du papier – La surface du papier est représentée par une grille 2D de cellules. À chacune d'entre elles sont associées une hauteur de papier et une capacité maximale de rétention d'eau.

Interaction papier-eau-pigments – Van Laerhoven *et al.* ont donc repris le modèle des trois couches proposé dans [CAS+97]: une couche de surface où l'eau stagne, une couche de dépôt des pigments et enfin une couche capillaire dans laquelle l'eau est absorbée par les pores du papier. Les algorithmes gouvernant les phénomènes liés à ces trois couches sont quant à eux simplifiés pour atteindre des performances temps-réel.

Couche de surface – L'état du champ des vitesses définissant le mouvement d'un fluide peut être exprimé par l'équation suivante, qui est une variante de l'équation de Navier-Stokes [Stam03]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \eta / \rho \nabla^2 \vec{v} \quad (1)$$

L'algorithme proposé par Van Laerhoven *et al.* peut être divisé en trois étapes pour chaque *step time*.

- Le champ des vitesses \vec{v} se modifie selon le déplacement propre de l'eau, l'advection, représenté par le terme $-(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$, le second terme $\eta / \rho \nabla^2 \vec{v}$ correspondant lui au phénomène de diffusion. Les vitesses induites par le mouvement du pinceau peuvent simplement être additionnées au champ des vitesses au début de chaque *step time*. Le calcul de la vitesse résultant de la diffusion revient à inverser la matrice creuse $(I - \eta / \rho \Delta t \nabla^2) \vec{v}_{new} = \vec{v}_{old}$ où I est la matrice identité.
- L'évolution au cours du temps des quantités d'eau w est modélisé par l'équation suivante:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) w + v_w \nabla^2 w \quad (2)$$

L'analogie avec l'équation (1) est évidente: le terme $-(\vec{v} \cdot \nabla) w$ décrit le phénomène d'advection et $v_w \nabla^2 w$ celui de diffusion. Cependant, il faut tenir compte de l'uniformisation des hauteurs d'eau de chaque cellule du au fait que l'eau se répand. Donc, au champ des vitesses calculé précédemment, \vec{v}_i , vient s'ajouter un deuxième champ des vitesses, \vec{v}_h , résultant de la diffusion de l'eau à la surface du papier:

$$\vec{v} = \omega_i \vec{v}_i + \omega_h \vec{v}_h \quad \text{où} \quad \omega_i + \omega_h = 1$$

Pour chaque cellule, le volume d'eau qui s'écoule vers la cellule voisine dépend de la valeur du champ des vitesses des deux cellules. En effet, la vitesse de déplacement de l'eau en tout point de la frontière entre les deux cellules peut être considérée comme égale à la moyenne des vitesses. Ainsi, la variation de la quantité d'eau de la cellule i, j s'exprime par

$$\Delta w = \frac{\vec{v}_{moy} \Delta t w_{i,j}}{largeur_{i,j}}$$

L'évaporation est le dernier phénomène à venir modifier la quantité d'eau d'une cellule. À chaque *step time*, un volume d'eau proportionnel au taux d'évaporation de la couche de surface, $\epsilon_{surface}$, disparaît de chaque cellule: $\Delta V = \epsilon_{surface} \Delta T V_{i,j}$

– Le champ des vitesses ne gouverne pas uniquement le déplacement de l'eau mais également celui des quantités de pigment p_{idx} :

$$\frac{\partial p_{idx}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) p_{idx} + v_p \nabla^2 p_{idx} \quad (3)$$

À nouveau, les deux termes du membre de droite de l'équation (3) représentent respectivement les phénomènes d'advection et de diffusion des pigments. Par analogie, les nouvelles quantités de pigments résultant de la diffusion sont obtenues par inversion de la matrice creuse: $(I - v_p \Delta t \nabla^2) p_{idx,new} = p_{idx,old}$ où I est la matrice identité et v_p le taux de diffusion du pigment. La proportion de pigments déplacés suite à l'advection s'exprime donc par:

$$\Delta p_{idx} = \frac{\vec{v}_{moy} \Delta t (p_{idx})_{i,j}}{largeur_{i,j}}$$

Couche de dépôt – Il y a un transfert continu de pigments entre la couche de surface et celle de dépôt, mais c'est cette dernière qui conserve la quantité de pigments déposés p_{idx} sur chaque cellule. La granulation γ_{idx} et la densité δ_{idx} influencent la quantité de pigment transférés selon la hauteur h du grain du papier. Le pouvoir couvrant, ω_{idx} , détermine quant à lui la résistance du pigment à repasser dans la couche de surface. Étant donné ces considérations, les pigments sont adsorbés et désorbés selon les équations suivantes:

$$\Delta p_{ad} = \Delta t (p_{idx} (1 - w_{frac}) (1 - h \gamma_{idx}) \delta_{idx})$$

$$\Delta p_{de} = \Delta t (p_{idx} w_{frac} (1 - (1 - h) \gamma_{idx}) \delta_{idx} / \omega_{idx})$$

où w_{frac} représente la quantité d'eau présente dans la couche de surface.

Couche capillaire – L'eau déposée suite à un passage du pinceau est graduellement absorbée par le papier. À chaque *step time*, une certaine quantité d'eau est transférée de la couche de surface à la couche capillaire selon un taux d'absorption α , soit $\Delta w = \alpha \Delta t$. L'eau présente dans la couche capillaire s'étend aux cellules voisines selon un processus de diffusion identique à celui décrit dans la couche de surface, puis finit par disparaître selon le taux d'évaporation ϵ_{cap} , soit $\Delta w = \epsilon_{cap} \Delta t$

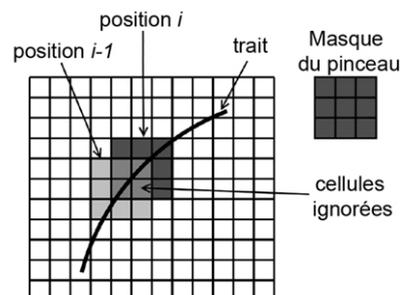


Figure 21 – Application du masque le long d'un trait [VLV04]

Modélisation du pinceau – La modélisation du pinceau a peu d'influence sur l'algorithme décrit dans l'article et est intentionnellement simple: un masque de forme circulaire ou carrée. Lors du tracé, le centre de ce masque est appliqué au centre de chaque cellule composant le trait original (Figure 21). Cependant, afin d'éviter une accumulation d'eau et de pigments trop importante, les cellules déjà touchées par l'application du masque à la position précédente sont ignorées, c'est-à-dire qu'elles ne recueillent plus d'eau ou de pigments supplémentaires.

Rendu – Le rendu de l'image finale est obtenu en déterminant la couleur de chaque cellule dans la couche de dépôt. Étant donné que chaque pigment est décrit en termes de ses composantes rouge, verte et bleu et que la concentration en pigments dans une cellule est exprimée comme une fraction de la surface de cellule, la couleur de la cellule est calculée en additionnant simplement les fractions de chaque composante RVB.



Figure 22 – Rendu [VLV04]

Analyse

Trois remarques récapitulent ce qu'il faut retirer de cet article. Tout d'abord, une implémentation directe des algorithmes décrits n'est pas envisageable: certaines valeurs de paramètres sont – comme dans beaucoup d'autres publications – volontairement ou non, oubliées. Ainsi, quelle la valeur de la densité et de la viscosité du mélange eau-pigment, du taux d'évaporation de la couche de surface, du celui de la couche capillaire, de la proportion d'eau ou de pigment déposée lors du passage du pinceau, etc ? En supposant même que tous ces paramètres soient normalisés, comment en déterminer la bonne combinaison permettant également d'atteindre ce rendu à l'aquarelle ?

Deuxièmement, un mélange des couleurs basé sur la synthèse additive n'est pas représentatif de la réalité puisque dans ce cas l'accumulation de pigments finit par refléter une couleur noire. Étant donné que les auteurs sont repartis du travail de Curtis *et al.* [CAS+97], où ces derniers affirmaient que le rendu optique du mélange des couleurs selon la théorie de Kubelka-Munk pouvaient être exécuté en temps-réel, pourquoi avoir fait « marche à arrière » de ce point de vue là ? Aucune explication n'est donnée si ce n'est que Van Laerhoven *et al.* se sont essentiellement consacrés à rendre le procédé de simulation d'aquarelle interactif.

Et enfin, les performances temps-réel annoncées sont-elles vraiment atteintes ? Il y a lieu de se poser la question ! Tout au long de l'article, Van Laerhoven *et al.* ne parlent ni de la résolution de la feuille de dessin, ni même du nombre de pixels représentant un grain du papier mais bien en termes de « cellules » et, ce n'est qu'à l'avant-dernière section de la publication qu'une légende nous indique « ... *image de dimension 400 × 400 cellules. Chaque cellule couvrant exactement un pixel ...* ». Par conséquent, en choisissant une résolution de 200 dpi, correspondant à une qualité d'impression brouillon, la taille réelle de l'image est de 2 × 2 pouces. Les besoins en mémoire évoqués jusqu'ici dans d'autres articles sont bien évidemment amenuisés par la taille de la surface de travail et nul doute que l'application est, dans ce cas, temps-réel ...

Discussion

Au vu des analyses logicielles et bibliographiques, le concept le plus réaliste de modélisation de l'interaction inter-outils est celui des couches de pigments déposées successivement sur la feuille de dessin. Les étapes de cette interaction pourront donc se baser en partie sur celles développées dans le cadre de mon travail de fin d'études, en tenant compte toutefois de la nature des outils graphiques: les quantités de mine ne sont plus simplement additionnées mais chaque outil graphique dépose sur le grain une couche de pigments. La modification du grain par l'outil graphique se détaille donc comme suit:

- Calcul de la quantité maximale de pigments pouvant être ajoutée. Cette quantité varie selon le nombre et la nature des couches de pigments sous-jacentes. Par exemple, la saturation du grain interviendra dans le cas des crayons graphites ou de couleur. De même, si la dernière couche consiste en du crayon gras et qu'elle est suffisamment épaisse, il ne sera pas possible de venir ajouter de l'encre ou de l'aquarelle, vu l'imperméabilité de la cire.
- Calcul de la quantité réelle de pigments déposés, c'est-à-dire détermination de la hauteur de la couche de pigments.
- Endommagement du grain selon l'outil graphique et la pression subie.

En ce qui concerne le rendu du mélange des couleurs, les logiciels étudiés n'apportent aucune solution réaliste. Par contre, la littérature nous montre la voie à suivre en ce domaine. Curtis *et al.* sont les premiers à proposer la théorie de Kubelka-Munk pour le rendu d'aquarelles [CAS+97]. Cependant, la spécificité de leur approche et l'absence du caractère temps-réel de leur application ont fait oublier cette théorie pendant quelque temps. En effet, de plus récents articles [RMN05, YMI04] l'évoquent à nouveau avec une excellente qualité de rendu obtenue en temps-réel et nous confortent dans l'idée d'intégrer ce procédé à notre future application.

Reste le problème majeur de la modélisation de la feuille de dessin. À l'échelle macroscopique, la feuille de papier est un objet tout à fait anodin, qui, à l'échelle microscopique, devient d'une complexité extraordinaire. Malgré son apparente uniformité à l'oeil nu, le papier n'est pas un milieu continu (Figure 1). En effet, il est composé d'une multitude de fibres entremêlées arbitrairement: une feuille de dessin de format A4 en possède environ 150000. Ces fibres donnent au papier une certaine cohérence par le biais de liaisons chimiques.

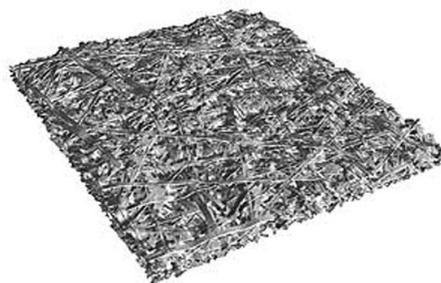


Figure 1 – Modélisation 3D du réseau de fibres d'une feuille de papier (École Française de Papeterie et des Industries Graphiques)

Une modélisation tridimensionnelle du réseau fibreux composant la feuille de papier, comme l'ont envisagé Takagoi *et al.* dans [TF99], semble donc être la meilleure démarche à suivre pour rester, d'un point de vue informatique, au plus près de la réalité. Cependant, la quantité de données à prendre en compte et le temps de calcul nécessaire lors de l'interaction de ce modèle 3D avec un outil graphique quelconque n'en font pas un concept judicieux. Restant tout de même persuadée qu'il est impératif de simuler le papier pour obtenir non seulement un rendu de bonne qualité mais également un comportement réaliste de l'interaction entre celui-ci et les outils de dessin, l'approche adoptée dans le cadre de ce travail reste celle déjà décrite dans [Jeu04], à savoir modéliser la feuille de dessin par une texture représentant son relief.

Dans le cadre de mon travail de fin d'études, la feuille de dessin virtuelle était générée selon la méthode dite du « *quilting* avec découpe d'erreur minimum », technique habituellement réservée au placage de textures sur des objets tridimensionnels. Elle consiste à synthétiser une nouvelle texture visuellement semblable à un échantillon donné en accolant des morceaux, *patches*, issus de cet échantillon et se recouvrant partiellement. Lors du processus de synthèse, un nouveau *patch* est choisi en fonction de sa correspondance avec la zone de recouvrement, puis découpé le long de cette frontière selon le chemin d'erreur minimum (Figure 2). Cette technique génère un papier très réaliste étant donné qu'à chaque synthèse apparaît une nouvelle feuille visuellement semblable aux précédentes mais pas exactement identique, précisément comme dans la réalité pour des feuilles de dessin issues d'un même bloc. Cependant, du au temps de

recherche nécessaire pour trouver le *patch* candidat dans l'échantillon initial, elle limitait très fortement la taille de la zone de travail. En considérant de surcroît qu'un « effet multi-papier » comme proposé dans les logiciels ArtWeaver et Painter™ IX serait un bénéfice informatique par rapport à la réalité, il y a lieu de réfléchir à une toute autre approche de la feuille de dessin virtuelle.

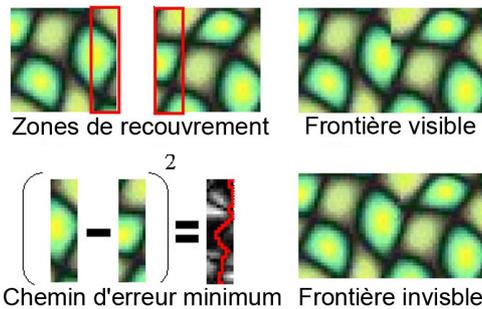


Figure 2 – Quilting avec découpe d'erreur minimum

La figure 3 est une esquisse de chaise réalisée sur un vrai papier avec un fin feutre noir et illustre parfaitement le genre de croquis envisagé comme entrée du module de reconstruction 3D de notre futur application. À force de la regarder, une remarque m'est venue à l'esprit: la feuille de dessin est quasiment vierge. En effet, après analyse de son histogramme, 16.37% de la zone de travail contient l'information utile: les traits. Par conséquent, la démarche adoptée auparavant, non seulement très coûteuse en temps de calcul, synthétisait une feuille virtuelle dont uniquement un quart serait utilisé dans le meilleur des cas. Quel gâchis ! La nouvelle approche envisagée, fondée sur cette observation, synthétise la feuille de dessin exclusivement là où elle est utile c'est-à-dire sous les traits. Avant de décrire cette méthode un peu plus en détail, le lecteur assidu aura déjà noté l'économie au niveau des ressources mémoire qu'il est possible d'envisager.



Figure 3 – Croquis de chaise, Matthew Hilton

Étant donné que notre feuille de dessin n'apparaît que sous la plume du dessinateur et donc en même temps que le trait lui-même, il est primordial de développer un algorithme de génération suffisamment performant. En effet, l'application doit rester interactive et, lors d'un trait, un certain laps de temps est déjà consacré aux calculs du rendu graphique de l'outil de dessin. De plus, en tenant compte de la progression sans cesse croissante des cartes mères multiprocesseurs mises sur le marché, l'architecture de notre application s'oriente donc vers le *multithreading* (Figure 4).

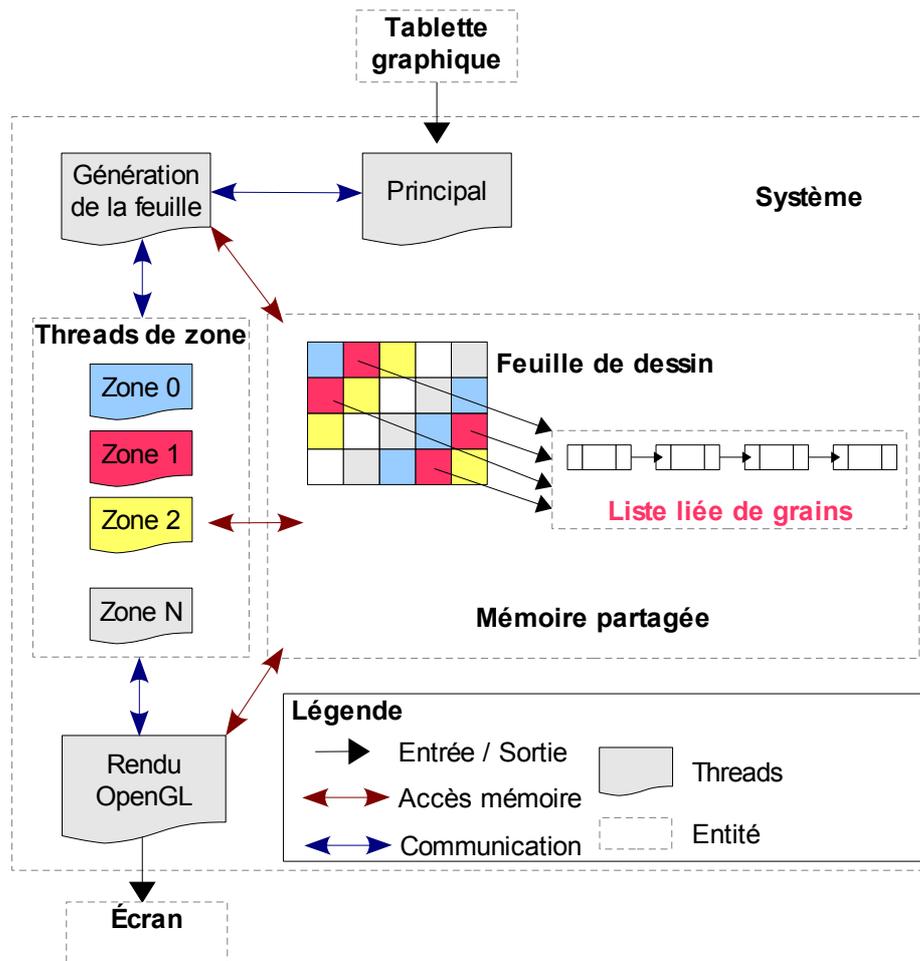


Figure 4 -- Architecture de la future application

L'architecture de notre système est composée d'un *thread* principal gérant les événements utilisateur et délégrant les tâches relatives à la structure du papier aux *threads* secondaires que sont celui de génération de la feuille et celui du rendu OpenGL. L'espace de dessin est divisé en zones non-jointives, chacune étant gérée par un *thread* et utilisant une liste liée pour collationner les grains qui la compose. Toutes ces listes liées sont stockées dans une mémoire partagée accessible par tous les *threads*.

Pour chaque nouveau trait, le *thread* principal se charge de générer le masque représentant la surface de contact entre la feuille de dessin et la pointe de l'outil graphique. Ensuite, pour chaque position du stylet – réelle ou interpolée, ce masque est déformé selon α et β , les deux angles d'inclinaison, et la pression P y est distribuée. Enfin, le *thread* principal envoie au *thread* de génération de la feuille de dessin la pression appliquée et les coordonnées de chaque grain de la feuille interagissant avec le masque. La séquence des actions effectuées par les différents *threads* secondaires est résumée à la figure 5.

Génération de la feuille	Zone <i>i</i>	Rendu
1. Réception des données concernant le grain affecté par l'outil graphique utilisé 2. Détermination de la zone concernée par le grain → <i>i</i> 3. Envoi des coordonnées du grain à la Zone <i>i</i> 6. Génération des propriétés du grain	4. Recherche du grain dans la liste liée qui lui est associée 5. • Si le grain est absent, demande de génération de ses propriétés. • Si le grain est présent, passage à l'étape 7. 7. Interaction grain – outil graphique	8. Rendu du grain selon la théorie de Kubelka-Munk

Figure 5 -- Séquence des actions effectuées pour un grain affecté par un outil graphique donné

Pendant cette séquence, les zones non-concernées par le grain affecté trient leur liste liée afin d'optimiser, lorsque leur tour viendra, la recherche de l'étape 4. Ce tri peut être à tout moment arrêté si la zone reçoit un grain à traiter.

La génération des propriétés du grain dont il est question au point 6 consiste essentiellement à déterminer sa hauteur en fonction de celle de ses voisins immédiats. Dans notre approche texturée du relief de la feuille de dessin, cette hauteur est modélisée par une certaine teinte de gris. L'échantillon de texture initial fournit l'ensemble des voisinages admissibles, et déterminer la hauteur d'un grain revient donc à y sélectionner celui qui correspond le mieux au voisinage du grain considéré. La méthode de recherche est basée sur la quantification vectorielle [GG92].

Pour terminer cette discussion, l'un des objectifs du LuciD Group étant de concevoir des outils ergonomiques et naturels pour les concepteurs, l'interface graphique du logiciel ArtRage constituera notre source d'inspiration. Sa limpidité et son aspect aussi intuitif qu'un plumier renversé sur une table nous rappellent une fois de plus qu'une interface graphique doit être adaptée à son utilisateur, et non l'inverse.

Annexe A

Conversion RGB vers CMJ

```
(RGB), (CMY) ∈ [0..1]
function RGB2CMY(R, G, B) | [
    C=1-R
    M=1-G
    Y=1-B
]
```

Conversion CMJ vers RGB

```
(RGB), (CMY) ∈ [0..1]
function CMY2RGB(C, M, Y) | [
    R=1-C
    G=1-M
    B=1-Y
]
```

Conversion CMJ vers CMJN

```
(CMY), (CMYK) ∈ [0..1]
function CMY2CMYK(C, M, Y) | [
    K=1
    if C < K → K=C
    [] C ≥ K → SKIP
    fi
    if M < K → K=M
    [] M ≥ K → SKIP
    fi
    if Y < K → K=Y
    [] Y ≥ K → SKIP
    fi
    if K=1 → C=M=Y=0
    [] K ≠ 1 → C=(C-K)/(1-K)
        M=(M-K)/(1-K)
        Y=(Y-K)/(1-K)
    fi
] |
```

Conversion CMJN vers CMJ

```
(CMY), (CMYK) ∈ [0..1]
function CMYK2CMY(C, M, Y, K) | [
    C=(C(1-K)+K)
    M=(M(1-K)+K)
    Y=(Y(1-K)+K)
] |
```

Conversion RGB vers HSL

```
(R G B), (H S L) ∈ [0..1]
function RGB2HSL(R, G, B) | [
    max = maximum(R, G, B)
    min = minimum(R, G, B)
    Δ = max - min
    L = (max + min) / 2
    if Δ = 0 → H = S = 0
    [] Δ ≠ 0 → if L < 0,5 → S = Δ / (max + min)
                [] L ≥ 0,5 → S = Δ / (2 - max - min)
    fi
    r' = 0,5 + (max - R) / (6 Δ)
    g' = 0,5 + (max - G) / (6 Δ)
    b' = 0,5 + (max - B) / (6 Δ)
    if max = R → H = b' - g'
    [] max = G → H = (1/3) + r' - b'
    [] max = B → H = (2/3) + g' - r'
    fi
    if H < 0 → H = H + 1
    [] H > 1 → H = H - 1
    [] H > 0 and H < 1 → SKIP
    fi
fi
]
```

Conversion HSL vers RGB

$(RGB), (HSL) \in [0..1]$

```
function HSL2RGB(H, S, L) | [  
if S=0 → R=G=B=L  
[] S≠0 → if L<0,5 → temp1=L*(1+S)  
[] L≥0,5 → temp1=(L+S)-(S*L)  
fi  
temp2=2L-temp1  
R=H2RGB(temp1, temp2, H+(1/3))  
G=H2RGB(temp1, temp2, H)  
B=H2RGB(temp1, temp2, H-(1/3))  
fi  
]|  
  
function H2RGB(V1, V2, H) | [  
if H<0 → H=H+1  
[] H>1 → H=H-1  
[] H>0 and H<1 → SKIP  
fi  
if 6H<1 → return V1+6H(V2-V1)  
[] 2H<1 → return V2  
[] 3H<2 → return V1+((2/3)-H)(V2-V1)  
[] 3H≥2 → return V1  
fi  
]|
```

Conversion RGB vers HSV

```
(R G B), (H S V) ∈ [0..1]
function RGB2HSV(R, G, B) [|
    max = maximum(R, G, B)
    min = minimum(R, G, B)
    Δ = max - min
    V = max
    if Δ = 0 → H = S = 0
    [] Δ ≠ 0 → S = Δ / max
        r' = 0,5 + (max - R) / (6 Δ)
        g' = 0,5 + (max - G) / (6 Δ)
        b' = 0,5 + (max - B) / (6 Δ)
    if max = R → H = b' - g'
    [] max = G → H = (1/3) + r' - b'
    [] max = B → H = (2/3) + g' - r'
    fi
    if H < 0 → H = H + 1
    [] H > 1 → H = H - 1
    [] H > 0 and H < 1 → SKIP
    fi
fi
|]
```

Conversion HSV vers RGB

```
(RGB), (HSV) ∈ [0..1]
function HSV2RGB(H,S,V) [|
  if S=0 → R=G=B=V
  [] S≠0 → if H=1 → h=0
  [] H≠1 → h=6H
  fi
  i=floor(h)
  V1=V*(1-S)
  V2=V*(1-S(h-i))
  V3=V*(1-S(1-(h-i)))
  if i=0 → R=V
  G=V3
  B=V1
  [] i=1 → R=V2
  G=V
  B=V1
  [] i=2 → R=V1
  G=V
  B=V3
  [] i=3 → R=V1
  G=V2
  B=V
  [] i=4 → R=V3
  G=V1
  B=V
  [] i=5 → R=V
  G=V1
  B=V2
  fi
fi
|]
```

Annexe B

Bloby model

Dès 1982, James Blinn a commencé à explorer des techniques pour modéliser les structures moléculaires, qui sont souvent représentées par un assemblage de boules et de bâtons. Les approches conventionnelles, modélisant de telles formes par l'intermédiaire de surfaces bicubique ou quadratique, deviennent très difficiles lorsque les molécules sont quelque peu complexes. Pour cette raison, Blinn a développé un modèle mathématique qui ressemble, dans sa forme, à la simulation des cartes de densité électronique [Bli82]. La mécanique quantique représente l'électron dans un atome comme une fonction de densité de la position spatiale. Une fonction simple pour l'atome l'atome d'hydrogène est donnée par:

$$D(x, y, z) = \exp(-ar)$$

où $r = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}$ et (x_1, y_1, z_1) la position de l'atome

Pour représenter un ensemble d'atomes, il suffit de sommer la contribution de chaque atome pris séparément. La fonction prend alors la forme suivante:

$$D(x, y, z) = \sum_i b_i \exp(-a_i r_i)$$

où r_i est la distance séparant (x, y, z) du centre de l'atome i

Une surface peut ainsi être définie par les points où la fonction de densité égale un certain seuil T

$$F(x, y, z) = D(x, y, z) - T$$

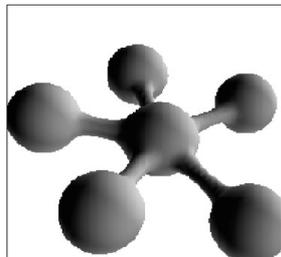


Figure 1 – Forme modélisée en utilisant le « Bloby model »

Théorie de Kubelka-Munk

Établissement des équations

Soit une couche en suspension dans l'air d'un matériau donné et uniformément illuminée d'un côté, disons le dessus, par de la lumière incidente diffuse d'intensité I . En supposant que le matériau considéré ait un facteur de réflexion R_0 et un facteur de transmission T pour ce type de lumière, la quantité de lumière réfléchie vers le haut vaut $R_0 I$ et $T I$ représente celle transmise vers le bas. Par la symétrie, si la couche est illuminée de manière diffuse par le dessous avec une intensité J , les quantités de lumière reflétée et transmise sont, respectivement, de $R_0 J$ vers le bas et de $T J$ vers le haut, comme illustré à la figure 1.

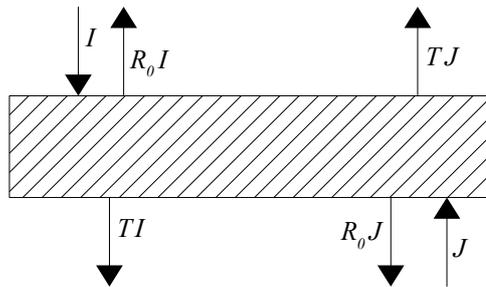


Figure 2 – Facteurs de réflexion et de transmission d'une couche en suspension dans l'air

En pratique, la couche n'est pas en suspension dans l'air mais repose sur un substrat, dont le facteur de réflexion est noté R_g . Dans ce cas, le flux ascendant reflété par le substrat est donné par

$$J_g = (T \cdot I + R_0 \cdot J_g) R_g = \frac{T \cdot I \cdot R_g}{1 - R_0 \cdot R_g} \quad (1)$$

Le facteur de réflexion R de la couche reposant sur le substrat est donné par

$$R \cdot I = R_0 \cdot I + T \cdot J_g \Leftrightarrow R = \frac{R_0 \cdot I + T \cdot J_g}{I} = R_0 + \frac{T^2 \cdot R_g}{1 - R_0 \cdot R_g} \quad (2)$$

Remarquons que R_0 est le facteur de réflexion de la couche sur un substrat parfaitement noir, c'est-à-dire totalement absorbant, pour lequel R_g est nul.

Étudions maintenant un exemple complet et considérons une série de fines couches d'épaisseur d et toutes parallèles à la surface du substrat. La couche n , de facteur de réflexion r_0 et de facteur de transmission t , est éloignée d'une distance

x de la surface inférieure non-illuminée et reçoit un flux de lumière i_n , dirigé vers le bas, et un flux j_n vers le haut. En passant d'une couche à l'autre, ces flux subissent les variations suivantes

$$\begin{aligned} i_n = r_0 \cdot j_n + t \cdot i_{n+1} &\Leftrightarrow t(i_{n+1} - i_n) = (1-t)i_n - r_0 \cdot j_n \\ &\Leftrightarrow i_{n+1} - i_n = \left(\frac{1}{t} - 1\right) i_n - \frac{r_0}{t} \cdot j_n \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} j_{n+1} = r_0 \cdot i_{n+1} + t \cdot j_n &\Leftrightarrow j_{n+1} - j_n = r_0 \cdot i_{n+1} + (1-t)j_n = r_0 \frac{i_n - r_0 \cdot j_n}{t} + (1-t)j_n \\ &\Leftrightarrow j_{n+1} - j_n = \frac{r_0}{t} \cdot i_n + \left(t - 1 - \frac{r_0^2}{t}\right) j_n \end{aligned} \quad (4)$$

De plus, notons $a = 1 - r_0 - t$ la quantité de lumière absorbée par la couche. Ces équations ne sont valables que si les facteurs de réflexion et de transmission des deux flux, r_0 et t , sont identiques, ce qui est le cas si, pour les deux flux, la distribution angulaire des intensités est identique. Conformément à cette hypothèse, l'exemple choisi peut être traité comme un milieu continu, définissant ainsi deux coefficients, S et K , respectivement de dispersion et d'absorption. En substituant $S \cdot d$ à r_0 et $1 - K \cdot d - S \cdot d$ à t , en d'autres termes la quantité de lumière transmise égale la quantité totale moins la somme de celle absorbée et de celle dispersée, les équations (3) et (4) exprimant les variations de flux deviennent des équations différentielles en divisant par d et en prenant la limite $d \rightarrow 0$

$$S = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{R_0}{d} = \frac{dR_0}{dx} \quad \text{et} \quad K = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{a}{d} = -\frac{dT}{dx} - \frac{dR_0}{dx} \quad (5) - (6)$$

Les équations fondamentales de la théorie Kubelka-Munk, décrivant les variations de flux pénétrant un milieu, sont alors donnée par

$$\frac{dI}{dx} = -(K+S)I + S \cdot J \quad \text{et} \quad \frac{dJ}{dx} = (K+S)J - S \cdot I \quad (7) - (8)$$

Pour une valeur donnée des coefficients S et K , les fonctions de flux $I(x)$ et $J(x)$ sont obtenues en résolvant les deux équations différentielles simultanément, c'est-à-dire pour une même valeur de x .

Résolution analytique

Soit le système d'équation

$$dI = -(K+S) \cdot I \cdot dx + S \cdot J \cdot dx \quad (9)$$

$$dJ = (K+S) \cdot J \cdot dx - S \cdot I \cdot dx \quad (10)$$

Divisons (9) par I et (10) par J et prenons la différence des deux équations ainsi obtenues, il vient

$$\begin{aligned} \frac{dI}{I} - \frac{dJ}{J} &= -2(K+S)dx + \left(\frac{J}{I} + \frac{I}{J}\right)S \cdot dx \\ \Leftrightarrow d \left[\ln \left(\frac{I}{J} \right) \right] &= -2(K+S)dx + \left(\frac{J}{I} + \frac{I}{J}\right)S \cdot dx \end{aligned} \quad (11)$$

Posons $r=I/J$ la réflectance de la couche infinitésimale d'épaisseur dx considérée. L'équation (12) devient:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{r} &= \left[-2(K+S) + \left(\frac{1}{r} + r\right)S \right] dx \\ \Leftrightarrow \frac{dr}{r \left[-2\left(1 + \frac{K}{S}\right) + \left(\frac{1}{r} + r\right) \right]} &= S \cdot dx \end{aligned} \quad (12)$$

Posons $a=1+K/S$ et développons le dénominateur de l'équation (14), il vient:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{r^2 - 2ar + 1} &= S dx \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2\sqrt{a^2-1}} \left(\frac{1}{r-a-\sqrt{a^2-1}} - \frac{1}{r-a+\sqrt{a^2-1}} \right) dr &= S \cdot dx \end{aligned} \quad (13)$$

En posant $b=\sqrt{a^2-1}$, il vient finalement:

$$\left(\frac{1}{r-a-b} - \frac{1}{r-a+b} \right) dr = 2b \cdot S \cdot dx \quad (14)$$

Les conditions aux limites du système considéré imposent

- R_g , le facteur de réflexion du substrat en $x=0$
- R , le facteur de réflexion de la couche considérée en $x=X$

L'intégration de l'équation (14) s'écrit donc:

$$\int_{R_g}^R \left(\frac{1}{r-a-b} - \frac{1}{r-a+b} \right) dr = 2bS \int_0^X dx \quad (15)$$

dont le résultat est donné par:

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{R-a-b}{R-a+b} \cdot \frac{R_g-a-b}{R_g-a+b} \right) &= 2bSX \\ \Leftrightarrow R &= \frac{(a+b)(R_g-a+b) + (b-a)(R_g-a-b) \exp(2bSX)}{(R_g-a+b) + (R_g-a-b) \exp(2bSX)} \\ \Leftrightarrow R &= \frac{1 - R_g(a-b \coth(bSX))}{a - R_g + b \coth(bSX)} \end{aligned} \quad (16)$$

L'équation (16) nous donne donc le facteur de réflexion, R , d'une couche d'épaisseur X étalée uniformément sur un support de facteur de réflexion R_g en fonction des ses coefficients de diffusion et d'absorption, S et K .

Références

- [http 1] <http://www.culture.gouv.fr/culture/arcnat/chauvet/fr/index.html>
- [BSM88] T. Bleser, J. Sibert, McGee, « Charcoal Sketching: Returning Control to the Artist », ACM Transactions on Graphics, Vol. 7(1), 76 – 88, 1988
- [CAS+97] C. Curtis, S. Anderson, J. Seims, K. Fleischer, D. Salesin, « Computer-Generated Watercolor », Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, pages 421 – 430, 1997
- [GG92] A. Gersho, R. Gray, « Vector Quantization and Signal Processing », Kluwer Academic Publisher, 1992
- [Jeu04] Aurélie Jeunejean, « Algorithme de rendu réaliste pour environnement de dessin virtuel », Master These, Université de Liège, 2004
- [LKL05] Hyunjun Lee, Sungtae Kwon, Seungyong Lee, « Real-Time Pencil Rendering », to appear NPAR, 2005
- [MA1942] David L. MacAdam, « Visual sensitivities to color differences in daylight » J. Opt. Soc. Am, Vol. 32, 247-273, 1942
- [MG02] A. Majumder, M. Gopi, « Hardware-Accelerated Real Time Charcoal Rendering », Proceedings of Second International Symposium on Non Photorealistic Animation and Rendering, 56 – 66, 2002
- [MNI02] Xiaoyang Mao, Y. Nagasaka, Atsumi Imamiya, « Automatic Generation of Pencil Drawing Using LIC », Proceedings of SIGGRAPH'02, page 149, 2002
- [Mun1915] Henry Munsell, « Atlas of the Munsell color system », Wadsworth Howland & Co. inc. Printers, 1915
- [Ne1706] Isaac Newton, « Optice – sive de reflexionibus, refractionibus, inflexionibus et coloribus lucis: libri tres », Londini S. Smith & B. Walford, 1706

- [RMN03] Dave Rudolf, David Mould, Eric Neufeld, « Simulating Wax Crayons », Proceedings of the 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, page 164 – 173, 2003
- [RMN05] Dave Rudolf, David Mould, Eric Neufeld, « A Bidirectional Deposition Model of Wax Crayons », Computer Graphics Forum, Volume 24, Number 1, page 27 – 39, 2005
- [Stam01] Jos Stam, « A simple fluid solver based on the fft », Journal of Graphics Tools, Vol. 6, No. 2, pages 43 – 51, 2001
- [Stam03] Jos Stam, « Real-time fluid dynamics for games », Proceedings of the Game Developer, 2003
- [TF99] Sakeo Takagi, Issei Fujishiro, « Microscopic Structural Modeling of Colored Pencil Drawings », Pacific Graphics '99 Conference Proceedings, pages 250 – 258, 1999
- [VLV04] Tom Van Laerhoven, Jori Liesenborgs, Frank Van Reeth, « A Paper Model for Real-time Watercolor Simulation », Technical Report TR-LUC-EDM-0403, EDM/LUC, 2004
- [VBV05] Tom Van Laerhoven, Koen Beets, Frank Van Reeth, « Introducing Artistic Tools in an Interactive Paint System », Technical Report TR-UH-EDM-0501, EDM/UH, 2005
- [vW91] J. J. Van Wijk, « Spot noise: Texture Synthesis for Data visualization », Proceedings of SIGGRAPH'91, Vol. 25, No. 4, pages 309 – 318, 1991.
- [WPF+02] M. Webb, E. Praun., A. Finkelstein, H. Hoppe, « Fine tone control in hardware hatching », Proceedings NPAR, pages 53 – 58, 2002
- [YMI04] Shigefumi Yamamoto, Xiaoyang Mao, Atsumi Imamiya, « Colored Pencil filter with Custom Colors », Proceedings of Pacific Graphics 2004, pages 329 – 338, 2004
- [ZIS+05] J. Zander, T. Isenberg, S. Schlechtweg, T. Strothotte, « High Quality Hatching », Computer Graphics Forum , Vol. 23, No. 3, 421 – 430, 2005