

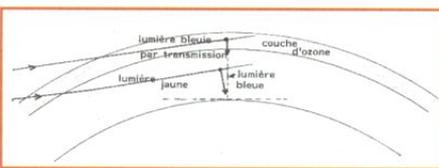
«Arche violette» parfois visible après le coucher du soleil.

très peu sensible à cette couleur. Quand le bleu et le violet sont mélangés le bleu domine.

### Couleur du ciel au zénith et au crépuscule.

Quand le soleil se couche, on constate que le ciel est d'un bleu intense au zénith, alors que l'horizon est rouge. Cette particularité est en contradiction avec la diffusion de Rayleigh. En effet, la lumière diffusée à ce moment provient de rayons qui ont traversé une épaisse couche d'atmosphère et se sont donc appauvris en bleu. La lumière diffusée devrait être plutôt jaunâtre !

Diverses explications ont été proposées : il semble que le phénomène résulte de l'action absorbante de la couche d'ozone (le spectre d'absorption de l'ozone comporte une bande dans le rouge). Si, de plus, la lumière a traversé des régions où se trouvent des poussières qui diffusent une lumière blanche par effet Mie le phénomène est encore plus net. Pendant le jour l'absorption de l'ozone n'a pas d'influence appréciable car l'épaisseur traversée est faible.



**Expériences :** Diverses expériences ou observations permettent de confirmer les hypothèses précédentes sur la diffusion de la lumière.

Nous rappelons pour mémoire l'expérience bien connue de Tyndall : dans une cuve transparente on provoque la formation de fines particules de soufre colloïdal; un faisceau lumineux qui traverse la cuve diffuse de la lumière bleue, tandis que la lumière transmise est jaune puis orangé.

On peut réaliser plus simplement un arche violette (ou pourpre) dans un milieu diffusant avec une solution très diluée de savon ou de lait.

Dans tous les cas on vérifie que lorsque la concentration des particules augmente la lumière diffusée devient de plus en plus blanche.

L'observation des fumées est également riche d'enseignements. Par exemple, la fumée d'une cigarette est bleu clair. Si cette fumée a été au préalable inhalée dans les poumons elle est blanchâtre car les particules, chargées d'eau, ont des dimensions plus grandes.

Un feu de broussailles peut se présenter sous divers aspects. Sur les bords de la colonne de fumée la couleur est en général nettement bleue, mais au centre elle est blanche si la densité des particules est suffisante. Il peut même y avoir absorption totale de la lumière et la fumée devient noire. Le soleil vu à travers un incendie peut devenir d'un rouge brun. Ce sont les particules diverses de l'atmosphère qui dans certaines circonstances donnent cette couleur au soleil couchant.

### Couleurs crépusculaires

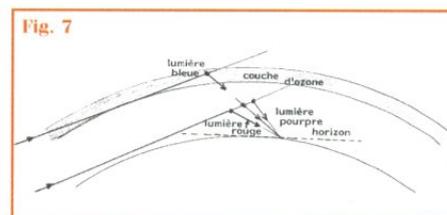
Les couchers et levers de soleil nous offrent parfois des spectacles colorés d'une grande beauté, surtout quand les nuages apportent leur concours.

Une analyse scientifique ne saurait être que superficielle compte tenu du nombre de paramètres qui entrent en jeu : d'un jour à l'autre, d'une saison à l'autre, les conditions changent. La présence de fumées, de brumes, de nuages modifient les couleurs...

Dès que le soleil est près de l'horizon, à l'ouest, de nombreux phénomènes colorés font leur apparition avec des bandes jaunes, puis orangé. Une dizaine de minutes environ après le coucher du soleil on peut avoir la chance de voir se développer une arche violette (ou pourpre) dans un ciel clair. Cette arche est centrée sur le point de l'horizon où le soleil s'est

couché. Elle atteint son maximum environ une demi-heure plus tard. A ce moment-là tout le paysage est illuminé en pourpre ; les murs, les arbres, etc... exposés à l'ouest prennent un aspect inhabituel...

Cette lumière pourpre résulte de l'addition de lumière bleue et de lumière rouge. La lumière bleue proviendrait des rayons situés dans la haute atmosphère, peu affectés par la diffusion de l'air, mais en revanche bleuis par absorption de l'ozone. La lumière rouge aurait pour origine les rayons transmis qui passent près de la Terre et qui sont fortement rougis. L'observateur recevrait alors dans les deux cas la lumière diffusée, et qui n'est pas sensiblement modifiée, soit par effet Rayleigh dans la haute atmosphère, soit par effet Rayleigh et effet Mie dans la basse atmosphère. (fig 7)



### Déformation du disque solaire et rayon vert

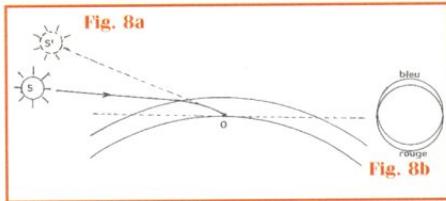
Si l'atmosphère est calme on peut avoir la chance d'assister à la déformation de l'image du soleil qui peut être fractionnée. Le plus souvent le disque rouge orangé prend la forme d'une ellipse dont le grand axe est horizontal. (Les observations doivent être faites avec précaution; même si la lumière est fortement atténuée, il ne faut regarder que pendant de très bref instants).

La réfraction est la cause de ce phénomène : l'atmosphère est un milieu d'indice variable qui diminue avec l'al-



Le fameux rayon vert rarement observable. (photo Romeuf)

titude, de sorte que les rayons lumineux s'incurvent légèrement vers la Terre (fig 8a). Quand le soleil se trouve en S, l'observateur O le voit dans la direction OS'. Or la réfraction n'est pas la même pour les rayons issus du bord supérieur et ceux issus du bord inférieur. Sur la ligne d'horizon le soleil est aplati de 6' soit 1/5 de son diamètre angulaire qui vaut 30'.



En fait, cette variation importante n'est pas bien perçue car le système visuel corrige cette déformation (il a également tendance à exagérer la dimension de l'astre à l'horizon). Il existe un moyen simple de se rendre compte de cette déformation : il suffit de s'allonger sur le sol de manière à faire tourner de 90° la ligne de vision habituelle; le soleil paraîtra alors nettement elliptique. Avec une photographie, la manœuvre est évidemment plus simple !

Quant au rayon vert, il doit son existence, qui n'est pas mythique, à la dispersion de la lumière qui accompagne la réfraction. La déviation des rayons lumineux augmente du rouge au bleu (la variation d'indice de réfraction est de l'ordre de  $8 \times 10^{-8}$ ). Il en résulte que l'atmosphère se comporte alors comme un prisme de petit angle qui donne autant d'images du soleil qu'il y a de couleurs : ces images se superposent en partie et seuls les liserés extrêmes rouge (vu en bas) et bleu (vu en haut) peuvent être distingués, si toutefois le soleil est masqué convenablement (fig 8b). C'est ce qui va se produire lorsque l'image du soleil est sur le point de disparaître à l'horizon, quand le bord de l'image verte subsiste seule (le liseré bleu n'est pas visible car à ce moment cette couleur est très forte-

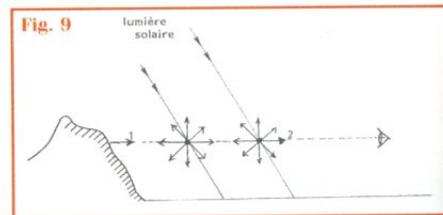


Couleurs crépusculaires.

ment absorbée). Le dernier "rayon" visible est donc vert; il ne dure qu'une fraction de seconde (le "green flash"). Le rayon vert est surtout visible en mer ou dans le désert, lorsque le ciel est très pur, l'absorption pas trop grande et l'horizon rectiligne. Il est recommandé d'utiliser des jumelles protégées par une feuille mylar et de ne procéder à des observations que par intermittence.

## ► Couleurs dans le paysage Couleurs des paysages lointains

La diffusion de la lumière permet d'expliquer l'aspect brumeux et bleuté que prennent les paysages lointains lorsqu'ils sont constitués essentiellement de masses sombres, comme par exemple les forêts. En effet, à la faible lumière reçue de ces fonds sombres par l'observateur, se superpose la lumière diffusée par l'air (et éventuellement les poussières) qui nous sépare de ces fonds (fig 9)



La lumière diffusée a un double effet : elle contribue à diminuer le contraste des objets en rajoutant une lumière uniforme et, de plus, elle superpose une lumière bleue due à la diffusion Rayleigh de l'atmosphère, à la lumière émise par le fond. L'effet n'est appréciable que si l'épaisseur d'air est assez grande; cet effet s'accroît avec les distances, ce qui permet de distinguer des plans successifs et d'apprécier les distances.

Ce phénomène est surtout observé sur les fonds sombres qui ne réfléchissent que peu de lumière. Si le fond est lumineux, la contribution de la diffusion vue précédemment est négligeable, sauf pour de très grandes distances. Mais alors dans ce cas on assiste à un jaunissement de la lumière transmise par le fond qui n'est pas complètement compensé par la lumière diffusée bleutée. Ainsi des sommets enneigés très éloignés paraîtront plutôt jaunâtres. Certains auteurs ont émis l'hypothèse que la diffusion de la lumière par les molécules d'air n'était pas à elle seule, capable d'expliquer ces phénomènes. En particulier le bleuissement serait dû à la présence de molécules organiques, notamment des terpènes, émises par les bois de résineux ou les sols humiques sous l'action du soleil.

## ► Mélanges de couleurs

La perception des couleurs est influencée par l'acuité de notre système visuel. Quand deux points lumineux sont vus sous un angle (inférieur à une certaine valeur, l'œil ne



La diffusion de la lumière est responsable des lointains bleutés. (Chaîne des Dômes vue de Gergovie)

voit plus qu'une seule tache : on atteint la limite de l'acuité visuelle. L'acuité visuelle dépend de nombreux facteurs, notamment de l'éclairage et du contraste des objets avec le fond. En général elle est de l'ordre de la minute d'angle. Ainsi dans les conditions usuelles on peut distinguer deux objets distants de un mètre et situés à 3500 m de l'observateur.

En dessous de cette limite, les images des points (qui sont en fait des taches) se superposent sur la rétine et l'œil voit la somme des couleurs des différents points : il réalise ainsi une synthèse additive des couleurs. (Cette propriété est mise à profit pour reproduire les couleurs sur un écran de télévision où l'on utilise trois couleurs seulement).

Dans la nature ce phénomène est très général. Ainsi une prairie éloignée a une couleur uniforme, d'un vert qui est obtenu par synthèse de différentes couleurs que l'on distingue au premier plan. Les peintres néo-impressionnistes ont cherché à tirer parti de cette propriété pour obtenir des couleurs plus lumineuses (en tout cas différentes de celles qu'on obtient par mélange des pigments qui réalise une synthèse soustractive).

## ► Couleurs de l'eau

La couleur de l'eau est particulièrement changeante pour de nombreuses raisons.

- La surface de l'eau est un miroir qui réfléchit, selon l'angle d'incidence une quantité plus ou moins grande de lumière. Si l'eau est calme, elle réfléchit essentiellement la lumière du ciel qui est elle-même très changeante. Si la surface est agitée par le vent, elle réfléchit des lumières de provenances diverses (ciel, paysage environnant,...) qui se mélangent.
- Une partie de la lumière qui a pénétré dans l'eau est diffusée par les particules en suspension. Comme



*Synthèse additive de couleurs au loin par défaut d'acuité visuelle.*

ces particules sont en général grandes par rapport à la longueur d'onde de la lumière, la lumière diffusée a la couleur de ces particules. C'est ainsi que les eaux argileuses ou sablonneuses ont des teintes brunes.

- D'une manière générale, les phénomènes de diffusion jouent un rôle important, même si l'eau est pure. Les molécules jouent un rôle analogue à celui déjà rencontré dans l'atmosphère. Avec de fines particules en suspension, on observe une lumière bleue (voir plus haut l'expérience de Tyndall).

## ► Couleurs de la mer et des lacs

La couleur de la mer est surtout influencée par la réflexion de la lumière à la surface et par le fait que cette surface soit constamment en mouvement. Au loin, la couleur est très voisine de celle du ciel, mais elle est plus sombre que le ciel (seulement une faible fraction de la lumière est réfléchie, 3 % en incidence normale).

En fait la mer a sa couleur propre, due

à la lumière diffusée et à la lumière absorbée qui dépend de l'épaisseur : depuis longtemps différentes mers ont été identifiées par leur couleur (Mer Rouge, Mer Noire, Mer Blanche...)

Les lacs, de profondeur en général moindre, et dont la surface est plus calme ont des couleurs plus variées car leur environnement, notamment en montagne, crée des conditions particulières d'éclairage.

Dans les lacs bleus la couleur est due essentiellement à l'absorption du rouge, tandis que dans les lacs verts ou vert-jaunes, ce sont les ions  $Fe^{3+}$ , ainsi que l'acide humique qui conditionnent la couleur; très souvent aussi cette couleur est due à la présence d'algues microscopiques présentes dans les eaux calcaires.

## ► Polarisation de la lumière et couleur de l'eau

Depuis Malus (1807), on sait qu'une surface réfléchissante, comme la surface de l'eau, polarise la lumière. Le taux de polarisation est total quand cet angle vaut  $53^\circ$ . Toute la lumière réfléchie vibre alors dans une direction parallèle à la surface de l'eau. En examinant cette lumière avec un analyseur qui ne laisse passer que la lumière vibrant dans une direction perpendiculaire à la précédente, aucune lumière n'est transmise. Si la plus grande partie de la lumière arrive sous une incidence de  $53^\circ$ , la lumière réfléchie est absorbée; il est alors possible de bien voir la lumière réfractée provenant du fond de l'eau, des poissons, etc...

Le phénomène qui nous intéresse plus particulièrement est la polarisation de la lumière diffusée par le ciel.

Quand on regarde le ciel bleu à travers un analyseur on constate que l'intensité lumineuse présente des minimums et de maximums alternés



*Les eaux argileuses ont une teinte souvent marron. (La Gartempe en Limousin)*



La couleur de la mer est la même que celle du ciel, en plus foncé.

tous les quarts de tour. Les minimums sont très accusés lorsqu'on regarde le ciel dans une direction perpendiculaire à la direction du soleil : la lumière diffusée est fortement polarisée dans cette direction et sa direction de vibration est perpendiculaire au plan déterminé par la direction du soleil et la direction d'observation.

Ces remarques vont nous permettre de faire les observations suivantes :

**1.** Si l'on dispose d'un polariseur (qui sert ici d'analyseur) et qu'on observe le ciel à travers, on peut atténuer fortement la lumière polarisée provenant du ciel sans éteindre la lumière (non polarisée) provenant des autres sources de lumière. Ainsi le contraste entre le ciel et les nuages (très peu polarisés) va être accentué. Il en est de même pour les lointains bleutés vus précédemment.

**2.** Une expérience peu connue consiste à utiliser la polarisation naturelle par réflexion à la surface de l'eau pour analyser la polarisation du ciel. Aucun matériel n'est nécessaire : il suffit de choisir un jour où quelques nuages sont présents dans le ciel et de repérer une surface d'eau calme, comme un petit étang. Si la lumière vient de l'est, regarder le ciel vers le sud ainsi que son image dans l'eau. On constate que le contraste varie

avec l'incidence. Dans certaines conditions on verra une image du ciel pratiquement noire; la couleur de l'image réfléchi dans l'eau varie selon l'angle d'incidence.

## ► Couleurs des feuillages

Il n'est pas possible de passer en revue l'ensemble des phénomènes observables dans la nature. Terminons cet aperçu par quelques remarques concernant les feuillages en espérant que le lecteur ne manquera pas de poursuivre cette recherche...

Les prairies et les feuillages donnent une infinité de nuances vertes. On remarquera que les feuilles des arbres présentent deux faces d'aspects différents : l'une de ces faces est souvent très réfléchissante (hêtre, chêne, etc...) alors que l'autre a une texture mate qui favorise la diffusion. Il en résulte que la couleur dépend de la position de l'observateur. La couleur des feuilles résulte de la lumière réfléchi par la surface, qui se comporte comme un miroir, et de la lumière réfléchi qui a pénétré dans la feuille et a subi l'absorption par la chlorophylle, ce qui donne une couleur verte. La lumière réfléchi sur la sur-



La surface de l'eau «analyse» la lumière polarisée du ciel, le contraste avec les nuages est augmenté.

face brillante n'a pas la même pureté. On conçoit que le nombre de possibilités soit sans limites...

De même les brins d'herbe n'ont pas le même aspect si on les regarde au soleil ou à contre jour. En effet, l'éclairage du soleil est intense et directif, de sorte que les zones qui envoient la lumière vers l'observateur sont très localisées et de faibles variations de l'angle d'incidence modifient la couleur : l'ensemble a l'aspect d'une juxtaposition d'éléments colorés bien discernable si on est assez près. D'une manière générale la lumière du soleil exalte les couleurs dites "chaudes" comme le rouge et le jaune, pour les raisons déjà données à propos des vitraux (voir l'article "les verres colorés et leur histoire"). Aussi il serait bien dommage que les impératifs de la culture moderne fassent disparaître les champs de jonquilles ou de coquelicots...

### Bibliographie

- M. G. J. MINNAERT :  
*"Light and colour in the outdoors"*  
Springer-Verlag  
New-York - 1993
- F. SUAGHER - J. P. PARISOT :  
*"Jeux de lumière"*  
Cèdre - Besançon - 1995
- L. DETTWILLER :  
*"Qu'est-ce que l'optique géométrique ?"*  
Dunod - Paris - 1990
- **Articles de revue**
- M. NUSSENZVEIG :  
*"La théorie de l'arc-en-ciel"*  
in les phénomènes naturels  
Bibl. Pour la Science  
Belin - Paris - 1978
- M. HENRY :  
*"Mirages, halos et gloires"*  
in . Revue du Palais  
de la découverte, vol 16 - 1987
- M. HENRY :  
*"Optique atmosphérique"*  
in. Auvergne-Sciences n° 33  
Clermont-Ferrand - 1995
- R. JOUANISSON :  
*"L'arc-en-ciel : observations et expériences"*  
in. Bulletin de l'Union des  
Physiciens, n°809 Paris - 1998.
- Logiciel :  
*"Spectrum"*  
L. DETTWILLER et D. ROMEUF,  
ADASTA, 1994.  
Clermont-Fd.

# Couleur **numérique** et exploration mathématique à l'interface **Art\*Science** : Computer Art et automates cellulaires

par Bernard Caillaud

On veut présenter, dans cet article, certains aspects d'une recherche artistique menée sur ordinateur et centrée sur la couleur. Il ne s'agit pas rigoureusement d'un exposé consistant sur la couleur numérique (ce serait bien prétentieux dans le cadre d'un article) mais de remarques sur l'enrichissement qu'elle apporte dans les méthodes mises en oeuvre dans la création plastique et plus particulièrement dans la peinture algorithmique telle qu'elle est présente dans mon travail.

On a voulu illustrer largement cet article de reproductions d'oeuvres en couleur puisque, même si la partie théorique est importante, seules comptent finalement les images et l'impact visuel qu'elles provoquent.

Les rappels qui suivent sont succincts et fragmentaires mais utiles, peut-

être, pour une meilleure intelligence de l'ensemble.

## ■ Rappels

### ▷ Perception colorée

#### • Nécessaire relation entre physique et perception

On sait au moins que la couleur est une perception et que l'information correspondante se forme à partir d'une stimulation physique dès son entrée dans l'oeil vers le cerveau (on parle parfois du système "rétinex" pour désigner le système physiologique qui s'étend de la rétine au cortex).

On est ainsi habilité à dire que la couleur existe seulement à l'intérieur du

système perceptif même si l'information physique entrante peut être décrite en termes d'énergie, de longueur d'onde et donc de photons et que l'on peut établir des relations entre ces grandeurs physiques et les sensations colorées (c'est le but de la psycho-physique ; dans ce domaine précis on parle plus spécifiquement de psychométrie chromatique).

On est ainsi habilité à dire que la couleur n'est pas une qualité du monde au contraire de la forme (encore que ceci demanderait discussion).

Une incompréhension perdure souvent entre ceux qui parlent des grandeurs physiques (et donc de la lumière entrante) pour parler de la couleur et ceux pour qui les couleurs sont des attributs de la nature au sens large (donc des objets du monde) ou de façon plus restrictive sont des

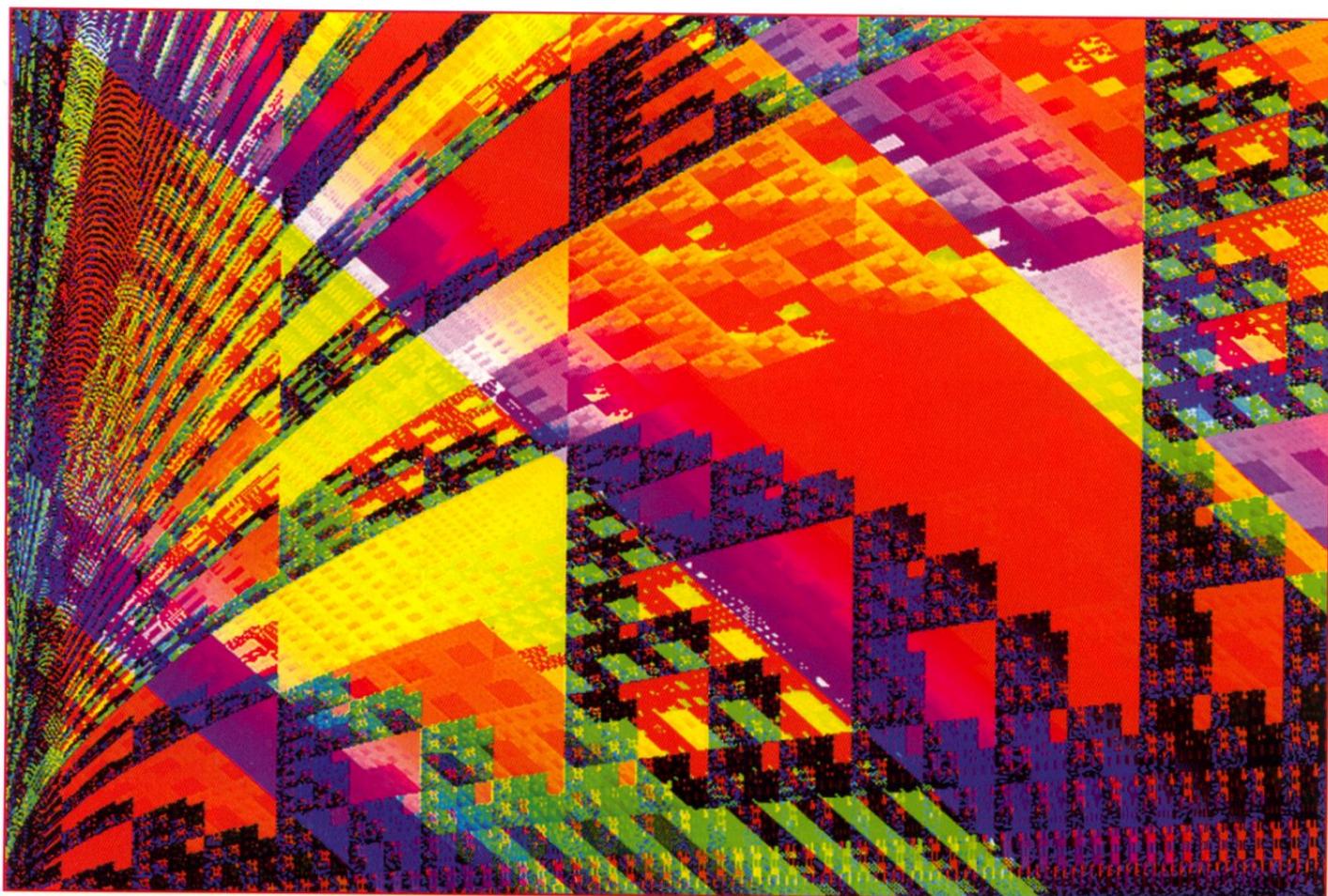


Figure 01 - Série XY - Color, n° 18, 1998.

matières qui peuvent donner couleur au monde (au sens des couleurs du peintre).

• **Luminance**

Elle correspond à la notion intuitive de luminosité qui rend compte de l'évolution du foncé vers le clair. On distingue la luminance énergétique (grandeur physique) de la luminance lumineuse (autrefois brillance) qui quantifie la perception. On définit dans certains cas la clarté (grandeur relative) qui tient compte du contexte perçu.

• **Longueur d'onde dominante / Teinte ou tonalité**

*Teinte* : qualificatif de la perception chromatique qui permet de la classer comme verte, bleue, rouge...avec toutes les confusions que l'on sait. Si le physicien analyse la lumière correspondante il mesurera la longueur d'onde qui porte le maximum d'énergie (longueur d'onde dominante) et l'associera à la couleur perçue par le sujet.

On propose parfois des correspondances du type

- 380nm-430nm : violet
- 430nm-500nm : bleu
- 500nm-560nm : vert
- 560nm-590nm : jaune
- 590nm-630nm : orangé
- 630nm-780nm : rouge

On distingue environ 150 à 200 teintes (sans faire intervenir leurs nuances...).

• **Pureté / saturation**

La pureté (caractéristique de la lumière) prend en compte l'énergie de la longueur d'onde dominante par rapport à l'énergie totale de la lumière

étudiée. Plus exactement elle prend en compte la luminance lumineuse de la longueur d'onde dominante par rapport à la luminance lumineuse de la lumière blanche qu'il faudrait ajouter à cette première pour reconstituer la lumière effectivement reçue. Plus faible est la quantité de lumière blanche plus pure est la lumière colorée. Cette pureté (colorimétrique) est mise en relation avec l'équivalent psycho-physique nommé saturation qui exprime l'intensité de coloration de la teinte du stimulus chromatique.

• **Trivariance visuelle**

Les trois grandeurs précédentes sont nécessaires et, en première approximation, suffisantes pour quantifier la couleur perçue. On parle alors de trivariance chromatique que l'on met en relation avec les trois types de cônes et les trois couleurs primaires (voir ci-dessous).

• **Primaires**

Les fameuses couleurs primaires nous ont toujours été présentées, à la petite école et souvent après, comme une triade quasiment mystique et incontournable. On sait, en fait, qu'il existe une quasi-infinité de triplets liés chacun à des conditions d'expérimentation précises suivant le type de synthèse mis en jeu ; le phénomène important est bien qu'il faut au moins trois couleurs de base pour reconstruire, grâce à elles, un vaste ensemble de nuances colorées et que les longueurs d'onde dominantes associées doivent être choisies respectivement dans les basses, moyennes et hautes longueurs d'onde de l'intervalle visible (donc environ de 400nm à 750nm).

Pour le reste on peut rappeler un certain nombre de cas classiques dans le tableau ci-dessous :

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| • Triplet                        | <b>Rouge, Vert, Bleu</b>   |
| Synthèse Additive                | Application : Eclairage de théâtre, light-shows...<br>Colorimétrie additive    |
| Synthèse Optique                 | Application : Luminophores du moniteur (TV, ordinateur) pointillistes          |
| • Triplet                        | <b>Magenta, Jaune, Cyan</b>  |
| Synthèse Soustractive            | Application : Eclairage de théâtre, light-shows...<br>Pellicule photographique |
| • Triplet                        | <b>Rouge, Jaune, Bleu ou Rouge-Magenta, Jaune, Bleu-cyan</b>                   |
| Synthèse pigmentaire             | Application : mélanges des peintres  |
| • Triplet                        | <b>Magenta, Jaune, Cyan (+ noir)</b>   |
| Synthèse optique et soustractive | Application : Impression papier  |

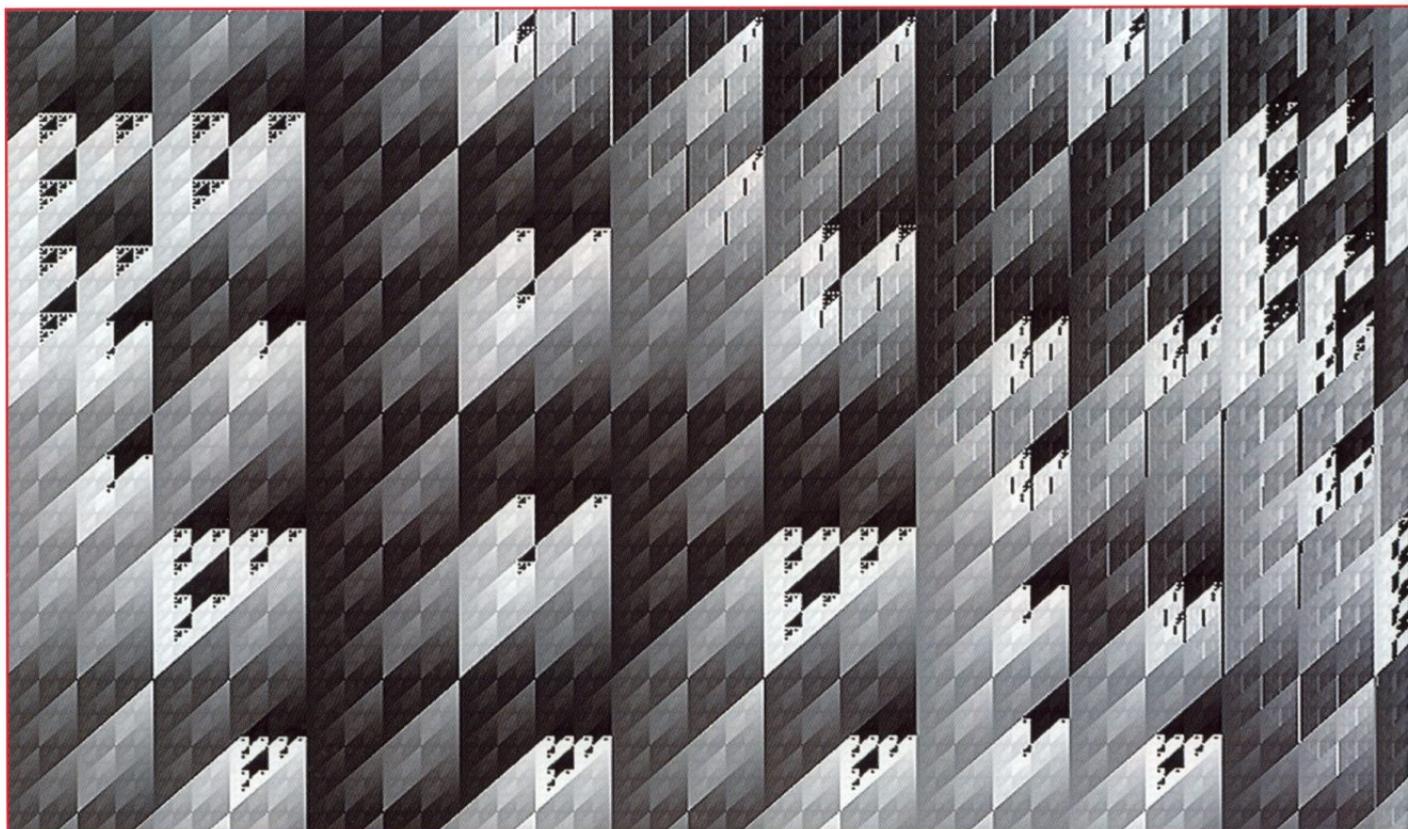


Figure 02 - Série XY - nb, n° 13, 1998.

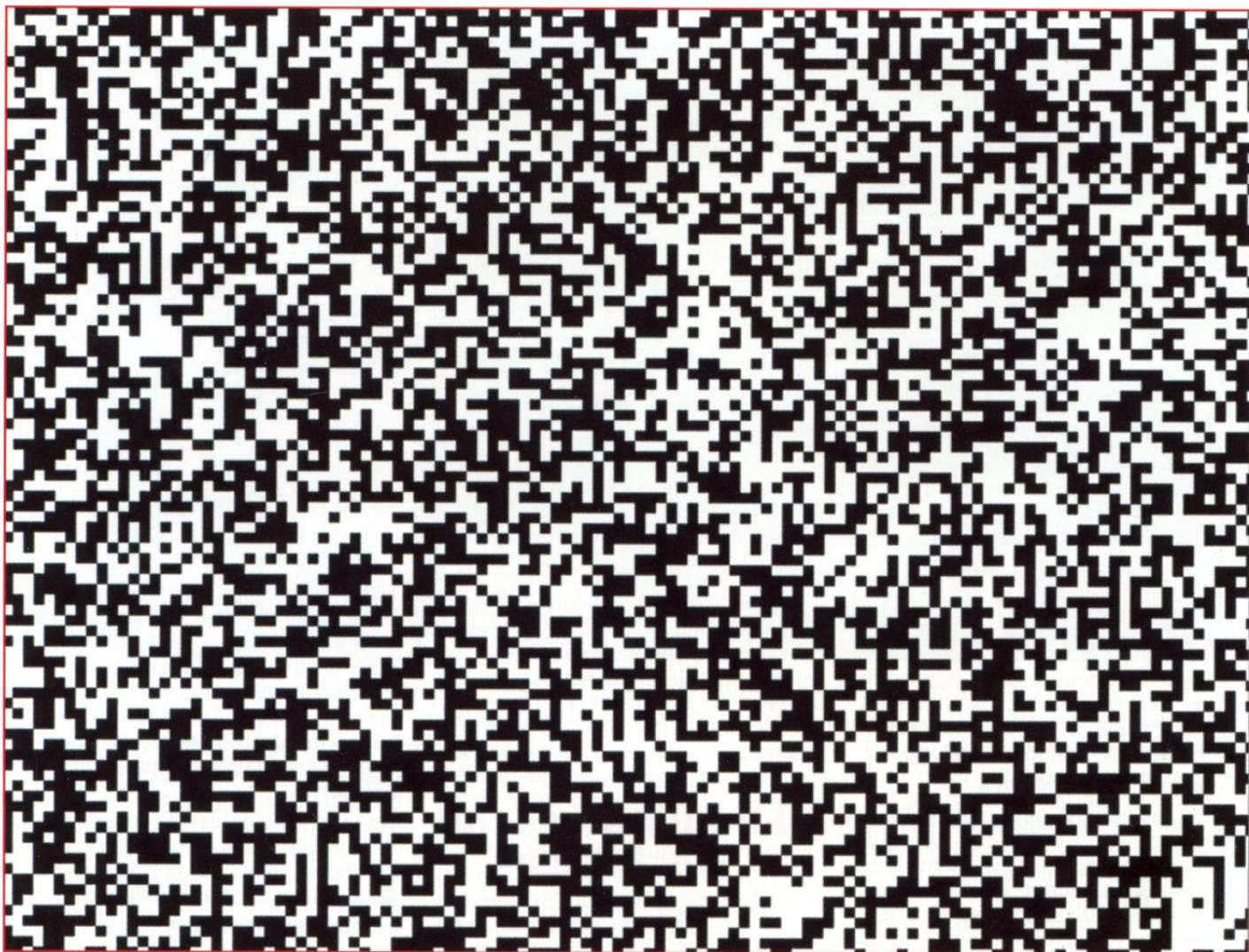


Figure 03 - Distributions aléatoires de pixels noirs ou blancs.

• **Espaces colorimétriques**

La trivariance chromatique implique un espace à trois dimensions pour repérer l'ensemble des perceptions colorées. Mais il ne suffit pas de placer, dans un espace réglé, un ensemble de points. La grande question est alors celle de la métrique de cet espace à savoir la correspondance spatiale entre la mesure et la perception. Si, en toute région de cet espace, une même distance parcourue correspond à une même variation chromatique perçue on doit estimer que l'espace créé est uniforme. En fait, compte tenu des bases choisies et des réponses non linéaires de l'oeil, ces conditions ne sont jamais réalisées et la métrique est toujours complexe. Les espaces proposés sont alors, le plus souvent, le résultat d'approximations plus ou moins grossières suivant le problème à traiter.

Les travaux rigoureux sur ces questions complexes sont menés, depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle environ, par la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) et il est de coutume de citer le diagramme chromatique (1931) qui pose les premiers problèmes dans un plan. L'étude en trois dimensions conduira en particulier aux espaces CIELa\*b\* et CIEluv - 1976 (note 1).

▷ **Couleur numérique**

On fait ici quelques remarques sur la couleur écranique qui concernent moins le domaine des applications de l'ordinateur tournées vers la production d'image au sens commercial, que celui de son utilisation comme surface de création pour le plasticien. On trouvera sur le net des adresses qui donnent les bases relatives à ces questions (note 1).

• **Luminophores**

Ce sont les unités émettrices responsables, par synthèse optique, de l'apparition de la couleur sur l'écran du moniteur quand ils sont frappés par le faisceau d'électrons cathodique. Ils sont de trois catégories (émetteurs rouge, vert et bleu) et le tableau ci-dessous indique leurs caractéristiques :

On doit noter ici la grande pureté de ces primaires par rapport à celles employées dans d'autres secteurs de reproduction de la couleur et on pourrait comparer leur réponse à celles des cônes de l'oeil responsables, en premier niveau, de la perception colorée (note 2).

• **Systèmes de représentation de la couleur numérique**

Les systèmes les plus souvent utilisés sont les plus géométriquement simples et corrélativement les moins aptes à représenter un espace colorimétrique uniforme ce qui ne semble pas gêner les concepteurs de logiciels (on peut citer les systèmes cubiques RVB ou CMJN, le système cylindrique, ridiculement faux (note 2) -et toujours employé dans Adobe Photoshop- et le système à double cône TSL ). Depuis quelques années est heureusement apparu le système Lab (adaptation du système CIELa\*b\* 1976) qui deman-

|  | Emetteur rouge | Emetteur Vert | Emetteur Bleu |
|--|----------------|---------------|---------------|
| Clarté<br>(pourcentage en luminance exprimé par rapport au blanc de l'écran)       | 30%            | 52%           | 35 %          |
| Longueur<br>d'onde dominante<br>(qui détermine donc le caractère de teinte)        | 605-615 nm     | 520-535 nm    | 450-460 nm    |
| Pureté<br>(proportion de la luminance de la lumière pure dans la luminance totale) | 95-100%        | 80-85%        | 80-90%        |

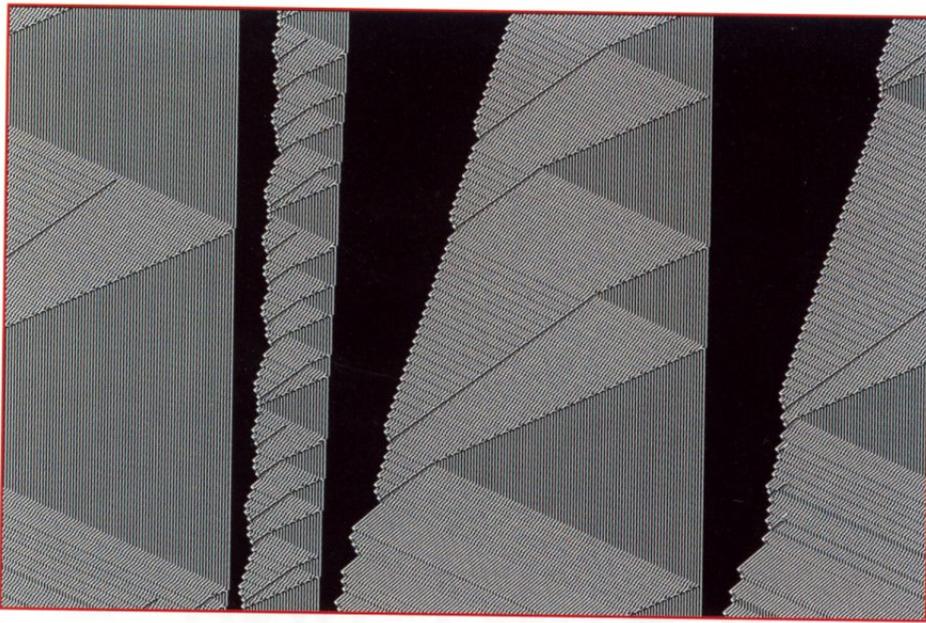


Figure 04a - Automate à une dimension et 4 plus proches voisins, 2000.

derait à être sérieusement testé dans sa version numérique... De toutes façons ces systèmes ont rarement une pertinence perceptive dans la mesure où les écrans de visualisation sont tous différents du fait de leur constitution et surtout de leurs réglages....

#### • Nuances chromatiques

Suivant les auteurs on semble pouvoir distinguer de 50.000 à 300.000 nuances colorées... On est donc bien en dessous du nombre de 16 millions de couleurs affichables, au dire des marchands, par les moniteurs. Je ne ferai pas de commentaires sur ce type de publicité. En revanche, si on prétend pouvoir coder les luminances de chaque primaire sur 256 niveaux, la combinatoire donne effectivement 16.777.216 nuances ce qui n'a aucune réalité perceptive...

#### ■ Emergence des images

### ► Le monde sensible et ses images différées

Nous nous donnons, grâce à nos sens, des images du monde (la remarque n'est pas neuve), les principales étant les images "retinex" et celles, différées, obtenues par les méthodes photographiques.

Les images auditives participent de notre construction de la réalité ; à côté d'elles pourraient figurer les images des sons qui impliquent une écoute plus orientée et sélective et, associées mais différées, les images scientifiques obtenues par transformée de Fourier et nommées, le plus souvent, sonagrammes (note 3).

Les images des odeurs, des saveurs et du toucher participent également de notre construction de la réalité mais ne peuvent être reliées à des images différées sauf à considérer les images

corticales qui témoignent géographiquement d'une excitation mais dont le pouvoir discriminant est faible : il semble difficile actuellement, sur ces images, de distinguer la perception odoriférante d'une rose de celle d'un oignon...

### ► Le monde caché et ses images objets

Dans les domaines du trop petit et du trop grand, du trop rapide et du trop lent, du masqué, donc dans ces domaines qui échappent précisément à la perception directe, il faut cette fois faire appel à des techniques d'imagerie scientifique qui produisent, le plus souvent en différé, des images sensibles d'un monde dont on peut douter de l'existence à l'exclusion de ses images qui pourraient alors être considérées comme les objets réels d'un monde virtuel.

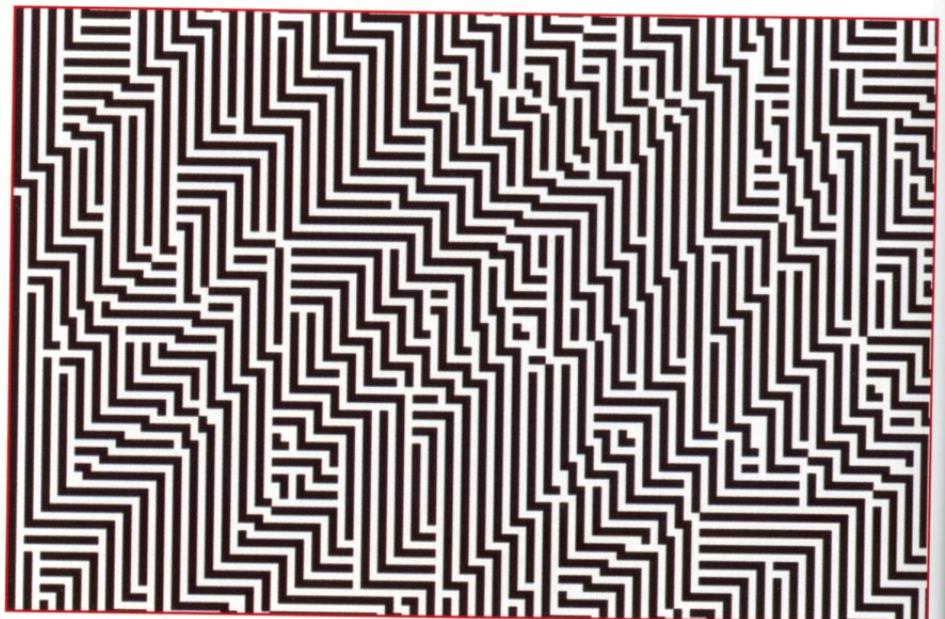


Figure 04a - Automate à deux dimensions et 2 plus proches voisins, 1997.

D'ailleurs on peut dire qu'actuellement la plus grande partie de l'univers "connu" se réduit à des images quand on sait qu'un bon nombre d'entre elles sont obtenues dans des zones de longueurs d'onde non visibles et que certaines sont intégralement construites en associant plusieurs domaines de longueurs d'onde (images composites)

On peut finalement citer, dans ces images du monde caché, les images produites par l'activité des mathématiques "alphanumériques" dont les plus connues du grand public sont bien, encore aujourd'hui - au-delà des courbes classiques- les fractales...

### ► Le monde mental

Dans cette question de l'émergence des images on peut dire que l'activité mentale conduit au moins à trois catégories d'images ; celles de modélisation, celles de simulation et celles de création libre ( on pourrait vouloir supplémentairement classer les images des mathématiques dans cette catégorie).

On peut considérer que l'esprit génère des modèles qui peuvent se concrétiser, pour partie, par des images (dites pour cette raison de modélisation)

La reconstruction d'un réel présent ou disparu passe par une phase de conceptualisation qui se concrétise en simulation par l'image dite de synthèse.

La création artistique est bien, enfin, expression du monde mental qui se concrétise, dans les arts plastiques, par des... images qui ne sont qu'anecdotiquement des images du monde.

On pourra dire alors que le Computer Art (note 4) se situe à la fois dans le monde caché et dans le monde mental.

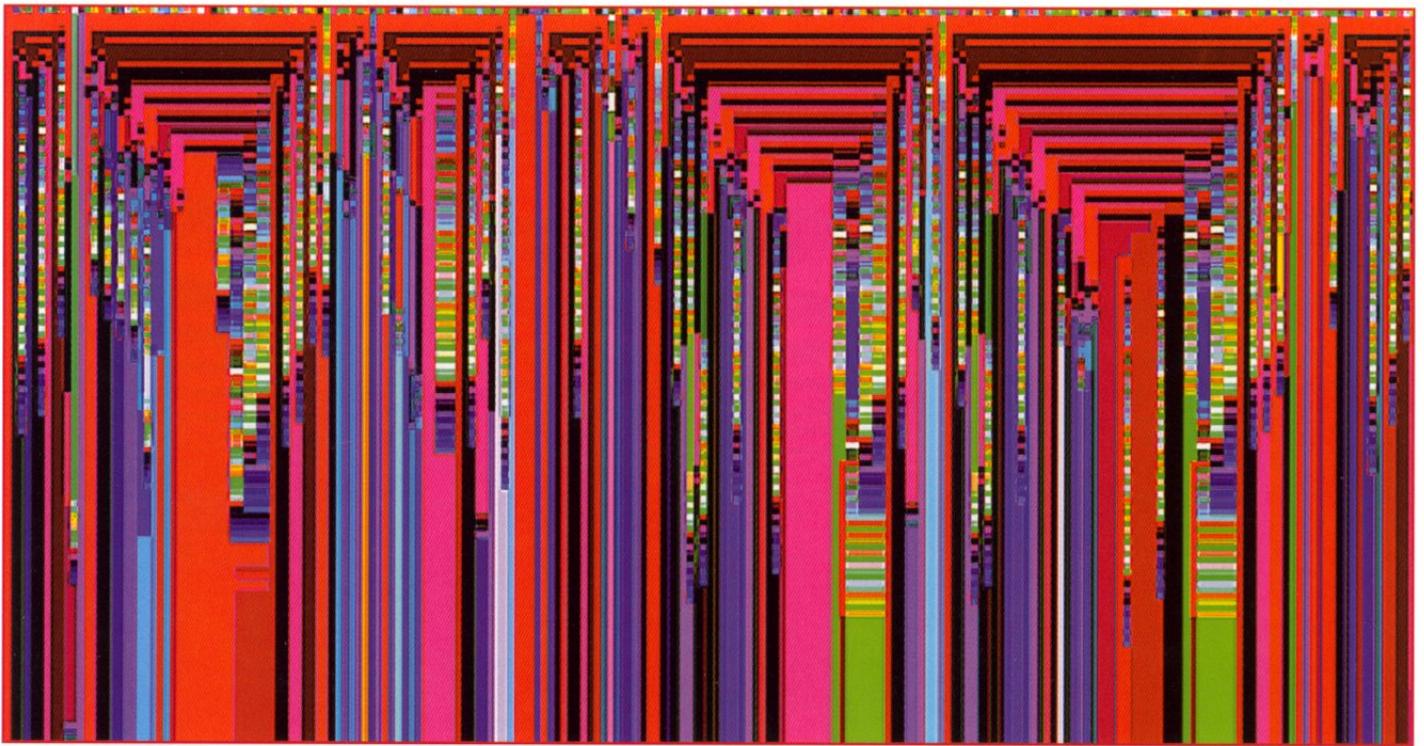


Figure 05 - Automate à une dimension et 2 plus proches voisins, série Alea Color, n° 12, 1997.

### ■ Traitement numérique et interprétation

Le traitement d'image, qu'il soit analogique ou numérique, est d'abord amélioration et/ou restauration de l'image initiale pour en faciliter la lecture.

On peut, dans le même esprit, procéder à une interprétation en fausses couleurs ou faire passer, dans le cas d'un document en noir et blanc, les valeurs de gris en valeurs chromatiques (traitement par couleurs indexées).

Rappelons qu'aux débuts du Computer Art on traduisait approximativement les valeurs de gris par des signes typographiques (passage du continu au discontinu) dont la densité optique moyenne correspondait à ces valeurs ce qui, par synthèse optique, à bonne distance, permettait la lecture de l'image initiale.

Un autre aspect important consiste à recréer un document par superposition modulée de plusieurs documents relatifs à un même objet : on parle bien d'image composite (voir ci-dessus).

Finalement l'analyse morphologique (note 5) permet de donner une description quantitative de la structure de l'objet associé au document-image. Le traitement d'image est, par ailleurs, souvent associé à la vision et à la reconnaissance des formes.

On donne (note 6) les adresses de quelques sites relatifs à ces traitements d'image.

### ● Création numérique visuelle

#### A. Création logicielle

Elle consiste essentiellement à utiliser des logiciels d'aide à la création. C'est une méthode riche mais passive. Le logiciel le plus connu actuellement est sans nul doute Adobe Photoshop.

#### - Création "manuelle"

Par nostalgie, peut-être, du geste du peintre, on utilise une tablette graphique et un crayon optique qui reproduit sous forme de trace-écran le mouvement de la main sur la tablette (ce que l'on fait, avec moins de facilité il est vrai, avec la souris). De nombreuses options permettent de régler la qualité de la trace.

#### - Création et traitement d'image

Si on introduit dans l'unité centrale un document numérisé on peut appliquer des variantes "ludiques" de routines employées en traitement d'image qui porteront sur les couleurs et/ou sur les formes en associant éventuellement plusieurs images...Une batterie de "filtres" est maintenant disponible qui permet une combinatoire d'effets impressionnante.

#### - Création par déplacement logiciel

Certains artistes ou scientifiques réadaptent des parties de programmes spécialisés pour les orienter vers leur pratique artistique. Cette démarche peut concerner de façon générale des logiciels du commerce ou même des "résultats-images" fournis par ces logiciels.

#### - Création numérique interne de simulation

Par ailleurs des logiciels sont proposés pour créer directement des images tournées vers la simulation du réel et notamment dans le domaine des images dites 3D : ils semblent surtout concerner les fabricants de pub, clips et jeux vidéo. On parle alors le plus souvent d'image de synthèse et ce concept a, malheureusement et depuis des décennies, occulté les recherches des artistes numériques.

### B. Création et programmation

On trouve ici l'aspect le plus intéressant de la création numérique : celui de la programmation personnelle. Depuis les débuts du Computer Art, des créateurs ont souvent eux-mêmes conçu des programmes originaux pour développer leur propre activité plastique et certains de ces programmes sont devenus les bases de logiciels du commerce.

Je travaille plus précisément dans le domaine de l'exploration mathématique visuelle qui consiste à établir, dans un langage de programmation classique, des routines de définition des pixels d'une fenêtre d'affichage. Depuis l'émergence des questions liées aux systèmes non linéaires et au chaos on connaît le succès des "images" fractales, celles des attracteurs étranges et pour une moindre part, peut-être, celles issues de l'espace de Lyapunov...

J'ai pour ma part exploré des domaines voisins et en particulier les automates cellulaires ; j'appelle ma recherche : "peinture algorithmique". Elle se situe dans le domaine, en continuelle mutation, de l'Algorithmic Art. On trouvera des développements de ces questions dans mon ouvrage à paraître prochainement : *Création numérique 1960 - 2000 / Aspects du Computer Art depuis ses origines* (note 7)

#### ● Algorithmic Art

Art numérique, mathématiquement construit, sans hypothèse visuelle de départ ; il ne s'agit donc ni de modélisation ni de simulation. Il repose d'une part sur l'efficacité visuelle de l'algorithme qui définit l'état colorimétrique des pixels du plan image et, d'autre part, sur la nouveauté de cet algorithme.

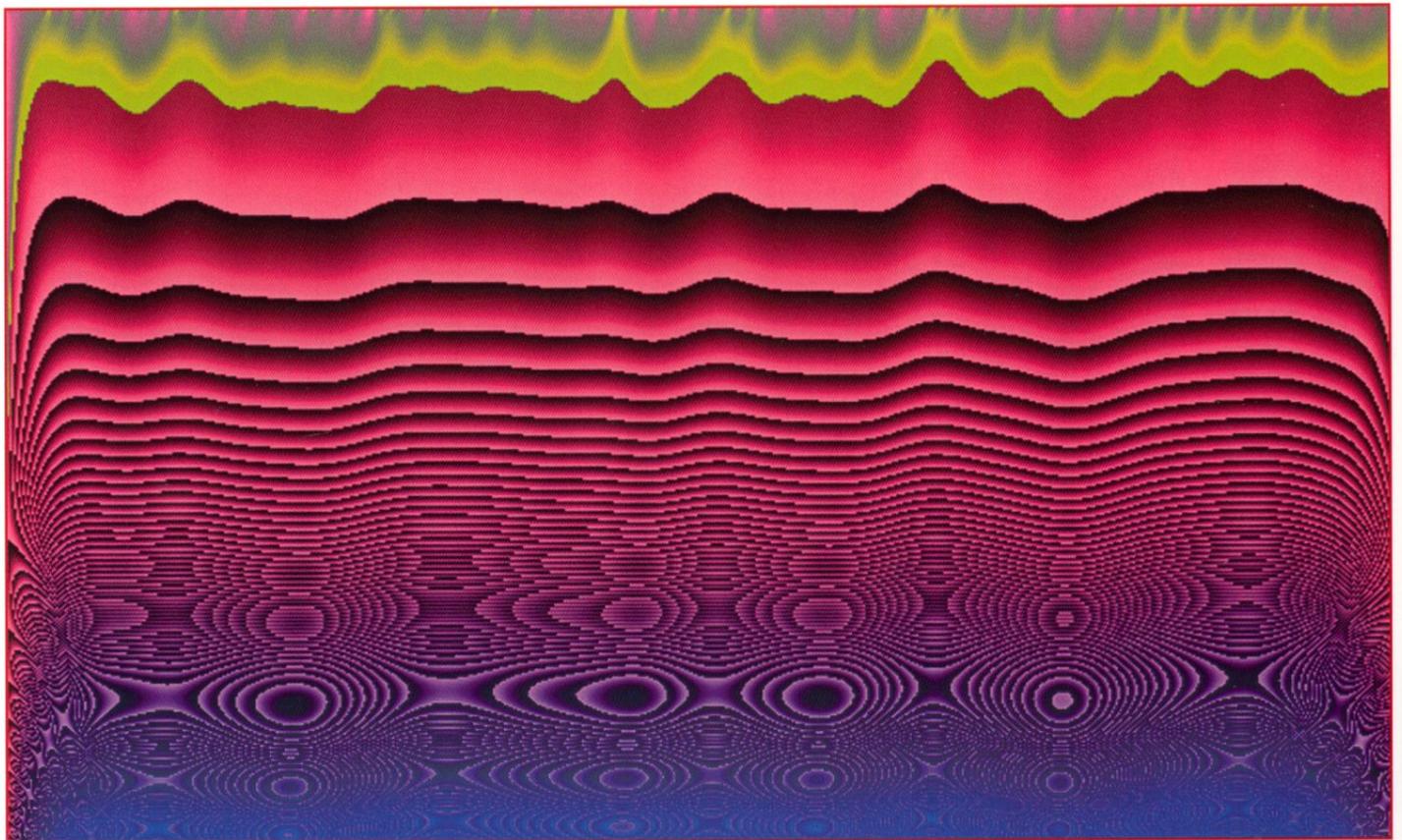


Figure 06 - Automate à une dimension et 2 plus proches voisins, série Phase Color, n° 8, 1998.

### A. Coordonnées et état colorimétrique

On cherche à définir l'état colorimétrique de chaque pixel, donc la valeur des trois composantes R, V, B par une opération qui porte sur les valeurs des coordonnées  $x$  et  $y$  du pixel correspondant par l'intermédiaire d'opérateurs logiques. Le tableau ci-dessous rappelle la définition des trois principaux opérateurs par leur table de vérité :

AND (conjonction)

| A | B | A (AND) B |
|---|---|-----------|
| 1 | 1 | 1         |
| 1 | 0 | 0         |
| 0 | 1 | 0         |
| 0 | 0 | 0         |

OR (ou inclusif)

| A | B | A (OR) B |
|---|---|----------|
| 1 | 1 | 1        |
| 1 | 0 | 1        |
| 0 | 1 | 1        |
| 0 | 0 | 0        |

XOR (ou exclusif)

| A | B | A (XOR) B |
|---|---|-----------|
| 1 | 1 | 0         |
| 1 | 0 | 1         |
| 0 | 1 | 1         |
| 0 | 0 | 0         |

On a donc, par exemple, comme conditions :

$$R = ((x \text{ XOR } y * x) \text{ OR } (x * y))^{1/2.41} \\ \text{XOR } \sin(x+y \text{ AND } x-y) \text{ AND } \\ \cosh(x/y+x)^2$$

$$V = ((x \text{ AND } y * x) \text{ OR } (x * y))^{1/2.41} \\ \text{OR } \sin(x+y \text{ AND } x-y) \text{ AND } \\ \cosh(x/y+x)^3$$

$$B = ((x \text{ XOR } y * x) \text{ XOR } (x * y))^{1/2.41} \\ \text{AND } \sinh(x+y \text{ AND } x-y) \text{ AND } \\ \cos(x/y+x)^2$$

De telles conditions développent alors dans le plan des structures colorées liées le plus souvent à des motifs dont la périodicité spatiale est directement dépendante des fonctions mises en jeu dans l'écriture des conditions.

#### - Couleurs

L'exemple ci-dessus conduit effectivement à une image colorée puisqu'en chaque point les composantes R, V, B sont différentes (voir figure 1).

#### - Valeurs neutres

Si les trois composantes sont identiques en tout point on obtiendra une image en valeurs de gris (voir figure 2).

### B. Automates cellulaires

À partir d'un pavage de cellules identiques et connexes (que l'on peut réduire à la limite au pixel) qui ne diffèrent que par leur état colorimétrique (suivant une distribution initiale aléatoire) l'algorithme explore les plus proches voisins d'une cellule quelconque, repérée par ses coordonnées, et en déduit une éventuelle évolution de la valeur chromatique de la cellule concernée calculée à partir des états colorimétriques de ses voisins. Cette règle d'ordre proche appliquée en boucle construit progressivement sur l'ensemble des cellules un ordre global perçu comme une forme. À chaque nouvelle règle de

calcul correspond une nouvelle forme (note 8).

Le pavage aléatoire initial peut n'avoir qu'une dimension ou deux ou trois (mais ce dernier cas nécessite une représentation tridimensionnelle qui complique la visualisation sans vraiment apporter un intérêt plastique supplémentaire : elle ne sera donc pas développée ici).

#### - Valeurs neutres

Par souci de simplicité on va préciser les notions ci-dessus dans le cas où les cellules peuvent prendre deux et deux seuls états : le blanc ou le noir. La figure 3 présente une distribution aléatoire (3A) à une dimension puis une distribution aléatoire (3B) à deux dimensions qui constituent chacune l'état initial de l'automate.

#### • Automate à une dimension

Dans ce cas la règle de calcul va porter sur l'état colorimétrique des plus proches voisins à gauche et à droite de la cellule examinée.

Le programme va relire progressivement la situation initiale aléatoire en appliquant la règle d'ordre proche : La distribution initiale va être modifiée et la nouvelle distribution va s'afficher sous la première : le processus va se répéter jusqu'à remplir la totalité de la fenêtre. On est conduit par exemple, pour une règle spécifiée, à la figure 4a.

#### • Automate à deux dimensions

Dans ce cas la règle de calcul va porter sur l'état colorimétrique des plus proches voisins à gauche, à droite, en dessus et en dessous de la cellule exa-

minée. Le processus, voisin de celui ci-dessus, va conduire par exemple, pour une règle spécifiée, à la figure 4b.

#### • Exemple de règle

Donnons, dans le cas le plus simple (automate à une dimension), des exemples de règles en nous limitant à deux plus proches voisins :

Premier exemple : si la cellule de gauche est noire et si celle de droite est blanche alors la cellule examinée devient ou reste noire...

Deuxième exemple : si la cellule de gauche est noire et si celle de droite est noire alors la cellule examinée devient ou reste blanche...

Troisième exemple : si la cellule de gauche est blanche et si celle de droite est noire alors la cellule examinée garde son état...etc.

Avec des règles aussi simples on obtient déjà une variété de formes très diverses...en noir et blanc.

#### • Espace torique

Chacun aura compris qu'un petit problème se pose au moment où, arrivant sur la dernière cellule de droite, la règle doit examiner l'état de la cellule qui se trouve à sa droite mais ...qui n'existe pas! Il faut donc indiquer dans le programme que cette cellule inexistante sera remplacée par la première cellule de gauche. De la même façon la première cellule de gauche aura pour voisine de gauche la dernière cellule de droite. On fait ainsi une boucle spatiale et l'espace de la

fenêtre prend donc une structure de tore ; dans le cas des automates à deux dimensions il faudrait boucler en horizontale et en verticale.

#### • Nombre de plus proches voisins

Par souci de clarté nous avons envisagé le cas de deux plus proches voisins (automates à une dimension) qui trouverait son correspondant avec quatre plus proches voisins pour les automates à deux dimensions. Rien n'empêche cependant de considérer un nombre de voisins différent : ce nouveau paramètre est un facteur déterminant dans l'obtention de la forme finale.

## ■ Couleurs

Sans donner plus de détails sur ces questions (ce qui serait impossible dans le cas d'un article) je voudrais donner quelques exemples de travaux auxquels on aboutit en jouant sur les règles, le nombre de plus proches voisins, le caractère torique ou non de l'espace et en faisant intervenir la couleur : on se reportera, sans plus de commentaires, aux figures 5 à 8 (qui demanderaient en réalité, chacune, un développement...)

#### ■ Automates et colorisation

Mes travaux actuels portent sur des associations entre les conditions de création des automates cellulaires et les contraintes colorimétriques appliquées aux pixels du fait de leurs posi-

tions (coordonnées x et y). On aboutit ainsi à des superpositions formelles où s'affrontent des structures d'ordre proche et des formes chromatiques. Je donnerai encore ici des exemples-images sans commentaire supplémentaire (figures 9 à 12).

*Les images présentées dans cette "galerie numérique" sont directement issues de la logique mathématique ; elles n'ont pas d'objet référent et émergent directement d'un monde caché (cf.introduction) dans le monde visuel. Quel que soit leur intérêt par ailleurs, elles sont ainsi rigoureusement neuves et se rangent sans discussion à côté des objets du monde...réel. On peut dire qu'elles inaugurent un nouvel art que l'on pourrait qualifier d'expérimental sans conceptualisation visuelle ; un art, certes issu de la mathématique, mais non art mathématique ou scientifique puisqu'il y a toujours en bout de chaîne un humain qui décide et qui choisit ou rejette les propositions de la Machine-Computer. Cet art aura-t-il besoin, un jour, d'une nouvelle esthétique?*

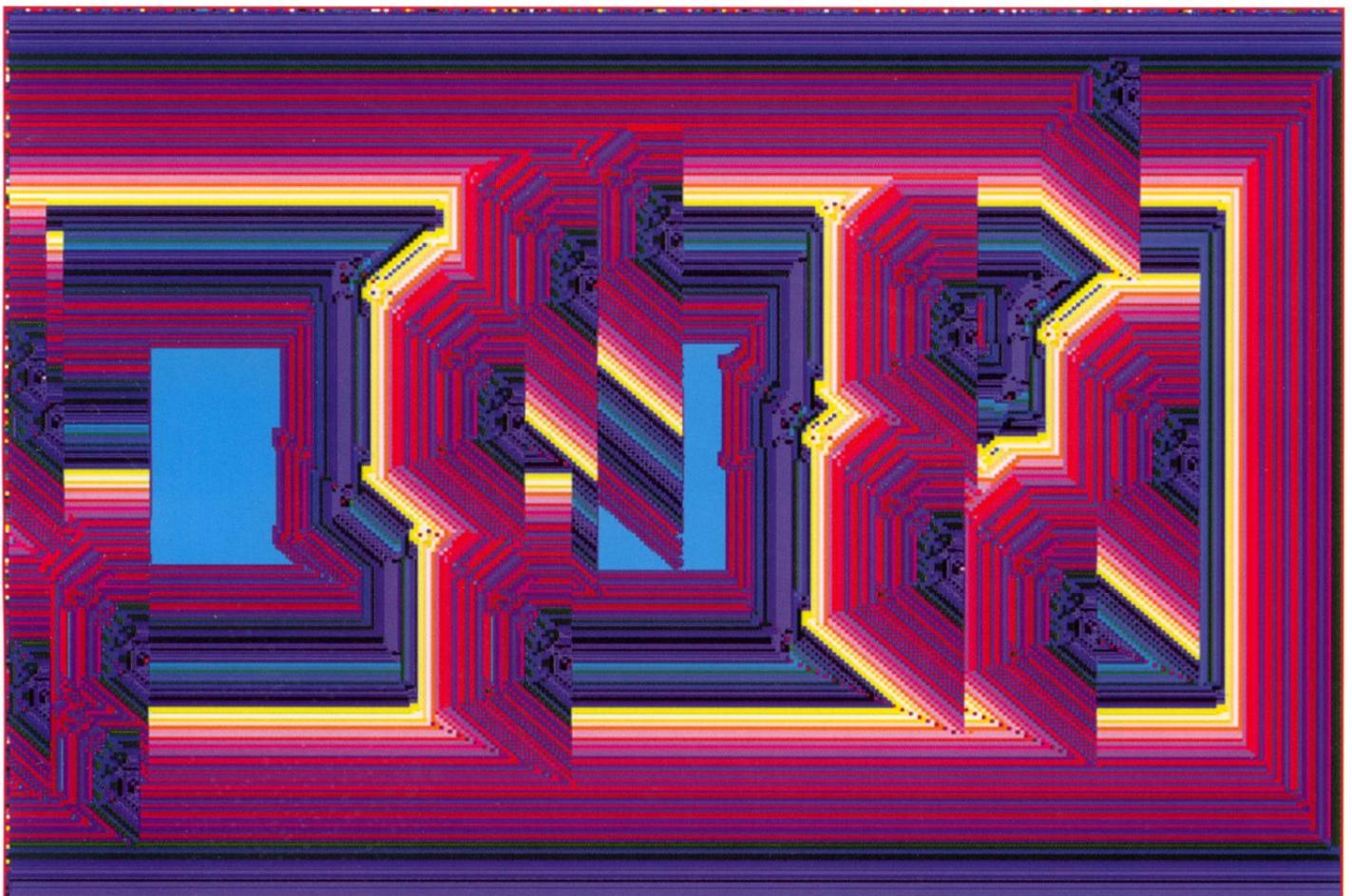


Figure 07 - Automate à deux dimensions et 2 plus proches voisins, série aléatoire, Level 1, 1999.

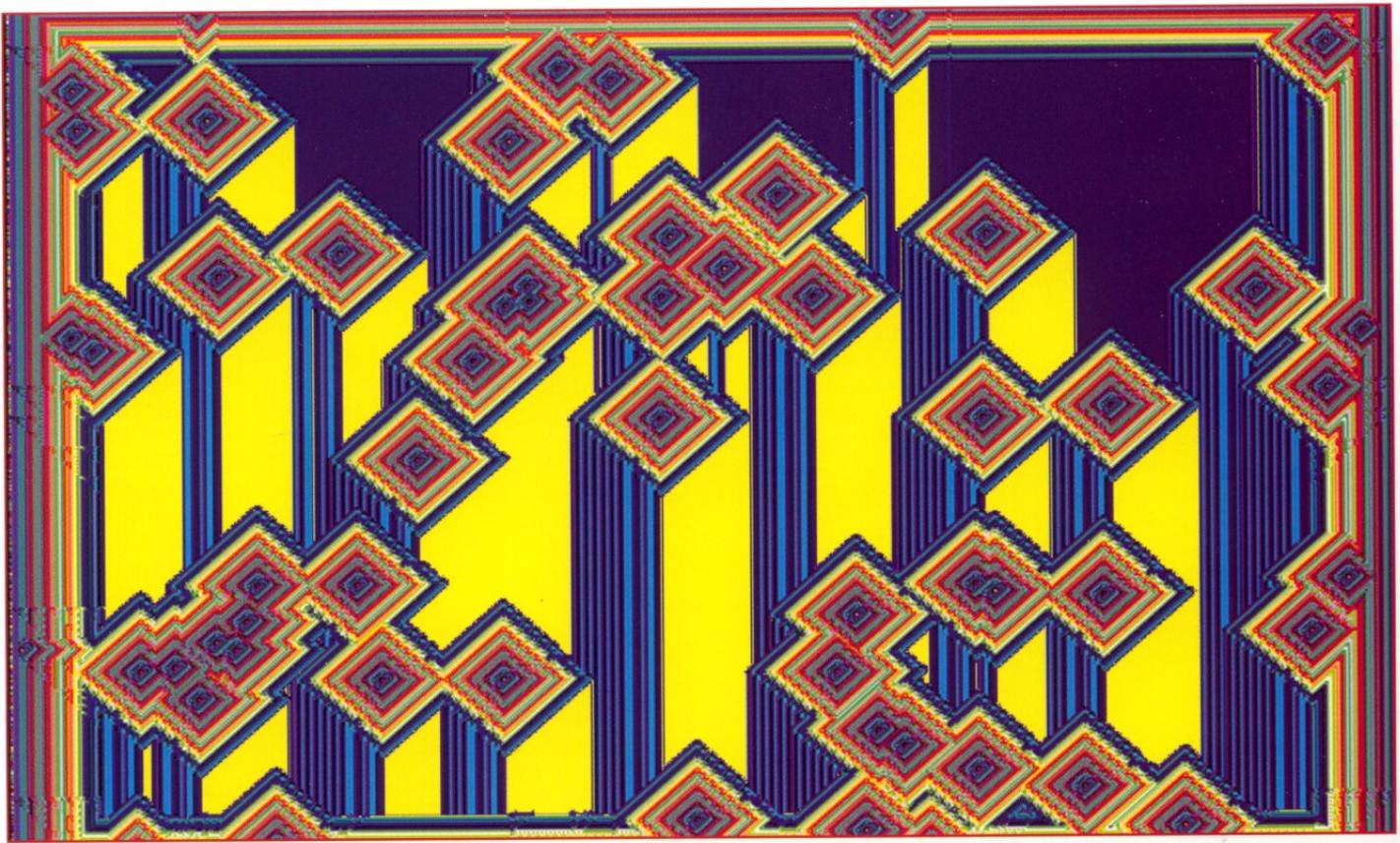


Figure 08 - Automate à deux dimensions et 2 plus proches voisins, série aléatoire, Level 2, 1999.

### A. Notes

- (1). <<http://www.cst.fr/dtech/07-mai98/dtech07.html>>  
 <<http://margaux.ipt.univ-paris8.fr/~chan/colori.html>>  
 <<http://motelec.fpms.ac.be/Electrotechnique/Securit%E9/Colorim%E9trie.html>>  
 <<http://mcmarco.multimania.com/mcmarco2000/COLORIMETRIE/COLORIM1.html>>  
 <[http://www.chez.com/divirion/web\\_cou/cou\\_03.htm](http://www.chez.com/divirion/web_cou/cou_03.htm)>  
 <<http://www.iro.umontreal.ca/~dift6042/notes/node127.html>>  
 <<http://www.sig.enst.fr/~brette/pam/node3.html>>  
 <[http://www.supelec-rennes.fr/ren/perso/jweiss/tv/perception/percept4.html#\\_Toc432324308](http://www.supelec-rennes.fr/ren/perso/jweiss/tv/perception/percept4.html#_Toc432324308)>  
 <<http://www.colorsystm.com/projekte/fr/37cief.htm>>

<<http://mcmarco.multimania.com/mcmarco2000/couleurs/coulglos.html>>  
 <<http://www.erag.ch/MAC/Pages/glossaire.htm>>  
 <<http://www.colorsystm.com/projekte/fr/38lutf.htm>>

- (2). Voir Bernard Caillaud Couleur numérique et couleur psychophysique : remarques d'un plasticien. -Le micro bulletin CNRS n° 53, 1994
- (3). Voir Bernard Caillaud L'analyse sonographique numérique Actes des 6e journées informatique et pédagogie des sciences physiques, Lille, 1994
- Bernard Caillaud Images numériques des sons. Le micro bulletin CNRS n° 60 1995

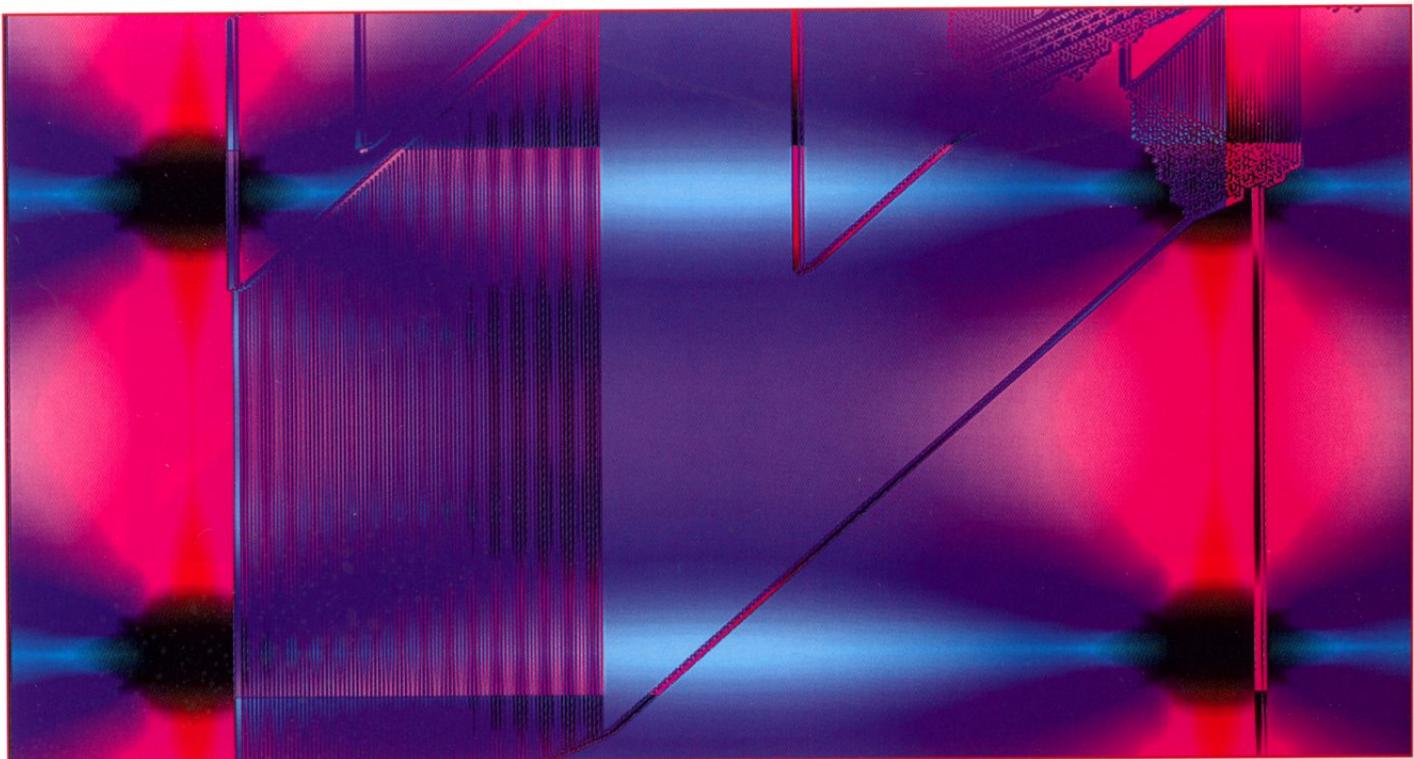


Figure 09 - Automate à une dimension et 4 plus proches voisins, Coloris, 2001.

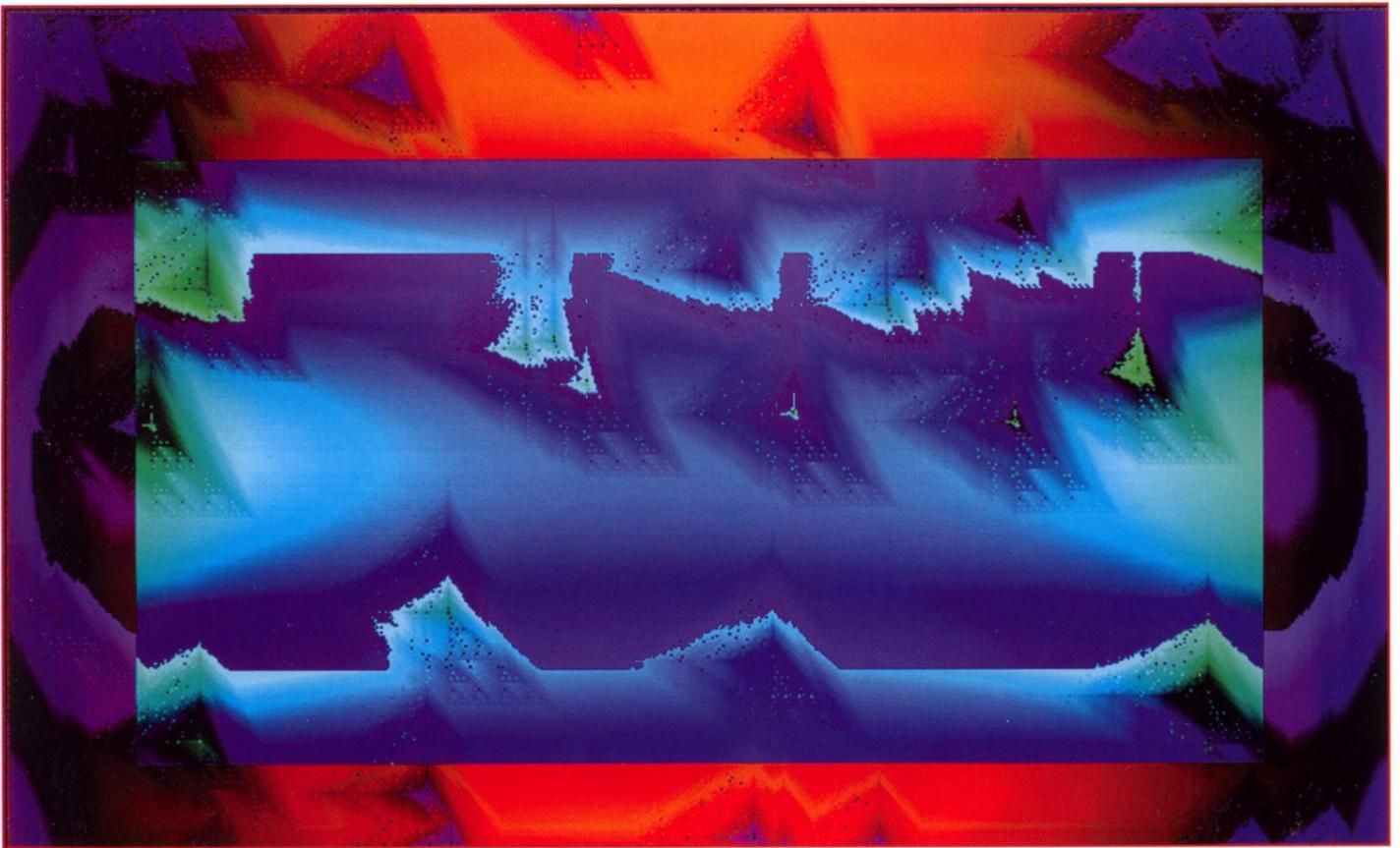


Figure 10 - Automate à deux dimensions et 2 plus proches voisins, Coloris, 2001.

- Bernard Caillaud Analyse sonographique et enseignement CRDP-Caen CNDP, 1995
- Bernard Caillaud Analyse et synthèse spectrale pour l'étude des sons naturels et musicaux avec Daniel Beaufils-UDP n°809-Vol 92, 1998
- Bernard Caillaud Analyse sonographique et aspects de la phonétique appliquée avec Mireille Leriche- EPI n°93, 1999 <<http://www.inrp.fr/Access/JIPSP/phymus/accueil.htm>>

- (4). "Le Computer Art - art par ordinateur, ou art informatique-est sans doute né aux Etats-Unis en 1952, lorsque Ben E.Laposky utilisa une calculatrice analogique et un oscillographe cathodique pour réaliser ses Electrons Abstractions. Peu après, en 1956, il réussit à produire une image électronique en couleurs". 1993-Frank Popper
- (5). J.L.Chermant et M.Coster-Précis d'analyse d'image-Presses du CNRS-1989
- (6). <[http://pczenith.univ-mlv.fr/~jf/Trait\\_image/an\\_imag.html](http://pczenith.univ-mlv.fr/~jf/Trait_image/an_imag.html)>  
<<http://www.iquebec.com/kadchakib/Chap1/Chap1.htm>>
- (7). <<http://www.europia.fr/Caillaud>>
- (8). On trouve depuis peu, en français, des sites bien renseignés sur les automates cellulaires, en voici quelques exemples :  
<<http://www.lirmm.fr/~reitz/sujets/ca.html#Index>>  
<[http://ludique.u-bourgogne.fr/MEMBRES/Ronny/AC\\_1.htm](http://ludique.u-bourgogne.fr/MEMBRES/Ronny/AC_1.htm)>  
<<http://www.renard.org/alife/french/acintro01.html>>  
<<http://www-iis.unil.ch/alea/diplome/c2/c23.html>>

**Le lecteur pourra étendre avantageusement sa propre recherche avec les termes "Cellular Automata" et "A-life"**

## **B. Références bibliographiques relatives à la couleur et à la colorimétrie**

- **Michel Albert-Vanel**, *Le planètes-couleur-système*, ENSAD, Paris, 1983
- **P.J.Bouma**, *Les couleurs et leur perception visuelle*, Dunod, 1949, première édition
- **Manlio Brusatin**, *Histoire des couleurs*, Flammarion, 1986
- **Pierre Buser, Michel Imbert**, *Vision*, Hermann, 1987
- **Bernard Caillaud**, *Couleur et Aléatoire*, Paradigme, 1988
- **Patrick Callet**, *Interaction lumière-matière et synthèse d'image* Diderot éditeur, art et science, 1998, 326 p +CD
- **Alain Chrisment, Pierre Durchon, Dr.Philippe Lanthony, Irène Tavernier**, *Communiquer par la couleur*, Ed. 3C Conseil, 19 rue des Balkan, Paris
- **Alain Chrisment**, *Couleur et colorimétrie*, Ed. 3C Conseil, 19 rue des Balkan, Paris
- **Maurice Dérivé**, *La couleur-PUF-Que sais-je?*, 1964, première édition
- **Maurice Dérivé**, *La couleur dans la publicité et la vente*, Dunod, 1969
- **Maurice Dérivé**, *La couleur dans les activités humaines*, Dunod, 1968, troisième édition
- *Dictionnaire technique des peintures, des travaux de peinture et de colorimétrie appliquée à ces travaux et aux produits de l'espèce*, Ministère de l'économie et des finances. Marchés publics, fascicule GPEM/PV, Publication du Moniteur Paris, 1970
- *Dictionnaire de colorimétrie théorique et technique*, Ministère de l'économie et des finances. Marchés publics, fascicule GPEM/PV.PPO 02. Décision n°28, "Journal officiel n°5562, Paris, 1976
- **Maurice Elie**, *Lumière, couleurs et nature*, Vrin, 1993 (choix de textes historiques)
- **Edouard Fer**, *Solfège de la couleur*, Dunod, 1962, deuxième édition
- **Jacques Fillacier**, *La pratique de la couleur*, Dunod, 1986
- **A.Fournier**, *Colorimétrie*, Editions de l'institut textile de France, 1977
- **Karl Gerstner**, *Les formes des couleurs*, Bibliothèque des arts, 1986
- **J.W.Goethe**, *Le traité des couleurs, triades*, 1973, première édition française



Figure 12 - Automate à deux dimensions et 2 plus proches voisins, Coloris, nouvelle série, 2001.

- **Pierre Glafkides**, *Chimie et physique photographiques*, Paul Montel, 1967, troisième édition
- **Frans Gerritsen**, *Présence de la couleur*, Dessain et Tolra, 1975, première édition française
- **Alfred Hicethier**, *Le cube des couleurs*, Dessain et Tolra, 1969, première édition française
- **M. Indergand**, *bibliographie de la couleur*, Société des amis de la bibliothèque Forney, 1984
- **J. Itten**, *Art de la couleur*, Dessain et Tolra, 1967, première édition française
- **Paul Kowaliski**, *Vision et mesure de la couleur*, Masson, 1978, première édition
- **H. Küppers**, *La couleur. Origine, méthodologie, application*, Dessain et Tolra, 1975, première édition française
- **Yves Legrand**, *Optique physiologique*, Masson, 1972, deuxième édition
- **Dominique Legrand**, *La couleur imprimée : mode d'emploi*, Edition : trait d'union graphique, 1990
- **André Lemonnier**, *Couleur 1, Echelles et schémas*, CCI, 1974
- **Harald Mante**, *La couleur en photographie*, Dessain et Tolra, 1971
- **Ellen Marx**, *Les contrastes de la couleur*, Dessain et Tolra, 1973
- **Alain Pelat**, *Une introduction : vision, photométrie, colorimétrie*, Ellipses, Edition marketing, 1988.  
*Compléments de colorimétrie et illusions géométriques*, Ellipses, Edition marketing, 1989
- **Henri Pfeiffer**, *L'harmonie des couleurs*, Dunod, 1972,  
*Recueil : la couleur*, Editions Ousia, 1993  
*Poétique de la couleur*, Une Histoire du cinéma expérimental Auditorium du Louvre/ Institut de l'image octobre 1995
- **George Roque**, *Art et Science de la couleur*, éditions Janine Chambon, 1997, 474 p
- **George Roque, Bernard Bodo, Françoise Viénot**, *Michel-Eugène Chevreul ; Un savant, des couleurs*, Editions du Museum d'histoire naturelle, 1997, 277p
- **Robert Sève**, *Physique de la couleur ; de l'apparence colorée à la technique colorimétrique*, Masson, 1996

### C. Sites relatifs aux recherches de l'auteur

<<http://www.station-mir.com/kio/>>

Ce site contient, en particulier, les articles suivants :

- "Technoscience-Art: itinéraire d'un plasticien" Revue du palais de la découverte - 1992.
- "Image scientifique et création plastique" Bulletin de l'ADASTA - 1993.
- "Pour un musée de l'image scientifique" Bulletin de l'ADASTA - 1993.
- "Couleur numérique et couleur psychophysique" Le micro-bulletin-CNRS - 1994.
- "Image, algorithme et aléatoire" Revue internationale de sociologie, Rome - 1994.
- "Recherche plastique et Automates Cellulaires" Art Re-Vision - n°5-1994 .
- "Images numériques des sons" Le Micro-bulletin-CNRS-n°60-1995 .

<<http://www.envf.port.ac.uk/illustration/z/the/Caillaud/01.htm>>

Site en anglais ; contient de nombreuses illustrations.

<<http://www.info.unicaen.fr/caen/artcomputer/>>

Ce site est, en partie, lié à l'ouvrage : *Création numérique 1960 - 2000 / Aspects du Computer Art depuis ses origines*