Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Fabrice Neyret

CR1 CNRS

*i*MAGIS - GRAVIR / IMAG - INRIA

Complexité Naturelle et Synthèse d'Images

Soutenue le 22 octobre 2001, devant la commission composée de :

M. Claude Puech	**Président**
M. Bernard Peroche	**Rapporteur**
M. Przemyslaw Prusinkiewicz	**Rapporteur**
M. Jos Stam	**Rapporteur**
M. Didier Arquès	**Examinateur**
M. Christophe Chaillou	**Examinateur**

Remerciements

J'adresse mes remerciements à Claude Puech, le directeur de l'équipe, qui a su façonner peu à peu ce regroupement rare de personnalités, d'ouverture et de moyens qu'est *iMAGIS*, lieu de créativité et de diffusion scientifiques exceptionnel, au sein duquel le hasard à eu la générosité de bien vouloir m'associer.

Je remercie les membres du jury d'avoir bien voulu consacrer de leur temps pour participer à mon évalution, ainsi que Marie-Paule Cani et Xavier Decoret qui ont relu et commenté ce mémoire.

Je salue tous les imagiciens, mes collègues permanents, les anciens étudiants qui ne sont jamais totalement partis, les nouveaux, et notamment tous mes étudiants (ils me prennent pour un Monsieur, c'est amusant !) sans qui peu de travail concret verrait le jour, et également mes élèves, qui ont su supporter sans broncher une demi-heure de dépassement par tranche d'une heure et demi de cours. Je remercie en particulier ceux qui bénévolement ont permis ou permettent à la machine *iMAGIS* de fonctionner, Jean-Dominique, Frédo, Gilles, Éric, Joëlle, Jérémie, Nicolas et quelques autres, soit en maintenant en route contre sa volonté manifeste le matériel informatico-visuel, soit en maintenant la cohésion de l'équipe au travers des moments informels et de l'animation scientifique. Puisse l'esprit d'*iMAGIS* ne jamais s'étioler.

Tout paraît si simple, aujourd'hui. Il y a cependant eu un *avant*, où tout était très loin d'être acquis, et où exilé dans mon postdoc je ne voyais pas comment écrire l'avenir. Je remercie ceux qui m'ont supporté et soutenu – parfois à bout de bras – là bas et ici, Michiel, James, Alexis & Rachel, Shérif & Chantal, Marie-Paule et quelques autres, qui m'ont aussi quasiment forcé à monter ma candidature au CNRS. Je veux bien le leur reconnaître maintenant, c'était une fameuse idée...

Table des matières

Préambule

Après un post-doctorat à l'université de Toronto au *DGP*, j'ai été recruté en octobre 1997 au laboratoire GRAVIR (UMR 5527 CNRS-UJF-INPG ; dirigé par Claude Puech), dans l'équipe *iMAGIS*. Mes travaux s'inscrivent dans le domaine de la synthèse d'images, l'équipe s'intéressant plus particulièrement au traitement des scènes complexes. "*Complexe*" recouvre ici de multiples dimensions, comme la nature des phénomènes (optiques et mécaniques), des formes et des matériaux, et la quantité d'information impliquée.

Ce mémoire présente les approches que j'ai faites miennes pour tenter de représenter la complexité de la nature dans l'espoir d'en produire des images et animations de synthèses, ainsi que les travaux particuliers que j'ai menés dans cet esprit après ma thèse de doctorat.

Dans le premier chapitre, j'introduis le contexte de la production d'images, ainsi que les trois principaux axes d'attaque que j'adopte pour le traitement de la complexité, à savoir le *multi-échelle*, le *procéduralisme*, et la *simulation phénoménologique*. Dans le second chapitre, je décline mes thèmes de recherche, et retrace les travaux existants relatifs au sujet. Dans le troisième, je résume mes contributions dans ces divers thèmes, le texte de mes principaux articles étant reproduit en Annexes A à D.

1 Introduction aux thèmes

1.1 Réalisme, complexité et temps de calcul

Le marché traditionnel de la synthèse d'image qu'est l'industrie du cinéma et plus généralement l'audiovisuel, est en pleine expansion et demandeur d'effets spéciaux de plus en plus sophistiqués. Il est consommateur d'**images réalistes**, mais est pénalisé par le **temps de calcul** (15 mn à plusieurs heures par image). Le marketing au sens large (publicité TV, automobile, architecture) a des besoins relativement similaires. On peut escompter que l'usage des images de synthèse s'y étende avec la banalisation des outils.

Un domaine en plein essor est celui de la réalité virtuelle, qui, prolongeant les traditionnels simulateurs, a besoin de **temps réel** (25 images par seconde, voire bien plus), et aimerait bénéficier d'une meilleure qualité d'image.

Un marché nouveau par son importance est celui du jeu, d'autant moins à négliger que son budget a dépassé aujourd'hui celui du cinéma. Les animations sont soit précalculées, ce qui ramène à la première catégorie d'applications, soit interactives, ce qui rejoint la seconde (de même, l'imagerie médicale, la visualisation scientifique, l'étude d'impact, font appel selon les applications soit au rendu réaliste, soit au rendu temps réel).

On peut reformuler ces demandes ainsi :

- traiter des scènes réalistes complexes avec un temps de calcul plus raisonnable ;
- accroître le réalisme de ces scènes, notamment en augmentant encore leur complexité apparente ;
- complexifier les images interactives tout en préservant l'interactivité ;
- pouvoir spécifier des scènes complexes de façon ni trop exhaustive, ni trop générique.

1.2 Complexité naturelle

L'archétype de la complexité se rencontre avec les **scènes naturelles**, sous toutes leurs formes (plantes, fluides, nuages, animaux à fourrure, terrain, feu...), notamment à cause de l'aspect "récursif" que l'on y retrouve : il y a des structures à spécifier à toutes les échelles, et en même temps une certaine généricité dans les "motifs" qui apparaissent à une échelle donnée. Lorsque l'on cherche à la reproduire virtuellement, cette complexité pose d'énormes problèmes quantitatifs aux outils et techniques usuels, tant en termes de travail de spécification et de capacité mémoire qu'en termes de calcul du mouvement et du rendu.

Les scènes naturelles sont intéressantes en elles-mêmes : l'audiovisuel (effets spéciaux, études d'impact), le marketing au sens large (architecture notamment), les simulateurs, sont demandeurs de scènes naturelles virtuelles ; les éditeurs de jeux cherchent eux aussi à multiplier les scènes extérieures. On peut en outre escompter que les modèles ou algorithmes mis au point pour traiter la complexité des scènes naturelles seront également généralisables à d'autres types de situations.

Sciences physiques vs expérience visuelle

D'un tout autre point de vue, la synthèse de scènes naturelles offre aussi la possibilité de relire et "tester" diverses théories de la physique (au sens large), afin de confronter leur "réalisme" à la sagacité visuelle d'un observateur via la génération d'images et d'animations. Cette "utilisation" des théories de la physique peut différer amplement de ce pourquoi elles ont été conçues : le critère visuel humain est subjectif et qualitatif plutôt que quantitatif, et privilégie certaines échelles. En revanche, il lui faut des résultats crédibles en tout point de l'image à chaque instant, et non une poignée de valeurs synthétiques. La physique s'employant à rendre compte du réel, elle devrait a fortiori permettre de rendre compte et prévoir l'aspect visuel des scènes. Les écueils sont cependant nombreux :

- À la différence des objets manufacturés, les scènes naturelles sont extrêmement complexes, notamment du point de vue de la variété des phénomènes qui y interviennent. Il est difficile de trier ce qui est prépondérant de ce qui est négligeable vis à vis de l'aspect visuel, d'autant que les phénomènes interagissent entre eux.
- L'échelle de modélisation utilisée en physique est très variable : pour ce qui concerne les phénomènes naturels qui nous intéressent, cela va du dixième de micron pour ce qui touche au façonnage de la couleur par les matériaux, à la centaine de kilomètres pour la modélisation des phénomènes atmosphériques. Notre échelle de référence est celle avec laquelle l'Homme perçoit son environnement habituel. Ainsi, une modélisation peu fine nécessite d'être complétée (e.g. par une interpolation mimétique du phénomène), et une modélisation trop fine nécessite d'être réinterprétée (ou idéalement, intégrée) à l'échelle utile. Dans les deux cas, il y a un écart important entre ce que fournit la physique et ce dont on a besoin pour calculer des images.
- Une équation physique est difficilement utilisable sans valeurs numériques pour ses paramètres. Or en pratique, dès que l'on s'éloigne des corps purs, ces valeurs numériques sont des denrées rares. D'autre part, nombre de modèles physiques sont des constructions artificielles[1] (pour l'élasticité non linéaire, la turbulence), et l'obtention de paramètres peut être très difficile.
- Aussi surprenant que cela puisse paraître, si la science a avancé en profondeur dans certains domaines (mécanique quantique, électromagnétique,...), d'autres, parfois très voisins, n'ont pas atteint un niveau de compréhension utilisable (e.g. turbulence), voire échappent encore largement à la modélisation. Par exemple, bien que l'Homme côtoie nuages et rivières depuis quelques centaines de millénaires (alors qu'il n'a jamais vu de quarks !), non seulement aucune théorie n'explique les moutonnements des premiers ou les ridules des secondes, mais il semble même que ces sujets échappent totalement à l'intérêt des scientifiques[2].

[1] Tout modèle est une construction, par définition artificielle. Mais certaines sont peu commodes et intuitives (car peut-être inachevées ?).

[2] Serait-ce parce qu'ils n'ont pas d'implication industrielle ?
En fait, ces deux sujets commencent à susciter un peu d'attention depuis très récemment : pour le premier, parce que la forme des nuages influe sur les bilans radiatifs, ce que l'on ne

Validation
Les remarques précédentes suggèrent d'avoir un minimum de recul et de la prudence par rapport aux modèles et équations de la littérature : *ils ne sont pas le réel.* Puisque nous cherchons dans notre domaine à reproduire l'apparence de scènes et d'objets, il est primordial, comme aimait à le répéter Alain Fournier [Fou99, Fou91], de se référer systématiquement aux **images du réel**, comme source d'inspiration et comme moyen de validation.[3]

La validation est chose difficile à mener rigoureusement en synthèse d'images : peu de sujets se portent à la comparaison absolue pixel à pixel, et si des tests psychométriques seraient naturels puisque notre cible est le spectateur humain, il est délicat de faire juger un aspect isolément sans introduire un contexte qui perturbera l'expérience (i.e. on ne peut montrer une forme sans matière ni éclairage, ni soumettre un éclairage ou un mouvement sans objet support, et pourtant si ces attributs ne sont pas eux-même parfaitement réalistes, ni l'algorithme de rendu irréprochable, le test ne porte plus sur l'aspect voulu). L'oeil subjectif du chercheur (et de ses pairs) est donc souvent le seul critère de jugement ; il lui faut donc à tout prix des images de référence pour juger un peu moins subjectivement du résultat, et remettre le modèle en cause tant que celui-ci n'est pas convainquant[4].

1.3 L'utilisateur

En synthèse d'images, les modèles sont destinés à être utilisés par des humains, qu'il s'agisse de l'artiste qui construit les scènes, ou de l'utilisateur terminal, acteur d'un jeu ou d'une simulation, ou spectateur d'un film. S'agissant de la spécification des scènes, il faut éviter à l'artiste redondances et travail rébarbatif, mais il faut cependant lui laisser un fort *pouvoir d'expression* : il ne s'agit pas pour lui de réaliser une visualisation neutre, mais de faire passer une intention (tant dans la succession des évènements que dans l'aspect et l'éclairage). Un outil automatique, même fondé sur la physique, est frustrant pour un artiste, qui a sa propre idée de ce qui est réaliste[5], qui veut pouvoir s'écarter du réalisme (e.g. pour dramatiser ou idéaliser), et qui en tout cas veut un contrôle important de la disposition et de l'évolution des principaux éléments de la scène dans la mesure où ceux-ci doivent avant tout servir un scénario.

---

peut plus négliger dans les modèles météorologiques fins, sachant que l'on ne peut pas non plus adopter une modélisation métrique pour la simulation du climat global ; pour le second, parce que l'exploitation des images satellite de la mer pour connaître la hauteur des vagues à partir des reflets est impossible si l'on n'a pas un modèle explicatif des structures fines de la surface. Cela dit, peut-être que la synthèse d'images constituera elle-même l'intérêt industriel suscitant le développement des connaissances en ce domaine...

[3] J'ai commencé à en mettre à disposition (plus de 200) en ligne [Ney].

[4] L'industrie des effets spéciaux a souvent de meilleurs modèles que le monde académique pour cette raison : le logiciel, l'effet ou le film ne se vendront pas si leurs destinataires ne jugent pas l'image convainquante, aussi les programmeurs itèrent réellement, voire changent d'approche, jusqu'à obtenir un bon résultat ; alors que nous nous arrêtons facilement à la première itération...

[5] Et son intuition est parfois plus juste que le résultat de nos modèles "réalistes", soit que ces derniers soient incomplets (e.g. a-t-on bien pris en compte les éléments peu structurés ; ou la variation des paramètres d'un lieu à l'autre ?), soient qu'ils s'incluent dans un environnement logiciel qui, lui, n'est assurément pas physiquement correct (e.g. l'éclairage direct et indirect).

Si les outils doivent être puissants, ils doivent donc aussi laisser à l'artiste des moyens de contrôle. Ce contrôle doit pouvoir s'effectuer à différents niveaux, simple ou détaillé selon l'importance de l'effet (e.g. premier plan ou décors). Les moyens de contrôle doivent être **pertinents**, i.e. les paramètres de réglage ne doivent pas être trop nombreux, ni trop fins et abstraits. Une représentation fondée sur "les bons" paramètres est donc susceptible de constituer un bon outil d'expression.

D'autre part, un outil interactif permet à l'utilisateur d'intuiter les effets des paramètres, et de procéder par tâtonnements. Un modèle léger peut donc conduire à un meilleur résultat qu'un modèle complexe, dans la mesure où l'artiste pourra peaufiner davantage les paramètres et affiner la mise en forme de la scène dans ses divers aspects.

1.4 Modèles multi-échelles

Les algorithmes de rendu (qui calculent l'illumination parvenant à l'œil) opérant soit par projection des éléments sur l'écran (Z-buffer), soit par échantillonnage à l'aide de rayons (ray-tracing), le coût en calcul va croissant (et ce pas toujours linéairement) avec la quantité d'information. Pour maîtriser ce coût, il est souhaitable d'utiliser une représentation des objets appropriée à l'échelle où on les voit, donc de disposer de représentations **multi-échelles** (car la taille apparente évolue avec le point de vue).

À noter qu'au delà de ce qu'il est objectivement possible de distinguer à travers un pixel, le système visuel humain a ses propres limites et préférences psychophysiques, dont l'étude devrait permettre de tirer parti afin de ne calculer et afficher que ce qui est perceptible. Dans un cas comme dans l'autre, la difficulté consiste à s'affranchir de ce que l'on *sait* d'un objet (e.g. il est constitué de feuilles), pour ne représenter que ce qu'on en *voit* (des taches d'ombre et de lumière).

Niveaux de détails

Une technique courante consiste à recourir à des **niveaux de détails**, revenant à spécifier la géométrie des objets plusieurs fois avec une précision différente, de manière à n'utiliser une représentation "lourde" que pour les points de vue proches, pour lesquels les détails sont objectivement visibles. Ce traitement peut être automatisé, notamment à l'aide des algorithmes de décimation polygonale, qui sont – avec la course au taux de polygone par seconde du hardware graphique – les deux principales voies développées ces dernières années en recherche.

Cette approche est cependant purement géométrique, et suppose que les détails plus petits qu'un pixel d'image ne contribuent pas à l'illumination, ce qui est faux : quelle que soit la taille apparente de ses ondulations, une tôle ondulée reflète globalement la lumière différemment d'une tôle plane. De même, une forêt de pins privée de ses aiguilles n'aurait ni la même couleur, ni le même ombrage, ni la même transparence. Cette non-équivalence visuelle (en dépit du contrôle de l'erreur géométrique) entraîne notamment que le passage d'une échelle à l'autre n'est pas continu (effet de "poping").

Hiérarchie de modèles
Les conséquences visuelles des détails interviennent jusqu'aux échelles microscopiques, influençant voire déterminant la réflectance d'un matériau (couleur, anisotropie), et l'aspect dû à son état de surface (rugosité, texture). Cependant, les recherches en modélisation de l'apparence s'étant développées indépendamment de celles en modélisation des surfaces (et en faisant appel à d'autres domaines en mathématiques et en physique), la représentation en synthèse d'image de la réflectance (loi d'illumination locale) et de la texture sont d'une nature totalement différente des représentations géométriques. On peut cependant considérer que ces modèles sont des représentations de la géométrie adaptées à ces échelles. Ainsi, Kajiya suggère [Kaj85] d'opérer en fonction de la distance du point de vue une transition de modèle géométrique à modèle texturel, puis à modèle photométrique (réflectance), c'est à dire d'établir une **hiérarchie de modèles**.

Cette idée fondamentale a été peu suivie. De nombreux modèles de réflectance de matériaux sont dérivés d'hypothèses sur la microgéométrie des surfaces, divers modèles texturels phénoménologiques ont été développés pour permettre à l'utilisateur de contrôler ou d'imiter les variations locales de l'aspect des surfaces, et des modèles de simplification ou d'amplification géométrique s'occupent des échelles où le relief est directement visible*. Mais ces démarches ne sont pas connectées et correspondent à des sous-disciplines indépendantes et de culture assez différentes.

* Je traite de ces divers modèles dans un chapitre de livre consacré à la représentation des matériaux [Ney02], reproduit Annexe B.

D'autre part, si la dérivation des effets visuels garde une certaine homogénéité d'approche avec la spécification des surfaces (par exemple pour une poterie rugueuse, un terrain, un toit en tuiles), dans la mesure ou il s'agit de réaliser une intégrale sur un élément de surface paramétré (à moins que l'on recoure à une description statistique), les repères classiques disparaissent pour les quasi-surfaces (tissu, cheveux, fourrure) qui vues de près perdent leur qualité de "surface",et pour les objets distribués dans l'espace (feuillage).

1.5 Procéduralisme *

* cf note précédente. Voir aussi [EMP+94].

Il est parfois possible de décrire l'*apparence* par un ensemble de règles ou de propriétés, au lieu de devoir spécifier explicitement chaque détail de la forme ou de la couleur. C'est notamment souvent le cas lorsqu'il s'agit de détails petits et répétitifs. Cependant la véritable distinction est dans l'*intention* de l'artiste : lorsqu'un élément importe dans son individualité, il souhaitera le façonner en particulier ; lorsqu'il est conçu comme participant à l'**habillage** d'une entité plus importante, les caractéristiques pertinentes sont avant tout statistiques. On peut alors se permettre une génération automatique, se conformant aux paramètres génériques spécifiés par l'artiste (lesquels peuvent d'ailleurs eux même varier d'un endroit à l'autre, soit explicitement, soit selon une fonction dont les propriétés ont été spécifiées).

Les fractales (flocons de von Koch, triangles ou pyramides de Sierpinsky...) sont un exemple de figures procédurales ; elles sont cependant peu utilisées en tant que telles pour la spécification de scènes. Les textures de couleur (ou de transparence) constituent la principale modalité recourant au procéduralisme : Perlin et Worley ont proposé des fonctions génériques permettant d'imiter notamment les matériaux à veine ou à grain ; des grammaires ont aussi été utilisées pour décrire l'aspect d'objets manufacturés. On dispose également d'algorithmes plus complexes pour reproduire l'apparence : si l'on connaît les causes qui ont produit la configuration à imiter, on peut recourir à des simulations spécifiques, comme celles des équations de réaction-diffusion régissant la couleur de la robe des animaux à taches ou à rayures, ou celles de la fracturation d'une surface rigide. S'il est plus commode de recourir à une description statistique de l'aspect (spectre, autocorrélation), ou si l'on dispose d'un échantillon de référence duquel extraire cette information, il est possible de synthétiser des textures se conformant à ces propriétés.

Il n'y a cependant aucune raison de limiter à la spécification de la couleur l'usage du procéduralisme ; tous les outils mentionnés plus haut peuvent potentiellement s'appliquer à la spécification de formes, voire de mouvements. Ce type d'usage est pourtant très rare[6], à quelques exceptions notables : les plantes, de structure récursive et répétitive, sont souvent modélisées par système de règles ; de même, les terrains peuvent être construits automatiquement par subdivision récursive perturbée aléatoirement. Le *bump mapping*, qui imite efficacement le grain ou l'embossage d'une surface, constitue un cas limite, dans la mesure où l'on ne génère pas objectivement de la forme[7] mais juste des variations d'intensité lumineuse (i.e. les variations de la forme se résument à celles de la normale, qui ne se manifeste que dans la réflection de la lumière). Les concepts d'**amplification géométrique**, ou d'**interpolation stochastique**, qui permettent d'ajouter de l'information à une échelle plus fine que celle des données disponibles (mesures, ou résultats de simulation), font timidement leur apparition. Ils ont été utilisés pour la synthèse de terrains (MNT* enrichi aux petites échelles) et de fluides (ajout de détails dans le champ de vitesse, respectant les lois de conservation).

* *Modèle Numérique de Terrain.*

[6]On peut augurer que cela va s'améliorer avec le développement des surfaces de subdivision, procédurales par définition, qui partagent une certaine proximité avec l'approche texturelle (notamment par le fait qu'elles se prêtent bien aux outils de traitement du signal [LMH00]).

[7]i.e. du relief. En fait, la notion de *forme* n'est pas vraiment bien posée : pour le géométricien, il s'agit de la surface mathématique continue ; pour son collègue informaticien, il s'agit du maillage en mémoire, voire d'une version expurgée des détails "inutiles" car inférieurs au pixels ; pour l'artiste, il s'agit d'une surface matérielle comprenant divers attributs... Dans ce dernier cas, comme le dit Alain Fournier [Fou94, Fou99], il est difficile de distinguer la forme de ce qui régit l'apparence dans son ensemble. De plus, comme le signale Luciani, la notion de forme n'existe pas sans la donnée d'une perception (grandeur physique plus capteur) : la forme d'un objet concret n'est pas la même du point de vue tactile, sonore, lumineux, électronique, X ou gamma, et change aussi selon la dimension (largeur des détails par rapport à la longueur d'onde de la radiation ou la taille du senseur)... C'est précisément l'objet de la section 1.4 que de chercher à définir des représentations en fonction de la perception variable que l'on a des différents attributs des objets.

1.6 Simulation : modèles physiques vs modèles phénoménologiques

Plusieurs situations complexes, comme la modélisation des écoulements fluides, ou la modélisation de l'éclairage global, se rapprochent de problèmes d'ingénierie mathématique, lesquels reposent sur la résolution numérique de systèmes d'équations différentielles locales sur une version discrétisée de la scène. Il est donc tentant de recycler ce savoir-faire pour nos propres problèmes : c'est ce que l'on nomme *approche* **physique** (ou *"par modèles physiques"*), laquelle permet effectivement de produire des résultats à la richesse visuelle impressionnante. Cependant les buts et critères de l'infographie ne sont pas les mêmes que ceux de l'ingénierie : dans notre cas la plausibilité est suffisante (ce qui est moins exigent que l'exactitude), et seules les valeurs visibles ou ayant un effet visible sont utiles ; par contre une haute résolution visuelle est requise (alors que pour une étude thermique le résultat peut consister en quelques scalaires représentatifs). Le prix à payer en terme de coût en calcul (et en mémoire) peut alors être jugé excessif[8], surtout si en pratique il rend impossible l'utilisation de hautes résolutions. D'autre part, comme pour l'ingénierie, il faut être bien sûr d'introduire toutes les équations liées aux phénomènes en présence, et il faut trouver des valeurs pour les divers paramètres (conditions aux bords, notamment) ; c'est autrement plus difficile dans une scène naturelle que dans un milieu artificiel à l'environnement contrôlé. De plus, quand les caractéristiques visibles sont des phénomènes émergents des équations (ondes de chocs, caustiques, reflets, plis, conformation), donc non gérés explicitement, il est difficile de garantir qu'elles sont convenablement simulées, et il est très délicat pour l'utilisateur de les contrôler (alors que c'est son intention !).

Dans certains cas, la modélisation de l'aspect physique et de son évolution peut également être faite en s'intéressant directement aux *conséquences macroscopiques visibles*, plutôt qu'aux *causes microscopiques internes* : forme et propagation des vagues, propriétés hydrauliques, instabilités, réflectance, motifs, propriétés spectrales... Les approches **phénoménologiques**[10] permettent ainsi de caractériser très efficacement les configurations et comportements visibles, en évitant les problèmes de la simulation à partir

[8]D'autant que l'on ne fait aucun usage de toute la *connaissance a priori*[9] dont on peut disposer sur le phénomène naturel donné auquel on s'intéresse : on introduit lors de la simulation numérique considérablement plus de degrés de liberté que l'apparence du phénomène ne semble en avoir, ce qui du simple point de vue de la théorie de l'information est un signe d'inefficacité et de gaspillage de ressources.

[9]La connaissance a priori disponible peut prendre diverses formes, de la simple observation visuelle – éventuellement via celle des artistes peintres – aux considérations physiques empiriques (régimes, domaines de variation usuels). Même en matière de *formes*, d'Arcy Thompson [Tho17] montre qu'indépendamment de l'arbitraire apparent et de la multitude des interactions (à l'échelle cellulaire ou macroscopique), l'environnement, et notamment l'échelle, contraignent et façonnent en grande partie la morphologie dans la nature.

[10]Que l'on peut aussi appeler *empiriques*[11], ou encore *impressionnistes* si l'on traite du rendu des détails. NB : Alain Fournier établi une taxonomie plus précise que la mienne dans [Fou89].

[11]Comme la physique consiste essentiellement, à partir de l'observation, à isoler des objets et états, puis à formuler les interactions entre ceux-ci, je trouve qu'il est peu valide de qualifier une physique d'"empirique" ou de "fondamentale" (avec des connotations entendues : la première est moins rigoureuse voire moins valide) sous le seul prétexte que la première s'applique à une grande échelle, et la seconde à une échelle consensuellement atomique.

des équations locales. Ces caractérisations, utilisées historiquement très tôt, peuvent être reliées (éventuellement a posteriori) aux modèles physiques fins par étude modale ou intégration analytique (au moins au voisinage de l'équilibre) de ceux-ci. Pour cette raison, on peut rapprocher les modèles issus des approches *phénoménologiques* et *analytiques* : les premières tentent de modéliser directement l'aspect sans tenir compte des causes ; les secondes tentent de déduire les comportements globaux à partir des lois locales en s'appuyant sur une série d'hypothèses et simplifications que l'on sait applicables par l'observation (connaissance a priori). D'autre part, des ponts permettent souvent de relier ultérieurement des physiques différentes[12], un modèle empirique pouvant alors se bonifier en modèle analytique.

1.7 Bilan

Dans ce chapitre, j'ai introduit le contexte de la synthèse d'images en tant que domaine applicatif, et le problème du traitement de la complexité, particulièrement aigu dans le cas des scènes naturelles. En outre, j'ai montré comment chercher des représentations capables de produire des images "naturelles" crédibles pouvait aider à faire progresser la compréhension des phénomènes naturels.

Parmi les diverses approches susceptibles de traiter la représentation de la complexité naturelle, j'ai décrit les trois que j'avais suivies jusqu'à présent, à savoir le multi-échelle, le procéduralisme, et la simulation phénoménologique. Peut-être les ai-je préférées à d'autres, comme l'optimisation des structures et algorithmes ou le réemploi de mesures réelles (IBR, motion capture...), précisément parce qu'elles permettaient d'avantage de comprendre quelque chose sur les lois de la nature, réelle et subjective (i.e. perçue). Dans le chapitre suivant, j'éclaire mes motivations, avant de décrire les divers thèmes auxquels je me suis consacré.

[12]de sujet ou d'échelle d'intérêt, comme la physique quantique et la chimie, la thermodynamique et la mécanique des fluides, la mécanique des fluides et la théorie des ondes, la chimie et la biologie, la biologie et la physiologie, etc.

2 Mes thèmes de recherche

2.1 Introduction

Motivations

Les motivations qui orientent le choix des approches et des thèmes d'un chercheur sont souvent multiples et pas toujours totalement conscientes. Pour ce qui me concerne, interviennent certainement mon passé dans l'**industrie** des effets spéciaux (notamment à *Thomson Digital Image*), ma profonde curiosité envers les **sciences** physiques au sens large (celles qui cherchent à rendre compte de l'apparence et du comportement du monde – vivant ou inanimé – dans ses divers aspects), et l'appropriation des "jouets **techniques**" acquis au cours ma formation (maths, maths appliquées, informatique). Ces trois sources d'influence ont forgé[13] mes valeurs et ma culture.

- La première tend à maintenir la finalité applicative de mon milieu industriel d'origine, me conforte dans les thèmes liés au rendu réaliste, m'impose les critères de l'*utilité*, de l'*efficacité* et de la *contrôlabilité*.
- La seconde pousse à la curiosité contemplative, au développement de modèles "pour le plaisir" qui illustrent, implémentent ou tentent de valider visuellement des connaissances de diverses disciplines[14], réappliquées à la spécification de mondes que l'on souhaite visuellement crédibles.*
- La troisième tend à mettre en œuvre divers "jeux de Mécano" permettant de "bricoler" une maquette qui donne rapidement chair à une idée simple.* Elle incite à participer à divers projets dont le défi est avant tout technique, ce qui correspond notamment dans mon cas aux projets temps-réel comme les simulateurs ou les jeux 3D.

* C'est la synthèse d'images envisagée comme réciproque de l'analyse scientifique, dans l'esprit de 1.2.

* Cette réalisation de maquettes pour tester les idées participe du soucis de validation que j'évoquais en 1.4.

Le cumul de ces influences me conduit particulièrement vers les **scènes naturelles**, dans la mesure où celles-ci concentrent simultanément :

- une demande industrielle (effets spéciaux, parcs à thème, étude d'impact, jeux) confrontée à de fortes difficultés, devant produire des images hyper-réalistes[15] et du décor au kilomètre ;
- une foule de problématiques scientifiques mobilisées pour représenter – de façon calculable, et contrôlable – des phénomènes d'une grande variété et d'une complexité polymorphe ;
- une nécessité de faire le pont avec les diverses disciplines scientifiques qui étudient ces divers phénomènes, pour emprunter et adapter leurs modèles ;
- le besoin d'algorithmes et de structures de données astucieux pour obtenir un calcul rapide du rendu : moins d'une heure pour du rendu réaliste de scène complexe, $1/25^{\text{ème}}$ de seconde ou moins pour des applications temps-réel.

[13] Ce qui ne veux pas dire qu'elles ne sont pas contradictoires...

[14] Mécanique des milieux déformables, résistance des matériaux, mécanique des fluides, physique de l'atmosphère, optique, biologie, botanique, psychologie de la vision, géologie...

[15] L'hyper-réalisme n'est pas encore une demande primordiale pour les jeux, qui peuvent se contenter d'un réalisme approximatif, mais exigent une grande fluidité (i.e. calculs et affichage très rapide) et des possibilités d'interaction avec le décor.

En somme, mes travaux visent certains débouchés applicatifs, certains thèmes, et certaines techniques, sans que ces niveaux ne se réduisent l'un à l'autre : je m'intéresse aussi à des thèmes qui ne sont pas destinés à être transférés à l'industrie audiovisuelle, et à des techniques dont l'utilité ne se limite pas au thème des scènes naturelles. D'autre part, comme je ne suis pas un théoricien de l'algorithmique, je suis peu motivé pour travailler à l'amélioration incrémentale d'algorithmes existants. Je préfère donc explorer hors des voies balisées, attaquer des problèmes non résolus, essayer des approches nouvelles. C'est pour moi l'occasion de maximiser la part de créativité (par rapport au travail d'"étaillage", plus rébarbatif bien qu'indispensable dans toute science), ainsi que le ratio résultats nouveaux (au sens "images nouvelles") sur travail de réimplémentation préliminaire[16].

Mon domaine initial (à TDI) concernait avant tout le rendu, couvrant la spécification des matériaux et textures et le calcul du rendu proprement dit. Mes travaux de thèse m'ont conduit à introduire de nouvelles représentations pour optimiser le rendu, qui gomment la frontière entre représentation géométrique et photométrique. Puis en cherchant des représentations qui soient animables (notamment lors de mon postdoc à l'Université de Toronto), et en m'intéressant aux formes naturelles qui résultent essentiellement d'un mouvement (nuages, feu, fluides), la frontière entre modélisation géométrique et simulation du mouvement s'est à son tour estompée. Mes thèmes de recherche traversent donc les trois sous-disciplines de la synthèse d'image (modélisation géométrique, simulation du mouvement, rendu réaliste), mais se concentrent néanmoins sur quelques préoccupations que je présente dans les sections qui suivent.

Contenu du chapitre

Dans ce chapitre, j'identifie et décris sept thèmes de recherche (liés) selon lesquels se sont déclinés mes travaux, dans le sillage des trois approches de la représentation de la complexité citées précédemment. Parmi ces thèmes, les *représentations alternatives*, les *modèles d'habillage* et les *hiérarchies de modèles pour le mouvement* recoupent les trois axes, tandis que l'approche *phénoménologique* est déclinée en deux thèmes correspondants à l'animation et au rendu. Le thème lié à l'usage du *hardware graphique* est une forme de technique alternative (à l'usage d'algorithmes) pour obtenir des modèles efficaces. Le dernier, consacré aux *scènes naturelles*, est un thème applicatif, qui recoupe et s'appuie sur les précédents.

Pour chacun de mes thèmes de recherche, je décris et justifie leur approche, en précise les limites ou les dangers, puis je mentionne les travaux existants relatifs au sujet, et je situe brièvement comment se situent mes contributions, la synthèse de mes divers travaux faisant l'objet du chapitre suivant.

[16] Les méthodes publiées que l'on aimerait utiliser ou prolonger sont rarement disponibles sous forme de programme. Il faut donc les réimplémenter, sachant que ce temps ne correspond pas à une activité de recherche, et que l'information présente dans les papiers n'est pas toujours suffisante pour reproduire une maquette. De plus, certains thèmes de recherche en graphique reposent aujourd'hui sur un substrat logiciel lourd, "capital" concentrant le travail de plusieurs années de plusieurs chercheurs, et sont donc accessibles aux seules équipes qui ont investi dans cet effort spécialisé.

2.2 Hiérarchie de modèles pour la modélisation géométrique : représentations alternatives

L'idée sous-jacente est de construire des représentations géométriques minimales selon des critères purement visuels, d'où la qualification d'**approche impressionniste**. Dans la mesure où le point de vue varie au cours de l'animation, une telle représentation doit être adaptative. Dans la lignée du concept de hiérarchie de modèles énoncé en 1.4, il s'agit de recourir aussi bien à des modèles strictement géométriques (facettes) que texturels ou photométriques (réflectance) pour représenter les formes aux diverses échelles. En effet, la géométrie des détails vus de loin d'un pelage animal ou d'un toit en tuiles, comme la microgéométrie d'un sol rugueux ou de cristaux de glace dans la neige, ont une incidence visible (voire caractéristique) dans l'image. Pour autant, cela ne signifie pas que l'on voit explicitement cette géométrie*, mais juste "quelque chose" que l'on dérive habituellement de la géométrie, i.e. l'illumination, qui dépend des normales locales, qui elles-mêmes découlent des variations de la surface. Pour les objets macroscopiques simples, l'illumination varie dans l'image plus lentement que la géométrie[17], mais dans le cas présent cette géométrie est invisible en elle-même et on n'en voit ce qui en "émerge". Dès lors, et c'est l'idée même des représentations alternatives, on gagne à représenter directement ces phénomènes émergents, ou du moins quelque chose qui permet de les produire rapidement, et à "oublier" (ou coder séparément à l'échelle utile) la géométrie.

*i.e. sa forme au sens position, parallaxe, silhouette, galbe...

L'objectif est de gagner en **efficacité** (coût de rendu), en **qualité** (en évitant les artefacts[18]), et en **simplicité de spécification** des scènes pour l'utilisateur (en évitant les redondances et les excès de précision, en situant le travail de spécification à la bonne échelle pour chacun des aspects).

L'efficacité provient d'une part du caractère **minimal** de la représentation (à qualité perceptive égale ou supérieure), et d'autre part de la **structuration** que la représentation peut apporter aux donnée (alors qu'une "soupe de polygones" est totalement instructurée : on ne sait pas a priori quels polygones peuvent être vus en un pixel, ni dans quel ordre de profondeur ils apparaissent, ni quels sont leurs voisins, ce qui encombre le calcul de cribles et tests coûteux).

Il est cependant difficile de trouver une représentation minimale adaptée à tous les cas. La stratégie consiste donc à traiter des familles particulières d'objets, chacune offrant des propriétés particulières que l'on peut exploiter pour intégrer analytiquement l'effet visuel des détails plus petits qu'une échelle donnée (i.e. disposer de *connaissance a priori* sur un objet ou phénomène permet soit de faire des traitements analytiques, soit de fonder des hypothèses simplificatrices fortes ; a contrario les possibilités d'optimisation dans un cadre purement général sont forcément beaucoup plus limitées).

[17] C'est en tout cas l'hypothèse qui conduit à l'interpolation de Gouraud, largement utilisée en graphique.

[18] Coût et artefacts (aliasing) accompagnent le suréchantillonage qu'il faut réaliser pour intégrer toute la connaissance stockée (inutilement précise) qui se projette en un pixel donné.

Limites de l'approche
Les inconvénients de cette approche tiennent d'une part à l'utilisation de représentations non-standard, qui complexifient les logiciels lorsqu'il faut à toutes les étapes introduire leur prise en compte (de même le recours au hardware graphique, prévu pour les polygones, peut être difficile), et d'autre part à la relative spécificité de ces représentations, souvent adaptées pour une famille particulière d'objets ou d'effets (le risque étant d'être amené à gérer une représentation différente pour chaque objet de la scène). À noter que les représentations à base de point (*surfels*) évitent ces écueils dans la mesure où elles s'appuient sur une primitive standard (au moins pour le hardware), et ont une application assez générique. Réciproquement, le cantonnement au tout-géométrique est à mon avis une impasse dans le cas des scènes naturelles, et le recours à la simplification géométrique n'est aucunement une solution puisqu'elle détruit de l'information visible (cf section 1.4).

* Cf [Ney02], reproduit Annexe B, pour plus de détail sur ces techniques.

Travaux existants relatif au sujet*
• Plusieurs représentations non-polygonales ont été introduites assez tôt en synthèse d'images : les textures, qui ont apporté une richesse visuelle inaccessible autrement en 76, puis l'ingénieux *bump-mapping*, donnant une impression de relief saisissante pour les petites variations de surface, ou encore les systèmes de particules [Ree83, RB85], permettant de créer des scènes naturelles très fouillées en se basant sur une primitive économique, le trait. Il est à noter que l'approche texturelle au sens large est en soit structurante, ce qui entraîne un gain important* que ce soit pour spécifier l'information, la stocker ou calculer le rendu : ainsi, les *displacement maps*, ou *height fields*, permettent d'encoder un relief véritable de façon compacte dans une image (e.g. bas-reliefs), le maillage correspondant étant soit créé au vol (dans une région limitée de l'espace [WMF+00]), soit traité implicitement par un algorithme de rendu dédié [PHL91]. Les *surfels*, une autre famille de représentations géométriques alternatives compactes, a été introduite très récemment [PZvBG00, SD01]), la primitive de base étant le point (au sens "pixel") ou l'élément de surface plutôt que le polygone. Outre le caractère facilement adaptatif, cette forme de stockage s'affranchit d'informations inutiles au rendu, alors que le stockage par maillage comporte beaucoup de redondance.

* De plus, cette structuration permet d'adapter la résolution utile en fonction de la distance (par exemple à la manière des MIP-maps).

Davantage axés sur une intégration analytique des phénomènes, divers modèles de réflectances dédiés (ou *shaders*) ont été introduits, pour représenter par exemple les nuages de poussière [Bli82], les surfaces rayées (comme l'aluminium brossé) ou tissées [PF90]. Avec un objectif plus générique, Kaufman préconise une représentation volumique des scènes (i.e. à base de voxels), et s'appuie sur un hardware graphique adapté [19]. Les volumes ont également été jugés efficaces pour représenter les "surfaces floues" (comme la fourrure), conduisant à la représentation des textures volumiques ([KK89], généralisé par mes travaux de thèse [Ney95b, Ney95a, Ney96a, Ney96b, Ney98]) : pour les quasi-surfaces

[19] On sait maintenant utiliser le hardware graphique classique – et à plus forte raison celui de la nouvelle génération de cartes – pour rendre efficacement des volumes [LL94, WE98, RSEB+00].

comme la fourrure, la chevelure, le tissu, la prairie, le couvert forestier vu du ciel, une représentation polygonale serait démesurément lourde, alors que la complexité est très localisée et les détails très inférieurs à la taille du pixel. À noter que les textures dépendantes du point de vue (BTF*) [Dis98, OBM00], encodant les effets de parallaxe, peuvent reproduire une partie de ces effets. En outre, il existe des représentations dédiées aux objets visibles en volume (nuages, fluides, feu), comme les voxels ou les blobs [SF91, Sta95], bien que d'autres techniques citées puissent également être utilisées (e.g. texture [Gar84, Gar85] ou réflectance [Bli82, Sta94] suggérant le volume).

* Bidirectional Texture Function.

Des généralisations plus ou moins poussées de la notion d'image ont également été introduites pour représenter les objets (des plus simples, comme les *sprites*, aux plus complexes, comme les LDI [SGHS98], les combinaisons d'images en Z [MO95, Max96], ou les combinaisons d'image et de géométrie [PCD$^+$97, SDB97]), voire stocker toutes les vues possibles (comme les *lightfields* [LH96, GGSC96] et les fonctions plenoptiques [Che95, MB95]), ou encore exploiter la ressemblance des images entre deux pas de temps [LS97].

• Kajiya a introduit la notion de hiérarchie de modèles [Kaj85], proposant de passer d'une représentation géométrique à une représentation texturelle, puis photométrique, avec la distance, mais sans montrer d'implémentation. À défaut de provoquer une unification des approches liées aux différentes échelles, cela a formalisé l'idée que des modèles non-géométriques pouvaient servir à représenter de la forme, ce qui s'est traduit par l'apparition progressive de quelques briques : [CMS87, WAT92] ont montré comment construire une BRDF* à partir d'une surface complexe, [COM98] convertit en bump-maps les détails géométriques, [BM93] a proposé une représentation intermédiaire (un bump-mapping avec effets de parallaxe et d'auto-ombrage) permettant de faire une transition douce entre bump-mapping et géométrie, Alain Fournier [Fou91, Fou92] ayant, lui, introduit une autre représentation, fondée sur un ensemble de normales en chaque point de la surface, qui permet de faire la transition entre bump-mapping et réflectance. Plus récemment, les représentations à base d'images (IBR*), et notamment les imposteurs [SDB97], permettent une transition entre représentation géométrique et texturelle. Il est à noter que les textures volumiques, telles que développées lors de ma thèse[20], permettent naturellement une transition vers la géométrie[21] d'une part (puisque c'est une représentation 3D complète), et vers la photométrie d'autre part (puisqu'au niveau hiérarchique le plus grossier, le volume se réduit à un seul voxel, perdant toute parallaxe).

*Carte de réflectance 4D donnant l'intensité réfléchie dans une direction donnée pour une incidence donnée de la lumière.

**Image Based Rendering.*

Comme on le voit, il existe de nombreuses voies pour fonder des représentations alternatives aux polygones, et bien d'autres sont encore à imaginer pour représenter efficacement divers types d'objets ou de phénomènes à

[20][Nom95] a également proposé une représentation à base de textures volumiques adaptée aux arbres, en prévoyant la transition avec la géométrie.

[21]Dans un cadre temps-réel, [PC01] a présenté une hiérarchie à 3 niveaux pour représenter une prairie sous le vent, comportant un passage continu des brins d'herbe explicites à une forme de texture volumique composée de tranches de texture transparente verticales déformées par le vent.

une échelle particulière. Concernant la hiérarchie de modèles, bien que plusieurs briques utilisables aient été proposées, le champs est encore assez peu exploré.

Mes contributions : (voir section 3.1 et Annexe A)

Mes travaux de thèse [Ney95b, Ney95a, Ney96a, Ney96b, Ney98] concernaient la mise en place d'une représentation alternative multiéchelle complète à base de textures volumiques, adaptée aux objets à la complexité répétitive et concentrée au voisinage d'une surface (forêt, prairie, fourrure, et autres "habillages en relief"...). Nous avons étendu ce travail vers le contexte temps-réel [MN98].

D'autre part, nous avons travaillé à la conception d'autres types de représentations alternatives multiéchelles complètes, adaptées aux arbres, à base de *shaders* et de BTF [MN00, MNP01]. J'ai également travaillé à l'utilisation de shaders pour simplifier d'autres situations géométriques coûteuses (voir section 3.1), comme les arêtes arrondies des objets manufacturés.

2.3 Aspect de surface *

* Je traite de ce domaine en détail dans un chapitre de livre consacré à la représentation des matériaux [Ney02], reproduit Annexe B.

L'aspect des surfaces (couleur, rugosité, réflectance, texture...) réfère à des détails géométriques de taille comparable ou inférieure au pixel. Que l'on considère ces détails dans le cadre de la section précédente (représentation minimale adaptative) ou que leur nature microscopique les préserve à jamais d'être vus individuellement, on est conduit à définir des **matériaux** et des **textures**. Ces notions visent à définir la *loi de* **réflectance** en tout point de la surface (illumination locale), dans ses aspects chromatiques et directionnels, et la façon dont les *paramètres* de celle-ci (donc l'aspect) varient le long de la surface. Ces deux problématiques constituent des domaines d'étude assez indépendants, qui m'intéressent tous deux.

Définir un matériau nécessite d'expliciter les paramètres (intrinsèques ou contrôlable par l'utilisateur) qui interviennent dans l'aspect de celui-ci, que l'on s'appuie sur un modèle géométrique, physique, ou phénoménologique, puis de synthétiser une expression mathématique qui reproduise le comportement souhaité en fonction de ces paramètres.

Définir une texture mobilise une variété plus grande de problèmes à traiter et de techniques envisageables. Pour la représentation texturelle la plus classique, il faut d'une part définir l'aspect d'un échantillon, et d'autre part spécifier une fonction de mappage, qui précise la façon dont on "tapisse" la géométrie avec la texture. L'aspect de la texture peut être soit entièrement dessiné par l'utilisateur, soit créé automatiquement de manière à imiter un matériau réel (e.g. marbre, écorce), avec un certain degré de contrôle par l'utilisateur.

- Dans le cadre de la spécification de matériaux, la création **procédurale** de textures* m'intéresse en particulier, pour synthétiser par exemple de la roche, des écorces, ou des planches de bois.

* Au sens large : comme on l'a vu en 1.5, il ne s'agit pas forcément d'images.

- Dans le cadre général du mappage de texture, je m'intéresse aussi à la résolution des nombreux problèmes concrets qui handicapent les graphistes au quotidien : distorsion, répétitivité, spécification des frontières...[22]
- Enfin, je m'intéresse aussi comme indiqué en 1.4 à l'utilisation et l'extension de ces approches pour représenter de la géométrie, en particulier pour créer une couche de détails géométriques constituant un **habillage** d'une surface plus simple (aspérités d'une coulée de lave, herbe sur une colline, boucles d'un textile).

Les risques du domaine

Les risques de ce domaine tiennent d'une part à la spécificité de nombreux modèles, dédiés à tel ou tel type d'aspect, et à la dispersion qui peut en découler (d'autant que pour définir un type d'aspect donné, il faut parfois intervenir à tous les niveaux de la chaîne réflection-texture-mapping-géométrie), et d'autre part à la tentation de spécifier trop directement l'aspect dans l'outil, au lieu d'en faire un outil de création permettant à l'artiste de s'exprimer.

[22] Ce sont des problèmes durs, peu traités, et parfois mal posés.

Travaux existants relatif au sujet

• Les artistes utilisent largement les textures pour constituer un aspect de surface[23], en les dessinant directement dans l'espace texturel, ou en recourant à un logiciel permettant de peindre directement à la surface d'un objet [HH90]. En outre, comme on l'a vu en section 1.5, les méthodes procédurales permettent une grande variété d'aspect à partir du contrôle de quelques paramètres, les plus classiques étant les textures de Perlin [Per85], Worley [Wor96], la réaction-diffusion [FMP92, WK91, Tur91], ou la resynthèse à partir d'échantillons [HB95, DB97]. En pratique cependant, hors le dessin manuel il n'existe aucune technique permettant de construire un aspect de bois (planches ou écorce) ou de pierre véritablement réaliste.

L'aspect de surface peut également receler une composante géométrique, laquelle peut être spécifiée par approche procédurale. Cela a par exemple été utilisée par Fournier [FF80, FFC82] et Musgrave [MKM89] pour construire des terrains montagneux, ou par Fleischer [FLCB95] pour constituer des surfaces d'écailles ou d'aiguilles. Une approche texturelle peut aussi être utilisée, comme les *displacement maps* et les *textures volumiques* évoqués en 2.2.

• Les textures sont usuellement définies dans un espace de référence, puis mappées sur un objet après paramétrisation de la surface de celui-ci. Comme les surfaces ordinaires, non développables, n'admettent pas de paramétrisation sans distorsion, cela pose intrinsèquement un problème de qualité visuelle des textures, auquel n'échappent que les textures 3D (*solid textures*) type Perlin, paramétrées directement dans l'espace tridimensionnel, et les textures générées in situ, interactivement [HH90] ou par calcul (e.g. textures de réaction-diffusion, ou par resynthèse à partir d'échantillons [Tur01, WL01]). Peu de solutions ont été apportées à ce problème de distorsion des textures : plusieurs auteurs s'efforcent d'optimiser la paramétrisation [LM98, BVI91], mais comme le problème est intrinsèque au mapping, on ne peut espérer qu'améliorer légèrement la situation (à moins de se cantonner à des surfaces quasi-développables). D'autres proposent de relâcher la contrainte en autorisant la texture à "craquer" en des positions et conditions choisies, obtenant ainsi un *atlas* [MYV93] (ou patron) au lieu d'une carte unique. Très récemment, plusieurs méthodes reportant la contrainte de continuité au contenu ou synthétisant celui-ci sur place sont parvenues à résoudre le problème (dans leurs cadres respectifs), en abandonnant l'idée de recourir à un paramétrage global de la surface.

D'autres problèmes courants du mapping restent sans bonne solution : comme la paramétrisation d'une surface est définie par interpolation à partir des coordonnées texturelles spécifiées aux sommets du maillage, délimiter une zone texturée ne peut se faire que le long des arêtes, ce qui suppose de retailler le maillage le long de la frontière de la zone si l'on tient à un placement précis. La seule autre possibilité (outre englober l'ensemble de la surface dans la texture) consiste à recourir à une texture de masque, indiquant quelle texture s'applique en tout point. Retailler le maillage l'alourdit inutilement[24] et risque d'introduire des faces de mauvaise qualité, tandis que recourir à une

[23] La création des textures peut représenter plus de la moitié du travail de modélisation d'une scène.

[24] Cela revient à repousser à l'étage 3D le traitement d'un problème 2D.

texture couvrant la surface alors qu'on ne veut mapper qu'une zone ramène aux problèmes de distorsion* (sans parler du coût en mémoire). De même, réaliser un texturage à partir d'un échantillon permet de disposer d'une banque d'aspects indépendemment des objets et d'avoir une bonne résolution, mais il est très difficile d'éviter la répétitivité, à moins de construire une seconde texture couvrant toute la surface [25].

* De plus, il faut veiller à ce que ce mapping soit bijectif, même hors de la zone d'intérêt, faute de quoi la partie utile de la texture risque de se projeter à des endroits parasites.

• Les textures sont également utilisées comme support d'information, voire de communication entre représentations de natures différentes : une texture peut être perçue comme une grille de valeurs mappée sur surface, les valeurs pouvant aussi bien être des propriétés visuelles que des paramètres abstraits (lesquels peuvent éventuellement permettre de spécifier de la géométrie), résulter d'une simulation ou être construites "à la main", tandis que le mapping établit un lien entre cet espace abstrait et une surface géométrique. Ainsi, certains logiciels (e.g. Houdini) permettent de créer des systèmes de particules en fonction d'une densité tracée dans la texture, ou au contraire de laisser des marques dans la texture en fonction d'un événement géométrique (e.g. contact, impact). Dorsey et Harahan [DPH96] reproduisent les effets de salissure dus au ruissellement de l'eau en stockant les paramètres d'état des matériaux (concentration en eau et impuretées) dans plusieurs couches de texture. Deussen et al [DHL+98] simulent un écosystème (interaction entre plantes, influence de la topographie) avec le même esprit, ce qui permet notamment à l'artiste de dessiner ou modifier certaines textures contrôlant la répartition des espèces, plutôt que de les laisser totalement sous le contrôle de la simulation.

• Les textures permettent de spécifier le "grain" et les variations d'aspect à l'échelle supra-pixel. A plus petite échelle, c'est le rôle des modèles d'illumination de rendre compte de l'état de surface. Ce domaine a connu beaucoup de succès, et de nombreux modèles, simples ou complexes, génériques ou spécialisés, ont été proposés (cf [FvDFH90, WW92, Cal98]). Par contre, si le shading de matériaux au sens classique a été bien étudié et est largement utilisé, l'expression sous forme de modèle de réflectance de l'effet global d'une micro-géométrie connue est beaucoup moins commun. [PF90, ON94, HDKS00] s'intéressent aux effets de la rugosité, [HK93, GMN94] décrivent ceux de la "peau" sous la surface, [Sta99] reproduit les effets de la diffraction, [Bli82, Sta94] rendent comptent des distributions en volume, [Gol97] simule l'apparence de la fourrure rase.

Comme on le voit, quelques travaux balisent une étendue qui reste très vaste : nombreux sont les problèmes à résoudre, les outils à introduire et les voies à étendre, surtout si l'on y ajoute ceux concernant la création procédurale de texture (ou de géométrie).

[25] Le seul travail existant était celui de [Sta97a], qui ne s'appliquait qu'au surfaces planes. Après la publication de mon article [NC99] résolvant les problèmes de distorsion, discontinuité et répétitivité pour certaines familles de textures, d'autres contributions sont apparues, notamment [PFH00] qui part également d'un échantillon, mais qui reconstruit tout de même une texture résultat couvrant toute la surface.

Mes contributions :

J'ai travaillé à la conception de modèles d'habillage, éventuellement animés, en cherchant à éviter les problèmes inhérents aux textures (voir section 3.2 et Annexe B). J'ai été confronté à ces problèmes dans le cadre du réalisme (simulation de l'aspect de coulées de lave [SAC$^+$99]), et je les ai attaqués en tant que tels dans [Ney96c, NC99]. J'ai également abordé ces mêmes sujets dans le cadre du temps-réel [MN99, NHS01] (voir section 3.3 et Annexe C).

À noter que certaines des représentations géométriques alternatives vue précédemment, particulièrement focalisées sur la prise en compte des détails ([MN98, MN00], cf section 3.1 et Annexe A), relèvent également de ce thème.

2.4 Temps réel et accélération par le hardware graphique

Il peut exister 4 à 5 ordres de grandeur de différence dans le temps de calcul entre une visualisation purement logicielle et une visualisation accélérée par le hardware graphique. Même si la qualité graphique n'est a priori pas la même, il est difficile de ne pas tenter d'utiliser cette puissance, ne serait-ce qu'en dérivant une version temps-réel légèrement altérée à partir d'un algorithme ou d'une représentation totalement logicielle, accédant ainsi à des domaines d'application très différents. On peut également utiliser le hardware comme un accélérateur, sans viser le temps réel, quitte à décomposer le rendu en une multitude de passes, ou à n'accélérer que certaines parties du traitement. Enfin, on peut considérer le hardware graphique comme un puissant calculateur spécialisé dans certaines opérations, et essayer d'utiliser celles-ci pour réaliser des tâches autres que le rendu.

Le hardware graphique est fondé sur l'algorithme du Z-buffer, sa primitive géométrique de prédilection est le triangle, et l'architecture usuelle du pipeline restreint le calcul de la réflectance (modèle de Phong exclusivement) aux seuls sommets[26], la couleur étant ensuite interpolée sur la face. A priori, si l'on souhaite effectuer un rendu évolué avec des ombres, de la transparence, ou des interactions lumineuses, effectuer un calcul d'illumination complexe au pixel près, ou utiliser une représentation différente du polygone, on peut sembler mal parti. Cependant une multitude d'outils ou de généralisations viennent se joindre au schéma de base : textures de 1 à 4 dimensions, tables d'indirection et matrices de transformation diverses, reconnaissance des coefficients négatifs ou supérieurs à 1, lois de mélange programmables (au niveau des diverses sources de couleur – texture, matière, couleur au sommet –, et au niveau des pixels entre deux couches de rendu successives), mémoire d'état en chaque pixel (*stencils*) permettant la réalisation d'automates rudimentaires, etc [NDW93, OGL, OGL98, SGIa, SGIc, SGIb]. L'approche consiste donc à considérer que l'on dispose d'un calculateur qui reconnaît une grammaire très particulière, avec laquelle il faut s'efforcer d'exprimer le phénomène ou la représentation souhaité.

Limites de l'approche

Les inconvénients de l'approche tiennent à la spécificité de certaines fonctionnalités, hypothéquant la pérennité et la portabilité des méthodes qui les utilisent, dans un contexte où la rapidité de l'évolution du matériel peut rendre trivial un problème difficile quelques mois plus tôt, ou au contraire où une fonctionnalité puissante mais peu utilisée par l'industrie peut disparaître (quand ce n'est pas le fabriquant de la carte...). D'autre part, quelle que soit

[26] Cette présentation du hardware était valide jusqu'à une date récente, correspondant à l'arrivée de la nouvelle génération de cartes graphiques type Nvidia ou ATI. Il devient maintenant possible, d'une façon encore limitée mais qui va rapidement s'étendre, d'exprimer au niveau du pixel le calcul de la couleur, à l'aide d'un micro-programme laissé à la liberté du programmeur [Nvi]. La recherche relatée dans ce mémoire étant essentiellement antérieure à cette génération, je me réfère ici essentiellement à une architecture type SGI. Cependant cela n'enlève rien à la pertinence de l'approche : simplement, ce qui jusqu'à présent n'allait pas de soit va devenir maintenant plus naturel, plus facile, et ira plus loin.

l'amélioration du matériel, devoir passer par une API suppose nécessairement des contraintes et des limites, qui n'existent pas lorsqu'on adopte une solution purement logicielle. Cependant, il faut être certain que les utilisateurs jugent suffisamment important le gain de qualité pour accepter de subir un temps de calcul quelques milliers ou centaines de milliers de fois plus longs...

Travaux existants relatif au sujet
La prise en compte (avec certaines approximations) des reflets, des ombres, des taches lumineuses, du bump-mapping, voire des volumes de voxels se fait facilement via un traitement texturel, et est couramment utilisé dans l'industrie du jeu. Plus récemment, des méthodes non temps-réel mais accélérées par hardware ont été proposées pour le rendu réaliste des tissus [XCL$^+$01, DLHS01], des aspérités de surface [HDKS00], des caustiques [TS00], ou d'un ciel nuageux [DKY$^+$00]. Une librairie permettant de faire réaliser par le hardware un *shader* spécifié librement à l'aide d'un "langage de shading" a même été rendu disponible [OL98].

L'arrivée de la nouvelle génération de cartes graphiques type Nvidia ou ATI, dont le pouvoir d'expression est largement accru (même si certaines fonctionnalités des cartes SGI sont encore absentes), change considérablement les données du problème : d'une part parce que la disponibilité d'une micro-programmation au niveau du pixel[27] ouvre beaucoup de portes (d'une manière d'autant plus simple et élégante que le langage aura gagné en généralité), et d'autre part parce que l'introduction à répétition de nouvelles fonctionnalités (tous les 6 à 12 mois !), adjointe à la grande disparité dans la programmation des diverses cartes, décourage les industriels d'utiliser trop explicitement les possibilités du matériel. On pourrait donc voir apparaître deux tendances contradictoires : le recours massif et facilité à la programmation du hardware, et l'utilisation massive de librairies introduisant une couche d'abstraction entre spécification du rendu et matériel.

Mes contributions :
Je me suis intéressé à traiter en temps réel des situations qui n'étaient jusqu'alors pas envisageables dans ce contexte, par leur complexité géométrique (forêts) ou de traitement (collisions, textures procédurales, simulation plausible) [MN98, LCN99, MN99, MNP01, NHS01] (voir section 3.3 et Annexe C) ;

À noter que certains de mes autres travaux utilisent le hardware graphique [Ney97, NC99, SAC$^+$99, Ney01] et sont ainsi compatibles avec le temps réel, bien que n'ayant pas été conçus à cette fin.

[27]Sur les Nvidia GeForce 3, ce sont en fait 3 niveaux de micro-programmation qui sont offerts, au niveau du calcul des sommets (*vertex shaders*), des textures (*textures shaders*), et de la couleur finale (*pixel shaders*).

2.5 Hiérarchie de modèles pour le mouvement

La notion de hiérarchie de modèles évoquée plus haut dans le contexte de la géométrie est applicable à d'autres cadres, permettant de combiner ce que chaque modèle fait le mieux, dans sa zone de validité ou d'optimalité. Ainsi en manière d'animation, il peut être utile de recourir à une simulation physique à grande échelle (déformations, écoulement), et à des modèles phénoménologiques simples et visuellement riches à petite échelle (par exemple pour les fluides, nuages, coulées de lave, réactions biologiques locales). Autant cette notion de hiérarchie de modèles est maintenant classique en matière d'animation de personnages [CHP89, MNA98], autant elle est pratiquement inexistante pour le traitement des phénomènes physiques animés.

Limites de l'approche
Le risque de cette approche est d'introduire une découpe trop schématique en échelles, les phénomènes n'étant pas forcément bien découplés. Réciproquement, certaines applications gèrent une quantité colossale de détails en mouvement (fluides, foule, végétation), et il serait illusoire d'espérer pousser encore la complexité des scènes tout en continuant à contrôler chacun d'eux dans son individualité, ou au sein d'un gigantesque système d'équations.

Travaux existants relatif au sujet
Les physiciens recourent à des modèles sous-grille pour modéliser le comportement des fluides à l'échelle inférieure à la maille de l'échantillonnage (e.g. modèles de turbulence) : il s'agit bien de coupler deux types de modélisation très différentes. Ce type de procédé local fin (analogue au *shader* pour le rendu) n'est pas encore employé pour l'animation en synthèse d'images. Par contre, Stam propose une méthode d'amplification (interpolation stochastique) pour ajouter des détails dans le champs de vitesse d'un fluide [SF93] : le champs est construit de manière pseudo-aléatoire, mais il respecte les valeurs de vitesse initiales données sur la grille, tout en obéissant à la loi de continuité (conservation de la masse).

Certaines techniques multiéchelles, comme les multigrilles, ou naturellement multiéchelles, comme les méthodes spectrales, sont également utilisées par les physiciens et les numériciens. En animation de synthèse, l'approche des premières n'a pas vraiment été suivie (à l'exception de [DDCB01]). Par contre la synthèse spectrale du mouvement, permettant de reproduire certaines propriétés (e.g. autocorrélation en temps et en espace), a été utilisée pour produire un champ de vent complet [SF92], le mouvement des branches dans le vent [Sta97b], ou encore les vagues à la surface de la mer [MWM87, TDG00].

Comme on le voit, la notion de niveaux de détail et de hiérarchie de modèles est encore relativement balbutiante en animation de phénomènes physiques, bien que la réflexion soit présente.

Mes contributions :
J'ai eu l'occasion de mettre en œuvre de telles hiérarchies de modèles d'animation dans mes travaux liés aux fluides : coulées de lave [SAC+99] (section 3.2 et Annexe B), nuages et ruisseaux [Ney97, Ney01] (section 3.4 et Annexe D).

2.6 Approches phénoménologiques (formes et mouvement)

Les formes et les mouvements des objets et phénomènes naturels sont souvent complexes. C'est notamment le cas de ceux auxquels je m'intéresse : fluides (ruisseaux, nuages), plis (vêtements, lave), croûtes (lave, pain), plantes (écorce, nervures)... Les deux principales techniques classiques consistent d'une part à confier à l'utilisateur l'essentiel du travail de spécification, qui est alors redondant et pas toujours intuitif, et d'autre part à recourir à des simulations à base physique, inspirées de l'ingénierie mathématique appliquée à la physique. (À noter que d'autres techniques, par exemple basées sur les fractales ou la synthèse spectrale, permettent de spécifier des formes complexes à partir de peu de paramètres, cependant les effets ne sont pas toujours simples à contrôler.)

Comme on l'a dit en 1.6, les simulations "physiques" ont de nombreux inconvénients : elles sont très coûteuses, il est difficile d'orienter le résultat (e.g. forme des vagues, plis d'un tissu), il est pratiquement impossible de gérer un domaine large ou une résolution fine (sachant qu'en synthèse d'images on veut en général les deux, par exemple pour une vue sur l'océan ou un ciel nuageux). Qui plus est, les paramètres sont souvent difficiles à trouver (e.g. conditions limites au fond d'un ruisseau, viscosité turbulente...).

Le problème provient essentiellement de ce que ces méthodes n'ont pas été développées à l'usage de la synthèse d'images, alors que dans notre domaine les résultats n'ont pas besoin d'être quantitativement précis mais juste visuellement crédibles, que l'on ne s'intéresse qu'aux grandeurs visibles et en des lieux particuliers (e.g. interface du fluide), et que bien souvent tout le *sens* d'un phénomène (ce qu'on en appréhende) réside dans des comportements émergents, donc issus très indirectement des lois locales régissant le phénomène (e.g. écoulements). Ce dernier point résume tout le problème : difficulté de simulation, coût, difficulté de contrôle du résultat.

Je cherche à développer des approches visant à **représenter directement les phénomènes émergents** (plis, ondes, instabilités, formes d'équilibre) pour certaines familles de phénomènes, dans le but d'obtenir une simulation phénoménologiques visuellement réaliste, rapide, et facilement contrôlable, en s'appuyant notamment sur les connaissances physiques macroscopiques qui sont disponibles. D'autre part je cherche à développer des représentations adaptées aux objets dont la **forme résulte du mouvement** ou de la croissance (nuages, subduction, objets nervurés, surfaces à fractures ou déchirures).

Limites de l'approche

Les inconvénients de cette approche tiennent essentiellement dans le fait que l'on exploite des cas particuliers plutôt que de traiter le cas général (ce que ferait une simulation lourde) : il faut veiller à ce que celui-ci recouvre un ensemble de situations suffisamment significatives pour être véritablement utile. D'autre part – et c'est une morale récurrente[28] – il faut développer beaucoup d'efforts

[28] On retrouve par exemple cette dualité pour les algorithmes de rendu : un algorithme de lancer de rayon est extrêmement simple à programmer, il est très général, mais il est fort coûteux, tandis que le A-buffer nécessite une structure et un traitement complexes, moyennant quoi on est "payé en retour" par une grande performance et une bonne qualité visuelle.

pour établir une nouvelle représentation fonctionnelle, crédible et efficace, alors que suivre une méthode standard basée sur un traitement atomique est beaucoup plus simple. Il faut établir des ponts avec d'autres disciplines, établir des synthèses (car le problème n'y a pas été traité avec le même objectif, comme vu en 1.2), pour ensuite trouver une méthode d'application à notre domaine compatible avec toutes les étapes de la synthèse d'images, puis résoudre tous les problèmes liés au paramétrage (interface), à la continuité, et à la crédibilité obtenue au final... D'autre part, comme les voies standards reçoivent beaucoup d'efforts de recherche et d'amélioration (notamment par l'industrie), leurs performances peuvent s'accroître au delà des prévisions (par exemple par le développement d'accélérations en hardware), pouvant mettre à mal l'avantage obtenu par la méthode plus "astucieuse". Néanmoins, la tendance au "tout-simulation" (en rendu comme en animation) est à mon avis une impasse : elle est beaucoup trop coûteuse, et son coût croit rapidement avec la résolution. Dans les cas suffisamment généraux et complexes pour lesquels le recours à la simulation se justifie, l'avenir est sans doute aux méthodes mixtes (comme [SF93, SF95, FF01]), où la grande échelle est confiée aux modèles physiques, et où des représentations complémentaires se chargent des petites échelles et des surfaces libres (visibles, interface).

Travaux existants relatif au sujet
Plusieurs catégories de sources d'information intéressantes, extérieures à notre domaine, peuvent être consultées : les artistes peintres, qui savent distinguer l'essentiel, perceptif ou cognitif, et dont on peut essayer de tirer les recettes et critères ; la psychovision, qui donne quelques indices sur les éléments que le système visuel humain recherche prioritairement, ou au contraire ignore ; et les "grimoires de physiques"[29] [Car80, Fey77, Lig78], qui proposent souvent des modélisations simples et proches du *sens*[30], dans divers domaines (e.g. fluides). En pratique ces sources sont très peu utilisées[31] (quoique les critères psychovisuels commencent à faire leur apparition, par exemple pour dimensionner la précision des calculs d'éclairage).

Pour ce qui concerne l'apparence, l'habillage des surfaces, conduisant à rendre compte des aspects existants dans le monde réel de la façon la plus

Cependant le choix de la méthode performante n'est pas pour autant si clair pour l'industrie : celle-ci apprécie les méthodes robustes, aux résultats reproductibles d'une implémentation à l'autre, et suffisamment générales et puissantes pour que l'on puisse ajouter d'autres effets ; elle est prête à compenser le coût en constituant des *render farms* de centaines de machines –lesquelles voient leur prix baisser au fil des ans–. Toutefois les entreprises d'effets spéciaux sont également prêtes à développer un effet particulier pour l'usage d'un seul film, et quand celui-ci est hors de portée des méthodes classiques, les metteurs en scène savent accepter quelques contraintes pour obtenir une scène inédite.

[29] Ou plus généralement, les ouvrages des temps pré-informatiques ; car la disponibilité – historiquement récente – de la puissance de calcul semble avoir changé la façon même dont bien des physiciens pratiquent (et écrivent) leur science.

[30] Aux deux sens de sensible et d'intelligible (cela dit on peut considérer depuis Piaget que ces deux notions sont liées).

[31] Il est rare qu'une discipline sache s'ouvrir et se nourrir des autres ; c'est dommage car les ponts permettent beaucoup d'innovations. (Je ne prétend pas en avoir fait un grand usage non plus, au moins pour les deux premiers types !)

simple possible, a conduit à recourir à des modèles phénoménologiques comme évoqué en section 1.5 (e.g. les textures procédurales de Perlin, la synthèse spectrale, les grammaires...). La spécification des formes, quant à elles, se fait en général explicitement, à l'aide d'un modeleur. Toutefois, quelques techniques procédurales (comme les L-systèmes [Lin68, PLH88] ou le modèle d'AMAP [dREF$^+$88] pour les arbres) permettent de construire des objets en reproduisant l'aspect attendu. La synthèse de formes ou de mouvement à partir de propriétés statistiques ou spectrales entre également dans cette catégorie. En matière de mouvement, c'est essentiellement pour celui de la surface de l'eau et pour la simulation du vent que l'on a recouru à des modèles "non-fondamentaux" (i.e. sans résolution de systèmes d'équations locales) : propagation d'ondes [Pea86], modèles géométriques de vagues [FR86], synthèse spectrale [MWM87, TDG00], systèmes de particules pour l'écume, objets emportés [WH91] ou déformés [SF92, Sta97b] par le vent. En résumé, mis à part les textures, seules la mer et la végétation (et seulement en partie) ont été traitées selon cette voie.

Mes contributions : (voir section 3.4 et Annexe D)

Mes travaux sur les fluides (nuages, coulées, vagues) ont été réalisés dans cette optique phénoménologique, soit dans une approche par simulation ([Ney97, Ney01] et d'autres, détaillés en section 3.4), soit dans un esprit plus "texturel" [PN01].

D'autre part je travaille également sur les formes issues d'un mouvement (plissements, déchirures), voir section 3.4.

2.7 Approches analytiques (rendu)

Dans le même esprit, je cherche à dériver des modèles analytiques des comportements lumineux pour les familles d'objets pour lesquelles on dispose d'une forte **connaissance a priori** : Si l'on a une information sur la distribution et l'orientation de la matière à petite échelle (e.g. feuillage, fourrure, état de surface), il est possible d'estimer le comportement lumineux global d'un échantillon, et il est donc inutilement coûteux d'échantillonner aveuglément l'espace. De la même façon à grande échelle, un cumulus, ou un champ de neige, ne sont pas des distributions volumiques quelconques de densité, et leur spécificité se traduit bien par leur apparence lumineuse typique. Traiter la simulation optique dans le cas le plus général [Max94, NND96, Ebe97] (inter-réflections anisotropes multiples en volume), sans exploiter ces propriétés, conduit à un coût en calcul particulièrement prohibitif.

Limites de l'approche
Les risques et inconvénients sont les mêmes que ceux cités au point précédent.

Travaux existants relatif au sujet
La plupart des nombreux modèles de réflectance correspondent à l'approche analytique (voir [FvDFH90, WW92, Cal98]), puisqu'ils se résument à une expression mathématique intégrant les effets aux petites échelles en fonction des hypothèses correspondant au matériau visé, ou à l'approche phénoménologique (Phong, BRDF), imitant le comportement lumineux observé. Les modèles rendant compte de familles de microgéométries complexes par intégration procèdent de la même démarche, comme ceux de [PF90, ON94] pour les surfaces rugueuses (et [Sta99] quand on descend sous la longueur d'onde de la lumière), [Gol97] pour la fourrure rase, ou [Sta01] pour la peau. Concernant les interaction de la lumière dans des objets distribués en volume (forêt, nuages), les approches de [Bli82], [RB85], [Max91] ou [Sta95] exploitant certaines hypothèses (notamment en moyennant les effets des petites échelles) permettent d'accélérer le rendu, ce qui en pratique autorise des scènes plus détaillées, gagnant ainsi en réalisme.

Plus généralement, les diverses hypothèses fortes – mais pas toujours conscientes – permettant de ramener la simulation de l'éclairement à de simples considérations géométriques procèdent de l'empirisme, par exemple le fait d'omettre la décroissance en $\frac{1}{r^2}$ pour les sources lumineuses (voire de choisir $\frac{1}{r}$). De plus, le réglage par l'artiste de l'ambiant et de l'exposant spéculaire (contrôlant en pratique la taille de la tâche plutôt que la rugosité du matériau), voire les coefficients de réflection et indices de réfractions, se fait à l'estime de manière à obtenir un résultat plaisant, et non en consultant des tables de propriété des matériaux.

Mes contributions : (voir section 3.4 et Annexe D)
Mes travaux relatifs à ce thème concernent les représentations à base de *shaders* (intégration analytique de l'illumination "locale") [MN00], ainsi que l'estimation de l'illumination globale pour certains objets spécifiques comme les nuages convectifs [Ney00], en exploitant la connaissance a priori disponible.

2.8 Scènes naturelles

Leur richesse polyforme s'étant sur une large gamme d'échelles, comprend tout le règne végétal et minéral[32] – dont les fluides (cours d'eau, mer, pluie, vent, nuages, feu...) –, qui se déclinent en larges familles d'objets (fixes ou animés), sont le siège de multiples phénomènes lumineux (couleur du ciel, effets spectraux, volumiques, ou d'inter-réflection...) ou morphologiques (mouvement à long terme comme l'orogenèse, la tectonique, l'érosion, la colonisation, la croissance...).
La plupart des techniques et approches citées jusqu'ici sont concernées :

- les représentations alternatives, permettant de faire face à la complexité (végétation dans ses détails ou son ensemble, détail des surfaces rocheuses...) ;
- les textures et le procéduralisme, pour habiller les surfaces, mais aussi comme outil de spécification et de mise en place des éléments visuels (répartition des couleurs, des anfractuosité, des arbres dans le paysage, ou tout autre paramètre), l'idée étant de spécifier un champ texturel, plutôt que d'éditer explicitement chaque élément individuel ;
- le rendu efficace de la scène (de préférence sans simulation physique fine donc lourde) ;
- le recours au hardware graphique, pour accélérer les traitements, voire les rendre interactifs ;
- l'animation, à toutes les échelles de temps, dont les phénomènes quasi-statiques (oscillation des feuilles), les mouvements rapides et complexes (écoulements d'eau, croissance des nuages), et ceux à évolution lente (croissance, fractures), à traiter de préférence sans simulation physique fine donc lourde ;
- les formes résultant de mouvements (vagues, nuages, orogenèse, croissance...).

Les risques du domaine
Le risque d'explosion des ressources nécessaires (temps de spécification, de stockage, d'animation, de rendu, mémoire) en abordant des méthodes classiques est évident ; ce mémoire a essentiellement pour but de proposer des contextes de représentation et de traitement plus raisonnables. En dehors de quoi le principal risque de ce champ d'application passionnant est la gratuité[33] : même si l'effet vitrine peut avoir son utilité, mieux vaut veiller à ce qu'une scène naturelle puisse jouer son rôle de décor, en étant facilement spécifiable et contrôlable par l'artiste, et pouvoir supporter d'être habitée (pour être le théâtre d'un scénario), ce qui suppose notamment de pouvoir laisser le metteur en scène contrôler au bon niveau les éléments qu'il jugera nécessaires.

Cependant comme évoqué en 1.2, la recherche effectuée dans ce domaine peut aussi jouer un petit rôle dans la création de connaissances sur le monde,

[32] Je n'inclue pas personnellement le règne animal dans les scènes naturelles, que je considère plutôt dans le sens paysage, i.e. décor. Les animaux (éventuellement humains), même figurants, sont les acteurs de ce décor, et relèvent donc pour moi d'une autre problématique.

[33] Quoi qu'il existe certains logiciels [EMG, Moj] qui semblent n'avoir d'autre but que de laisser l'utilisateur se promener et admirer le paysage...

puisqu'avoir pu créer une maquette crédible suppose d'avoir pu *modéliser le réel* d'une façon capable d'en reproduire des images comparables, ce qui n'est pas rien...

Travaux existants relatif au sujet

Les phénomènes naturels, ou *natural look*, ont été à la mode chez les chercheurs en synthèse d'images dans les débuts (vers les années 80), où l'on cherchait à rendre compte du maximum de phénomènes différents, et où la complexité des scènes était d'autant plus spectaculaire que la puissance de calcul et de stockage était alors très limitée (par rapport à aujourd'hui). Ils deviennent à la mode aujourd'hui dans l'industrie, tant pour les effets spéciaux du cinéma que pour les jeux vidéo, rendus possibles par la maturité des techniques de base et la puissance des machines.
Les principaux éléments abordés sont :

- les phénomènes atmosphériques (brouillard, arc en ciel...), traités dès les débuts ([Max86a, Max86b, MHM88]....).
- la mer, sans modèle vraiment convainquant dans le milieu académique (à part quand même l'océan de [FR86]) malgré de nombreux travaux, mais avec de très beaux résultats dans les logiciels de la série *Digital Nature Tools* (ou *NatureFX*) de Areté Image Software [Are][34] (en l'occurrence, Psunami et PLiquid), utilisé notamment pour les films *Titanic* et *En pleine tempête* (*The perfect storm*) ;
- le rendu des nuages et de l'atmosphère, avec de beaux résultats académiques [TNK+93, NND96, Nis98, PSS99] (dont certains produits hors de notre domaine et non publiés, e.g. [Ben]), et à nouveau la présence marquante de Areté pour l'industrie (logiciels Psyclone, Pyro et RenderWorld) ;
- la végétation, à l'échelle d'un arbre ou du paysage, avec quelques modèles académiques (e.g. [PHM, dREF+88], AMAP du CIRAD [AMA, Bio], devenu produit industriel), et une forte présence industrielle (e.g. Xfrog [Xfr], WorldBuilder [WB], Bryce [Bry]) ou semi-industrielle (e.g. logiciels libres VTP [VTP], Terragen [Ter]) ;
- la construction (fractale, érosion) [FFC82, MKM89, RPP93, ESI] et le rendu [Ste97, Ste98] de terrains (et aussi notamment par les logiciels cités ci-dessus).

Comme on le voit, certaines choses ont été faites, mais néanmoins le travail réalisé sur l'eau ne couvre qu'une petite portion des aspects sous laquelle celle-ci apparaît autour de nous (quid des ruisseaux, sillages, ridules, déferlantes, cascades, écume, éclaboussures, ou simplement* la pluie ?), et il y a très peu (voire pas) d'études sur la formation et le mouvement des nuages et de la fumée (de plus les techniques de rendu actuelles me semblent peu utilisables à grande

* Signalons toutefois [FHP98], qui traite des larmes...

[34]Admirer la qualité des images produites sur leur site web [Are] conduit à la fois à l'enthousiasme (un programme[35] sait faire *ça* !) et au désespoir (les méthodes employées sont souvent confidentielles, et l'effort de réinvention à produire pour acquérir cette maîtrise est probablement colossal)...

[35]Cependant, il faut garder à l'esprit en permanence que *les images ne sont pas faites par des logiciels, mais par des artistes utilisant ces logiciels.*

échelle), la géomorphologie pour les plissements ou les falaises, la mise en place des paysages ou niveau géologique et végétal, le mouvement, l'interaction avec le décor... À défaut, il existe souvent des recettes dans l'industrie (laquelle est alors capable de meilleurs résultats), relevant soit du savoir-faire d'artiste[36], soit de développements "maison" jalousement gardés secrets (c'est une part du capital de l'entreprise de production).

Mes contributions :

Mes travaux sur les fluides (lave, nuages, ruisseaux [SAC+99, Ney97, Ney00, Ney01]) et les forêts (arbres, écorces [MN00, MNP01]) visent directement à modéliser des éléments naturels (voir sections 3.1, 3.2, 3.4, et Annexes A, B, D).

Diverses autres contributions, notamment celles relatives à l'habillage ([Ney96c, MN98, NC99, PN01], ainsi que mes travaux de thèses), constituent des outils utilisables pour modéliser de tels éléments.

[36] Les artistes sont souvent capable de tirer des résultats extraordinaires de logiciels limités et buggués, n'hésitant pas à tenter des réglages imprévus, ni à se lancer dans un travail de fourmi qu'un développeur n'imaginerait même pas (comme modéliser un visage sommet par sommet à partir de rien).

3 Bilan des travaux (1997 - 2001)

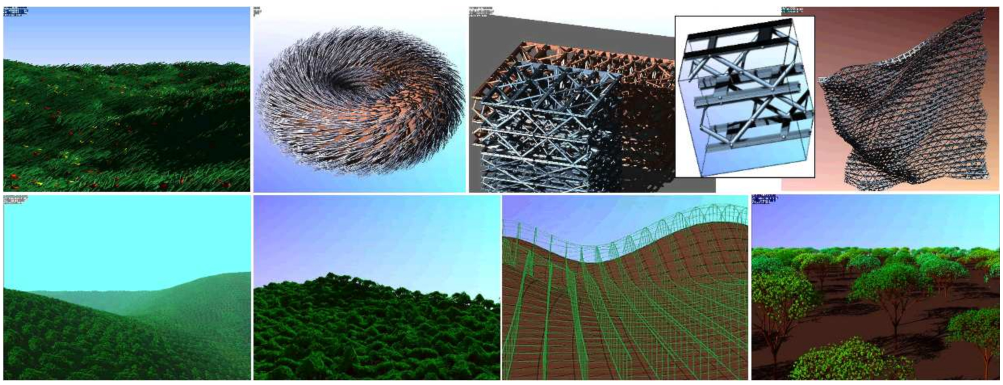
3.1 Représentations géométriques alternatives

• Textures volumiques

les *texels* permettent de représenter des objets complexes dont les détails sont petits par des volumes multi-échelles dont les voxels contiennent une densité et une fonction de réflectance. Ces volumes servent à recouvrir des surfaces à la manière des textures, constituant une "peau épaisse".
Ce modèle a été introduit en 1989 par Kajiya pour le cas particulier de la représentation de fourrure (sans multi-échelle). Je l'ai étendu pendant ma thèse (1994-1996), obtenant ainsi une représentation assez générale et très efficace, qui constitue alors une représentation impressionniste au sens défini en 2.2 :

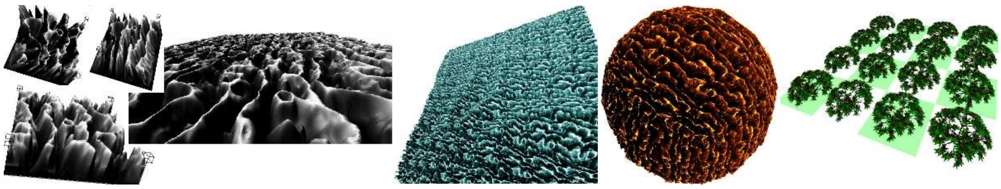
- la faible résolution dans la perception du relief est exploitée par l'usage du volume de voxels (dont la résolution correspond au nombre de plans que l'on peut distinguer en parallaxe),
- notre perception moyenne des formes (silhouette, position) est satisfaite par la répartition de la matière au sein de ce volume de voxels,
- la perception fine de l'illumination est assurée par la fonction de réflectance présente dans chaque voxel,
- le caractère multi-échelle se retrouve d'une part dans la structure en octree du volume (on utilise les voxels de taille adaptée) et d'autre part dans la nature même de l'approche texturelle (spécification fine et locale d'un échantillon, mappage de cet échantillon, spécification à grande échelle de la surface de support).

L'efficacité provient d'une part du caractère minimal de la représentation (évitant ainsi le sur-échantillonnage, qui coûte très cher tout en ne pouvant supprimer tout l'aliasing), et d'autre part de la structuration qu'elle apporte aux données : les voxels étant ordonnés dans le volume et le mappage des volumes étant lui-même ordonné sur la surface, on sait exactement quelles instances de volume et quels voxels parcourir, et dans quel ordre, contrairement à ce qu'il en serait si les détails étaient représentés par des maillages.



Ces travaux, menés lors de ma thèse, ont été prolongés après mon recrutement au CNRS vers le domaine du temps-réel :

• Alexandre Meyer a réalisé sous ma direction en 97-98 pendant son stage de DEA une version temps-réel de ces travaux (en acceptant de renoncer à une partie du réalisme). Dans ce contexte, un volume cubique est représenté par une série de tranches carrées recouvertes d'une texture semi-transparente. Un objet 3D est ainsi traduit en tranches. La complexité d'une scène se distingue donc alors en nombre de faces virtuellement apparentes (celles de l'objet figuré) et en nombre de faces réellement tracées (les tranches texturées). Le coût de rendu sur des cartes graphiques haut de gamme étant quasi indépendant de la résolution des textures, on a entre autres propriétés de cette représentation une relation particulièrement économique entre coût et résolution : l'augmentation du nombre de faces à afficher (ici, les tranches) avec la diminution de la taille des arêtes du maillage à figurer est linéaire, alors que le nombre de faces du maillage (qu'on aurait classiquement utilisé) croît de manière quadratique.
Ce travail a donné lieu à une publication à *EWR* en 98 ([MN98], reproduite Annexe A).



• Avec l'avènement de la nouvelle génération de cartes graphiques (type Nvidia), ces travaux ont été repris (stage de Franck Sénégas en 2000-01) avec l'idée de regagner le réalisme perdu lorsqu'on représente le volume par des surfaces texturées en hardware. En effet, ces cartes permettent d'évaluer l'illumination en chaque pixel, et non plus aux seuls sommets des maillages. Nous sommes parvenus, en stockant un volume (partiel) de normales, à afficher en temps réel des objets complexes (e.g. arbres) avec un réalisme visuel accru. On dispose donc maintenant d'une représentation alternative temps-réel complète, substituable à la représentation polygonale. Pour pousser plus loin le réalisme, il reste à traiter les aspects éclairage (ombres, inter-réflections). En outre, il faut maintenant décliner les diverses échelles pour lesquelles on gagne à utiliser les textures volumiques, notamment dans le cadre de la représentation de forêts : feuillage, arbre entier, canopée...

• Textures bidirectionnelles

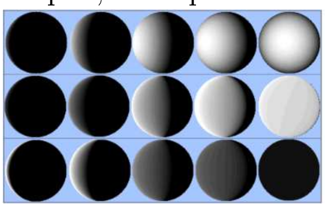
Alexandre Meyer a développé sous ma direction et celle de Pierre Poulin à Montréal (lors de sa dernière année de thèse) une nouvelle représentation temps-réel, de la famille des IBR (i.e. à base d'images précalculées), visant à afficher interactivement des paysages de forêt de manière réaliste, en rendant compte de l'éclairage et des ombres. Le principe consiste à enregistrer, pour de petits objets, l'aspect sous forme d'imagettes pour un échantillonnage représentatif des points de vue et des directions d'éclairage. En s'appuyant sur la nature répétitive et récursive des arbres, chaque "motif" (en l'occurrence touffe de feuilles ou d'aiguilles) peut être instancié de multiples fois sans coût de stockage supplémentaire, et une hiérarchie de motifs à plusieurs échelles est construite en utilisant comme détails de base les motifs de taille inférieure. Pour pouvoir estimer efficacement les ombres, on précalcule la visibilité aux divers niveaux hiérarchiques au moyen de *cubemaps*, cubes de texture stockant l'accessibilité de la lumière dans toutes les directions (cette structure est elle-même instanciée et hiérarchique).

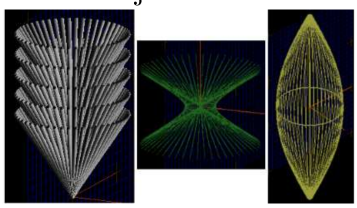
Ce travail a été publié à EWR en 2001 ([MNP01], reproduit Annexe A).

• **Réflectance vs forme**

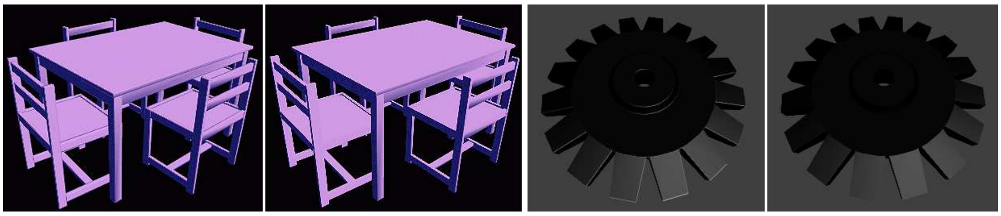
pour les objets complexes constitués de multitude d'objets plus fins (arbres feuillus ou conifères, fourrure, cristaux, etc), la forme globale de l'objet ne contrôle pas directement l'illumination locale de sa surface, contrairement aux objets usuellement traités en synthèse d'images, pour lesquels les normales – qui contrôlent l'illumination locale – dérivent des surfaces macroscopiques (qui sont continues et dérivables presque partout). Une idée alternative consiste à coder et traiter séparément ces deux aspects, afin de gagner en efficacité de calcul, en qualité de rendu, et en efficacité de description par l'utilisateur.

A titre d'exemple, je me suis intéressé en 1997 aux objets de types **nuage** (volume de gouttelettes) et **touffe d'aiguilles** (volume de cylindres de distribution connue). Dans le premier cas, j'ai pu dériver une formule analytique simple simulant la réflection de la lumière par une petite couche de volume sous la surface. Dans le second, j'ai développé un modèle qui détermine une forme simple ayant la même distribution de normales qu'une forme complexe axi-symétrique (e.g. touffe d'aiguilles de pin). L'idée est alors de maintenir deux formes, l'une qui contrôle la distribution spatiale d'information (en 3D et à l'écran), et l'autre qui contrôle le comportement optique, plus simple à "rendre" que la première, car connexe et convexe. Ces travaux-ci ne sont que de petites briques, mais qui finiront bien par servir à quelque chose un jour !



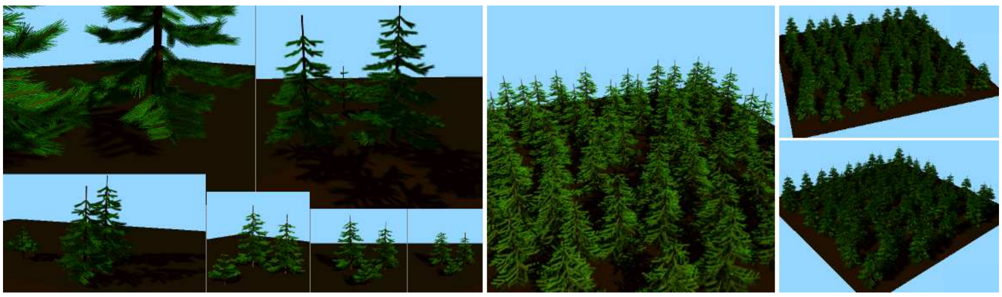


• Dans le même esprit, j'ai développé l'été 1999 une méthode permettant de remplacer les **arêtes arrondies** des objets (chanfreins, rainures, bords), qui "consomment" habituellement beaucoup de polygones pour donner une information faible et qui introduisent des artefacts à cause de la petite taille des facettes générées, par un *shader* dédié, i.e. une fonction de réflectance intégrant analytiquement le comportement optique correspondant à la portion visible de l'arête. Ces arêtes sont visuellement très intéressantes car elles tendent à détourer les objets, ce qui contribue à rendre les images plus riches et plus lisibles (e.g. architecture, objets manufacturés). J'ai développé une maquette, mais la découverte d'un article de 1989 introduisant une idée très proche a stoppé net les potentialités de recherche dans cette voie. Par contre des valorisations sont envisageables, dans la mesure où l'article de 1989 n'a pas eu de visibilité.



• D'autre part, Alexandre Meyer a commencé fin 1998 une thèse sur le thème des **représentations alternatives**, c'est à dire visant à se passer de l'information polygonale explicite des formes. L'objectif est d'exploiter au mieux la connaissance a priori disponible pour certaines familles d'objets afin de calculer analytiquement une bonne approximation de l'intégrale de l'illumination dans la région de l'espace visible à travers un pixel. Nos premiers travaux portent sur les **forêts de pins**, dans la mesure où la connaissance a priori sur la distribution des aiguilles est très forte. Nous avons dérivé une hiérarchie de trois *shaders* intégrant l'illumination (y compris les ombres et la transparence résiduelle) à l'échelle d'une aiguille, d'un cône d'aiguilles, et de toute une touffe. L'implémentation actuelle (peu optimisée), tourne environ 8 fois plus vite que *Rayshade* (un logiciel de rendu par ray-tracing), pour calculer l'image d'une forêt de sapins sans artefacts visuels.

Ces travaux ont été publiés à *Graphics Interface* en 2000 ([MN00], reproduit Annexe A).



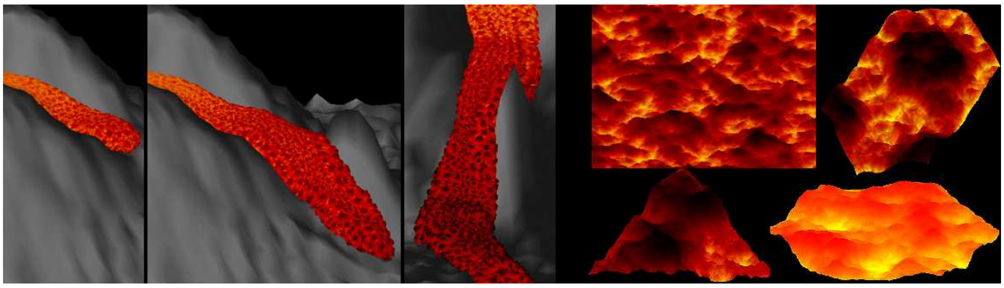
3.2 Aspect de surface réaliste

• Simulation d'une coulée de lave

Dans le même esprit que celui des hiérarchies de modèles, il s'agit de séparer l'aspect local de l'aspect global dans la forme et le mouvement de la coulée. Ici, la surface de la coulée est obtenue par simulation physique à base de particules (travaux dirigés par ma collègue Marie-Paule Cani, effectués par deux étudiants, Dan Stora et Pierre-Olivier Agliati, dont j'ai participé à l'encadrement). Il s'agit ensuite d'**habiller** cette surface par un modèle local en relief visuellement satisfaisant, pour représenter le fluide visqueux et la croûte en formation (c'est la partie que j'ai pris en charge). Pour cela on construit* des textures de déplacement vertical et des textures de couleur, inspirées du modèle procédural de Perlin, dans le voisinage des particules de la surface (ce voisinage étant déterminé par le diagramme de Voronoï des particules). On ne peut pas recourir à une paramétrisation globale de la surface pour mapper cette texture : aux distorsions habituelles des paramétrisations s'ajoutent les très grandes déformations accumulées par les fluides. La difficulté consiste alors à obtenir une texture (de relief et de couleur) continue-dérivable malgré la nature locale de sa construction.

* À noter que le rendu s'appuie sur le hardware graphique.

Ces travaux menés en 1998-99 ont donné lieu à une publication à *Graphics Interfaces* en 1999 ([SAC$^+$99], reproduite Annexe B).



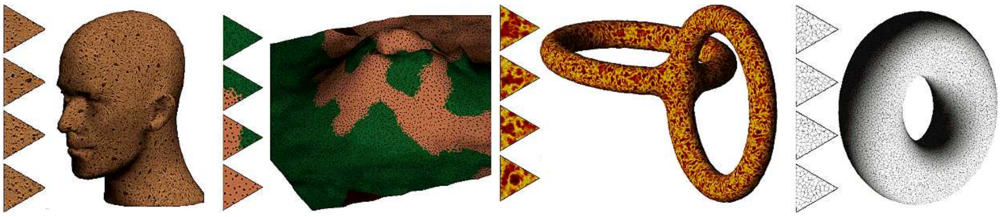
• Texture sans paramétrisation

La méthode usuelle en synthèse d'image pour décrire le recouvrement d'une surface par une texture consiste à passer par un paramétrage global de la surface. Les surfaces usuelles étant non développables, ce paramétrage comporte par essence des distorsions et discontinuités. En outre quand on souhaite utiliser un petit motif de référence, la répétitivité est généralement flagrante. J'ai développé (avec la participation de ma collègue Marie-Paule Cani) un modèle se passant de paramétrage global, permettant de texturer les surfaces sans subir de distorsion notable, sans introduire de discontinuité, et sans répétitivité apparente des motifs. Il s'agit de juxtaposer des petits paramétrages locaux, en ramenant les contraintes de continuité au contenu, lors de la phase de construction des motifs de texture. Ces paramétrages locaux sont obtenus en créant sur l'objet à habiller un "maillage de texture" formé de triangles quasi-équilatéraux de taille similaire (ce qui n'est pas très difficile à générer), plaqués sur la surface de l'objet.

Afin de constituer des motifs de texture triangulaires compatibles, j'ai étendu les principales techniques de synthèse de texture (textures procédurales de Perlin et de Worley, retouche d'image...) ; les textures volumiques s'adaptent également facilement à ce format.

Ce modèle ne résout bien sûr pas tout : reste à investiguer le domaine des textures anisotropes, le plus difficile étant sans doute d'en catégoriser des familles raisonnables (le problème général n'étant pas soluble) ; de plus ce travail a permis d'approcher certaines solutions quant à la délimitation des taches de texture et la transition entre zones, qui méritent plus d'attention.

Ces travaux menés en 1998-99 ont donné lieu à une publication à *Siggraph* en 1999 ([NC99], reproduite Annexe B).



3.3 Aspect de surface en temps réel

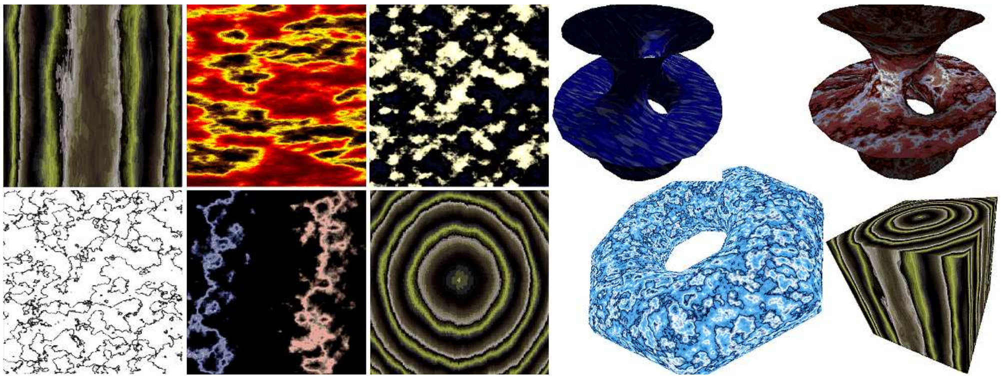
• Textures procédurales de Perlin en temps réel

Les textures de Perlin [Per85] sont les textures procédurales les plus utilisées (cette technique permet par exemple d'obtenir du bois ou du marbre), et c'est en outre une texture *3D*, i.e. non mappée sur une surface ; elle consiste à définir une fonction fractale tridimensionnelle dans laquelle on "taille" les objets à texturer. Comme cette approche nécessite l'évaluation d'une fonction en chaque pixel de l'écran, elle est coûteuse et réservée* au rendu réaliste (e.g. ray-tracing). En 1998, Antoine Miné (élève ENS en stage de magistère) a adapté sous ma direction cet outil de description de textures au contexte temps-réel. La difficulté consistant à utiliser toutes les fonctionnalités des cartes graphiques (qui s'appuient sur les polygones et non sur les pixels) de manière à obtenir, en 5 à 7 passes de rendu, un aspect très proche de ce qu'aurait donné un (long) calcul pour chaque pixel.

*à l'époque...

Ces travaux sont consignés dans le rapport de recherche* INRIA 3713 ([MN99], reproduit Annexe C).

* (Lequel a néanmoins été cité dans plusieurs articles.)



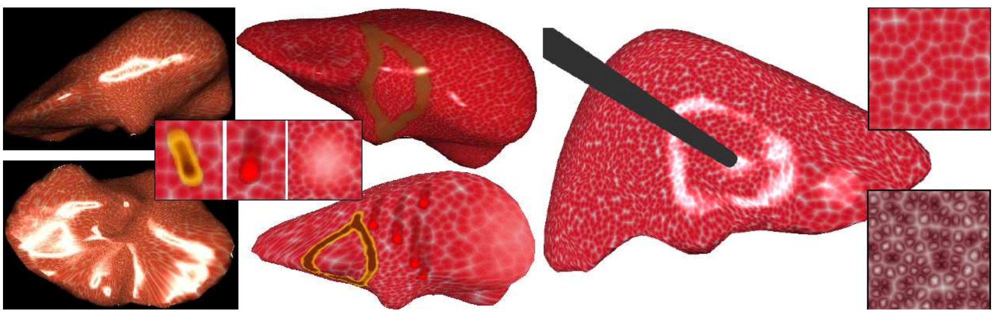
• Surface d'organe en cours d'opération

L'Action de Recherche Coopérative de l'INRIA "AISIM" a regroupé en 1998-1999 six projets de l'INRIA et l'IRCAD (centre de formation médicale), autour des problématiques liées à la réalisation d'un simulateur de chirurgie laparoscopique du foie, destiné à remplacer la formation sur animal ou sur cadavre. J'ai pris en charge tous les aspects liés au **rendu réaliste de l'organe en temps réel**. Raphaël Heiss en 1998 (stage ingénieur) et Franck Sénégas en 1999 (stage magistère) ont sous ma direction développé une maquette permettant de prendre en compte en temps réel la texture de l'organe, les reflets de la source lumineuse annulaire, et les effets dynamiques dûs aux réactions de l'organe aux actions du chirurgien. Ces actions sont de trois types : épanchement de gouttes de sang, blanchiment temporaire de la peau sous l'effet d'une pression, et cautérisation évolutive de la surface. Ces mouvements d'"objets" plus ou moins complexes à la surface du foie risquant de pénaliser le temps de calcul, un modèle de "sprites texturels" a été développé, constitué d'**objets 2D vivant dans l'espace de la texture**, mais soumis aux lois physiques 3D (notamment pour les gouttes de sang). Les maquettes ont été présentées à la direction scientifique de l'INRIA lors de la clôture de l'Action de Recherche Coopérative en 1999.

• Toujours dans le cadre d'AISIM, j'ai participé avec Marie-Paule Cani et Jean-Christophe Lombardo (postdoc à Epidaure) à la conception d'une nouvelle technique permettant de **détecter en temps-réel les collisions** entre un instrument de forme simple et le maillage du foie. Cette tâche est ordinairement très coûteuse lors de l'animation ; nous l'avons rendu négligeable (dans notre cas de figure) en ayant recours au hardware graphique : nous assimilons l'outil au "volume de vision" d'une caméra. Les faces éventuellement intersectées sont alors les analogues des faces "visibles" par cette caméra, dont le hardware graphique sait trouver la liste (c'est la fonction utilisée dans les applications 3D pour "cliquer" sur un objet).
Cette technique a été publiée à Computer Animation en 1999
([LCN99], reproduite Annexe C).

• À noter que Pierre-Olivier Agliati a réalisé en 1999 lors de son stage ingénieur (codirigé par Gilles Debunne et Marie-Paule Cani) l'intégration des modèles temps-réel de déformation, de collision, de texturation sans déformation, et de reflet de la source annulaire. Il est remarquable que l'intégration des aspects animation et rendu donne plus que le réalisme apporté par chacun des deux modèles séparément : les reflets procurent lors de la simulation des informations très utiles sur le galbe et la déformation de la surface, et notamment sur l'instant où l'instrument entre en contact, ou encore sur l'intensité de la force que celui-ci exerce sur l'organe.

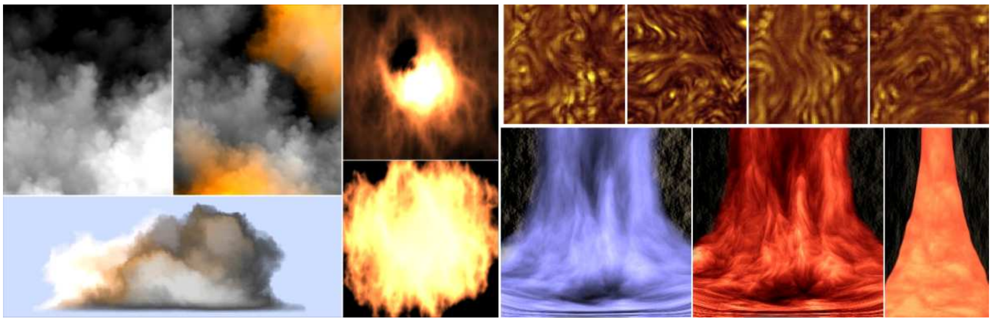
L'ensemble des travaux de rendu ont fait l'objet d'une publication acceptée en 2001 dans la revue *Visual Computer* ([NHS01], reproduite Annexe C).



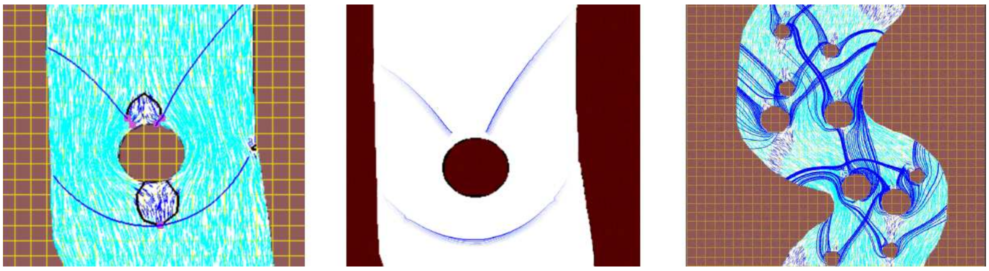
3.4 Approches phénoménologiques (forme et mouvement, rendu)

3.4.1 Liquides

• Textures fluides (flownoise)
Les textures procédurales fractales comme celles de Perlin, ou les synthèses spectrales, arrivent bien à reproduire des structures visuelles ou des champs qui évoquent des fluides. Cependant, obtenir une *animation* réaliste est un problème très différent de celui d'obtenir une *image fixe* réaliste : il ne suffit pas d'animer dans le temps les paramètres de la texture procédurale pour obtenir une bonne animation, même si chaque image successive est crédible. Ken Perlin (NY University) et moi-même avons proposé un modèle de texture procédurale animée évoquant le mouvement des fluides, en revisitant le modèle statique : l'idée consiste à introduire des rotations des fonctions de base aux diverses échelles, et à composer ces échelles non-linéairement de manière à reproduire l'advection des petites structures sur les grandes.
Ce travail a été présenté aux Technical Sketches de Siggraph en 2001
([PN01], reproduit Annexe D).

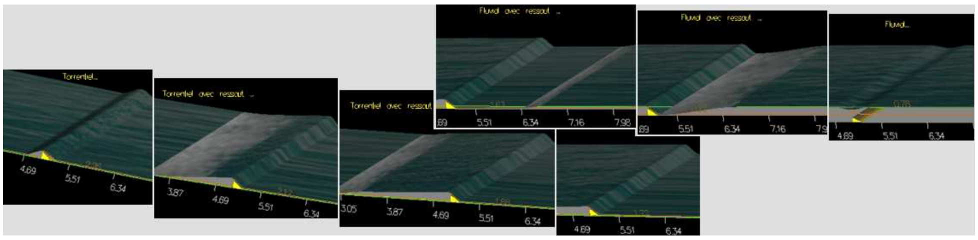


• Simulation d'un ruisseau
Nathalie Praizelin a initié en 2000 sous ma direction un stage de DESS dont le but était de **modéliser les ruisseaux** en s'attachant à l'aspect visuel dynamique : on souhaite capturer l'apparence du mouvement de l'eau (on remet cependant le rendu réaliste à plus tard). On se limite dans un premier temps au cadre des ruisseaux peu turbulents, pour lesquels on s'intéresse aux divers systèmes de ridules au voisinage des obstacles, stationnaires ou non, qui constituent véritablement *ce que l'on perçoit* d'un ruisseau (alors que le mouvement de l'écoulement lui-même n'est généralement pas visible, même à la surface). Ces ridules résultent d'ondes de choc, qu'il serait difficile et coûteux d'obtenir par simulation brutale de Navier-Stokes, alors qu'une connaissance physique macroscopique existe pour décrire directement les conditions d'apparition et les caractéristiques de ces phénomènes.
On effectue une résolution simplifiée de l'écoulement (i.e., non visqueux, irrotationnel, incompressible, 2D ou 2D$\frac{1}{2}$), puis on délimite les sites caractéristiques (e.g. zones sous-critiques), avant de construire en temps réel les divers systèmes d'ondes stationnaires. L'écoulement est rendu quasi-stationnaire en propageant "au fil de l'eau" des perturbations aléatoires (vortexs, sources apparentes).
Ce travail a été publié à EWAS'01 ([Ney01], reproduit Annexe D).



• Toujours dans le cadre des ruisseaux, Cédric Dodart a effectué sous ma direction un stage court d'ingénieur visant à extraire du domaine de l'hydraulique des formules empiriques permettant de caractériser les dimensions des ressauts et changements de niveaux dans l'écoulement en fonction des diverses conditions (pente, fond). Comme le calcul de la surface est simple (formules analytiques plus constructions linéaires), le programme tourne en temps-réel.

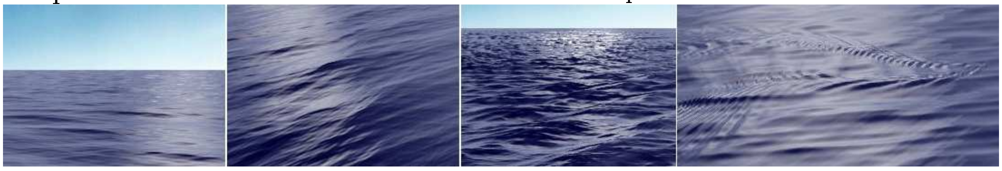
L'étude actuelle étant 2D, il reste à généraliser au 3D en considérant chaque veine fluide. On aura alors une brique supplémentaire du simulateur de ruisseaux, correspondant aux variations à grande échelle.



L'étape suivante consistera en l'étude fine des ondes de capillarité pour en tirer une construction simple (c'est en cours), et le rendu réaliste, éventuellement en temps réel (il s'agit avant tout de calculer les reflets sur la surface, ce qui ce fait facilement en hardware), ce qui passe par la génération de la surface complète de façon le plus efficace possible.

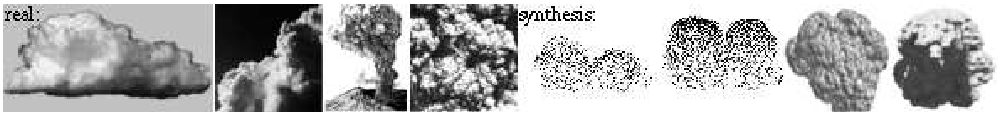
• **Mer**

J'ai co-encadré avec Marie-Paule Cani le stage de Damien Hinsinger consacré à la simulation adaptative de la mer par composition de trains d'ondes modélisés par des trochoïdes, et incluant la construction du sillage des bateaux (ondes de Kelvin). La surface de la mer est échantillonnée de façon à ce que chaque patch se projette avec la même taille à l'écran (à la façon des surfels), et les primitives d'animation sont filtrées selon leur longueur d'onde et leur distance, de façon à éviter l'aliasing et optimiser les calculs. Selon les seuils choisis, on peut obtenir des images réalistes fines (en une dizaine de secondes) ou plus épurées mais temps-réel. Une soumission de ces travaux à GI'02 est prévue.



3.4.2 Nuages

• **Forme et évolution des nuages convectifs**
Lors de mon post-doc au DGP à Toronto, je me suis intéressé (en contact avec plusieurs physiciens de l'atmosphère) à l'étude des divers phénomènes contrôlant le développement et la forme des nuages convectifs (cumulus), et notamment aux caractéristiques des différents modes d'instabilité (cellules de Bénard, instabilité de Rayleigh-Taylor, thermodynamique des bulles, instabilité de Kelvin-Helmoltz, cascade de Kolmogorov...). L'idée était ensuite de constituer un simulateur en choisissant ces phénomènes comme primitive, et en les agençant aux différentes échelles, sans avoir à résoudre de système d'équations locales.
Une première étude[37] a été publiée à EWAS'97 ([Ney97], reproduite Annexe D).



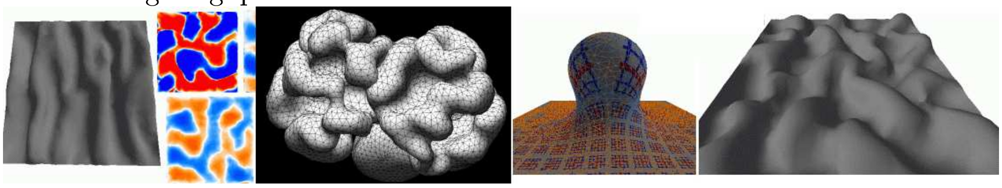
• **Rendu réaliste des nuages convectifs**
Les approches actuelles pour le rendu réaliste des nuages se basent sur la résolution du problème général de l'illumination volumique par diffusion anisotrope multiple en volume à partir des équations locales, ce qui est extrêmement coûteux, et permet difficilement d'utiliser une résolution élevée. J'ai démarré en 2000 une étude visant à caractériser l'aspect photométrique des nuages convectifs, dans le but de développer un modèle analytico-phénoménologique de rendu, permettant de construire très rapidement des images de haute qualité visuelle (effets et résolution). Il s'agit d'exploiter toute la connaissance a priori disponible sur les nuages convectifs : ils sont très dense, d'albedo très proche de 1, la zone de transition entre intérieur et extérieur est très fine (et la silhouette a une apparence caractéristique), la "surface" est composée de forme sphérique, etc... Un état des travaux est disponible dans le rapport de recherche INRIA 3947 [Ney00].

3.4.3 Surfaces

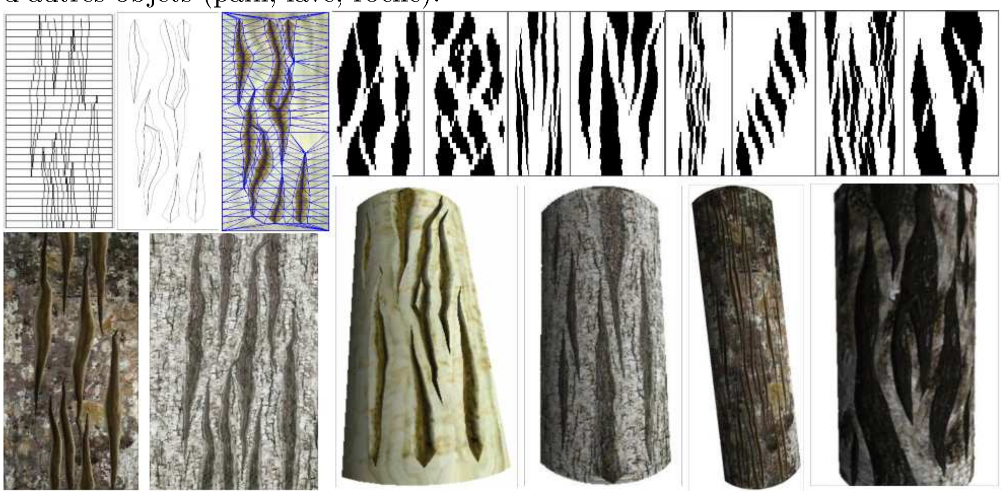
• **Textures de dilatation**
Jean Combaz a effectué en 99/00 sous ma direction un stage de DEA visant à implémenter un nouveau concept, les **textures de dilatation**. Il s'agit de mapper sur une surface les paramètres (amplitude, directivité) contrôlant sa dilatation ou contraction locale, puis de simuler la forme d'équilibre qu'adopte la surface en réponse à ces contraintes. La texture de paramètres peut être une "image", mais aussi être procédurale, ou encore dynamique (évolutive, ou subissant les effets de l'environnement, ou de l'utilisateur). L'objectif est de

[37] Curieusement, elle est beaucoup citée. J'imagine que cela constitue une mesure de la rareté des publications sur ce sujet...

laisser à l'utilisateur ou à un algorithme le soin de créer un ensemble de zones de dilatation (points chauds ou rifts) et de zones de contraction, isotropes ou axiales, permettant de spécifier très simplement une forme complexe (nuages, subduction, objets nervurés), à l'équilibre ou évolutive, dans l'optique d'offrir des modalités de contrôle intuitives et compactes.
Jean prolonge actuellement ces travaux en une thèse sur les phénomènes de croissance, avec comme pistes envisageables la mise au point d'outils interactifs de modélisation de formes, la création procédurale à bases biologiques, et la simulation géologique.



• **Simulation des déchirures**
Sylvain Lefebvre a effectué en 2001 sous ma direction un stage de DEA sur la simulation visuellement réaliste de surfaces à base de déchirures (écorce, pain, ...). On s'intéresse essentiellement aux déchirures qui résultent d'un phénomène de croissance, sans influencer en retour celui-ci (au premier ordre). Il s'agit donc essentiellement d'un "habillage visuel" couplant géométrie et texture, ce pour quoi une approche phénoménologique est tout à fait appropriée. Une représentation en bandelettes parallèles aux efforts dus à la croissance, segmentées en zones d'écorce pleine ou de fracture, adjointe à un modèle de propagation de fractures, permet d'obtenir des surfaces convainquantes aux aspects modulables par l'utilisateur (taux et forme des fractures, voire emplacement), sans recourir à une simulation lourde. (Une soumission prochaine de ces travaux est envisagée.)
Sylvain commence maintenant une thèse en continuation de son stage, avec comme pistes envisageables la synthèse de l'écorce sur tout l'arbre sans paramétrisation de surface, la prise en compte des effets apparentés (craquelures, lamelles, lambeaux), et la généralisation à l'aspect de surface d'autres objets (pain, lave, roche).



4 Perspectives de recherche

Voici quelques pistes concernant mes thèmes de recherche à venir à court et à plus long terme, en continuation de mes travaux actuel :

- poursuivre les travaux sur la modélisation, animation et rendu réaliste efficace (par modèles phénoménologiques ou mixtes) des cours d'eau et des nuages convectifs ;
- sur les représentations alternatives :
  - poursuivre la constitution d'une représentation géométrique temps-réel complète et réaliste, notamment en traitant les ombres et l'illumination globale dans les textures volumiques ;
  - étudier le meilleur usage qui peut être fait des textures volumiques pour la représentation des arbres et forêts, notamment en fonction de la distance (arbre vs canopée ou portions de feuillage) ;
  - étendre les shaders d'aiguilles aux feuillus pour aboutir à des shaders d'arbres ; étudier la possibilité d'une version temps réel ;
  - étudier la possibilité de transformer les surfels en une représentation réaliste, en y adaptant des shaders pour la représentation des détails sous-pixels ;
- étudier les possibilités de développer un modèle efficace pour l'illumination réaliste naturelle (soleil et ciel sur un terrain, inter-réflections, neige) ;
- poursuivre et étendre les travaux sur les formes issues du mouvement, et sur les phénomènes de croissance :
  - pour modéliser des surfaces naturelles (e.g. écorces, état de surface) ;
  - pour traiter des formes évolutives (notamment la transformation géologique[38] du paysage) ;
  - pour constituer des outils de modélisation[39] de formes commodes ;
- poursuivre l'activité dans le domaine des textures, notamment vers le procéduralisme (e.g. amplification géométrique pour la modélisation fine des roches), ainsi que les outils de mise en place (par exemple pour la distribution de la forêt dans un paysage) ;

En parallèle, je cherche fortement à tisser des liens avec d'autres disciplines : j'ai accumulé quelques contacts en France et à l'étranger en mécaniques des fluides et de l'atmosphère, ainsi qu'avec le CIRAD et Bionatics (experts en modèles végétaux) ; et d'autres domaines m'intéressent également (géologie, physique...).

[38] La pauvreté des illustrations des documentaires audiovisuels sur les sujets géologiques est éloquente quant à la totale absence d'outils adaptés. J'aimerais participer à un projet audiovisuel de long terme, rassemblant géologues, mécaniciens, synthésistes et artistes, pour réussir à mettre en place ces éléments et obtenir à terme un simulateur géologique !

[39] En particulier, je m'intéresse aux approches inspirées des modèles biologiques de croissance. Certains travaux du domaine s'en inspirent déjà [FMP92, WK91, Tur91, FPdB90, FLCB95, Pru93]. Il me semble possible d'aller beaucoup plus loin que ces modèles, et de générer de la forme (e.g. vilosités), des orientations (implantation de la fourrure et de la chevelure), des nervures, etc.

Références

[AMA] AMAP. (CIRAD) http ://www.cirad.fr/produits/amap/amap.html
et http ://www.cirad.fr/produits/amap/pepinieres/pepinieres.shtml.

[Are] Areté image software. http ://www.areteis.com/.

[Ben] Werner Benger. ray-tracing of nebular media.
http ://www.photon.at/~werner/clouds/Clouds.html.

[Bio] Bionatics. http ://www.bionatics.com/.

[Bli82] J. F. Blinn. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '82 Proceedings)*, volume 16(3), pages 21–29, July 1982.

[BM93] Barry G. Becker and Nelson L. Max. Smooth transitions between bump rendering algorithms. In James T. Kajiya, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, volume 27, pages 183–190, August 1993.

[Bry] Bryce. http ://www.metacreations.com/products/bryce4/.

[BVI91] Chakib Bennis, Jean-Marc Vézien, and Gérard Iglésias. Piecewise surface flattening for non-distorted texture mapping. In Thomas W. Sederberg, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, volume 25, pages 237–246, July 1991.

[Cal98] Patrick Callet. *Couleur-lumière, couleur-matière.* Diderot multimédia, January 1998. ISBN : 2-84352-087-8.

[Car80] M. Carlier. *Hydraulique générale et appliquée.* Eyrolles, 1980.

[Che95] S.E. Chen. Quicktime VR - an image-based approach to virtual environment navigation. In *SIGGRAPH 95 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 29–38, August 1995.

[CHP89] John E. Chadwick, David R. Haumann, and Richard E. Parent. Layered construction for deformable animated characters. In Jeffrey Lane, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, volume 23, pages 243–252, July 1989.

[CMS87] Brian Cabral, Nelson Max, and Rebecca Springmeyer. Bidirectional reflection functions from surface bump maps. In Maureen C. Stone, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Proceedings)*, volume 21(4), pages 273–281, July 1987.

[COM98] Jonathan Cohen, Marc Olano, and Dinesh Manocha. Appearance-preserving simplification. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pages 115–122, July 1998. ISBN 0-89791-999-8. Held in Orlando, Florida.

[DB97] Jeremy S. De Bonet. Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images. In Turner Whitted, editor, *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, pages 361–368. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1997.

[DDCB01] Gilles Debunne, Mathieu Desbrun, Marie-Paule Cani, and Alan H. Barr. Dynamic real-time deformations using space and time adaptive sampling. In *Computer Graphics Proceedings*, Annual Conference Series. ACM Press / ACM SIGGRAPH, Aug 2001. Proceedings of SIGGRAPH'01.

[DHL+98] Oliver Deussen, Patrick Hanrahan, Bernd Lintermann, Radomír Mech, Matt Pharr, and Przemyslaw Prusinkiewicz. Realistic modeling and rendering of plant ecosystems. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pages 275–286, July 1998. ISBN 0-89791-999-8. Held in Orlando, Florida.

[Dis98] J.-M. Dischler. Efficiently rendering macrogeometric surface structures using bi-directional texture functions. In *Rendering Techniques '98*, Eurographics, pages 169–180, 1998.

[DKY+00] Yoshinori Dobashi, Kazufumi Kaneda, Hideo Yamashita, Tsuyoshi Okita, and Tomoyuki Nishita. A simple, efficient method for realistic animation of clouds. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 19–28, July 2000. ISBN 1-58113-208-5.

[DLHS01] Katja Daubert, Hendrik P. A. Lensch, Wolfgang Heidrich, and Hans-Peter Seidel. Efficient cloth modeling and rendering. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering*, pages 63–70, 25–27 June 2001.

[DPH96] Julie Dorsey, Hans Køhling Pedersen, and Pat Hanrahan. Flow and changes in appearance. In Holly Rushmeier, editor, *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 411–420. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1996. held in New Orleans, Louisiana, 04-09 August 1996.

[dREF+88] Phillippe de Reffye, Claude Edelin, Jean Françon, Marc Jaeger, and Claude Puech. Plant models faithful to botanical structure and development. In John Dill, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, volume 22(4), pages 151–158, August 1988.

[Ebe97] David S. Ebert. Volumetric procedural implicit functions : A cloud is born. In Turner Whitted, editor, *SIGGRAPH 97 Technical Sketches Program.* ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1997. ISBN 0-89791-896-7.

[EMG] EMG. `http ://www.emg.fr/corporate/fr/index_fr.htm`.

[EMP+94] David Ebert, Kent Musgrave, Darwyn Peachey, Ken Perlin, and Worley. *Texturing and Modeling : A Procedural Approach*. Academic Press, October 1994. ISBN 0-12-228760-6.

[ESI] Équipe esi.
Modélisation de reliefs par érosion : `http ://www-igm.univ-mlv.fr/~w3esi/themes.old/Relief/`
Modélisation de bassins fluviaux : `http ://www-igm.univ-mlv.fr/~w3esi/themes.old/Fleuve/`
Modélisation de végétaux : `http ://www-igm.univ-mlv.fr/~w3esi/themes.old/Veget/`.

[Fey77] R. Feynman. *Lectures on physics*. Addison-Weisley Publishing Compagny, 1977.

[FF80] Alain Fournier and Don Fussell. Stochastic modeling in computer graphics. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 80)*, 14(3) :108, July 1980. Held in Seattle, Washington.

[FF01] Nick Foster and Ronald Fedkiw. Practical animation of liquids. *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, pages 23–30, August 2001. ISBN 1-58113-292-1.

[FFC82] Alain Fournier, D. Fussell, and L. Carpenter. Computer rendering of stochastic models. *Communications of the ACM*, 25(6) :371–384, June 1982.

[FHP98] Patrick Fournier, Arash Habibi, and Pierre Poulin. Simulating the flow of liquid droplets. *Graphics Interface '98*, pages 133–142, June 1998. ISBN 0-9695338-6-1.

[FLCB95] K. W. Fleischer, D. H. Laidlaw, B. L. Currin, and A. H. Barr. Cellular texture generation. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Proceedings)*, pages 239–248. Robert Cook, 1995.

[FMP92] Deborah R. Fowler, Hans Meinhardt, and Przemyslaw Prusinkiewicz. Modeling seashells. In Edwin E. Catmull, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings)*, volume 26, pages 379–388, July 1992.
Sur la morphogénèse en général, voir aussi :
`http ://www.cpsc.ucalgary.ca/Redirect/bmv/vmm/toc.html`.

[Fou89] Alain Fournier. The modelling of natural phenomena. *Graphics Interface '89*, pages 191–202, June 1989.

[Fou91] Alain Fournier. The natural look. *COMPUGRAPHICS '91*, I :426.1–426.10, 1991. `http ://www.cs.ubc.ca/cgi-bin/tr/1993/TR-93-52/`.

[Fou92] Alain Fournier. Normal distribution functions and multiple surfaces. In *Graphics Interface '92 Workshop on Local Illumination*, pages 45–52, May 1992.

[Fou94] Alain Fournier. From the look of things. *Graphics Interface '94*, pages 157–164, May 1994. Held in Banff, Alberta, Canada.

[Fou99] Alain Fournier. The tiger experience, 2 1999.
`http ://www.cs.ubc.ca/spider/fournier/tiger/index.htm`.

[FPdB90] F. David Fracchia, Przemyslaw Prusinkiewicz, and Martin J. M. de Boer. Visualization of the development of multicellular structures. In *Proceedings of Graphics Interface '90*, pages 267–277, May 1990.

[FR86] Alain Fournier and William T. Reeves. A simple model of ocean waves. In David C. Evans and Russell J. Athay, editors, *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, volume 20, pages 75–84, August 1986.

[FvDFH90] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, and J. F. Hughes. *Computer Graphics : Principles and Practices (2nd Edition)*. Addison Wesley, 1990.

[Gar84] Geoffrey Y. Gardner. Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 84)*, 18(3) :11–20, July 1984. Held in Minneapolis, Minnesota.

[Gar85] Geoffrey Y. Gardner. Visual simulation of clouds. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 85)*, 19(3) :297–303, July 1985. Held in San Francisco, California.

[GGSC96] Steven J. Gortler, Radek Grzeszczuk, Richard Szeliski, and Michael F. Cohen. The lumigraph. *Proceedings of SIGGRAPH 96*, pages 43–54, August 1996. ISBN 0-201-94800-1. Held in New Orleans, Louisiana.

[GMN94] Jay S. Gondek, Gary W. Meyer, and Jonathan G. Newman. Wavelength dependent reflectance functions. In Andrew Glassner, editor, *Proceedings of SIGGRAPH '94 (Orlando, Florida, July 24–29, 1994)*, Computer Graphics Proceedings, pages 213–220. ACM SIGGRAPH, July 1994.

[Gol97] Dan B. Goldman. Fake fur rendering. *Proceedings of SIGGRAPH 97*, pages 127–134, August 1997. ISBN 0-89791-896-7. Held in Los Angeles, California.

[HB95] David J. Heeger and James R. Bergen. Pyramid-Based texture analysis/synthesis. In Robert Cook, editor, *SIGGRAPH 95 Conference Proceedings*, pages 229–238. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1995.

[HDKS00] Wolfgang Heidrich, Katja Daubert, Jan Kautz, and Hans-Peter Seidel. Illuminating micro geometry based on precomputed visibility. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 455–464, July 2000. ISBN 1-58113-208-5.

[HH90] Pat Hanrahan and Paul E. Haeberli. Direct WYSIWYG painting and texturing on 3D shapes. In Forest Baskett, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH 90 Proceedings)*, volume 24, pages 215–223, August 1990.

[HK93] Pat Hanrahan and Wolfgang Krueger. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. *Proceedings of SIGGRAPH 93*, pages 165–174, August 1993. ISBN 0-201-58889-7. Held in Anaheim, California.

[Kaj85] James T. Kajiya. Anisotropic reflection models. In B. A. Barsky, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19(3), pages 15–21, July 1985.

[KK89] James T. Kajiya and Timothy L. Kay. Rendering fur with three dimensional textures. In Jeffrey Lane, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, volume 23(3), pages 271–280, July 1989.

[LCN99] Jean-Christophe Lombardo, Marie-Paule Cani, and Fabrice Neyret. Real-time collision detection for virtual surgery. In *Computer Animation'99*, May 1999. `http ://www-imagis.imag.fr/Publications/1999/LCN99`.

[LH96] M. Levoy and P. Hanrahan. Light field rendering. In *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 31–42, August 1996.

[Lig78] J. Lighthill. *Waves in fluids*. Cambridge University Press, 1978.

[Lin68] A. Lindenmayer. Mathematical models for cellular interactions in development, I & II. *Journal of Theoretical Biology*, 18 :280–315, 1968.

[LL94] Philippe Lacroute and Marc Levoy. Fast volume rendering using a shear–warp factorization of the viewing transformation. In Andrew Glassner, editor, *Proceedings of SIGGRAPH '94 (Orlando, Florida, July 24–29, 1994)*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 451–458. ACM SIGGRAPH, ACM Press, July 1994. ISBN 0-89791-667-0.

[LM98] Bruno Lévy and Jean-Laurent Mallet. Non-distorted texture mapping for sheared triangulated meshes. In Michael Cohen, editor, *SIGGRAPH 98 Conference Proceedings*, pages 343–352. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, July 1998.

[LMH00] Aaron Lee, Henry Moreton, and Hugues Hoppe. Displaced subdivision surfaces. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 85–94, July 2000. ISBN 1-58113-208-5.

[LS97] J. Lengyel and J. Snyder. Rendering with coherent layers. *Proceedings of SIGGRAPH 97*, pages 233–242, August 1997.

[Max86a] N. L. Max. Light diffusion through clouds and haze. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 33(3) :280–292, March 1986.

[Max86b] N.L. Max. Atmospheric illumination and shadows. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, volume 20(4), pages 117–24, August 1986.

[Max91] Nelson L. Max. Unified sun and sky illumination for shadows under trees. *CVGIP : Graphical Models and Image Processing*, 53(3) :223–30, May 1991.

[Max94] Nelson L. Max. Efficient light propagation for multiple anisotropic volume scattering. In *Fifth Eurographics Workshop on Rendering*, pages 87–104, Darmstadt, Germany, June 1994.

[Max96] N. Max. Hierarchical rendering of trees from precomputed multi-layer Z-buffers. In *Eurographics Rendering Workshop 1996*, pages 165–174, June 1996.

[MB95] Leonard McMillan and Gary Bishop. Plenoptic modeling : An image-based rendering system. *Proceedings of SIGGRAPH 95*, pages 39–46, August 1995. ISBN 0-201-84776-0. Held in Los Angeles, California.

[MHM88] F. Kenton Musgrave, Lewis Hitchner, and James Murphy. A realistic model of refraction for computer graphics. In *Proceedings of Modelling and Simulation on Microcomputers*, pages 37–43, 1988.

[MKM89] F. Kenton Musgrave, Craig E. Kolb, and Robert S. Mace. The synthesis and rendering of eroded fractal terrains. In Jeffrey Lane, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, volume 23(3), pages 41–50, July 1989.

[MN98] Alexandre Meyer and Fabrice Neyret. Interactive volumetric textures. In George Drettakis and Nelson Max, editors, *Eurographics Rendering Workshop 1998*, pages 157–168, New York City, NY, July 1998. Eurographics, Springer Wein. ISBN 3-211-83213-0 `http ://www-imagis.imag.fr/Publications/1998/MN98b/`.

[MN99] Antoine Miné and Fabrice Neyret. Perlin textures in real time using OpenGL. Technical report, RR-3713, INRIA, 1999. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/RR-3713-fra.html`.

[MN00] Alexandre Meyer and Fabrice Neyret. Multiscale shaders for the efficient realistic rendering of pine-trees. In *Graphics Interface*, pages 137–144. Canadian Information Processing Society, Canadian Human-Computer Communications Society, May 2000. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Alexandre.Meyer/research/gi00/`.

[MNA98] F. Multon, J. L. Nougaret, and B. Arnaldi. Coarse-to-fine design of feedback controllers for dynamic locomotion. *The Visual Computer*, 13(9-10) :435–455, 1998. ISSN 0178-2789.

[MNP01] Alexandre Meyer, Fabrice Neyret, and Pierre Poulin. Interactive rendering of trees with shading and shadows. In *Eurographics Workshop on Rendering*, Jul 2001. `http ://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/MNP01`.

[MO95] N. Max and K. Ohsaki. Rendering trees from precomputed Z-buffer views. In *Eurographics Rendering Workshop 1995*, June 1995.

[Moj] MojoWorld. `http ://www.fractalworlds.com/`.

[MWM87] G. A. Mastin, P. A. Watterberg, and J. F. Mareda. Fourier synthesis of ocean scenes. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 7(3) :16–23, March 1987.

[MYV93] Jérôme Maillot, Hussein Yahia, and Anne Verroust. Interactive texture mapping. In James T. Kajiya, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, volume 27, pages 27–34, August 1993.

[NC99] Fabrice Neyret and Marie-Paule Cani. Pattern-based texturing revisited. In *SIGGRAPH 99 Conference Proceedings*, pages 235–242. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1999. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/SIG99/`.

[NDW93] J. Neider, T. Davis, and M. Woo. *OpenGL Programming Guide*. Addison-Wesley, 1993.

[Ney] Fabrice Neyret. Real images gallery. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/gallery/`.

[Ney95a] Fabrice Neyret. Animated texels. In *Eurographics Workshop on Animation and Simulation'95*, pages 97–103, September 1995. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/EWAS95-fra.html`.

[Ney95b] Fabrice Neyret. A general and multiscale method for volumetric textures. In *Graphics Interface'95 Proceedings*, pages 83–91, May 1995. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/GI95-fra.html`.

[Ney96a] Fabrice Neyret. Synthesizing verdant landscapes using volumetric textures. In *Eurographics Workshop on Rendering'96*, pages 215–224, June 1996. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/EWR96-fra.html`.

[Ney96b] Fabrice Neyret. *Textures Volumiques pour la Synthèse d'images*. PhD thesis, Université Paris-XI - INRIA, 1996. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/thesefabrice-fra.html`.

[Ney96c] Fabrice Neyret. Trimmed textures. Technical report, RR-2857, INRIA, 1996. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/RR-2857-fra.html`.

[Ney97] Fabrice Neyret. Qualitative simulation of cloud formation and evolution. In D. Thalmann and M. Van de Panne, editors, *8th Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS'97)*, pages 113–124, New York City, NY, September 1997. Eurographics, Springer Wein. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/EWAS97-fra.html`.

[Ney98] Fabrice Neyret. Modeling animating and rendering complex scenes using volumetric textures. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 4(1) :55–70, January–March 1998. ISSN 1077-2626 `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/tvcg98-fra.html`.

[Ney00] Fabrice Neyret. A phenomenological shader for the rendering of cumulus clouds. Technical Report RR-3947, INRIA, May 2000. `http ://www-imagis.imag.fr/Publications/2000/Ney00`.

[Ney01] Fabrice Neyret. Phenomenological simulation of brooks. In *Eurographics Workshop on Animation and Simulation'01*, pages 53–64, September 2001.

[Ney02] Fabrice Neyret. *Visualisation*, chapter Représentation des matériaux. Information Géographique et Aménagement du territoire. Hermès, 2002.

[NHS01] Fabrice Neyret, Raphaël Heiss, and Franck Sénégas. Realistic rendering of an organ surface in real-time for laparoscopic surgery simulation. *The Visual Computer*, à paraître, 2001.

[Nis98] Tomoyuki Nishita. Light scattering models for the realistic rendering of natural scenes. *Eurographics Rendering Workshop 1998*, pages 1–10, June 1998. ISBN 3-211-83213-0. Held in Vienna, Austria.

[NND96] Tomoyuki Nishita, Eihachiro Nakamae, and Yoshinori Dobashi. Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light. In Holly Rushmeier, editor, *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings*, pages 379–386. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1996.

[Nom95] T. Noma. Bridging between surface rendering and volume rendering for multi-resolution display. In *6th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 31–40, June 1995.

[Nvi] Nvidia. Whitepapers and technical demos. `http ://www.nvidia.com/Marketing/Developer/DevRel.nsf/`.

[OBM00] M.M. Oliveira, G. Bishop, and D. McAllister. Relief texture mapping. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 359–368, July 2000.

[OGL] Fabrice neyret. OpenGL : principe et astuces. `http ://www-imagis.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/doc/opengl.html`.

[OGL98] *Siggraph Course Notes CD-ROM. Advanced Graphics Programming Techniques Using OpenGL*. Addison-Wesley, 1998. `http ://www.sgi.com/software/opengl/advanced98/notes/`.

[OL98] Marc Olano and Anselmo Lastra. A shading language on graphics hardware : The pixelflow shading system. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pages 159–168, July 1998. ISBN 0-89791-999-8. Held in Orlando, Florida.

[ON94] Michael Oren and Shree K. Nayar. Generalization of lambert's reflectance model. In Andrew Glassner, editor, *Proceedings of SIGGRAPH '94 (Orlando, Florida, July 24–29, 1994)*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 239–246. ACM SIGGRAPH, ACM Press, July 1994. ISBN 0-89791-667-0.

[PC01] Frank Perbet and Marie-Paule Cani. Animating prairies in real-time. In *ACM Interactive 3D Graphics*, USA, Mar 2001. `http ://www-imagis.imag.fr/Publications/2001/PC01`.

[PCD+97] K. Pulli, M. Cohen, T. Duchamp, H. Hoppe, L. Shapiro, and W. Stuetzle. View-based rendering : Visualizing real objects from scanned range and color data. In *Eurographics Rendering Workshop 1997*, pages 23–34, June 1997.

[Pea86] Darwyn R. Peachey. Modeling waves and surf. In David C. Evans and Russell J. Athay, editors, *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, volume 20, pages 65–74, August 1986.

[Per85] Ken Perlin. An image synthesizer. In B. A. Barsky, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19(3), pages 287–296, July 1985. voir aussi `http ://www.noisemachine.com/`.

[PF90] Pierre Poulin and Alain Fournier. A model for anisotropic reflection. In Forest Baskett, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '90 Proceedings)*, volume 24(4), pages 273–282, August 1990.

[PFH00] Emil Praun, Adam Finkelstein, and Hugues Hoppe. Lapped textures. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 465–470, July 2000. ISBN 1-58113-208-5.

[PHL91] J. W. Patterson, S. G. Hoggar, and J. R. Logie. Inverse displacement mapping. *Computer Graphics Forum*, 10(2) :129–139, June 1991.

[PHM] Przemyslaw Prusinkiewicz, Mark Hammel, and Radomír Mech. Visual models of morphogenesis : A guided tour. `http ://www.cpsc.ucalgary.ca/Redirect/bmv/vmm-deluxe/`.

[PLH88] Przemyslaw Prusinkiewicz, Aristid Lindenmayer, and James Hanan. Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes. In John Dill, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, volume 22, pages 141–150, August 1988.

[PN01] Ken Perlin and Fabrice Neyret. Flow noise : textural synthesis of animated flow using enhanced Perlin noise. In *SIGGRAPH 2001 Technical Sketches and Applications*, August 2001.

[Pru93] Przemyslaw Prusinkiewicz. Modelling and visualization of biological structures. *Graphics Interface '93*, pages 128–137, May 1993. Held in Toronto, Ontario, Canada. `http ://www.graphicsinterface.org/pre1996/93-Prusinkiewicz.pdf`.

[PSS99] A. J. Preetham, Peter S. Shirley, and Brian E. Smits. A practical analytic model for daylight. *Proceedings of SIGGRAPH 99*, pages 91–100, August 1999. ISBN 0-20148-560-5. Held in Los Angeles, California.

[PZvBG00] Hanspeter Pfister, Matthias Zwicker, Jeroen van Baar, and Markus Gross. Surfels : Surface elements as rendering primitives. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pages 335–342, July 2000. ISBN 1-58113-208-5.

[RB85] William T. Reeves and Ricki Blau. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems. In B. A. Barsky, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19(3), pages 313–322, July 1985.

[Ree83] W. T. Reeves. Particle systems – a technique for modeling a class of fuzzy objects. *ACM Trans. Graphics*, 2 :91–108, April 1983.

[RPP93] P. Roudier, B. Peroche, and M. Perrin. Landscapes synthesis achieved through erosion and deposition process simulation. *Computer Graphics Forum (Eurographics '93)*, 12(3) :375–383, 1993. Held in Oxford, UK.

[RSEB+00] C. Rezk-Salama, K. Engel, M. Bauer, G. Greiner, and T. Ertl. Interactive volume rendering on standard pc graphics hardware using multi-textures and multi-stage rasterization. *2000 SIGGRAPH / Eurographics Workshop on Graphics Hardware*, pages 109–118, August 2000.

[SAC+99] Dan Stora, Pierre-Olivier Agliati, Marie-Paule Cani, Fabrice Neyret, and Jean-Dominique Gascuel. Animating lava flows. In *Graphics Interface (GI'99) Proceedings*, pages 203–210, Jun 1999. `http ://www-imagis.imag.fr/Publications/1999/SACNG99`.

[SD01] Marc Stamminger and George Drettakis. Interactive sampling and rendering for complex and procedural geometry. In K. Myskowski and S. Gortler, editors, *Rendering Techniques 2001 (Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering 01)*, 12th Eurographics workshop on Rendering. Eurographics, Springer Verlag, 2001. `http ://www-sop.inria.fr/reves/publications/data/2001/SD01`.

[SDB97] François X. Sillion, G. Drettakis, and B. Bodelet. Efficient impostor manipulationfor real-time visualization of urban scenery. *Computer Graphics Forum*, 16(3) :207–218, August 1997. ISSN 1067-7055 `http ://www-imagis.imag.fr/Publications/1997/SDB97/`.

[SF91] Jos Stam and Eugene Fiume. A multiple-scale stochastic modelling primitive. *Graphics Interface '91*, pages 24–31, June 1991. `http ://www.graphicsinterface.org/pre1996/91-StamFiume.ps.gz`.

[SF92] Mikio Shinya and Alain Fournier. Stochastic motion - motion under the influence of wind. In A.C. Kilgour and L. Kjelldahl, editors, *Computer Graphics Forum (Eurographics '92)*, volume 11(3), pages 119–128, September 1992.

[SF93] Jos Stam and Eugene Fiume. Turbulent wind fields for gaseous phenomena. *Proceedings of SIGGRAPH 93*, pages 369–376, August 1993. ISBN 0-201-58889-7. Held in Anaheim, California.

[SF95] Jos Stam and Eugene Fiume. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes. *Proceedings of SIGGRAPH 95*, pages 129–136, August 1995. ISBN 0-201-84776-0. Held in Los Angeles, California.

[SGHS98] Jonathan Shade, Steven J. Gortler, Li-Wei He, and Richard Szeliski. Layered depth images. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pages 231–242, July 1998. ISBN 0-89791-999-8. Held in Orlando, Florida.

[SGIa] Silicon graphics. performer white papers. `http ://www.sgi.com/software/performer/whitepapers.html`.

[SGIb] Silicon graphics. way cool, way fast OpenGL rendering techniques. `http ://reality.sgi.com/opengl/tips/`.

[SGIc] Silicon graphics. witches brew : source + docs on impressive programming. `http ://toolbox.sgi.com/TasteOfDT/src/exampleCode/WitchesBrew/`.

[Sta94] Jos Stam. Stochastic rendering of density fields. *Graphics Interface '94*, pages 51–58, May 1994. Held in Banff, Alberta, Canada. `http ://www.graphicsinterface.org/pre1996/94-Stam.ps.gz`.

[Sta95] Jos Stam. Multiple scattering as a diffusion process. *Eurographics Rendering Workshop 1995*, pages 41–50, June 1995. Held in Dublin, Ireland.

[Sta97a] Jos Stam. Aperiodic texture mapping. Technical Report R046, European Research Consortium for Informatics and Mathematics (ERCIM), January 1997. `http ://www.ercim.org/publication/technical_reports/046-abstract.html`.

[Sta97b] Jos Stam. Stochastic dynamics : Simulating the effects of turbulence on flexible structures. *Computer Graphics Forum*, 16(3) :159–164, August 1997. ISSN 1067-7055.

[Sta99] Jos Stam. Diffraction shaders. *Proceedings of SIGGRAPH 99*, pages 101–110, August 1999. ISBN 0-20148-560-5. Held in Los Angeles, California.

[Sta01] Jos Stam. An illumination model for a skin layer bounded by rough surfaces. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 39–52, Jul 2001.

[Ste97] A.J. Stewart. Hierarchical visibility in terrains. In *Eurographics Rendering Workshop*, June 1997.

[Ste98] A.J. Stewart. Fast horizon computation at all points of a terrain with visibility and shading applications. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 4(1) :82–93, March 1998.

[TDG00] Sebastien Thon, Jean-Michel Dischler, and Djamchid Ghazanfarpour. Ocean waves synthesis using a spectrum-based turbulence function. In *Computer Graphics International Proceeding*, 2000.

[Ter] Terragen. `http ://www.planetside.co.uk/terragen/`.

[Tho17] D'Arcy Wentworth Thompson. *On Growth and Form.* Cambridge University Press, Cambridge, 1917.

[TNK+93] Katsumi Tadamura, Eihachiro Nakamae, Kazufumi Kaneda, Masshi Baba, Hideo Yamashita, and Tomoyuki Nishita. Modeling of skylight and rendering of outdoor scenes. *Computer Graphics Forum (Eurographics '93)*, 12(3) :189–200, 1993. Held in Oxford, UK.

[TS00] Chris Trendall and A. James Stewart. General calculations using graphics hardware, with applications to interactive caustics. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 287–298, June 2000.

[Tur91] Greg Turk. Generating textures for arbitrary surfaces using reaction-diffusion. In Thomas W. Sederberg, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, volume 25, pages 289–298, July 1991.

[Tur01] Greg Turk. Texture synthesis on surfaces. *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, pages 347–354, August 2001. ISBN 1-58113-292-1.

[VTP] VTP project. `http ://vterrain.org/index.html`.

[WAT92] Stephen H. Westin, James R. Arvo, and Kenneth E. Torrance. Predicting reflectance functions from complex surfaces. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 92)*, 26(2) :255–264, July 1992. ISBN 0-201-51585-7. Held in Chicago, Illinois.

[WB] World builder. `http ://www.digi-element.com/`.

[WE98] Rüdiger Westermann and Thomas Ertl. Efficiently using graphics hardware in volume rendering applications. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pages 169–178, July 1998. ISBN 0-89791-999-8. Held in Orlando, Florida.

[WH91] Jakub Wejchert and David Haumann. Animation aerodynamics. In Thomas W. Sederberg, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, volume 25, pages 19–22, July 1991.

[WK91] Andrew Witkin and Michael Kass. Reaction-diffusion textures. In Thomas W. Sederberg, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, volume 25, pages 299–308, July 1991.

[WL01] Li-Yi Wei and Marc Levoy. Texture synthesis over arbitrary manifold surfaces. *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, pages 355–360, August 2001. ISBN 1-58113-292-1.

[WMF+00] Xiaochuan Corina Wang, Jérome Maillot, Eugene L. Fiume, Victor Ng-Thow-Hing, Andrew Woo, and Sanjay Bakshi. Feature-based displacement mapping. *Rendering Techniques 2000 : 11th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 257–268, June 2000. ISBN 3-211-83535-0.

[Wor96] Steven P. Worley. A cellular texturing basis function. In Holly Rushmeier, editor, *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings*, pages 291–294. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1996.

[WW92] Alan Watt and Mark Watt. *Advanced Animation and Rendering Techniques : Theory and Practice.* Addison-Wesley Publishing Company, 1992.

[XCL+01] Ying-Qing Xu, Yanyun Chen, Stephen Lin, Hua Zhong, Enhua Wu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Photo-realistic rendering of knitwear using the lumislice. *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, pages 391–398, August 2001. ISBN 1-58113-292-1.

[Xfr] Xfrog. `http ://www.xfrogdownloads.com/`.

Annexes

articles publiés

A Représentations géométriques alternatives

- *Interactive Volumetric Textures* (EWR'98)

- *Multiscale Shaders for the Efficient Realistic Rendering of Pine-Trees* (GI'00)

- *Interactive Rendering of Trees with Shading and Shadows* (EWR'01)

B Aspect de surface réaliste

- *Représentation des matériaux*, Chapitre du livre *Visualisation* (collection *Information Géographique et Aménagement du territoire* Hermès)

- *Pattern-Based Texturing Revisited* (Siggraph'99)

- *Animating Lava Flows* (GI'99)
  NB : ma contribution correspond à la partie "rendu" (section 4).

C Aspect de surface temps-réel - Utilisation du hardware graphique

- *Real-time Collision Detection for Virtual Surgery* (Computer Animation'99)

- *Perlin Textures in Real Time Using OpenGL* (RR-INRIA #3713)

- *Realistic Rendering of an Organ Surface in Real-Time for Laparoscopic Surgery Simulation* (The Visual Computer)

D Approches phénoménologiques

- *Flow noise : textural synthesis of animated flow using enhanced Perlin noise* (Siggraph'01 Technical Sketches)

- *Phenomenological Simulation of Brooks* (EWAS'01)

- *Qualitative Simulation of Cloud Formation and Evolution* (EWAS'97)