

Créer, Simuler, Explorer des Univers Naturels sur Ordinateur

Fabrice NEYRET

EVASION - GRAVIR (CNRS, INPG, INRIA, UJF) / IMAG - INRIA
<http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/>
Fabrice.Neyret@imag.fr

Abstract *"So many pixels, and so little time"*

Cet article traite de l'esprit, des approches, et des buts, dans lesquels j'ai mené mes différents travaux. On trouvera néanmoins une synthèse de ces derniers en annexe, à titre d'exemples d'instanciation de ces approches. Ces travaux ont très souvent été menés avec mes étudiants ; ceux-ci sont donc à inclure quand je dirai "je" ou "mes".

1. Introduction : quoi, pourquoi ?

Pourquoi fait-on de la recherche ? Pourquoi sur tel sujet plutôt qu'un autre ? Et sous quel angle le traitons-nous ? Ceci résulte de toutes sortes de contingences : celles du moment, celles qui ont modelées notre histoire professionnelle et personnelle, et plus avant, celles qui ont forgées nos goûts. En ce qui me concerne, je suis resté curieux du pourquoi du monde depuis l'enfance, je bidouille l'informatique depuis l'adolescence, et je me suis retrouvé par hasard¹ un jour ingénieur en synthèse d'images.

Ces trois ascendances se retrouvent dans mes choix de thèmes et d'approches :

- De mon passage à *Thomson Digital Image*, j'ai conservé la préoccupation de l'utilisateur graphiste : la scène est au service d'un scénario, l'œil du spectateur en est le destinataire ("réaliste" signifie alors "visuellement plausible"), et l'utilisateur a besoin d'outils qui l'aident à spécifier la scène. Il veut des outils qui soient utilisables (en vraie grandeur, pour une gamme utile de situations), dont il puisse contrôler le résultat (cela suppose aussi d'avoir un retour visuel rapide²), et il rêve de scènes et

¹ Plus improbable encore était de faire ensuite une thèse, puis d'obtenir un poste de chercheur CNRS.

² J'insiste : le graphiste ne veut pas d'une boîte noire avec juste un bouton "start" : il a une idée précise de ce qu'il veut obtenir, qui peut

d'effets encore irréalisés. Qui dit "en vraie grandeur" et "rapide" dit "efficace" en coût de mémoire et de calcul.

- Le goût pour la bidouille informatique s'est transformé en jeu du défi technique dans le "Meccano" des représentations, visant à repousser les limites du faisable actuel en repérant de nouvelles formulations prometteuses (e.g., représentations alternatives, exploitation des possibilités du GPU...).
- La curiosité envers les sciences physiques (au sens large de celles qui cherchent à rendre compte de l'apparence et du comportement du monde – vivant ou inanimé – dans ses divers aspects) m'a poussé vers les scènes naturelles. Au delà du Graal qu'elles constituent en synthèse d'image, quelle meilleure occasion d'aller revisiter les différents domaines des autres disciplines, pour se les réapproprier en les adaptant à la création de mondes que l'on souhaite plausibles ? La synthèse peut alors être vécue comme une forme de "preuve par 9" de la validité des modèles décrivant le monde (tel que l'humain le perçoit) : si le résultat est plausible, c'est qu'on a compris quelque chose du phénomène.

L'inspiration de ce qui suit découle largement de tout cela.

être "plus que réaliste", voire même non réaliste au sens physique. Il s'intéresse au résultat, non aux causes. Réciproquement, comme il a l'œil, un outil modeste mais paramétré et rapide lui permettra d'itérer vers un bel effet réaliste, alors qu'un modèle à prétention "physiquement réaliste" risque de n'aboutir après un long calcul qu'à un réalisme partiel, à la mesure de ce qui a été pris en compte ou ignoré dans le modèle. N'oublions pas non plus que même si on dispose aujourd'hui des équations de bien des phénomènes, ce qui manque cruellement, ce sont les données (valeurs, variations des valeurs à la surface, conditions aux bords), sans lesquelles le réalisme n'est pas grand chose.



2. Buts

Les buts dans lesquels s'inscrivent mes divers travaux sont de permettre de *gérer de très grandes complexités de détails* (de forme, d'aspect, de mouvement), des *scènes extrêmement vastes*, à *bas coût en calcul et mémoire*, et *haute contrôlabilité*. "Permettre" signifie pouvoir spécifier, générer, stocker, animer, rendre (*i.e.*, calculer le rendu réaliste).

Le parti pris est d'une part que la richesse en détails est une composante en soi du réalisme, d'autre part qu'une telle scène sera toujours arbitrairement "lourde" de plusieurs ordres de grandeur par rapport aux capacités mémoire et calcul des machines. D'office, il s'agit donc de savoir passer à l'échelle, sachant qu'un algorithme ou une représentation valide – en robustesse, qualité, efficacité, contrôlabilité – pour 1000 polygones ne l'est pas forcément pour 10 milliards.

L'exigence de faible coût, au delà de l'applicabilité aux jeux vidéos, ou de la viabilité du feedback pour le graphiste, n'est qu'une manière de fixer une limite arbitraire quand de toutes façons le traitement "classique" de telles masses déborderait toutes limites matérielles raisonnables.

Les scènes naturelles ont aussi pour particularité que l'on voit à la fois de grandes étendues près de l'horizon et des détails au premier plan, entre lesquels on passe continûment. Cependant, seule une petite partie de l'information est visible à un moment donné, en fonction du champ de vision, de la distance, des occultations. La "quantité perceptible" étant bornée sur un écran³ (d'un objet on voit soit beaucoup avec peu de détails, soit peu avec beaucoup de détails) l'espoir de pouvoir procéder efficacement semble a priori bien posé.

3. Cibles applicatives

Je m'intéresse à 4 grandes catégories d'"objets" intervenant dans les scènes naturelles, catégories comprenant plusieurs déclinaisons distinctes, et plusieurs aspects différents à traiter. Concernant par exemple l'eau, la surface de la mer et d'un ruisseau sont tellement différentes d'aspect, de propriétés, d'usage dans un scénario, que mon parti pris est de les traiter différemment pour mieux exploiter ces spécificités et fournir une réponse mieux adaptée, d'où les déclinaisons explicites des catégories. Les différents aspects à traiter sont typiquement la forme, le mouvement, l'apparence visuelle, dont les 3 problèmes peuvent être durs, pour des raisons indépendantes.

³ Sans parler des limites de la perception humaine...

• Paysages végétalisés (dont forêts):

Produire des paysages naturels "habillés" demande un travail humain et machine considérable pour les films comme pour les jeux vidéo. En matière de simulateurs, pour lesquels il faut à la fois réalisme, univers large, et grande rapidité, cela reste un défi malgré la forte compétition dans ce domaine.

Il s'agit de proposer des représentations économes en ressources capable de décrire la répartition des peuplements (zones, densités, variétés), l'aspect des éléments de base, et des méthodes de rendu et de spécification de ces représentations. Ceci devant s'accorder à la masse de données attendue d'un paysage, la variété des échelles (dans la même vue, plus les transitions lors du mouvement).

Les travaux que j'ai menés en la matière portent essentiellement sur les forêts (textures volumiques [Ney95b, Ney95a, Ney96a, Ney96b, Ney98, MN98, SN01, DN04b, CDN04], réflectance [MN00], représentations à base d'images [MNP01], représentation à base de points [GMN05]) et sur les sols (textures adaptées [NC99, LN03, LDN04]).

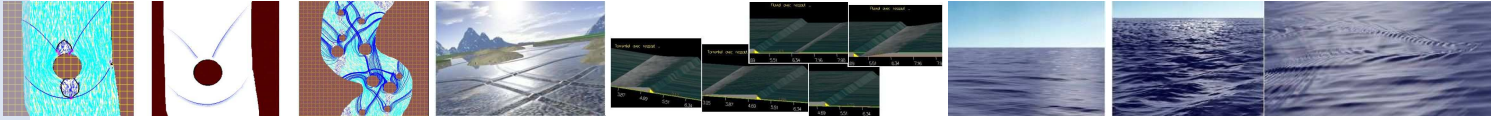
• Surfaces complexes:

Ici, il s'agit de proposer des méthodes facilitant la création de surfaces naturelles complexes, parfois évolutives : croûte de lave, plissements, fissures, écorces, morphogénèse [SAC*99, LN02, CN02, CN06]... Il faut trouver de bons compromis entre automatisme et poignées de contrôle, tout en limitant le coût géométrique, et gérer le couplage avec l'échelle supérieure, changements topologiques compris – spatiaux ou temporels.

• Surfaces d'eau et écoulements:

Même si plusieurs séquences d'effets spéciaux de films et plusieurs papiers à Siggraph présentent des scènes d'eau animées, un modèle capable de générer des surfaces d'eau convaincantes dans des conditions utiles et utilisables est loin d'être réalisé. Une large variété de phénomènes très reconnaissables et d'échelles très différentes sont susceptibles de s'y produire : des ridules aux tsunamis en passant par les tourbillons, remous, ondes, "pattes de chat" lors des risées... Plusieurs sont très complexes d'aspect ou de mouvement : déferlement, ressauts hydraulique, cascades, écume... Même un simple rond dans l'eau est bien plus difficile à produire qu'il n'y paraît, s'il s'agit d'être réaliste. Heureusement, aux différents types de scènes aquatiques (mer, ruisseaux, rivière) et situations (tempête ou calme, au large ou au rivage) correspondent essentiellement quelques phénomènes bien typés.

Je me suis intéressé aux cas de la mer au large [HNC02],



des ruisseaux calmes [DN01, RN05], et à l'ajout de détails animés dans les écoulements [PN01, Ney03, AN06]. Ici aussi, il s'agit de pouvoir visualiser rapidement et à grande qualité des portions d'un vaste territoire, qui en l'occurrence sont animés.

• Nuages convectifs au sens large:

Cette catégorie regroupe cumulus et cumulonimbus, avalanches aérosol, fumée turbulente, "convectif" signifiant "moutonnant", de forme et de mouvement. Ici, tout est difficile. La forme est complexe et multiéchelle. Le mouvement est complexe et multiéchelle. L'apparence lumineuse est complexe et multiéchelle. La physique et l'algorithmique sous-jacentes au mouvement comme à l'optique sont complexes. Les paramètres sont nombreux et sensibles. Les termes sources – chaleur et humidité pour le mouvement, lumière de toutes origines pour l'optique – sont complexes et influent. Personne ne sait encore fabriquer des formes et mouvement satisfaisants, pas même les physiciens. Pour le rendu, diverses méthodes ont été proposées, cependant elles sont loin de rendre compte de tous les phénomènes observables. Alors que, comme pour la plupart des phénomènes naturels, l'œil du spectateur est expert.

Les travaux que j'ai effectués en la matière portent sur la forme et le mouvement des nuages convectifs [Ney97, BN04], le rendu réaliste des nuages convectifs [Ney00, Ney03, BNL06], la simulation d'avalanches [Ric03, LNS*03] et de fumée [AN05, ANSN06].

4. Définitions

Il est toujours important de bien poser le problème à résoudre et la terminologie employée, afin d'éviter incohérences, ambiguïtés, contre-sens et incompréhensions. D'autant que nombre de termes sont polysémiques ou variables selon les disciplines – voire les auteurs – dont certains termes-clés employés dans cet article :

- J'appelle "*phénomène*" un comportement (spatial, temporel, optique) identifiable, c'est à dire perceptible, séparable, caractérisable.
- J'appelle "*représentation*" une formalisation des paramètres d'un objet ou d'un phénomène, ce qui peut inclure la structure de données employée pour le manipuler. Souvent, elle n'a de sens que reliée à des méthodes d'entrées (création ou modification des données) et de sorties (production d'une forme, d'un mouvement, d'une apparence visuelle).
- J'appelle "*modèle*" l'ensemble comprenant la formalisation des paramètres d'un objet ou phénomène, les équations

qui le régissent, voire parfois les algorithmes qui en produisent une sortie – apparence, forme, mouvement.

- "*Modèle physique*" désignera ici le plus souvent l'appellation impropre, mais commune en graphique, de modèle à grain fin s'appuyant sur des équations physiques locales. Typiquement, une équation différentielle discrétisée sur un maillage ou une grille.
- En contraste, j'appelle "*modèle macrophysique*" un modèle à gros grain (cf section 5.3). Un tel modèle est parfois également dénommé "*phénoménologique*", voire "*analytique*" ou "*empirique*", bien que ces notions ne soient pas équivalentes : stricto-sensu, "*phénoménologique*" ou "*empirique*" signifie que l'on a formalisé les effets sans chercher à s'appuyer sur des causes plus fines, et "*analytique*" s'applique notamment aux situations où l'on a pu intégrer une formule littérale à partir des équations locales.
- "*Représentation alternative*" se réfère et s'oppose à représentation canonique classique, cf section 5.2. Typiquement, en matière de représentation des formes, il s'agit des représentations autres que les maillages surfaciques (à base de facettes, généralement triangulaires).

Remarques :

- Un modèle macrophysique ou phénoménologique n'en est pas moins "physique" stricto-sensu, c'est à dire pas moins rigoureux qu'un modèle local : les physiciens en utilisent, et c'est également une forte composante de mon travail.
- La distinction entre modèles analytiques et phénoménologiques au sens strict est en fait subjective et provisoire : un modèle physique est souvent le macroscopique d'un autre, et le lien formel s'est parfois établi postérieurement à la description empirique.

5. Approches

Pour avancer vers les buts définis plus haut, j'ai essentiellement combiné 3 familles d'approches :

5.1. Hiérarchie de modèles

Que ce soit pour organiser, spécifier, ou rendre via des niveaux de détails, il est naturel de séparer les échelles. Même si la mécanique des fluides régit à la fois le cours de la rivière et l'aspect des fines vaguelettes et de l'écume, même si la rugosité d'une surface est géométriquement une composante de la forme, même si les variations lumineuses dans les barbules d'un nuage résultent des mêmes lois optiques que l'illumination globale, dans l'œil du spectateur il ne s'agit pas de la même chose, dans l'esprit de l'artiste cela ne sert pas la même fonction, dans l'algorithme cela



ne correspond pas au même régime, dans les données le mode de description diffère. On gagne donc à les représenter par des modèles différents, couplés, et spécifiés ou contrôlés de manière très différentes par le graphiste. Par ailleurs, on distinguera souvent les échelles liées à l'agencement de la scène, la forme des objets, et leur "habillage". Par exemple pour une rivière on pourra traiter par des modèles séparés son cours, ses ressauts, et ses ridules. Et pour une forêt, sa distribution générale, l'arbre individuel, et les détails de l'écorce ou des feuilles.

De toutes façons, un modèle est rarement bon à toutes les échelles, soit pour l'utilisateur (contrôle de l'effet, disponibilité des données ou intuition des paramètres), soit pour des raisons de performances (il serait difficile de simuler Navier-Stokes en 3D à l'échelle millimétrique sur un océan).

De plus, dans la combinatoire des éléments pouvant intervenir dans une scène, comme dans celle des choix qui peuvent porter sur un aspect sans remettre en cause les autres, une découpe hiérarchique permet d'isoler des primitives ciblées. Cette modularité compense en partie la spécificité des sous-modèles.

En pratique, Une difficulté est de coupler les différents modèles qui interagissent pour former un objet complet ou une scène [SACN98, CNPT06], et en cas de représentation adaptative, d'assurer la transition continue entre modèles – par exemple lors d'un zoom [CMS87, BM93].

5.2. Représentations alternatives

5.2.1. Quels paramètres pour représenter le monde ?

Homo Scientificus (surtout s'il est féru de maths applis) aime bien les espaces vectoriels : "Donnez moi une base, un atome, un phonème, un noeud de grille, un rayon, une facette triangulaire, et je vous reconstruis le monde". Las, cela peut s'avérer inadapté, soit à cause de la quantité (allez représenter une forêt avec des facettes ou des atomes), soit parce que ça ne correspond pas à la forme sous laquelle les données sont disponibles, soit parce que les propriétés induites sont médiocres (allez moyennerez l'aspect d'une surface polygonale⁴, ou en extraire des normales de qualité pour l'éclairage et les reflets).

La perception (*ce qu'on voit de*), la représentation (*ce qu'on sait de*), dépendent beaucoup de l'échelle, mieux vaut alors essayer de les faire coïncider ! Notons qu'une *surface*

⁴ La géométrie d'une tôle ondulée vue de loin est très proche d'un plan, par contre sa façon d'attraper la lumière persiste dans sa différence, à toutes distances.

n'existe pas physiquement en soi, hors de tout contexte : selon l'échelle et les propriétés (de l'œil, du matériau, de la lumière), c'est une limite floue et poreuse entre deux médiums, une interface complexe, ou un objet géométrique simple. Et ces 3 gradations se répètent elles-mêmes au niveau microscopique (cellulaire, tissulaire), au niveau de l'arbre entier (silhouette-enveloppe du feuillage), puis de la planète (couvert végétal).

L'approche *minimaliste* ou *impressionniste*, consiste à ne représenter que ce qui contribue à la perception. Ceci conduit à considérer séparément les différents indices visuels. Ainsi, la forme et la position apparentes n'ont de sens qu'au dessus de la taille du pixel [Ney02]. À l'échelle de quelques fractions à quelques pixels, la forme de la surface n'est pas perçue directement, par contre sa normale influe fortement sur l'éclairage (ou *shading*). Plutôt que de la déduire de primitives surfaciques coûteuses et non directement visibles, autant la représenter directement ! [Fou92]. Notons qu'alors la normale régissant le shading peut ne plus du tout coïncider avec la normale de la forme apparente : cela se manifeste par exemple pour les buissons taillés, dont la forme⁵ peut être conique ou parallélépipédique tandis que l'orientation du feuillage a un biais systématique vers le ciel. À plus petite échelle encore, la forme ne se traduira plus que par la statistique de son interaction avec la lumière, ce qui se représente de façon économique par une fonction de réflectance [PF90, Ney99]. Le relief lui-même se décline en plusieurs indices : entre objets discrets, l'ordre d'occultation par rapport à l'œil suffit. Pour les grands écarts de profondeur, la parallaxe est directement perçue (par stéréovision ou lors du mouvement), il faut donc la représenter. Pour les petits écarts, il n'y a plus que les variations de shading qui suggèrent le relief. Les ombres portées peuvent également apporter d'autres indications de relief.

Enfin, utiliser une même primitive simultanément pour des rôles différents peut entraîner une augmentation de coût injustifiée : si positionner ou affiner des décorations sur une surface impose d'affiner le maillage, la complexité géométrique et le coût de rendu augmentent aussi, sans justification⁶. Idéalement, la complexité géométrique ne devrait être affectée que par la précision géométrique (3D+silhouette). Mieux vaut donc découpler ce qui procède du monde géométrique (forme 3D), du monde textuel (habillage de la surface), et du monde photométrique (interaction lumineuse), comme suggéré par [Kaj85].

⁵ On parle de *pseudo-surface* quand la géométrie simple ne suffit pas à rendre compte du shading.

⁶ Par ailleurs, les polygones ainsi introduits sont souvent très mal conditionnés.



5.2.2. Structures et propriétés

Au delà des questions d'optimisation perceptive et d'économie de ressources, les représentations peuvent avoir des propriétés particulières, décisives dans certaines circonstances. Par exemple, 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 du rendu de cribles et tests coûteux. De même, on ne sait pas définir la moyenne de polygones (*i.e.*, donnant le même rendu moyen, cf l'exemple de la tôle ondulée), il faut donc soit dénaturer l'information, soit conserver la version suréchantillonnée. Réciproquement, des primitives à base de grilles, comme les textures et les volumes de voxels, se prêtent à un parcours ordonné et ne visitant que ce qui est nécessaire, donnent facilement accès au voisinage, et permettent de moyenniser l'information visuelle sans autre perte que la résolution.

La façon dont le coût évolue en fonction des paramètres peut également constituer une différence importante entre primitives. Ainsi, multiplier par 2 la précision spatiale entraîne de multiplier par 4 le nombre de facettes, le nombre de pixels de texture, le nombre de cellules d'un octree⁷, et par 8 pour une grille de voxels. Par contre le coût de rendu des facettes va être multiplié grossièrement⁸ par 4, tandis que le coût de rendu de texture est inchangé, et le coût de rendu du volume⁹ par 2. Par ailleurs, les premiers polygones apportent énormément d'information visuelle sur un objet, mais le second million assez peu. Réciproquement, stocker en voxels une scène faite d'éléments épars et petits coûte cher, tandis qu'affiner des détails locaux se fait assez efficacement. De surcroît, les voxels se prêtent très bien à représenter des distributions statistiques de matière (densité), ce qui est un avantage décisif pour les détails des pseudo-surfaces. Enfin, le coût du rendu de texture est proportionnel à la surface apparente de celle-ci (et nul si hors-champs), *i.e.*, ce qu'on voit, alors que le coût pour un maillage chargé est grossièrement proportionnel au nombre de faces, *i.e.*, ce qu'on sait.

5.2.3. Quelques représentation alternatives

Les représentations alternatives se sont longtemps limitées au bump mapping, aux modèles de réflectance de microgéométries [WAT92, PF90], et aux systèmes de particules (plantes, cheveux et fourrure par traits à la Reeves [Ree83,

⁷ Approximativement, pour une forme simple.

⁸ Pour des maillages chargés, sans *shader* complexe.

⁹ Avec un algorithme de rendu par slices.

RB85]). Puis sont venues à la fin des années 90 les méthodes IBR et les imposteurs. Aujourd'hui, les représentations alternatives ont véritablement émergées : points, geometry images, parallax textures (et nombreuses extensions, des VDM au rendu volumique local sur GPU).

Celles auxquelles j'ai contribuées concernent le monde *texturel*, les représentations à base de *réflectance*, d'images, de points, les textures volumiques, et les représentations vectorielles de haut niveau pour les fluides. Elles sont synthétisées à l'annexe A.

5.3. Simulation phénoménologique, ou macrophysique (formes, mouvement, rendu)

5.3.1. Observer le réel, pour bien l'imiter

Le destinataire final de nos images est l'œil du spectateur, expert en matière d'apparence naturelle. Le destinataire intermédiaire de nos outils est le graphiste, dont les intentions et intuitions sont une extrémisation de cette expertise. Une de nos motivations essentielles quand on travaille sur les scènes naturelles, est de produire des images confondantes. Il est donc crucial de maintenir très haut cette valeur suprême : il faut partir de l'image réelle, puis ensuite revenir à l'image réelle pour juger du résultat. Il faut se promener, observer, collecter des photos et films, des croquis, toucher du doigt, faire de petites expériences si possible pour s'approprier le phénomène. Avoir ainsi des objectifs, des critères, une référence. Et au cours des résultats partiels, s'y re-confronter. C'est l'essence du message d'Alain Fournier [Fou91, Fou89, Fou94, Fou99].

De toutes façons, comme pour tout problème, on ne saura pas où aller, comment arbitrer, ni comment juger du résultat, si l'on n'a pas de buts et de critères. Le premier point est donc de cerner l'objectif d'une étude : quel est l'objet, dans quelles déclinaisons, quelles limites (hypothèses sur la scène visée), quels sont les phénomènes visibles à reproduire (ce qui suppose de les catégoriser, puis de faire des choix éclairés). Puis de même, cerner ces différents phénomènes. Bref, faire une enquête, des repérages, une étude de cas.

5.3.2. Pourquoi la simulation classique est souvent inadaptée

Les formes et les mouvements des objets et phénomènes naturels sont souvent complexes. Les deux principales techniques classiques consistent soit à confier à l'utilisateur l'essentiel du travail de spécification, qui est alors totalement contrôlable mais redondant, rébarbatif et pas toujours intuitif, soit à recourir à des simulations physiques inspirées de l'ingénierie mathématique appliquée à la physique.



Les simulations “physiques” ont de nombreux inconvénients¹⁰ : elles sont très coûteuses, il est difficile d’orienter le résultat (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 à la fois, *e.g.*, océan, ciel, paysage), le résultat change avec la résolution (donc une prévisualisation risque d’être non significative), on ne peut pas obtenir directement tel pas de temps sans faire toute la simulation, etc. Qui plus est, les paramètres sont souvent difficiles à trouver (*e.g.*, conditions limites au fond d’un ruisseau), ou à manipuler (car très éloignés du résultat et du sens commun).

Le problème provient essentiellement de ce que ces méthodes n’ont pas été développées à l’usage de la synthèse d’images malgré les ressemblances superficielles de problématique : dans notre domaine les résultats n’ont pas besoin d’être quantitativement précis mais juste plausibles, on ne s’intéresse qu’aux grandeurs visibles et en des lieux particuliers (B-Rep, interface du fluide, vent au niveau des branches), mais on exige par contre une résolution proche du pouvoir de discrimination de l’observateur (pixel), et bien souvent tout le *sens* d’un phénomène (*i.e.*, ce qu’on en appréhende) réside dans des comportements émergents, donc issus très indirectement des lois locales régissant le phénomène (*e.g.*, un écoulement). Ce dernier point résume tout le problème : difficulté de simulation, coût, difficulté de contrôle du résultat.

Les méthodes numériques introduisent largement plus de degrés de liberté que n’en a en apparence le phénomène observé, d’où la complication non nécessaire de traitement et de recueil de paramètres. Alors que les données naturelles ne sont pas du bruit blanc, ont des éventails de valeur typiques, ce qui induit bien souvent des *régimes* privilégiés (fluvial/torrentiel, diffus/directionnel), des prépondérances (une atténuation cumulée à des chances d’être soit opaque, soit linéaire), etc. On dispose donc d’une *connaissance a priori*. L’introduction de paramètres trop fins masque même des régularités importantes : malgré l’imprédictibilité du chaos et de la turbulence pour un fluide donné, des fluides aussi différents que du nuage (air humide) et un panache volcanique (cendre brûlante) ont une grande similarité de forme et de mouvement.

Réciproquement, il est difficile de garantir que l’accumulation des phénomènes et paramètres locaux modélisés va bien reproduire les bons phénomènes émergents, voire, produire quoi que ce soit de plausible : par exemple la croissance d’un ciel de cumulus suppose une bonne répartition initiale du profil de température et d’humidité, qu’il n’est pas trivial de

¹⁰ On pourra lire à ce propos cet article de PDI : [LF02].

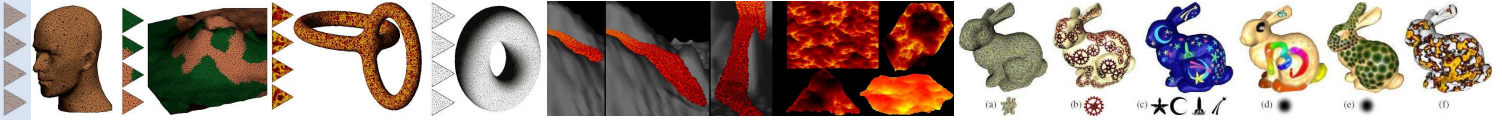
régler pour obtenir des nuages, et du bon type. Par ailleurs, si la résolution insuffisante d’une grille (pour cause de coût de mémoire et de simulation) conduit à modifier l’étendue d’un gradient naturel (bord de nuage, couche d’inversion), le résultat (rendu réaliste, simulation de la convection) peut en être totalement altéré (fuite de lumière, percée précoce des nuages) [SAA*00]. Que reste-t-il alors du réalisme “physique” ?

5.3.3. Principes de l’approche phénoménologique

L’idée est d’essayer de *représenter directement les phénomènes émergents* (plis, ondes, instabilités, formes d’équilibre, modes de transport lumineux), qui sont ceux que l’on voit directement, qui supportent le sens commun du phénomène, et qui sont ceux que le graphiste souhaite pouvoir manipuler. Ils sont généralement macroscopiques, donc compacts à stocker et traiter. Selon le phénomène, la difficulté, le goût, on pourra procéder selon l’une ou l’autre des acceptions du terme (cf section 4) : soit partir de l’observation directe, isoler des primitives et phénomènes, caractériser leurs paramètres, comportements et interactions ; soit partir d’un modèle de référence lourd, le faire tourner dans nombres de situations (éventuellement sur des cas canoniques), et en extraire des phénomènes émergents et comportements (ceci peut parfois se faire ou se guider par approximations analytiques, mais il est essentiel d’avoir une référence brute !). On cherche alors à modéliser le phénomène principal, puis les principaux, puis les autres.

Dans tous les cas, la bibliographie en physique (au sens large, mais à ne pas confondre avec l’ingénierie mathématique pour la physique !) pourra avantageusement servir d’inspiration et de guide¹¹, en décrivant comportements, prépondérances, ordres de grandeurs, et en proposant les objets et modèles de la physique décrivant ces phénomènes. Beaucoup de descriptions macrophysiques sont disponibles (a minima des caractérisations de fréquences, longueur d’onde, dimensions, angles, régimes, seuils...). Cette physique et ingénierie d’avant les ordinateurs (hydraulique,

¹¹ Par exemple [Lig78, Car98], en matière de vagues ou d’hydraulique. Sinon, on pourra commencer par les *cours de Feynman* [Fey77], mais on trouve aujourd’hui des cours généraux ou spécialisés complets et de qualité sur le web [Mus], ainsi que des sites encyclopédiques [hyp, Wei]. Un peu d’inspiration sous google (plutôt en anglais) permet d’accéder à de la documentation variée, approfondie et solide [DFKZ]. On trouve également de l’iconographie sous forme papier et électronique [VD82, M.S, Ney]. Certains ouvrages plus “philosophiques et transversaux”, comme [Tho17, Bal01], ont l’air écrits pour nous ! Ne pas négliger non plus la vulgarisation de qualité [Boh87, LL02] et les beaux livres [KK98], voire... les cours de peinture naturaliste.



aérogologie...) est très précieuse. Par contre elle fournit rarement la solution directe au problème ; il faut donc les adapter, les revisiter, s'en inspirer, passer par exemple du 2D au 3D, etc – ce qui est rarement facile : il faut bien payer l'avantage escompté. De même, la consultation de praticiens experts (carènes, parapentistes...) est souvent très éclairante, et... passionnante.

Bien sûr, il ne s'agit pas d'être extrémiste : il est des aspects, des échelles, des composantes, pour lesquelles une simulation physique est adaptée, gérable, et préférable pour le graphiste. Typiquement, le flot macroscopique d'une rivière, l'interaction lumineuse globale, gagneront probablement à être résolus par simulation classique, mais à échelle très grossière. L'approche de la hiérarchie de modèles (cf section 5.1) consistera donc à isoler ces deux échelles (pour que chaque phénomène donné soit pris en compte par l'une ou par l'autre, mais pas les deux), puis à articuler les deux représentations (l'une pouvant être vue comme un habillage de l'autre).

5.3.4. Quelques modèles phénoménologiques

Nombre de modèles "compacts et astucieux" ont été développés très tôt en graphique pour obtenir des résultats riches, de qualité, et contrôlables. Plusieurs d'entre eux peuvent être réellement considérés comme relevant d'un modèle macroscopique. Citons, à titre d'exemple, le modèle d'illumination de Phong [FvDFH90], les systèmes de particules de Reeves [Ree83, RB85] (quant à la forme, l'éclairage, l'ombrage), l'animation macroscopique de fluides [WH91].

Les approches que j'ai développées concernent la *physique macroscopique*, la *simulation phénoménologique de la forme et du mouvement* de rivières, la *simulation phénoménologique du rendu* de nuages, les *effets des phénomènes de croissance* (plis, morphogénèse). Elles sont synthétisées à l'annexe B.

6. "Ten unsolved problems"

Régulièrement au long de l'histoire de notre discipline, des membres éminents de la communauté ont fait le point sur l'accompli, puis les points durs non résolus, avant de se lancer dans l'exercice périlleux de la futurologie.

Parmi ces principales listes de points durs [Uns], nombre de points persistent encore, même s'ils ne reçoivent pas toujours d'attention. Je cite ci-dessous ceux qui rejoignent des thèmes abordés ici, et d'autres du même esprit. J'ai contribué à avancer dans la résolution de plusieurs d'entre eux, sans bien sûr épuiser le sujet.

- **Ivan Sutherland (1966)** : couplages de modèles, décrire le mouvement, modélisation hiérarchique ;
- **Newell & Blinn (1977)** : complexité du monde réel, propriété des "surface" réelles (pseudo-surfaces), antialiasing, intégration en systèmes ;
- **Heckbert (1987)** : filtrage de textures, antialiasing, ombres réelles, cohérence temporelle, automatiser les LOD, hiérarchies, culling, transition douce entre modèles ;
- **Siggraph panel de 1991** :
A. Barr : gérer la complexité des scènes ;
P. Hanrahan : transport lumineux efficace et physiquement valide ;
- **Levoy (1998)** : modéliser les environnements complexes, la nature, LOD continu entre échelles extrêmes ;
- **Blinn¹², le retour (1998)** : intégration en systèmes, simplicité des paramètres et de l'utilisation, arithmétique des pixels : gamma, alpha prémultiplié, quantification, corrélation, précision ; antialiasing, différence entre problèmes résolus en théorie ("preuve d'existence") et en pratique (utilisable en production) ;
- **Foley (2000)** : faire le pont entre IBR & géométrie, savoir traiter bien plus de pixels / bien moins de pixels, interface utilisateur.

Ma liste de points durs

• Scènes naturelles, construction

Mon Graal personnel serait une exploration temps-réel en qualité réaliste de vastes paysages, vus de haut comme à hauteur d'homme, en présence de forêts, prairies, montagnes, ruisseaux, fleuves, mer.

Également, dans le même esprit, l'exploration de nuages, de panaches volcaniques en plein déploiement, d'avalanches qui dévalent. Je ne désespère pas de le voir de mon vivant, et d'y contribuer sur des parties. Mais au delà des aspects que je traite, il en est beaucoup d'autres qui restent pratiquement vierges :

- Il n'existe aucun modèle de falaise¹³, et les modèles de montagnes sont très primaires.

- Il n'y a pas d'outils (du moins en recherche) pour la composition de paysages (géographie et habillage). Cela suppose un niveau de contrôle pas trop bas, et hiérarchique.

- En matière géographique, peut-être qu'une approche orientée géologie pourrait permettre de reproduire la

¹² À lire absolument !

¹³ C'est d'autant plus dommage qu'elles manquent dans les MNT.



mise en place du paysage¹⁴, réaliste ou phénoménologique ?

- En matière de distribution d'instances, il manque cruellement d'outils : comment répartir des arbres dans la forêt ? (simplement, puis y compris les variations de taille, d'espèces, d'altitudes). Les zones denses ou creuses dans le feuillage et la ramure ? Les feuilles au sol ? Les cailloux ? Le procéduralisme, l'amplification géométrique, ont besoin de fonctions plus riches que Perlin, Worley, et les distributions Poissonniennes.

- À propos de distributions ; l'échantillonnage concerne aujourd'hui bien d'autres domaines que le rendu : représentation par points, NPR, synthèse de textures, simplification adaptative... Ces points sont parfois macroscopiques, l'échantillonnage peut-être dynamique, et les contraintes sont contradictoires (continuité temporelle et adaptation). Ici aussi, on manque d'outils théoriques.

- Personne ne sait modéliser le vent et ses bourrasques, pas même les physiciens (notamment à cause des conditions au bord). Les ondes dans les blés, les arbres qui se tordent, les "pattes de chat" (risées) sur l'eau... C'est typiquement un domaine où l'approche phénoménologique est irremplaçable : autant la simulation numérique n'est pas prête de reproduire des "pattes de chat" (l'effet se produit au pire endroit : la paroi), autant on peut espérer caractériser et paramétrer son apparence par l'observation.

- L'illumination réaliste en extérieur est un cauchemar (soleil, ciel, nuages, sol, tout est source ; il existe des inter-réflexions à toutes les échelles), et plus encore si l'on reproduit les variations de couleur atmosphériques, et l'on tient compte des nuages, dynamique comprise. Est-il imaginable de simuler le détail de ces effets de manière plausible en temps réel ?

- Faut-il des approches génériques ou spécifiques, finalement ? Le générique est sensé s'adapter à tout, et la nature est riche en situations qu'on ne peut toutes prévoir. Mais réciproquement, il est difficile d'optimiser sans connaissance a priori, et de contrôler sans s'adapter aux perceptions et intuitions de l'utilisateur, qui dépendent de la situation. L'avenir dépendra peut-être de ce qui progressera le plus vite, entre l'inventivité des nouvelles contributions et la puissance des machines !

¹⁴ Ce serait pour moi un autre Graal, que de pouvoir visualiser la mise en place de nos paysages réels (un Google Earth animé, en quelques sortes). Ce serait un bel exemple de couplage avec une autre discipline (ici la géologie), lui permettant de tester, valider, compléter ses hypothèses, et un formidable outils de diffusion des connaissances.

• Filtrage

- Comme Kajiya l'a suggéré bien avant moi [Kaj85], il faut pouvoir commuter avec la distance de la géométrie à la texture puis à la photométrie. Cela devient même urgent, les micropolygones et les scènes vastes se banalisant avec l'augmentation de puissance des cartes graphiques : le filtrage est de plus en plus problématique. De rares travaux ont ouvert la voie [Fou92, CMS87, WAT92, BM93], mais l'essentiel du travail reste à faire, et il comporte de nombreuses difficultés. Au delà des distributions de normales, quid de l'occlusion, parfois même corrélée à d'autres attributs, des ombres, etc.

- Le filtrage des textures et shaders devient de plus en plus problématique :

- Textures et shaders sont de plus en plus utilisés pour des paramètres complexes autres que la couleur, qui ne devraient pas être filtrés linéairement. En fait, ceci revient au filtrage des représentations géométriques, traité au point précédent.

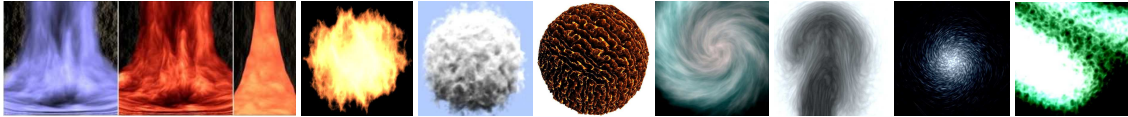
- Textures et shaders constituent désormais des structures de données et algorithmes complexes. En particulier, la position dans la texture n'est souvent plus une fonction linéaire de la position à l'écran (notamment, les cartes d'indirection par blocs – ou *tiles* – introduisent des discontinuités), hypothèse pourtant essentielle à la fonction de reconstruction (interpolation bilinéaire, filtrage pyramidale isotrope ou anisotrope). À noter que le texturage par patches et atlas a toujours eu ce problème de discontinuité, qui n'a à ma connaissance jamais été traité ni même commenté.

- Indépendamment de ces problèmes nouveaux, le filtrage de texture n'a pas évolué, malgré ses nombreuses lacunes :

- Le filtrage classique dans l'espace textuel n'est valable que si les autres paramètres du shading (normale, courbure, relief et parallaxe, ombres) ne varient pas dans l'empreinte du pixel. Avec les moyens actuels, serait-il possible d'obtenir un filtrage plus réaliste ?

- En particulier, le filtrage ultime (quand le pixel couvre une bonne proportion de l'objet ou une zone à forte courbure), toutes les hypothèses sont largement violées et on fait n'importe quoi faute de mieux. À noter que dans le cas d'indirection par blocs, le problème se présente dès que les pixels atteignent la surface des blocs.

- Plus personne n'évoque le motion blur. En production, il fut un temps où l'on considérait qu'une représentation non-blurée était inutilisable. Les techniques ont-elles changées ? Ou l'oubli vient de ce qu'on s'en passe dans les jeux, notamment parce que la cadence vidéo atteint souvent le double de celle du cinéma ?



• Textures

- Le filtrage de texture est un problème important et multiforme, cf point précédent sur le filtrage.

- Divers algorithmes se proposent de synthétiser des textures, parfois même évolutives, ou d'en distribuer les échantillons à la surface. Des textures sont utilisées dans certaines méthodes comme noyau de convolution. Dans le domaine de la synthèse de texture, l'habitude a été prise de montrer des exemples qui marchent, et d'autres qui ne marchent pas. Pour autant, on manque de caractérisation permettant de décrire les limitations ou hypothèses en terme de familles. Bref, qu'est-ce qu'une texture ? Est-il imaginable de dresser une taxonomie des caractères et propriétés, permettant de qualifier les algorithmes, d'explicitier les hypothèses, et réciproquement, de reconnaître telle famille dans telle image réelle à imiter, et de mettre au point des méthodes traitant correctement celle-ci ?

- J'ai traité quelques pistes en matière de texture de mouvement [PN01, Ney03, AN06]. Mais énormément reste à faire, à tous les niveaux : fonctions procédurales de pseudo-mouvement, modes de contrôle, composition efficace de textures régénérées, et surtout, comment procéder efficacement en 3D, notamment en exploitant le fait qu'on ne voit que la pseudo-surface des zones pleines ?

• GPU

Il est souvent ingrat ou risqué de produire de la recherche liée au GPU : il faut inventer des méthodes pérennes mais en tenant compte des limitations connues, tout en sachant que les bases changeront peut-être, ou que les choix standards privilégieront d'autres voies que celle sur laquelle vous investissiez ; il faut contribuer sur le fond, mais néanmoins coder beaucoup, en utilisant des supports pas tout à fait mûrs et peu documentés, sachant qu'il faut réapprendre à chaque évolution technique.

Les possibilités techniques ont explosées, mais en même temps divers limitations, bugs et mauvais usages anciens demeurent, et ont un impact aggravé par les nouveaux usages. Pour reprendre un des points évoqués par Blinn en 98, il faut savoir revisiter des approximations ou bugs implicitement admis du passés, pour attaquer l'avenir dans de meilleures conditions !

- L'orthogonalité s'est perdue en route (chaque modalité ne fonctionne pas dans toutes les conditions, certaines textures sont filtrables et d'autres non, etc).

- De nombreux bugs persistent (typiquement, les cas particuliers et les cas limites ne sont parfois pas gérés).

- Le Z-buffer et la transparence font toujours très mauvais ménage, ce qui pénalise fortement les performances des

scènes naturelles et du filtrage géométrique, lesquels font intervenir la transparence (nous avons proposé une solution simple).

- On sait depuis Porter & Duff [PD84] qu'il ne faut utiliser que l'alpha prémultiplié, mais ça n'est pas compatible avec certaines opérations.

- La chaîne de couleur reste une misère, et notamment le gamma est toujours ignoré : on effectue des interpolations linéaires dans le mauvais espace ! Ceci détériore la qualité de l'antialiasing et des effets de transparence.

- Le nombre de bits réellement utilisé pour diverses opération est insuffisant. Par exemple, le zoom sur une texture bute très vite sur la quantification des (u,v) !

- Les textures reconnues par le hardware se conçoivent toujours en unités rigides (non indexables) en nombre très limitées. Les programmeurs contournent en stockant leurs textures comme des sous-textures dans ces unités, mais perdent alors la notion de contexte (modulo, clamp), ce qui apporte des artefacts d'interpolation et de filtrage.

- L'anisotropie n'est pas reconnu pour les textures 3D, ce qui rend le filtrage de volumes totalement inutilisable (car l'approximation isotrope est dégénérée en 3D, ou il y a toujours un des axes qui est fuyant).

- Une évolution m'inquiète : j'espérais bientôt une texture unit programmable (pour prendre en compte les textures procédurales, et effectuer des corrections d'interpolation), mais il semble qu'elle est appelée à disparaître, ramenant tous les calculs dans le fragment shader. Cette généricité risque de se payer cher en terme de performances, puisque l'échantillonnage des textures est souvent la fonction la plus critique en terme de combinatoire, et fait donc l'objet d'optimisations spécialisées. Sans parler d'algorithmes dédiés, comme l'interpolation anisotrope adaptative (que deviendra-t-elle ?).

7. Conclusion

J'ai présenté ici beaucoup de mes travaux, qui ne sont cependant souvent que des ébauches, qu'ils correspondent à des rapports de stage ou à des publications internationales. Le champs est immense, le temps manque, et il est difficile de se restreindre à avancer patiemment sur un seul sujet ! Il y a donc de la place pour tout le monde. Il faut cependant savoir que si la recherche prend alors un tour passionnant (transdisciplinaire, expérimentale, voire naturaliste), elle a aussi de nombreux côtés ingrats : il faut investir et s'appropriier bases et bibliographie d'autres disciplines, beaucoup revisiter et reconstruire, essayer et recommencer, puis une fois un beau résultat intermédiaire atteint, convaincre nos pairs que ces approches méritent publication même si l'approche est inhabituelle

voir iconoclaste (pour remporter l'adhésion, il faudrait probablement avoir à monter des résultats particulièrement achevés et impressionnants, bref, couvrir à soi tout seul tous les stades du nouveau modèle innovant et prometteur jusqu'à la plateforme pré-industrielle traitant tous les aspects imaginables).

Ces travaux se sont largement appuyés sur mes étudiants (dont certains sont devenu mes collègues), dont plusieurs stages de DEA. Je ne sais pas si ce serait encore possible aujourd'hui, où parfois la formation se théorise, et le stage se réduit en peau de chagrin.

Certains travaux nouveaux ont été développés à l'occasion de collaborations industrielles : on croit souvent sa technologie mûre pour le transfert, mais la confrontation au cahier des charges et passage à l'échelle des utilisateurs réels est exigeante... et inspirante¹⁵.

J'ai eu l'occasion de collaborer ou simplement m'entretenir et visiter, toute une panoplie de chercheurs, ingénieurs et praticiens d'autres disciplines (de la géologie à l'hydraulique, de la botanique à l'aérodynamique, tendances physique atmosphérique, météo, radar, ou simplement pilote). Même si trouver un langage commun n'est pas toujours facile, toutes ces rencontres, discussions, lectures, sont un enrichissement, une source de compréhension, d'intuition, d'inspiration inégalables.

Une fois, j'ai même eu la chance d'avoir un étudiant double-compétence, venant de la physique des fluides : je n'en ai profité que pour un stage court, alors que d'autres offres de thèses et postdoc n'ont trouvées personnes : qu'il est difficile parfois de faire vivre la transdisciplinarité ! Mais comment faire autrement, si l'on souhaite faire entrer la nature entière dans un ordinateur !

Remerciements

Merci à Xavier Décoret et à Lionel Reveret, pour leur relecture exigeante de cet article.

Annexe A :

Représentations alternatives auxquelles j'ai contribué

• Monde textuel :

Il permet de décrire l'habillage indépendamment de la géométrie, et comporte des propriétés spécifiques : structuration due à la paramétrisation (permettant un accès direct aux données utiles et facilitant le filtrage), coût "procédural" (*i.e.*, en fonction de ce qu'on voit), facilité à manipuler des instances d'échantillons de référence. Notons que la programmabilité des GPU a permis une explosion des possibilités en ce domaine, puisqu'il est désormais possible, tout en conservant le contexte temps réel, d'exécuter en chaque pixel un programme manipulant des structures de données complexes (à la manière des *shaders* type

¹⁵ Monter et gérer des contrats et demandes de subvention est par contre une expérience exigeante... et épuisante, qui consomme un temps important en tâches à l'utilité discutable. Point trop n'en faut.

Renderman, autrefois réservés aux très coûteux algorithmes logiciels de rendu).

Les enjeux auxquels je me suis attelé sont :

- d'obtenir une précision textuelle arbitraire tout en consommant des ressources restreintes (en inventant de nouvelles représentations textuelles), cf [LN03, LDN04, LHN05b, LHN05a] ;
- de proposer des modalités commodes de spécification de contenus textuels (via représentations adaptées), cf [Ney96c, LN03, LHN05b] ;
- d'amener l'animation aux textures, et le textuel à l'animation (selon diverses modalités), cf [PN01, NHS02, LN03, Ney03, LHN05b, LHN05a, AN06] ;
- de développer des méthodes permettant d'éviter les nombreux artefacts qui menacent (distorsion, discontinuités, problèmes de filtrage, lesquels s'aggravent avec l'usage des fonctionnalités avancées (non-linéarités, indirections), mais qui sont rarement mentionnés dans les articles), cf [NC99, LDN04, DN04a, LHN05b].

• Représentations à base de réflectance, d'images, de points :

Dans ces travaux spécialisés aux arbres, il s'agissait de développer des représentations alternatives multi-échelles capables de reproduire efficacement les différents effets visuels, dont le shading et les ombres intervenant aux différentes échelles, cf [MN00, MNP01, GMN05].

• Les textures volumiques :

Les détails 3D (fourrure, feuillage, arbres) sont stockés sous forme d'un échantillon générique, dont les instances sont mappées sur une surface comme pour une texture 2D. Le contenu de l'échantillon est représenté par un volume de voxels comprenant densité et fonction de réflectance, "résumant" la géométrie locale. La méthode a été introduite par Kajiya et Kay [KK89] pour représenter la fourrure, en ray-tracing. J'en ai fait une représentation générique, filtrable, adaptative, animable, que j'ai progressivement adaptée au rendu projectif, et donc au temps réel. Notons qu'à elle seule, cette représentation illustre pratiquement tous les points évoqués précédemment : hiérarchie de modèles (séparation forme macroscopique, habillage, comportement optique), impressionnisme (données minimales en fonction de la taille apparente), structuration (permettant un rendu très efficace et un filtrage de qualité), cf [Ney95b, Ney95a, Ney96a, Ney96b, Ney98, MN98, SN01, DN04b, CDN04].

• Représentation vectorielles de haut niveau pour les fluides :

Il s'agit de minimiser les ressources nécessaires tout en améliorant la précision (arbitraire car sans grille) et la contrôlabilité (plus intuitive car plus proches des entités visibles de haut niveau), en lien avec ce dont il est question dans la section suivante. Notamment, je travaille :

- à la représentation des surfaces d'eau (mer, ruisseaux,

rivières), où les entités visibles (à représenter et manipuler directement) sont les vagues, ride, écume, et non les parcelles de fluide ou le champs de vitesse, cf [NP01, DN01, HNC02, RN05];

- l'animation de fluides type fumée via les filaments de vorticité, représentation bien plus compacte, robuste, proche des entités visibles, et permettant en outre des interactions proches de l'animation géométrique ( dition, keyframe, stockage, contrôle...), cf [AN05, ANSN06];
- la représentation des nuages convectifs en tant que forme surfacique (ils sont bien contrastés), contrôlée par le mouvement convectif de particules, et ayant l'apparence de pseudo-surfaces (selon l'approche de Gardner [Gar84, Gar85]), cf [Ney97, BN04].

Annexe B:

Modèles phénoménologiques auxquels j'ai contribué

• Physique macroscopique :

Il est parfois ambigu de délimiter où s'arrête le "grain fin" et ou commence le macroscopique, dans la mesure où la physique fournit parfois directement une formalisation utilisable en simulation. C'est notamment le cas pour la propagation des vagues oc anes, les propriétés de la turbulence, et de la vorticité, que j'ai utilisée pour [HNC02, Ney03, AN05, ANSN06]. De même pour les représentations alternatives minimalistes, quand elles procèdent par intégration de l'échelle fine (textures volumiques, réflectance, points, cf section 5.2). C'est plus net en matière de textures procédurales, visant directement à évoquer forme ou mouvement [PN01, AN06, MN99].

• Simulation phénoménologique de rivières (forme et mouvement)

Il s'agissait ici de répertorier les différents types de vagues et rides, d'en tirer une représentation vectorielle et un algorithme de simulation, puis une méthode de visualisation de la surface de l'eau préservant les bonnes propriétés de compacité et d'efficacité, cf [HNC02, RN05, DN01].

• Simulation phénoménologique de nuages (rendu)

Ici, l'objectif est de rendre compte des principaux phénomènes optiques (réflection et transmission isotropes et directionnelles, gloire et corolle, interr flection avec le sol) tout en se ramenant à l'utilisation d'un simple *shader*  valu  à chaque pixel de la surface des nuages (*shader* déterminé par analyse expérimentale et analytique), cf [Ney00, BNL06].

• Morphogénèse, plis, croissance (forme)

On s'est intéressé ici aux nombreux objets dont la *forme résulte du mouvement* ou de la croissance (plissements et

drapés, nervures, froissements et fissures, cloques...), pour lesquels il serait généralement très inefficace de re-simuler toute l'évolution, d'autant que les données sont parcellaires (historique des forces...), et que l'utilisateur souhaite orienter le résultat [CN02, CN06].

References

- [AN05] ANGELIDIS A., NEYRET F. : Simulation of smoke based on vortex filament primitives. In *ACM-SIGGRAPH/EG Symposium on Computer Animation (SCA)* (2005).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2005/AN05>.
- [AN06] AUGUSTIN A., NEYRET F. : *Flow-noise en temps réel*. Rapport de stage d'option.  cole polytechnique - Evasion, laboratoire GRAVIR, juin 2006.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2006/AN06>.
- [ANSN06] ANGELIDIS A., NEYRET F., SINGH K., NOWROUZ-ZAHRAI D. : A controllable, fast and stable basis for vortex based smoke simulation. In *ACM-SIGGRAPH/EG Symposium on Computer Animation (SCA)* (sep 2006).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2006/ANSN06>.
- [Bal01] BALL P. : *The Self-Made Tapestry : Pattern Formation in Nature*. Oxford University Press, 2001.
- [BM93] BECKER B. G., MAX N. L. : Smooth transitions between bump rendering algorithms. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)* (Aug. 1993), vol. 27, pp. 183–190.
- [BN04] BOUTHORS A., NEYRET F. : Modeling clouds shape. In *Eurographics (short papers)* (august 2004).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2004/BN04>.
- [BNL06] BOUTHORS A., NEYRET F., LEFEBVRE S. : Real-time realistic illumination and shading of stratiform clouds. In *Eurographics Workshop on Natural Phenomena* (sep 2006).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2006/BNL06>.
- [Boh87] BOHREN C. F. : *Clouds in a Glass of Beer : Simple Experiments in Atmospheric Physics*. Dover, 1987.
- [Car98] CARLIER M. : *Hydraulique générale et appliquée*. Eyrolles, 1972,1980,1998.
- [CDN04] COHEN F., DECAUDIN P., NEYRET F. : GPU-based lighting and shadowing of complex natural scenes. In *Siggraph Poster (Conf. DVD-ROM)* (august 2004).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2004/CDN04>.
- [CMS87] CABRAL B., MAX N., SPRINGMEYER R. : Bidirectional reflection functions from surface bump maps. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Proceedings)* (July 1987), vol. 21(4), pp. 273–281.
- [CN02] COMBAZ J., NEYRET F. : Painting folds using expansion textures. In *Pacific Graphics* (october 2002).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2002/CN02>.
- [CN06] COMBAZ J., NEYRET F. : Semi-interactive morphogenesis. In *Shape Modeling International* (2006).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2006/CN06>.
- [CNPT06] CANI M.-P., NEYRET F., PARENTHOEN M., TISSEAU J. : *Le traité de la réalité virtuelle. Volume 3 : outils et modes informatiques des environnements naturels*, third ed., vol. 3 of *collection sciences mathematiques et informatiques*. Mines Paris, 2006, ch. Modeles pour les env. naturels, pp. 315–331.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2006/CNPT06>.
- [DFKZ] D.H.M.Z., F.M.I., K.N.M.I., Z.A.M.G. : Manual of synoptic satellite meteorology.
<http://www.zamg.ac.at/docu/Manual/SatManu/main.htm>.

- [DN01] DODARD C., NEYRET F. : *Simulation d'un ruisseau par approches phénoménologiques pour la synthèse d'images*. Tech. rep., ENSIMAG-IMAGIS/GRAVIR, juin 2001.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2001/DN01>.
- [DN04a] DECAUDIN P., NEYRET F. : Packing square tiles into one texture. In *Eurographics (short papers)* (august 2004), pp. 49–52.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2004/DN04a>.
- [DN04b] DECAUDIN P., NEYRET F. : Rendering forest scenes in real-time. In *Rendering Techniques (Eurographics Symposium on Rendering - EGSR)* (june 2004), pp. 93–102.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2004/DN04>.
- [Fey77] FEYNMAN R. : *Lectures on physics*. Addison-Wesley Publishing Compagny, 1977.
- [Fou89] FOURNIER A. : The modelling of natural phenomena. *Graphics Interface '89* (June 1989), 191–202.
<http://www.cs.ubc.ca/~fournier>.
- [Fou91] FOURNIER A. : The natural look. *COMPUGRAPHICS '91 I* (1991), 426.1–426.10. <http://www.cs.ubc.ca/~fournier>.
- [Fou92] FOURNIER A. : Normal distribution functions and multiple surfaces. In *Graphics Interface '92 Workshop on Local Illumination* (May 1992), pp. 45–52.
- [Fou94] FOURNIER A. : From the look of things. *Graphics Interface '94* (May 1994), 157–164.
<http://www.cs.ubc.ca/~fournier>.
- [Fou99] FOURNIER A. : The tiger experience, 2 1999.
<http://www.cs.ubc.ca/~fournier>.
- [FvDFH90] FOLEY J. D., VAN DAM A., FEINER S. K., HUGHES J. F. : *Computer Graphics : Principles and Practices (2nd Edition)*. Addison Wesley, 1990.
- [Gar84] GARDNER G. Y. : Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 84)* 18, 3 (July 1984), 11–20.
- [Gar85] GARDNER G. Y. : Visual simulation of clouds. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 85)* 19, 3 (July 1985), 297–303.
- [GMN05] GILET G., MEYER A., NEYRET F. : Point-based rendering of trees. In *Eurographics Workshop on Natural Phenomena* (2005), E. Galin P. P., (Ed.).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2005/GMN05>.
- [HNC02] HINSINGER D., NEYRET F., CANI M.-P. : Interactive animation of ocean waves. In *ACM-SIGGRAPH/EG Symposium on Computer Animation (SCA)* (july 2002).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2002/HNC02>.
- [hyp] HyperPhysics.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>.
- [Kaj85] KAJIYA J. T. : Anisotropic reflection models. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)* (July 1985), vol. 19(3), pp. 15–21.
- [KK89] KAJIYA J. T., KAY T. L. : Rendering fur with three dimensional textures. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)* (July 1989), vol. 23(3), pp. 271–280.
- [KK98] KRAFFT M., KRAFFT K. : *Objectifs volcans*. Nathan Images, 1998.
- [LDN04] LEFEBVRE S., DARBON J., NEYRET F. : *Unified Texture Management for Arbitrary Meshes*. Tech. Rep. RR5210-, INRIA, may 2004.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2004/LDN04>.
- [LF02] LAMORLETTE A., FOSTER N. : Structural modeling of natural flames. In *Proceedings of SIGGRAPH 02* (July 2002), pp. 729–735.
- [LHN05a] LEFEBVRE S., HORNUS S., NEYRET F. : *GPU Gems 2 - Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation*. Addison Wesley, 2005, ch. Octree Textures on the GPU, pp. 595–613.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2005/LHN05a>.
- [LHN05b] LEFEBVRE S., HORNUS S., NEYRET F. : Texture sprites : Texture elements splatted on surfaces. In *ACM-SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D)* (April 2005).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2005/LHN05>.
- [Lig78] LIGHTHILL J. : *Waves in fluids*. Cambridge University Press, 1978.
- [LL02] LYNCH D. K., LIVINGSTON W. : *Aurores, mirages, éclipses... Comprendre les phénomènes optiques de la nature*. Dunod, 2002.
- [LN02] LEFEBVRE S., NEYRET F. : Synthesizing bark. In *Rendering Techniques (Eurographics Workshop on Rendering - EGSR)* (2002).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2002/LN02>.
- [LN03] LEFEBVRE S., NEYRET F. : Pattern based procedural textures. In *ACM-SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D)* (2003).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2003/LN03>.
- [LNS*03] LAIGLE D., NAAIM M., SARAMITO P., NEYRET F., CANI M.-P. : Coulées de boue et avalanches virtuelles : un outil visuel de communication et de caractérisation pour les risques naturels en montagne. *Ingénieries eau agriculture territoires* (2003), 127–136.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2003/LNSNC03>.
- [MN98] MEYER A., NEYRET F. : Interactive volumetric textures. In *Rendering Techniques (Eurographics Workshop on Rendering - EGSR)* (Jul 1998), Eurographics, Springer Wein, pp. 157–168.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/1998/MN98b>.
- [MN99] MINÉ A., NEYRET F. : *Perlin Textures in Real Time Using OpenGL*. Tech. rep., RR-3713, INRIA, 1999.
<http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/RR-3713-fra.html>.
- [MN00] MEYER A., NEYRET F. : Multiscale shaders for the efficient realistic rendering of pine-trees. In *Graphics Interface* (May 2000), pp. 137–144.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2000/MN00>.
- [MNP01] MEYER A., NEYRET F., POULIN P. : Interactive rendering of trees with shading and shadows. In *Rendering Techniques (Eurographics Workshop on Rendering - EGSR)* (Jul 2001).
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/2001/MNP01>.
- [M.S] M.S. CRAMER : Gallery of fluid mechanics.
<http://www.fluidmech.net/gallery/>.
- [Mus] MUSGRAVE D. : Physical oceanography.
<http://halibut.ims.uaf.edu/~musgrave/Academics/MSL620old/>.
- [NC99] NEYRET F., CANI M.-P. : Pattern-based texturing revisited. In *Computer Graphics (ACM SIGGRAPH)* (Aug 1999), pp. 235–242.
<http://www-evasion.imag.fr/Publications/1999/NC99>.
- [Ney] NEYRET F. : Real images gallery.
<http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/gallery/>.
- [Ney95a] NEYRET F. : Animated texels. In *Eurographics Workshop on Animation and Simulation '95* (Sept. 1995), pp. 97–103.
<http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/EWAS95-fra.html>.
- [Ney95b] NEYRET F. : A general and multiscale method for volumetric textures. In *Graphics Interface'95 Proceedings* (May 1995), pp. 83–91. <http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/GI95-fra.html>.
- [Ney96a] NEYRET F. : Synthesizing verdant landscapes using volumetric textures. In *Eurographics Workshop on Rendering '96* (June 1996), pp. 215–224. <http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/EWR96-fra.html>.

- [Ney96b] NEYRET F. : *Textures Volumiques pour la Synthèse d'images*. PhD thesis, Université Paris-XI - INRIA, 1996. <http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/thesefabrice-fra.html>.
- [Ney96c] NEYRET F. : *Trimmed Textures*. Tech. rep., RR-2857, INRIA, 1996. <http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/RR-2857-fra.html>.
- [Ney97] NEYRET F. : Qualitative simulation of cloud formation and evolution. In *8th Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS'97)* (Sept. 1997), Eurographics, Springer Wein, pp. 113–124. <http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/publis/EWAS97-fra.html>.
- [Ney98] NEYRET F. : Modeling animating and rendering complex scenes using volumetric textures. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)* 4, 1 (Jan–Mar 1998). <http://www-evasion.imag.fr/Publications/1998/Ney98>.
- [Ney99] NEYRET F. : Arêtes arrondis, shaders de nuages, shaders de touffes d'aiguilles, 1999. <http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/misc/>.
- [Ney00] NEYRET F. : *A Phenomenological Shader for the Rendering of Cumulus Clouds*. Tech. Rep. RR-3947, INRIA, May 2000. <http://www-evasion.imag.fr/Publications/2000/Ney00>.
- [Ney02] NEYRET F. : *Synthèses d'images géographiques*. Information Géographique et Aménagement du territoire. Hermes, 2002, ch. Représentation des Matériaux, pp. 19–55. <http://www-evasion.imag.fr/Publications/2002/Ney02>.
- [Ney03] NEYRET F. : Advected textures. In *ACM-SIGGRAPH/EG Symposium on Computer Animation (SCA)* (July 2003). <http://www-evasion.imag.fr/Publications/2003/Ney03>.
- [NHS02] NEYRET F., HEISS R., SENEGAS F. : Realistic rendering of an organ surface in real-time for laparoscopic surgery simulation. *the Visual Computer* 18, 3 (May 2002), 135–149. <http://www-evasion.imag.fr/Publications/2002/NHS02>.
- [NP01] NEYRET F., PRAIZELIN N. : Phenomenological simulation of brooks. In *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS)* (Sep 2001), Eurographics, Springer, pp. 53–64. <http://www-evasion.imag.fr/Publications/2001/NP01>.
- [PD84] PORTER T., DUFF T. : Compositing digital images. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 84)* (July 1984), vol. 18, pp. 253–259. <http://keithp.com/~keithp/porterduff/p253-porter.pdf>.
- [PF90] POULIN P., FOURNIER A. : A model for anisotropic reflection. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '90 Proceedings)* (Aug. 1990), vol. 24(4), pp. 273–282.
- [PN01] PERLIN K., NEYRET F. : Flow noise. In *Siggraph Technical Sketches and Applications* (Aug 2001), p. 187. <http://www-evasion.imag.fr/Publications/2001/PN01>.
- [RB85] REEVES W. T., BLAU R. : Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)* (July 1985), vol. 19(3), pp. 313–322.
- [Ree83] REEVES W. T. : Particle systems – a technique for modeling a class of fuzzy objects. *ACM Trans. Graphics* 2 (Apr. 1983), 91–108.
- [Ric03] RICHARD M. : *Simulation visuelle d'avalanches poudreuses*. Master's thesis, IVR (INPG,UJF), juillet 2003.
- [RN05] ROCHET F., NEYRET F. : *Simulation réaliste de ruisseaux en temps réel*. Master's thesis, IVR (INPG,UJF), Juillet 2005. <http://www-evasion.imag.fr/Publications/2005/RN05>.
- [SAA*00] STEVENS D., ANN S., ALMGREN B., BELL E., BECKNER A. : Small scale processes and entrainment in a stratocumulus marine boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences* 57, 4 (2000), 567–581. <http://ams.allenpress.com/perlserv/?request=get-pdf&doi=10.1175%2F1520-0469%282000%29057%3C0567%3ASSPAEI%3E2.0.CO%3B2>.
- [SAC*99] STORA D., AGLIATI P.-O., CANI M.-P., NEYRET F., GASCUEL J.-D. : Animating lava flows. In *Graphics Interface* (Jun 1999), pp. 203–210. <http://www-evasion.imag.fr/Publications/1999/SACNG99>.
- [SACN98] STORA D., AGLIATI P.-O., CANI M.-P., NEYRET F. : Animation de coulées de lave. In *Journées du groupe de travail Animation et Simulation (GTAS)* (Oct 1998). <http://www-evasion.imag.fr/Publications/1998/SACN98>.
- [SN01] SENEGAS F., NEYRET F. : *Visualisation haute-qualite de forets en temps-reel a l'aide de representations alternatives*. Master's thesis, INPG, Grenoble, Juin 2001. <http://www-evasion.imag.fr/Publications/2001/SN01>.
- [Tho17] THOMPSON D. W. : *On Growth and Form*. Cambridge University Press, Cambridge, 1917.
- [Uns] Ten unsolved problems in computer graphics. <http://www-evasion.imag.fr/Membres/Fabrice.Neyret/debats/10unsolved.html>.
- [VD82] VAN DYKE M. : *An Album of Fluid Motion*. Parabolic Press, Stanford, 1982.
- [WAT92] WESTIN S. H., ARVO J. R., TORRANCE K. E. : Predicting reflectance functions from complex surfaces. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 92)* 26, 2 (July 1992), 255–264.
- [Wei] WEISSTEIN E. : World of science. <http://scienceworld.wolfram.com/>.
- [WH91] WEJCHERT J., HAUMANN D. : Animation aerodynamics. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)* (July 1991), vol. 25, pp. 19–22.