



Modélisation procédurale de nuages multigenre

Yann Cortial, Antoine Webanck, Eric Guérin, Adrien Peytavie, Eric Galin

► To cite this version:

Yann Cortial, Antoine Webanck, Eric Guérin, Adrien Peytavie, Eric Galin. Modélisation procédurale de nuages multigenre. Journées Françaises d'Informatique Graphique (j.FIG), Oct 2017, Rennes, France. hal-01813228

HAL Id: hal-01813228

<https://hal.science/hal-01813228>

Submitted on 18 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation procédurale de nuages multigenre

Y. Cortial¹, A. Webanck², E. Guérin¹, A. Peytavie² et E. Galin²

¹INSA Lyon, Univ Lyon, LIRIS, CNRS

²Université Lyon 1, Univ Lyon, LIRIS, CNRS

Résumé

La modélisation et le rendu de phénomènes atmosphériques reste un problème ouvert en informatique graphique. L'étendue spatiale ainsi que la complexité des effets lumineux sont particulièrement difficiles à modéliser et à simuler. Dans ce travail, nous proposons un nouveau modèle de représentation de nuages multigenre par combinaison de bruits complexes. Le rendu est assuré par une méthode de single scattering qui prend en compte les nuages ainsi que l'atmosphère, avec une contribution ambiante du ciel environnant ainsi que la traversée des nuages. Nous utilisons une approximation analytique de la fonction de phase des nuages issue des travaux en physique. Cette approche procédurale se prête bien à l'animation et offre un bon niveau de contrôle utilisateur : nous le démontrons par la mise en place et le rendu d'un front météorologique complet combinant des cirrus, cirrostratus, altostratus, altocumulus, stratocumulus, cumulus et cumulonimbus.

1. Introduction

Les couches nuageuses présentes dans l'atmosphère définissent un ensemble volumique massif, visible à très grande distance même depuis le sol (distance de visibilité de l'ordre de 100 km). Cette distribution de densité est complexe, chaotique et multi-échelle. Les dix genres de nuages définis par l'homme ne constituent qu'une classification *ad hoc*, en réalité les nuages s'interpénètrent spatialement et évoluent d'un genre à l'autre au cours du temps. La modélisation de ciels nuageux réalistes est donc extrêmement difficile. La plupart des travaux de recherche en modélisation et/ou rendu de nuages se concentrent sur un nuage seul, ou au mieux un nombre limité de nuages du même type. Peu d'efforts ont été effectués pour parvenir à reproduire une atmosphère complète, c'est-à-dire multigenre, variée et animée. Les travaux récents présentent principalement des avancées en rendu, à l'exception de Schneider [Sch16]. Dans ce cadre, l'approche par simulation est peu appropriée parce que trop coûteuse en calculs et en mémoire, et parce que n'offrant que peu ou pas de contrôle utilisateur. L'approche procédurale est plus intéressante sur ces aspects, et offre de surcroît une solution élégante, par l'usage des variétés de bruit cohérents, au problème de la nature chaotique et fractale des nuages.

Notre contribution principale réside dans la modélisation de nuages multigenre, c'est-à-dire de couches nuageuses complètes, pouvant présenter simultanément les dix genres connus de nuages troposphériques de manière réaliste (Figure 1). Notre approche permet l'animation des dites couches, et offre potentiellement un bon niveau de contrôle utilisateur. La démonstration est apportée par la réalisation d'un front météorologique, mettant en œuvre l'animation de différents genres de nuages de façon cohérente.



Figure 1: Exemple d'atmosphère générée par notre méthode contenant 3 genres de nuages : cumulus humilis, altocumulus, et altostratus en arrière plan.

2. État de l'Art

Nous présentons ici un rapide état de l'art des méthodes de modélisation volumique de nuages et leur génération par simulation physique ou par des approches procédurales.

Simulations physiques. De nombreuses méthodes s'appuient sur des simulations numériques à partir des équations de la mécanique des fluides atmosphérique [KVH84, GN15]. Ces techniques s'appuient généralement sur une représentation par grille de voxels [MYDN01, DKNY08] ou par particules.

Les techniques de simulation physique souffrent d'un manque de contrôle utilisateur et d'un coût de traitement élevé : complexité mémoire d'une part, le système numé-

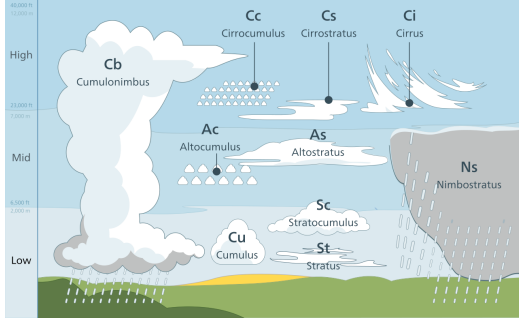


Figure 2: Représentation des dix genres de nuages troposphériques (Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported, Valentin de Bruyn).

Genre	Élévation (km)	Épaisseur (km)
Cirrus	8,6 - 13	?
Cirrostratus	6 - 8	0,1 - 3
Cirrocumulus	6 - 8	0,2 - 0,4
Altostratus	3 - 5	1
Altostratus	2 - 6	0,2 - 0,7
Stratus	0,1 - 0,7	0,2 - 0,8
Stratocumulus	0,5 - 1,5	0,2 - 1,2
Nimbostratus	0,1 - 1	2 - 5+
Cumulus	0,8 - 1,5	0,1 - 5
Cumulonimbus	? - 1	7 - 12

Table 1: Genre, élévation (base du nuage) et épaisseur moyenne des nuages troposphériques pour les latitudes tempérées.

rique œuvrant sur une grille 3D dont la résolution, forcément limitée, impacte le niveau de détail simulé; complexité temps d'autre part, ces équations ayant une résolution en temps polynomial sur la taille de la grille ont pour conséquence de ralentir la création ou la génération.

Pour pallier à ces problèmes, des simulations plus simples, hybrides ou adaptées ont été proposées. Ainsi Dobashi et al. [DKY*00] utilisent un automate cellulaire; une version étendue de la méthode a été proposée par Miyazaki et al. [MYDN01] sous forme de *CML* (Coupled Map Lattice). Par rapport au problème du manque de contrôle, [McL12] introduit des profils de température verticaux éditables par l'utilisateur, ce qui permet de spécifier les zones de formation de nuages et leur étendue verticale. Dobashi et al. [DKNY08] proposent une méthode basée mécanique des fluides, eulérienne, permettant de générer des formes de nuages prédéfinies par une silhouette 2D. Le problème de la complexité temps n'est cependant pas abordé et le coût de calcul reste prohibitif. De plus leur méthode ne permet de générer que des nuages cumuliformes.

Méthodes procédurales. Généralement, les nuages sont représentés par des sommes de bruit de Perlin [Per85] définissant une densité de nuage en tout point de l'espace. Nishita et al. [NDN96] proposent une modélisation à partir de primitives implicites à squelettes ponctuels, ou *blobs* [Bli82a, WMW86]. Ebert [Ebe97] utilise aussi ces primitives mais applique une distorsion de domaine avant l'évaluation de la fonction. Par la suite il devient commun de séparer la modélisation basse fréquence (forme globale des nuages) de la modélisation haute fréquence (détails). Les primitives implicites à squelette ont été populaires pour la modélisation basse fréquence de nuages cumuliformes [EB98, SSEH03]. Bouthors [BN08] choisit lui un maillage surfacique pour la forme globale d'un cumulus, modulé en hautes fréquences par une *hypertexture* [PH89] pour obtenir les détails de densité. On remarque que les fonctions de bruit, très souvent du bruit de Perlin [Per85] sont largement utilisées pour la modélisation haute fréquence. Plus récemment, Schneider et Vos [Sch16] proposent une solution reposant intégralement sur du bruit, ré-introduisant le bruit cellulaire ou bruit de Worley [Wor96].

Les avantages offerts par la modélisation procédurale sont

la représentation extrêmement compacte des volumes, la possibilité de générer de très grandes quantités de données, et l'aspect pseudo-aléatoire qui offre un potentiel de variété. Le modèle que nous proposons se rapproche de la technique de Schneider [Sch16], c'est-à-dire une approche plutôt fonctionnelle, en l'étendant pour modéliser les dix genres de nuages afin d'obtenir une couche nuageuse complète et réaliste.

3. Modèle de nuages multigenre

Éléments de météorologie. L'Atlas international des nuages [Wor75] reconnaît l'existence de dix genres de nuages (Figure 2), pour la seule troposphère, qui sont définis par l'altitude où ils résident et leur apparence. Le Tableau 1 fournit quelques éléments chiffrés sur les genres troposphériques, pour les latitudes moyennes. Ces données sont tirées de [KC14, HNF*95, GBAK07].

Notre modèle adopte une approche fonctionnelle qui combine de manière intensive des bruits procéduraux - à l'exception du cumulonimbus, dont la forme caractéristique est obtenue par l'utilisation de primitive implicite. À l'exécution, le modèle est échantillonné par le moteur de rendu. Ce dernier nécessite deux éléments par échantillon : le coefficient de dispersion σ (*scattering coefficient*) et un coefficient μ , modulant la constante A (section 4), contribution ambiante du ciel à l'éclairement du nuage. Moduler cette constante nous permet, de manière phénoménologique, de rendre certains nuages plus sombres que d'autres, comme c'est le cas par exemple des nimbostratus chargés de pluie.

Le modèle est une fonction $\mathcal{F}(\mathbf{p}, e)$ (équation 1) dont $\mathbf{p}$ définit le point d'échantillonnage et e définit l'élévation du terrain à la verticale du point $\mathbf{p}$. Ce filtrage est utile pour reproduire l'inertie de déplacement des masses nuageuses relative au relief, *i.e.* les nuages ne suivent pas exactement l'altitude du terrain mais épousent plutôt son contour général.

$$(\sigma, \mu) = \mathcal{F}(\mathbf{p}, e) \quad (1)$$

$$\mathcal{F}(\mathbf{p}, e) = \mathcal{F}_{cb}(\mathbf{p}, e) + \sum_{t \in \mathcal{T}} C_t(\mathbf{p}) \mathcal{F}_t(\mathbf{p}, e) \quad (2)$$

avec

$$\mathcal{T} = \{ci, cs, cc, a, sc, cuh, s, cu, ns\}$$

On suppose que l'on a à disposition des fonctions de couverture nuageuse pour chaque genre de nuage, dénotées par la lettre C . Ces fonctions travaillent uniquement sur les composantes x et y de $\mathbf{p}$ et ont des valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. Elles servent à modéliser par genre la spatialisation des nuages sur de grandes échelles. Ces fonctions peuvent également être spécifiées par des artistes sous forme de cartes 2D. $\mathcal{T}$ est l'ensemble des genres que nous modélisons : cirrus, cirrostratus, cirrocumulus, altostratus/altocumulus, stratocumulus, cumulus humilis, stratus, cumulus (mediocris et congestus); cb dénote le cumulonimbus capillatus.

La formalisation des fonctions des modèles des différents genres de nuages ($\mathcal{F}_t$ et $\mathcal{F}_{cb}$) est assez longue, on ne décrira ici que l'approche générale. Les expressions des $\mathcal{F}_t, t \in \mathcal{T}$ font appel à une fonction de densité nuageuse dédiée. De manière générale un bruit ou une combinaison de bruits emplit l'espace et donne la forme basse fréquence des nuages. Une fonction procédurale complémentaire vient détailler cette forme basse fréquence par soustraction d'une somme de bruits de fréquences croissantes. La couche de densité de nuage est obtenue en délimitant celle-ci par des altitudes et en combinant ces limites par deux gradients eux-mêmes modulés par du bruit. Une exception à relever concerne la modélisation du cumulonimbus, espèce *capillatus*, c'est-à-dire avec la forme caractéristique en enclume et dotée d'une corolle cirriforme déportée par le vent en altitude. Pour ce genre de nuage particulier nous introduisons une primitive implicite pour sa forme globale, une hyperboloïde à une nappe, que nous perturbons par distorsion de domaine grâce à des bruits tiers. Comme le modèle est largement basé sur des fonctions de bruit, nous avons cherché à utiliser des fonctions adaptées, autres que le bruit de Perlin. À la manière de Schneider [Sch16] le bruit de Worley [Wor96], lorsqu'il est complété (Figure 3), est apparu intéressant pour la modélisation d'aspects bourgeonnants/moutonneux sur les nuages.

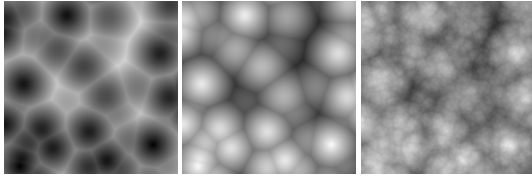


Figure 3: (De gauche à droite) Bruit de Worley, bruit de Worley complété, et combinaison de type turbulence de bruits de Worley complétés, avec lacunarité 3 et persistance 0.33.

4. Rendu

Nos contributions pour le rendu sont : l'utilisation d'une forme analytique approximée pour la fonction de phase des nuages issue de la littérature physique; et une approche pour le rendu combinant les deux milieux participatifs des nuages et de l'atmosphère, qui inclut la contribution ambiante du ciel environnant à l'éclairement des nuages.

4.1. Équation du Rendu

L'équation du rendu standard pour milieu participatif comporte classiquement une double intégrale et une forme de récursion sur les radiances. On introduit donc les simplifications suivantes, bien connues : on ne considère que la dispersion primaire, *single-scattering*, [Bli82b], et qu'une seule source active de lumière (pour la dispersion), celle du soleil, constituée de rayons parallèles. La Figure 4 introduit les notations utilisées. Nous proposons le modèle suivant pour prendre en compte de manière combinée les deux milieux participatifs que sont les nuages et l'atmosphère :

$$\mathcal{L}(\mathbf{o}, \omega) = T(\mathbf{o}, \mathbf{s})\mathcal{R}(\mathbf{s}) + \mathcal{J}_{atm} + \mathcal{J}_{cl} \quad (3)$$

avec

$$T(\mathbf{o}, \mathbf{s}) = T^{atm}(\mathbf{o}, \mathbf{s}) \cdot T^{cl}(\mathbf{o}, \mathbf{s})$$

où T^{atm} représente la transmittance associée à l'atmosphère et T^{cl} celle associée aux nuages. Et où :

$$\mathcal{J}_{atm} = \int_0^s T(\mathbf{o}, \mathbf{p})\sigma_s^{atm}(\mathbf{p})\mathcal{P}^{atm}(\theta)T(\mathbf{p}, \mathbf{e})\mathcal{L}_{sun}^{atm}d\mathbf{p} \quad (4)$$

$$\mathcal{J}_{cl} = \int_0^s T(\mathbf{o}, \mathbf{p})\sigma_s^{cl}(\mathbf{p})(\mathcal{P}^{cl}(\theta)T^{cl}(\mathbf{p}, \mathbf{e})\mathcal{L}_{sun}^{cl} + A)d\mathbf{p} \quad (5)$$

Dans les équations 4 et 5, $\mathcal{L}_{sun}^{atm}$ est l'énergie lumineuse du soleil dans l'espace (avant pénétration atmosphérique); $\mathcal{L}_{sun}^{cl}$ représente la lumière solaire parvenue au niveau des nuages; on propose un précalcul de cette quantité par approximation *single-scattering* en un point référence de la scène.

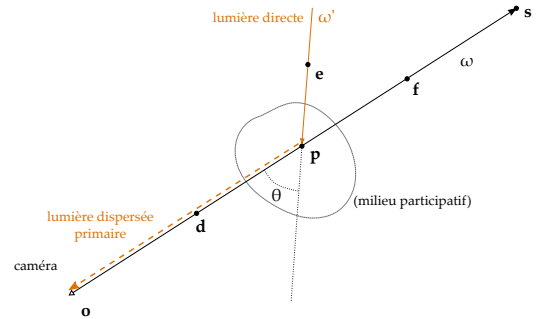


Figure 4: Évaluation de la lumière dispersée primaire (*single scattering*).

On note que dans l'expression de $\mathcal{J}_{cl}$, la transmittance sur le rayon secondaire (*i.e.* le rayon en direction du soleil) ne prend pas en compte l'extinction atmosphérique. Ceci car $\mathcal{L}_{sun}^{cl}$ représente la lumière solaire parvenue au niveau des nuages, c'est-à-dire que l'extinction atmosphérique est déjà intégrée de manière heuristique et ne doit pas être re-calculée. On introduit dans l'expression de $\mathcal{J}_{cl}$, A , une constante, multipliée par le coefficient de dispersion local, et approximant l'éclairement ambiant omnidirectionnel dû au ciel environnant le nuage. L'introduction de cette contribution est déterminante pour obtenir un aspect naturel des nuages. Elle est pré-calculée avant le rendu de chaque image, par moyenne en un point référence sur un ensemble

de rayons tirés aléatoirement. Enfin dans notre implémentation $\mathcal{P}^{cl}$, la fonction de phase associée aux nuages, est donnée par une approximation analytique proposée par Kokhanovsky [Kok04], que nous avons pris soin de normaliser.

5. Résultats

Nos résultats ont été obtenus *via* une implémentation en C++/OpenGL. Une partie du modèle a été codée sous forme de shaders GLSL, lesquels effectuent le *ray-marching* de manière efficace, les divers bruits étant pré-calculés et stockés sous forme de textures 3D. L'atmosphère comprenant les nuages est rendue sur une épaisseur de 12 km, au-dessus d'un terrain d'un peu plus de 100 km de côté (rendu avec un maillage adaptatif). Ces résultats ont été jugés positivement et validés par deux météorologues de Météo France (P. Dandin et P. Arbogast), un enseignant en prévision de l'ENM (M. Kreitz), un pilote d'avion anonyme et N. Phelps spécialiste des effets spéciaux et fondateur d'*e-on software*.

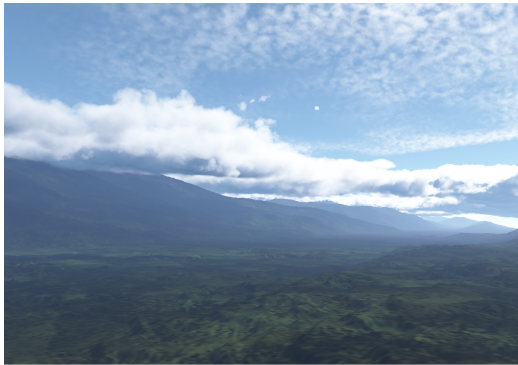


Figure 5: Stratocumulus et cirrocumulus d'altitude.

Notre application permet de rendre des étapes d'une séquence météorologique animée, en l'occurrence, un front froid instable défilant sur 540 km sur une journée complète. Cela montre que notre méthode offre un potentiel de contrôle. La structure de ce front combine 7 des 10 genres de nuages troposphériques. Le placement de chaque genre renvoie aux fonctions de couverture C_i du modèle. Elles ne sont au final qu'une fonction du temps et d'un placement horizontal sur l'étendue du front; c'est-à-dire une translation dans le sens du vent géostrophique d'une zone bi-dimensionnelle. Ainsi, on peut imaginer une application plus riche où l'utilisateur aurait la possibilité de spécifier ces couvertures en important ou dessinant ces cartes 2D d'animation.

En simplifiant la technique de rendu au niveau des rayons secondaires générés pour le calcul de la dispersion due à l'atmosphère, nous avons observé un gain de plus de 330% en temps de calcul (Tableau 2). Par contre, cette adaptation ne permet plus de combiner les transmittances, c'est-à-dire qu'on ne retient que la transmittance de l'atmosphère et on néglige celle des nuages. Si la densité de nuage est nulle en un point, cette simplification permet d'économiser les calculs de dispersion associés aux nuages et d'accélérer ainsi la boucle principale. Les Figures 1, 5 et 6 ont été obtenues avec cette méthode simplifiée.



Figure 6: (Haut) Cumulonimbus capillatus, avec sa corolle et escorté de cumulus. (Bas) Le même cumulonimbus, dans une mer de stratocumulus, surmonté de cirrocumulus. On note : l'aspect bourgeonnant bien reproduit par le bruit de Worley, et la forme implicite de l'hyperboloïde à une nappe.

Méthode de Rendu	Temps d'exécution	Écart-type
Complète	55.036 s	0.074 s
Simplifiée	12.599 s	0.174 s

Table 2: Temps d'exécution pour la production d'une image (moyenne sur 10 rendus, pour une même scène de test, résolution 1360 × 960 pixels, Intel Core i7, NVidia GTX 770).

6. Conclusion

Nous avons proposé trois contributions. (1) Une approche pour le rendu combiné de l'atmosphère et des nuages, prenant en compte la contribution environnante du ciel à l'éclairement des nuages. (2) L'utilisation de la fonction de phase pour les nuages introduite par Kokhanovsky [Kok04], une forme analytique simple qui permet de s'affranchir de l'usage d'outils de tabulation tels MiePlot. (3) Une extension des travaux introduits par Schneider [Sch16] - adoptant la même approche fonctionnelle, des combinaisons élaborées de bruit ont été développées pour modéliser des couches nuageuses complètes, multigenres. On a complété le modèle par l'introduction de volumes implicites (hyperboloïdes) pour modéliser adéquatement les cumulonimbus à enclumes. Nous avons montré que notre modèle permet un bon niveau de contrôle en réalisant l'animation d'un front froid instable, c'est-à-dire l'animation de couches nuageuses cohérentes entre elles sur le plan météorologique. Notre objectif est à présent d'étendre notre approche pour représenter des phénomènes nuageux plus spécifiques (orages, tornades, cyclones) et de permettre un meilleur contrôle sur de très grandes distances.

Références

- [Bli82a] BLINN J. F. : A generalization of algebraic surface drawing. *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 1, Num. 3 (1982), 235–256.
- [Bli82b] BLINN J. F. : Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces. *SIGGRAPH Computer Graphics*. Vol. 16, Num. 3 (1982), 21–29.
- [BN08] BOUTHORS A., NEYRET F. : *Real-time realistic rendering of clouds*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, 2008.
- [DKNY08] DOBASHI Y., KUSUMOTO K., NISHITA T., YAMAMOTO T. : Feedback control of cumuliform cloud formation based on computational fluid dynamics. *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 27, Num. 3 (2008), 94 :1–94 :8.
- [DKY*00] DOBASHI Y., KANEDA K., YAMASHITA H., OKITA T., NISHITA T. : A simple, efficient method for realistic animation of clouds. In *SIGGRAPH* (2000), pp. 19–28.
- [EB98] EBERT D. S., BEDWELL E. : Implicit modeling with procedural techniques. In *Implicit Surfaces* (1998).
- [Ebe97] EBERT D. S. : Volumetric modeling with implicit functions: A cloud is born. In *SIGGRAPH Visual* (1997), pp. 147–.
- [GBAK07] GIANNAKAKI E., BALIS D. S., AMIRIDIS V., KAZADZIS S. : Optical and geometrical characteristics of cirrus clouds over a southern european lidar station. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 7, Num. 21 (2007), 5519–5530.
- [GN15] GOSWAMI P., NEYRET F. : Real-time landscape-size convective clouds simulation. In *SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games* (2015).
- [HNF*95] HAYASAKA T., NAKAJIMA T., FUJIYOSHI Y., ISHIZAKA Y., TAKEDA T., TANAKA M. : Geometrical thickness, liquid water content, and radiative properties of stratocumulus clouds over the western north pacific. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 34, Num. 2 (1995), 460–470.
- [KC14] KHVOROSTYANOV V. I., CURRY J. : *Thermodynamics, kinetics, and microphysics of clouds*. 2014.
- [Kok04] KOKHANOVSKY A. : Optical properties of terrestrial clouds. *Earth-Science Reviews*. Vol. 64, Num. 3 (2004), 189–241.
- [KvH84] KAJIYA J. T., VON HERZEN B. : Ray tracing volume densities. *SIGGRAPH Computer Graphics*. Vol. 18, Num. 3 (1984), 165–174.
- [McL12] MCLOUGHLIN L. : *Realistic Natural Atmospheric Phenomena and Weather Effects for Interactive Virtual Environments*. PhD thesis, Bournemouth University, 2012.
- [MYDN01] MIYAZAKI R., YOSHIDA S., DOBASHI Y., NISHITA T. : A method for modeling clouds based on atmospheric fluid dynamics. In *Pacific Conference on Computer Graphics and Applications* (2001), pp. 363–372.
- [NDN96] NISHITA T., DOBASHI Y., NAKAMAE E. : Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light. In *SIGGRAPH* (1996), pp. 379–386.
- [Per85] PERLIN K. : An image synthesizer. *SIGGRAPH Computer Graphics*. Vol. 19, Num. 3 (1985), 287–296.
- [PH89] PERLIN K., HOFFERT E. M. : Hypertexture. *SIGGRAPH Computer Graphics* (1989), 253–262.
- [Sch16] SCHNEIDER A. : *Real-time volumetric cloudscapes*. 2016, pp. 97–127.
- [SSEH03] SCHPOK J., SIMONS J., EBERT D. S., HANSEN C. : A real-time cloud modeling, rendering, and animation system. In *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* (2003), pp. 160–166.
- [WMW86] WYVILL G., MCPHEETERS C., WYVILL B. : Data structure for soft objects. *The Visual Computer*. Vol. 2, Num. 4 (1986), 227–234.
- [Wor75] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION : *International Cloud Atlas*, vol. I. 1975.
- [Wor96] WORLEY S. : A cellular texture basis function. In *SIGGRAPH* (1996), pp. 291–294.