

Modélisation des phénomènes de turbulence dans les milieux participants

Daniel Barrero
barrero@irit.fr

Laurent Dadalto
dadalto@irit.fr

Mathias Paulin
paulin@irit.fr

René Caubet
caubet@irit.fr

Equipe de Synthèse d'Images
IRIT
Université Paul Sabatier
31077 Toulouse Cedex

Résumé: Pour la réalisation d'un modèle convaincant des phénomènes gazeux tels que la fumée, les nuages, il faut être capable de modéliser les irrégularités qui les caractérisent. Ces irrégularités sont la manifestation visible des phénomènes de turbulence, produits par les phénomènes d'advection et diffusion du gaz. Un phénomène gazeux peut être donc, divisé en deux parties : le modèle géométrique du milieu, et le modèle du mouvement. Ici, on propose un modèle hiérarchique de turbulence, en utilisant des méthodes stochastiques fondées sur un modèle physique pour contrôler le mouvement du gaz. Pour la modélisation de la partie visible du milieu, on utilise une hiérarchie de blobs diffus qui permet d'améliorer le temps de rendu.

Mots-clés : Turbulence, milieux participants, phénomènes gazeux, diffusion, advection, champs de mouvement.

1. Introduction

Lorsque l'on observe les phénomènes naturels tels que la fumée, le feu ou les nuages, leur géométrie n'est pas clairement définie. C'est précisément ces irrégularités qui permettent de les identifier. Dans le cas spécifique des phénomènes gazeux (fumée par exemple), ces irrégularités sont plus connues sous le nom de phénomènes de turbulence.

Pour obtenir une représentation réaliste des phénomènes de turbulence dans les milieux participants, il faut comprendre les facteurs qui ont une influence directe sur le comportement d'un gaz. De manière générale, ces facteurs sont : la vitesse et la direction générale de l'ensemble du gaz (appelé flux laminaire dans le domaine de la dynamique des fluides), le flux turbulent produit par l'interaction des molécules composant le gaz, la flottabilité thermique qui fait monter le gaz, (produite par l'échange de température entre le gaz et son environnement) et générant des forces de traînée à l'intérieur du gaz, la diffusion produite par le mouvement moléculaire et la dissipation moléculaire produite par la dissolution dans l'environnement.

Pour la modélisation de phénomènes de turbulence, il faut être capable de représenter tous ces facteurs dans le modèle. Ce problème est réduit à la modélisation des milieux, des objets, et de leurs interactions. Ce problème est très complexe et peut être appréhendé selon différents points de vue : approche totalement physique (dynamique des fluides) [FOL92] [KAS90] [ROG84] [CFD95] [STR95], méthodes stochastiques [AVE89] [FOL92] [STA93] [REE85] [WIT87] et modèles géométriques [EBE94] [REE85] où le seul but est d'obtenir une approximation visuelle du phénomène.

Une des meilleures alternatives (mais aussi la plus naturelle) pour ce type de phénomènes est la modélisation à partir de méthodes stochastiques car elles permettent de modéliser les irrégularités très facilement et sont suffisamment flexibles pour être utilisées dans la modélisation des phénomènes de turbulence [CFD95] [STR95].

L'objectif principal de ce travail est de présenter une méthode rapide permettant d'obtenir une bonne

approximation du phénomène par une combinaison de différentes méthodes respectant les lois physiques applicables à ce type de phénomène. Le modèle prend en compte les différents phénomènes de diffusion, convection, "rotationalité", pour la modélisation et animation des phénomènes de turbulence dans des milieux participants. Les phénomènes de turbulence et la géométrie du milieu sont représentés par un modèle hiérarchique.

2. Modèle du comportement d'un phénomène gazeux

La modélisation des phénomènes de turbulence existants dans les milieux participants est équivalente à la modélisation de la turbulence dans un fluide. Pour modéliser ce genre de phénomène de façon réaliste il faut tenir compte des lois de l'hydrodynamique et de la thermodynamique. En général dans le comportement d'un fluide on peut différencier deux types de flux : le flux laminaire, observable clairement dans le cas de fluides presque idéaux, qui décrit d'une façon générale le mouvement de la masse du fluide et le flux turbulent qui est le résultat des forces d'interaction entre les éléments composant le fluide ainsi que de l'interaction avec des objets qui affectent l'équilibre dynamique du fluide. Ces derniers phénomènes sont généralement d'une échelle très réduite par rapport au flux laminaire mais ils ont un effet significatif dans le comportement du gaz. Ils affectent la trajectoire individuelle des molécules du gaz en produisant des modifications de la trajectoire plus générale du flux laminaire.

Physiquement le comportement d'un gaz est influencé par différents facteurs : présence d'obstacles dans le chemin du fluide, vent, changement de pression et de température, forces d'interaction entre les molécules composant le milieu, diffusion moléculaire. Ces phénomènes entraînent des modifications dans la vitesse, la direction, la pression, et la température du fluide dans l'espace-temps. L'ensemble de ces modifications peut être représenté de façon physique par les équations de Navier-Stokes [STA93] [ROG84] [CFD95] [STR95]. Ces équations sont obtenues à partir de la combinaison des forces externes \mathbf{F} appliquées au fluide, de fonctions de pression $p(\mathbf{x},t)$, de vitesse $\mathbf{u}(\mathbf{x},t)$ et de densité $\delta(\mathbf{x},t)$ du fluide avec un coefficient de dissipation ν qui doit être égal à l'accélération du fluide et qui modifie les valeurs de caractérisation du fluide.

2.1. Bases de turbulence

Si on observe très attentivement les phénomènes turbulents, il est possible d'identifier très clairement un ensemble de formes qui ont tendance à apparaître de façon répétitive. Par exemple, les vortex sont très faciles à identifier et semblent apparaître de façon indépendante et aléatoire. De plus, si on analyse la géométrie perturbée des autres phénomènes de turbulence moins évidents, on peut voir que ceux-ci sont une combinaison de formes de turbulence plus simple. Il est donc possible d'obtenir un ensemble de définitions géométriques de base qui, combinées entre elles, peuvent reproduire de façon très réaliste les phénomènes les plus complexes (figure 1) [BAR96][BAR97].

Ainsi, un phénomène de turbulence peut être assimilé mathématiquement à un groupe qui est défini à l'aide d'un ensemble de champs de mouvement linéairement indépendants et d'un ensemble d'opérations sur ceux-ci. Chacun de ces champs de mouvement est modélisé soit à partir des formes géométriques observées dans le phénomène réel, soit par des modèles physiques pré-calculés sous forme de turbulence (ou une géométrie de turbulence) standard dans un espace paramétrique. On peut donc exprimer un phénomène de turbulence de la façon suivante :

$$Ft = \langle \mathbf{ft}, \mathbf{Op} \rangle, \mathbf{ft} = \{ft_1, \dots, ft_n\}, \mathbf{Op} = \{Op_1, \dots, Op_m \because Op_i: \mathbf{ft} \times \mathbf{ft} \xrightarrow{Op_i} \mathbf{ft}\} \quad (1)$$

Où Ft est le phénomène de turbulence, \mathbf{Op} est l'ensemble des opérations possibles sur la base, l'ensemble \mathbf{ft} est l'ensemble des formes de turbulence, et $ft_i, 1 < i < n$, sont linéairement indépendantes.

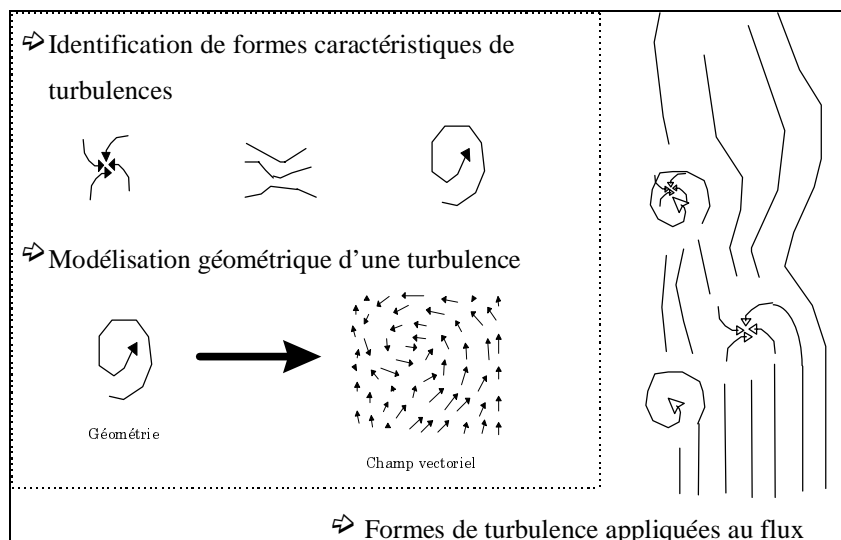


Figure 1. Représentation graphique du modèle de bases de turbulence

Chaque forme de turbulence f_i est équivalente à un champ de mouvement et celui-ci doit être défini par des fonctions de vitesse, pression et température du fluide. Comme l'objectif est de profiter du fait que l'on connaît la géométrie du phénomène, le champ peut être défini par des fonctions vectorielles dans l'espace qui représente la géométrie de la turbulence. Généralement ces fonctions sont continues sur l'espace paramétrique du champ et sont nulles dans les régions de l'espace où elles ne sont pas définies ou en dehors de l'espace paramétrique. De cette façon les opérations à réaliser entre les différentes formes de turbulence pour composer la simulation du phénomène, sont réduites à un simple problème de composition de fonctions vectorielles.

A partir de ces définitions, on peut introduire la définition du champ de base comme le champ qu'il est possible de calculer avec une fonction spécifique, soit physiquement (Navier-Stokes), soit par des méthodes stochastiques directes (i.e. champs aléatoires [STA93][STA95b]), soit par une définition mathématique.

2.2. Hiérarchie de Champs de Mouvement

En dynamique des fluides, de même que pour la définition de bases de turbulence, il a été observé qu'un champ de mouvement turbulent est composé principalement de deux niveaux de turbulences : à petite et grande échelle. La turbulence à grande échelle correspond en général au mouvement global du fluide (par exemple, la direction du courant dans un fleuve). Cette classe de turbulence contient les champs de mouvement représentant les flux laminaires. Les champs de petite échelle, par contre, correspondent aux phénomènes de turbulence proprement dits. A partir de cette classification, on peut proposer un modèle de champs de mouvement :

- On suppose qu'un champ de mouvement complexe $u(\mathbf{x},t)$, est défini par la composition linéaire de deux ensembles de champs possibles : champs à Grande Echelle $U_g(\mathbf{x},t)$ et à Petite Echelle ($U_p(\mathbf{x},t)$).

$$u(\mathbf{x}, t) = \alpha U_g(\mathbf{x}, t) + \beta U_p(\mathbf{x}, t), \quad (2)$$

- Chaque ensemble de champs U_g et U_p est une composition de champs de mouvement de chaque type : U_g est une composition de champs de base :

$$U_g(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_{b_i}(\mathbf{x}, t), \quad (3)$$

U_p est une composition de champs à petite échelle $u_i(x,t)$:

$$U_p(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^n u_i(\mathbf{x}, t) * \sigma_i * r(\mathbf{x}, t), \quad (4)$$

Dans cette équation, σ_i est la variance du champ vectoriel à petite échelle $u_i(x,t)$, et $r(x,t)$ est la fonction d'apparition. Cette fonction détermine la probabilité de l'apparition de champs de mouvement à petite échelle. C'est grâce à cette fonction que l'on peut insérer des irrégularités dans le cycle de vie d'un champ et l'application du phénomène de turbulence, pour obtenir un meilleur résultat.

Chacun des champs à petite échelle $u_i(x,t)$ correspond à un champ de mouvement complexe. De cette façon, si on applique la définition du champ complexe, tous les u_i sont définis de la manière suivante :

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \alpha U_{g_i}(\mathbf{x}, t) + \beta U_{p_i}(\mathbf{x}, t), \quad (5)$$

De cette façon, un champ de turbulence peut être représenté par un arbre n-aire de champs, de profondeur m (figure 2). La définition récursive de cette fonction se termine quand, pour tous les u_i d'un niveau déterminé, les U_{p_i} correspondent à un ensemble vide. C'est à dire qu'il n'est défini que par l'ensemble des U_{g_i} (composition linéaire des champs de base).

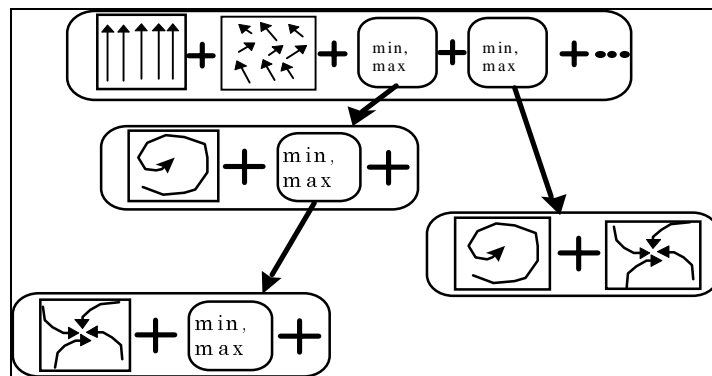


Figure 2. Représentation graphique du modèle hiérarchique du champ de mouvement

L'interaction entre le modèle de champs de mouvement hiérarchique et le modèle de bases de turbulence peut être faite d'une façon très naturelle, car les deux modèles sont complémentaires. Il suffit de faire la correspondance entre les champs de la base de turbulence et les champs à grande échelle du modèle de champs hiérarchiques. Au niveau de la base de turbulence, il faut compléter l'information stockée dans la base par l'ajout des données qui décrivent le spectre d'énergie du champ.

2.3. Evolution du modèle (conservation de l'énergie)

Le contrôle de l'évolution du modèle de champs est lié directement à la définition des fonctions d'énergie du champ et à des lois physiques de conservation de l'énergie. L'énergie totale de l'environnement de la simulation est distribuée dans toute la hiérarchie et n'est transmise qu'entre des champs de niveaux consécutifs. Pour définir les fonctions d'énergie appropriées, il faut tenir compte de certaines restrictions sur les fonctions ainsi qu'identifier la relation entre les différentes fonctions d'énergie et les différents événements clés pour l'évolution du modèle. Par exemple : la création et la disparition d'un champ, ...

Les fonctions d'énergie sont toutes des fonctions positives. L'interprétation physique de la fonction de distribution d'énergie dans le champ $\mathbf{E}(\mathbf{x},t)$ est la contribution cinétique au champ de mouvement. Ces fonctions peuvent être des fonctions arbitraires, à condition que l'intégrale suivante dans l'espace de Fourier

soit satisfaite (spectre d'énergie de Kolmogorov¹) [STA93] [CFD95] :

$$\frac{1}{2} u(x, t)^2 = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(k, t) dk dt, \quad (6)$$

La fonction du spectre d'énergie peut être n'importe quelle fonction positive à condition qu'elle ait comme borne supérieure l'énergie libre du système.

En général ces fonctions d'énergie peuvent être associées directement à des distributions de probabilité (normale, gaussienne, poisson, etc.) car celles-ci ne garantissent pas seulement d'être positives et continues, mais également remplissent les conditions de l'équation (6) [STA93]. Ce type d'équation permet aussi de caractériser le type de solution, dépendant du type de distribution, en simplifiant le système de contrôle pour l'utilisateur. Par exemple, dans le cas des distributions normales, il est important de connaître les valeurs de la moyenne et de la variance.

2.4. Interaction avec des objets solides

Il y a plusieurs façons de modéliser l'interaction entre le fluide et un objet solide. La façon la plus directe est de définir les forces produites par l'objet sur le gaz et d'introduire ce terme dans les équations de Navier-Stokes pour obtenir un champ de mouvement pour l'objet. L'inconvénient de cette solution est l'introduction d'irrégularités dans les équations pouvant rendre la résolution de ces équations complexe et coûteuse.

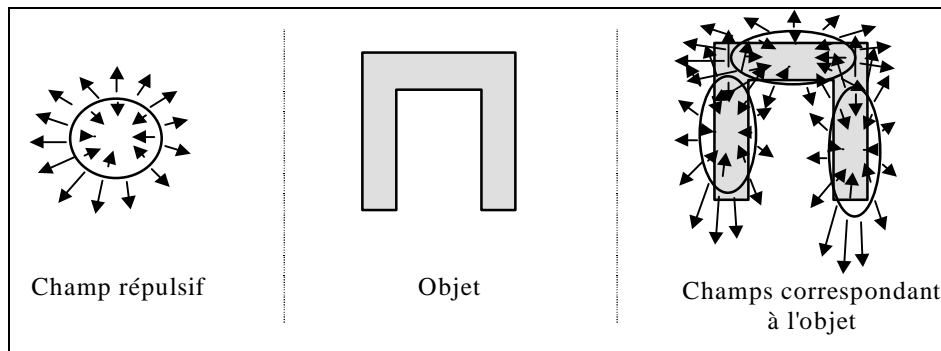


Figure 3. Approximation d'un objet par champs de mouvement répulsifs

L'utilisation de champs répulsifs superposés, arrangés selon la géométrie des objets (figure 3), permet l'obtention de résultats acceptables rapidement [BAR97]. Cependant, la construction automatique de cet ensemble de champs dépend de la complexité de la géométrie de l'objet et de ses propriétés physiques. La définition de champs répulsifs par l'utilisateur permet d'obtenir précisément des comportements particuliers de la part des objets.

Si cette méthode est très simple et pratique pour l'obtention d'une approximation rapide (avec l'aide de l'utilisateur) du comportement de champs de mouvement produits par l'objet en interaction avec le fluide, elle présente plusieurs problèmes.

Le problème principal de cette méthode est l'erreur produite par la superposition des champs voisins, générant des phénomènes de turbulence parasites, ainsi que la complexité de la génération des champs de mouvement pour qu'ils puissent représenter le plus précisément possible l'influence de l'objet sur le fluide. Pour résoudre ce problème, nous remplaçons les champs répulsifs radiaux par un ou plusieurs champs

¹ Evolution contrôlée par le spectre d'énergie de Kolmogorov (hypothèse de dissipation de longueur d'onde dans l'espace de Fourier pour l'énergie d'un fluide)

répulsifs dépendants de la géométrie de l'objet. Ces champs répulsifs sont déduits de la représentation paramétrique ou volumique de l'objet. Cependant, la possibilité de définir des champs radiaux supplémentaires est laissée à l'utilisateur afin de pouvoir modéliser un comportement particulier de l'objet.

3. Modélisation d'un gaz

Pour la modélisation du milieu, on a choisi d'utiliser comme point de départ, la méthode proposée par Stam [STA93][STA95b] et Maxwell [ROG84], qui propose de modéliser un gaz par une distribution de densité de probabilité. Pour l'implémentation de ce modèle, on propose une extension au modèle des blobs diffus de Stam [STA93].

Le problème principal de la méthode des blobs diffus est, outre un temps de calcul très long, qu'il est possible d'identifier clairement la géométrie utilisée pour modéliser les blobs. Il existe donc des artefacts visuels dans le résultat final de la simulation. Un deuxième problème avec la méthode de base est, que si un blob a réussi à atteindre une taille plus grande que l'échelle de turbulence la plus petite, il ne sera pas affecté par ces phénomènes de turbulence. Cela va se traduire par une perte dans la qualité de la simulation.

Pour résoudre ces problèmes il existe plusieurs méthodes. Le premier problème peut être résolu partiellement par l'élimination des blobs qui ont réussi à atteindre une taille déterminée. En effet, on suppose que leur contribution à la densité du gaz est tellement faible qu'elle peut être considérée comme nulle. Cependant, si plusieurs de ces blobs sont superposés dans l'espace, l'addition de densités faibles peut être considérable et la suppression de ces blobs entraînerait une erreur importante.

Le deuxième problème peut être résolu par la subdivision des blobs qui ont une taille plus grande que l'échelle de turbulence la plus petite. Cependant, outre le problème soulevé par la solution précédente, la suppression des blobs qui ont une densité non négligeable introduit une erreur certaine dans la simulation.

3.1. Hiérarchie de blobs diffus

Après avoir analysé les solutions possibles aux problèmes de la méthode de base de Stam[STA93], nous avons apporté les modifications suivantes au modèle de blobs diffus [BAR97] :

- Si un blob atteint une taille maximum autorisée, au lieu d'être supprimé, il est subdivisé en plusieurs blobs. Pour obtenir les nouveaux blobs, on recherche des régions de même caractéristiques dans le blob à diviser. Par exemple, une distribution uniforme de densité. On crée ainsi un nouveau blob englobant pour chacune de ces régions.
- La taille d'un blob n'est plus le seul critère permettant sa suppression. La densité totale du blob est aussi une variable de contrôle. Si cette densité est plus petite que la densité minimum autorisée, le blob est supprimé.
- Si un blob a une taille plus grande que l'échelle du phénomène de turbulence le plus petit, il est aussi subdivisé en plusieurs blobs.

Pour améliorer le temps de rendu, on utilise la subdivision hiérarchique du blob, une hiérarchie d'ellipsoïdes, comme une hiérarchie de volumes englobants pour l'accélération du rendu. Les feuilles correspondent aux blobs proprement dits (les blobs visibles à un instant donné) et les nœuds dans les niveaux plus hauts de l'arbre correspondent aux données des blobs qui sont à l'origine des blobs visibles. Grâce à cette méthode, il

est possible de limiter la qualité du rendu selon les objectifs de la simulation, en limitant la profondeur de la hiérarchie à visualiser (figure 4).

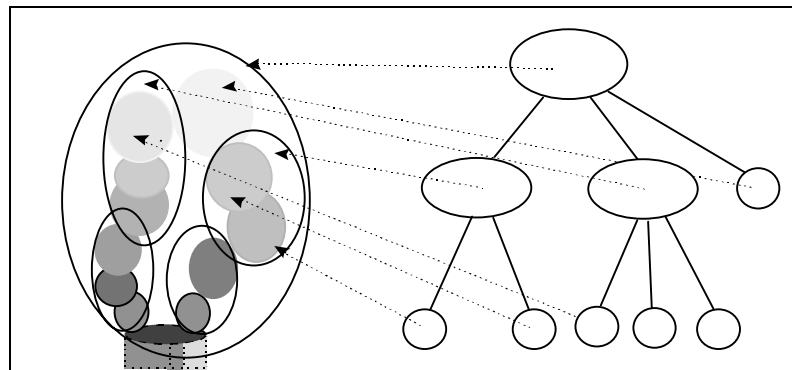


Figure 4. Hiérarchie de blobs diffus

L'utilisation de l'information de subdivision des blobs permet une construction adaptative de l'arbre. La maintenance de la validité de l'arbre est faite par un parcours de la hiérarchie à chaque instant pour actualiser les données de taille de chaque nœud de l'arbre. La principale difficulté, dans la maintenance de la consistance de la hiérarchie des ellipsoïdes, survient lorsque l'un des blobs est complètement inclus dans un blob parent différent du sien. Il faut alors vérifier quel parent est le plus proche (distance entre les centres) et actualiser en conséquence l'arbre s'il faut changer le blob de parent.

Comme la subdivision et le mouvement de chaque blob sont liés aux champs de mouvement du fluide, on peut profiter du modèle hiérarchique de turbulence pour améliorer le temps de calcul. La réutilisation des données est possible en faisant la relation directe entre les deux modèles. Chaque niveau de la hiérarchie géométrique du blob est lié à un niveau de la hiérarchie de turbulence du blob. Ainsi les fonctions et probabilités d'apparition de phénomènes de turbulence ne sont calculées que dans les zones contenant des molécules de gaz, ce qui évite de calculer inutilement les équations de turbulence dans des régions vides de l'espace.

Bien que Stam [STA93] ait proposé l'utilisation d'une hiérarchie de blobs pour l'accélération du rendu (plus exactement la construction d'un arbre binaire de blobs), il faut, à chaque instant, recalculer l'arbre entier à partir des équations de distance entre l'ensemble des blobs pour trouver le voisin le plus proche de chaque blob et ainsi reconstruire la hiérarchie. Cette opération est très coûteuse en temps de calcul. Cependant elle est nécessaire car le mouvement et la création de nouveaux blobs par la source (pour maintenir la continuité de la simulation) invalide la hiérarchie à chaque instant. De plus, la méthode de base des blobs diffus ne fournit pas d'informations suffisantes sur les relations entre les blobs pour permettre une maintenance adaptative de la hiérarchie.

4. Résultats

Pour tester le modèle de turbulence proposé, nous avons effectué une implantation complète du modèle de champs de mouvement hiérarchique en association avec le modèle de gaz représenté par une hiérarchie de blobs diffus. Pour la visualisation réaliste du phénomène, nous avons utilisé des méthodes de radiosité et de lancer de rayons modifiées pour prendre en compte la contribution du milieu participant [DAD97].

Dans un premier temps, nous avons créé une scène simple, mais permettant d'identifier de façon très claire les différentes façons de modéliser le comportement du gaz, ainsi que les différences entre la visualisation dans les domaines spectraux du visible et de l'infrarouge.

La scène de base correspond à un cendrier avec une cigarette allumée, dans une ambiance qui peut être considérée plus ou moins stable. Les phénomènes de turbulence sont produits par les phénomènes de convection et d'advection du gaz (dans ce cas, l'air).

Le champ de mouvement pour ces images est défini de la façon suivante : pour le mouvement général du gaz, un champ de mouvement ascendant est généré par une source de chaleur située dans la région correspondant à l'origine de la fumée. L'évolution des phénomènes de turbulence est alors contrôlée par le modèle de turbulence hiérarchique construit sur une base de turbulence possédant uniquement les champs de base suivants : champ unidirectionnel, vortex et spirale. La profondeur de l'arbre de turbulence a été limitée entre 2 et 5 niveaux; et celle de la hiérarchie de blobs à 10 niveaux. On a limité aussi le nombre maximum de fils de chaque blob à 4, et on introduit seulement 2 blobs toutes les 3 étapes de simulation.

Sur l'image 1, on peut voir la différence entre l'utilisation du modèle de flux laminaire avec un seul niveau de turbulence, où l'on peut identifier de façon plus ou moins claire la géométrie des phénomènes de turbulence à grande échelle, et le modèle de turbulence avec un arbre plus complexe pour contrôler le mouvement de la fumée, où la géométrie des phénomènes de turbulence à grande échelle est tellement déformée par les champs à plus petite échelle qu'il n'est pas possible de reconnaître leur géométrie.

Dans ces images, on peut voir comment, pour certains phénomènes spécifiques, le modèle de flux laminaire est suffisant pour obtenir un résultat visuellement plus proche de la conception qu'on a du comportement de la fumée d'une cigarette dans une ambiance fermée, et comment, par contre, le modèle turbulent est plus proche visuellement de la fumée observée dans des espaces ouverts où la diffusion du gaz est visiblement plus irrégulière.

L'image 2, montre les résultats de simulation du flux turbulent dans le spectre visible et dans l'infrarouge (ici on visualise seulement la fumée). Dans cette image il est possible d'observer de façon très claire que, pour les mêmes données, l'image dans l'infrarouge est complètement différente. Il est important de noter que la fumée est visible à la fois dans l'infrarouge et dans le spectre visible. En effet, la différence de température de certaines particules avec l'air ambiant est plus important que leur densité. Principalement celles qui ont une densité si faible qu'il est très difficile de les voir.

La séquence de l'image 3 présente les différentes images d'une séquence d'animation complète.

L'image 4 montre l'interaction de la fumée avec des objets plus complexes. Dans l'image de gauche, le mouvement de la fumée qui sort du moteur du biplan est influencé par le champ de vent produit par l'hélice, et on observe une division de la fumée lors de l'interaction avec les ailes et le corps du biplan.

5. Conclusions

La méthode proposée dans cet article possède comme avantage la possibilité de contrôler totalement le modèle par des paramètres physiques ainsi que le contrôle du niveau de détail selon les résultats désirés par une action directe sur la hiérarchie de turbulence et de blobs. L'utilisation des liens étroits entre la hiérarchie de blobs et la hiérarchie de turbulence permet la réutilisation de variables de contrôle et de variables d'état et entraîne une amélioration du temps de calcul de la simulation. L'utilisation de la hiérarchie de blobs pour modéliser le gaz permet d'avoir un temps de calcul plus réduit que les méthodes traditionnelles de rendu volumique ou textures solides.

Actuellement, nos recherches s'orientent vers l'amélioration de la modélisation des interactions du fluide

avec des objets solides, en particulier la génération automatique des champs répulsifs autour des objets solides, et l'accélération du temps de calcul de la simulation et le rendu. L'utilisation de ce modèle pour simuler les transferts calorifiques entre les milieux participants et les objets solides fait partie de nos objectifs qui est de fournir un outil de simulation complet prenant en compte les phénomènes réels.

6. Images

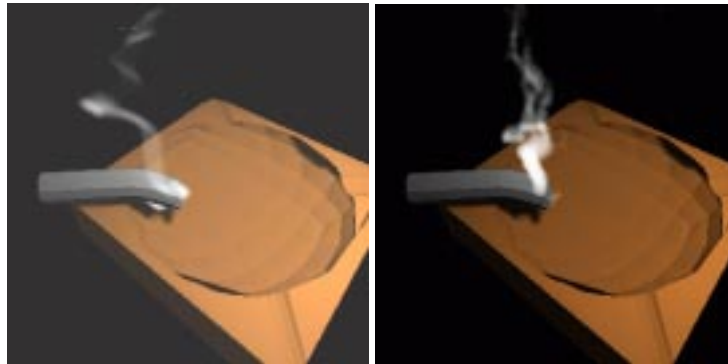


Image 1. Exemple de fumée modélisée par flux laminaire (gauche), et flux turbulent (droite)

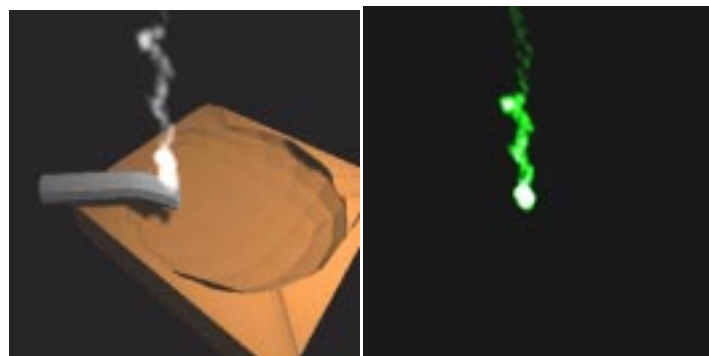


Image 2. Visualisation de fumée dans le visible et l'infrarouge (dans l'infrarouge seule la fumée est représentée pour plus de clarté)

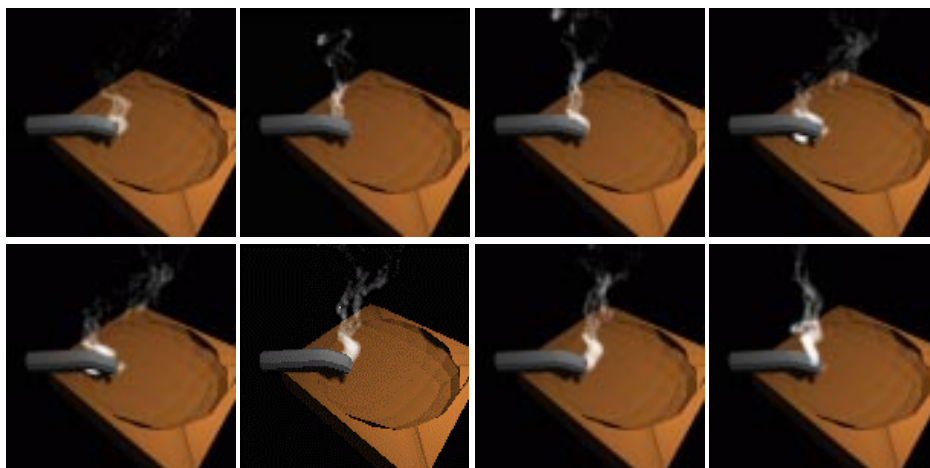


Image 3. Quelques images de la séquence de l'animation.

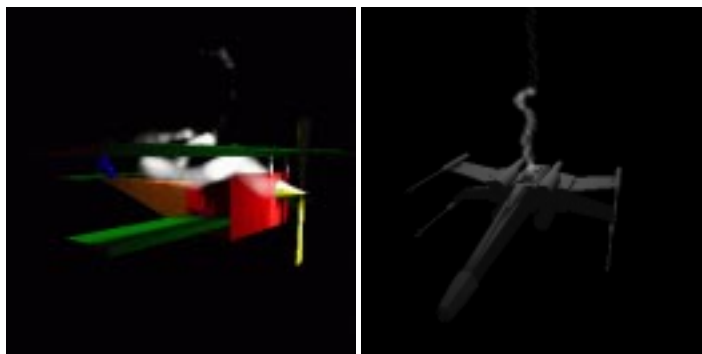


Image 4. Interaction de la fumée avec des objets complexes

Références

- [AVE89] Law Averill M., David Kelton, Simulation Modeling and Analysis, 1989.
- [BAR951] Barrero Daniel, Metodología de Modelaje Multinivel para Fenomenos de Turbulencia, UniAndes, Colombia, 1995.
- [BAR952] Barrero Daniel, Modelaje y Simulación de Fenomenos Turbulentos - Bases de Turbulencia, UniAndes, Colombia, 1995.
- [BAR96] Barrero Daniel, Jose Tiberio Hernández, Modelo para la Simulación de Fenomenos Turbulentos para Ambientes de Realidad Virtual, CLEI 1996.
- [BAR97] Barrero Daniel, Modélisation des Phénomènes Turbulentes dans les Milieux Participantes, Rapport DEA-2IL, IRIT - UPS, France, Juin 1997
- [BRO95] Brodlie K.W., Gallop J.R., Grant A.J., Haswell J., Hewitt W.T., Larkin S., Lilley C.C., Morphet H., Townend A., Wood J. and Wright H., Review of Visualization Systems, Advisory Group on Computer Graphics Technical Report, Loughborough University of Technology: Loughborough, Leicestershire, 1995.
- [CFD95] Computed Fluid Dynamics Journal, IEEE Press, January-December 1994, January April, 1995.
- [DAD97] L. Da Dalto, "Modelés pour la simulation de phénomènes naturels en image de synthèse ". Thèse Universitaire, IRIT, Novembre 1997.
- [EBE94] David S. Ebert, F. Kenton Musgrave, Dan Peachey, Ken Perlin, Steve Worley, "Texturing and Modeling a procedural approach", Academic Press Inc., Cambridge MA, 1994.
- [FOL93] J.Foley , A. vanDam, S. Feiner, J. Hughes, Computer Graphics Principle and Practice, USA, Addison Wesley, 1992.
- [KAR80] Karamcheti K, " Principles of Ideal Fluid Aerodynamics", 2nd edition, Kreiger, 1980
- [KAS90] M. Kass and G.Miller. "Rapid, Stable Fluid Dynamics for Computer Graphics", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'90), August 1990.
- [POS93] Post F.H., van Walsum T., Fluid Flow Visualization, in Focus on Scientific Visualization, Springer-Verlag, 1993.
- [REE85] Reeves, W.T., and R. Blau, Aproximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Particle Systems, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'85).
- [ROG84] R.S. Rogallo and P.Moin., Numerical Simulation of Turbulent Flows, Annual Review of Fluid Mechanics, 1984.
- [STA93] Jos Stam, Eugene Fiume, Turbulent Wind Fields for Gaseous Phenomena, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'93), August 1993.
- [STA95] Jos Stam, Eugene Fiume, Depicting Fire and Other Gaseous Phenomena Using Diffusion Processes, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'95), August 1995.
- [STA95b] Jos Stam, "Multi-Scale Stochastic Modelling of Complex Natural Phenomena". PhD Thesis, Dept. Of Computer Science, University of Toronto, 1995.
- [STR95] Streeter Victor L., Mecanica de los Fluidos, Colombia, McGraw Hill, Octava Edición, 1995.