

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

PFE – Simuler un ciel nuageux évolutif

Eric Heitz

1. Introduction

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Objectif

Reproduire le mouvement des nuages d'origine convective.



Exemple vidéo 1

Exemple vidéo 2

Nouveautés à introduire

Temps réel

Scalabilité

Paramétrisation intuitive

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

2. Etat de l'art

- 2.1 Simulation de fluide en graphisme

2.1.1 Equations de Navier-Stokes

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Les équations de Navier-Stokes décrivent le comportement infinitésimal d'un fluide.

Conservation de la masse

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2)$$

Le but d'un solveur est de calculer le vecteur vitesse \mathbf{u} qui satisfait ces équations.

2.1.2 Simulation eulérienne

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Un solveur eulérien discrétise l'espace dans lequel vit le fluide.

Méthodes avec une grille de calcul : on cherche à satisfaire l'équation pour chaque maille de la grille.

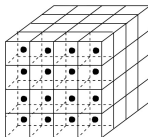


Figure: Stam99

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

6. Résultats
7. Conclusion

Un solveur lagrangien discrétise le *fluide* lui-même.

Méthodes SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

Le fluide est représenté par des particules lissées : on calcule la vitesse de chaque particule.

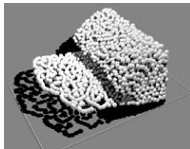


Figure: Wikipédia

2.1.4 Simulation en espace de vorticité

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
 volutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

La *vorticité* est une représentation duale de la vitesse.

Elle s'organise en *primitives* (anneaux, filaments) qui représentent le champ de vitesse de façon compacte.

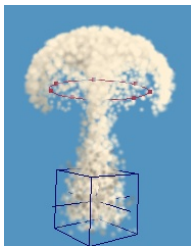


Figure: Neyret05

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

2. Etat de l'art

- 2.2 Simulation de nuages en graphisme

2.2.1 Méthodes sur grille

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Résolution de Navier-Stokes adapté au cas des nuages.

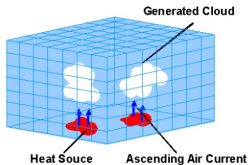


Figure: Dobashi02

Problèmes

Pas temps réel
Contrôle difficile
Peu scalable

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

6. Résultats
7. Conclusion

Utilisation d'imposteurs 2D.

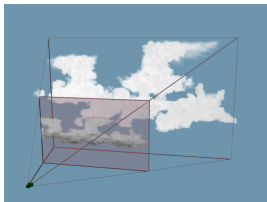


Figure: Microsoft Flight Simulator (2004)

Problèmes

Peu fidèle à la physique
Résultats pauvres/redondants

2.2.3 Méthodes procédurales

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Pas de simulation mais évaluation d'une fonction pseudo-aléatoire.



Figure: Flow noise (Perlin & Neyret 2001)

Problèmes

Impossible d'introduire des effets physiques complexes
Peu contrôlable

2.2.4 Simulation qualitative

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Approche multi-échelle/multi-phénomène.

Des heuristiques pour décrire chacun des phénomènes physiques séparément.

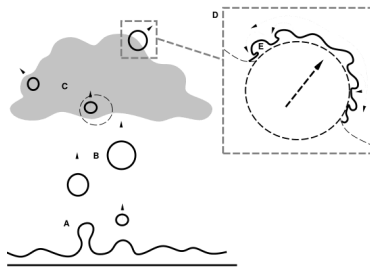


Figure: Description qualitative (Neyret 1997).

3. Physique des nuages convectifs

- 3.1 Le cumulus
- 3.2 Convection
- 3.3 Condensation
- 3.4 Mixing

3.1 Le cumulus

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Le cumulus est un nuage d'origine convective.





Fractus	Humilis	mediocris	Congestus
			

Table: Les différents stades de la vie du cumulus.

3.2 Convection

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Les *instabilités thermiques* sont à l'origine des phénomènes convectifs.

Une couche d'air chaud sous une couche d'air froid produit une *instabilité de Taylor-Rayleigh*.

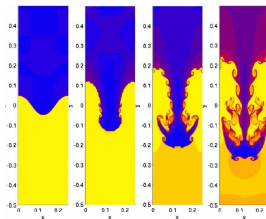


Figure: Instabilité de Taylor-Rayleigh.

La *température potentielle* est la température qu'aurait une parcelle d'air si elle était ramenée *adiabatiquement* au niveau de la mer.

Elle permet de calculer la force de *flottabilité* F exercée sur une particule p par l'atmosphère

$$F = g \frac{\theta_p - \theta_a}{\theta_a} \quad (3)$$

- θ_p est la température potentielle de la particule p .
- θ_a est la température potentielle de l'atmosphère.
- g est la valeur de l'accélération gravitationnelle.

3.2 Convection

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Le *profil thermique* de l'atmosphère décrit sa température en fonction de son altitude.

Un profil thermique instable est générateur de mouvement convectif.

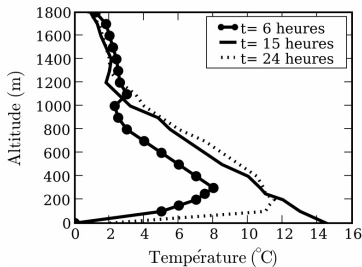


Figure: Profil thermique. Le réchauffement du soleil crée une instabilité près du sol.

Les mouvements convectifs s'organisent en *cellules de Bénard*.

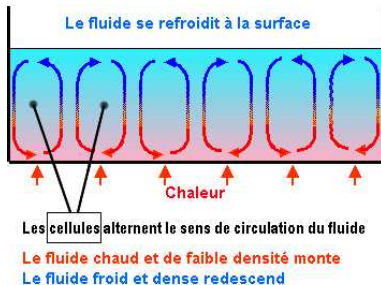


Figure: Cellules de Bénard.

3.3 Condensation

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Les instabilités font monter des *thermiques* chargées d'humidité.

L'eau qu'elles contiennent se condense lorsqu'elles atteignent le *point de rosée*.

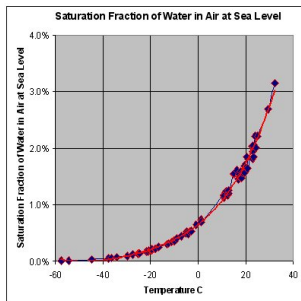


Figure: Le point de rosée dépend des conditions de pression et de température.

La condensation est le passage de la *phase gazeuse* vers la *phase liquide* de l'eau présente dans une thermique. Cette transformation libère de la *chaleur latente*.

$$E = Lm \quad (4)$$

- E est l'énergie libérée.
- L est le coefficient de chaleur latente de l'eau.
- m est la masse d'eau transformée.

Une thermique ascendante a tendance à se mélanger avec son environnement. Ce phénomène s'appelle le *mixing*.

Il a des conséquences importantes sur la mécanique du nuage :

- Réduction de la proportion d'eau dans la bulle → évaporation et absorption de chaleur.
- Source de turbulence.

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

4. Analyse du problème

4.1 Cahier des charges

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Nous cherchons à mettre au point un modèle de simulation :

Temps réel

Le calcul doit être assez léger pour tourner interactivement.

Scalable

Les modèle doit pouvoir générer des images avec un niveau de détail fin tout en gérant de grosses portions de paysage.

Intuitif

La paramétrisation de la simulation doit être simple et assez intuitive pour créer facilement des situations désirées.

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

6. Résultats
7. Conclusion

L'utilisation d'une grille ou d'une grille adaptative (*octree*) pour le stockage et les calculs.

Avantages

Accès direct aux données (Notion de voisinage).
Adaptativité facile à réaliser.

Inconvénients

Dissipation numérique.
Très coûteux pour le calcul.

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

6. Résultats
7. Conclusion

L'utilisation de particules pour le stockage et les calculs.

Avantages

Pas de dissipation numérique.

Le transport des quantités de matière est trivial.

Inconvénients

Nécessite la reconstruction des attributs physiques.

Adaptativité complexe.

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

5. Notre modèle

5.1 Présentation générale

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Notre modèle utilise

Des particules

Elles représentent les thermiques ascendantes. Elles gèrent les transformations thermodynamiques de l'eau qu'elles contiennent et le mixing avec l'environnement.

Un octree

L'octree sert de proxy pour reconstruire les attributs physiques. Les particules y sont *splattées*.

Des primitives de vorticité

Les attributs reconstruits dans l'octree paramétrisent des primitives de vorticité qui créent un champ de vitesse. Il permet de calculer le mouvement des particules.

5.1 Présentation générale

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

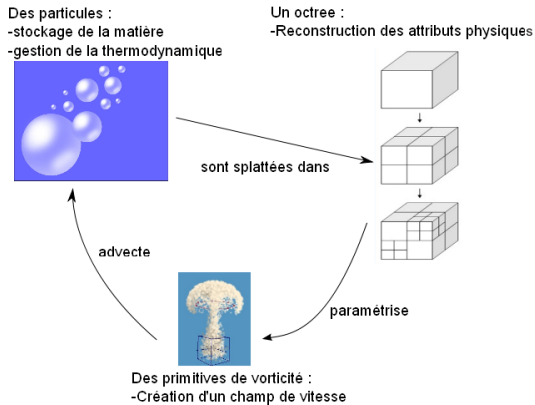


Figure: Notre modèle.

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

6. Résultats
7. Conclusion

Données

Quantités d'eau gazeuse et liquide.
Température potentielle.

Calculs

La thermodynamique en interne.
Le mixing en accédant aux valeurs de l'octree pour les attributs de l'environnement.
L'advection sur le champ de vitesse paramétré par l'octree.

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Données ponctuelles (reconstruites à chaque fois)

Quantités d'eau gazeuse et liquide.

Température potentielle.

Présence particulaire.

Calculs

Splatting des particules, construction multi-échelle des attributs physiques.

La flottabilité à chaque échelle.

Paramétrisation des anneaux de vorticité.

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

6. Résultats
7. Conclusion

On souhaite ne simuler à haute résolution que le visible. Notre modèle adapte sa résolution dans 3 cas de figure.

Zoom in

On s'approche d'une zone. Il faut augmenter la résolution.

Zoom out

On s'éloigne d'une zone. On peut baisser la résolution.

Rotation

On tourne la caméra qui dévoile une nouvelle zone. Il faut être capable de recréer rapidement de la haute résolution.

5.4 Adaptativité

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Notre modèle utilise les mécanismes suivants :

Rééchantillonnage

On se sert de l'octree pour créer de nouvelles particules à la résolution souhaitée.

Simulation rétroactive

Effectue quelques pas de calcul pour laisser la nouvelle échelle se placer dans un état stable.

Initialisation heuristique d'un pan de paysage

On utilise des heuristiques comme : le point de rosée, le profil atmosphérique, les cellules de Bénard, etc. pour initialiser une nouvelle zone de paysage.

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

6. Résultats

6.1 Implémentation de la physique

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Formation d'un cumulus

cumulus 3D sans rendu

cumulus 3D avec pseudo-rendu

cumulus 3D avec pseudo-rendu++

Mise en place des cellules de Bénard

Bénard 2D

Performances

A résolutions équivalentes (unité 20m sur domaine 10km²)

Nous : 7-8 fps simulation + rendu

Dobashi02 : 0.1-0.2 FPS simulation sans rendu

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

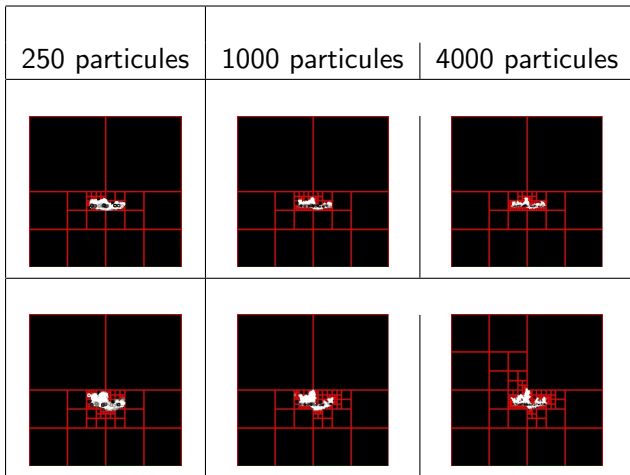


Table: La simulation produit les mêmes caractéristiques à différentes résolutions.

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

6. Résultats
7. Conclusion

Arg !

Utiliser l'octree comme proxy pour rééchantillonner

C'est vraiment une bonne idée ?

Non linéarité de certains phénomènes

L'approximation linéaire crée des inconsistances de dynamique sur différentes échelles.

Haute fréquence du profil thermique

Problème sous maille avec une résolution trop grossière (ex: inversion thermique).

7. Conclusion

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Physique des nuages convectifs

Cycle de vie du cumulus : OK

Organisation en cellules de Bénard : OK

Performances

1-2 ordres de grandeurs de différence avec les méthodes existantes.

Adaptativité

La simulation est incohérente à différentes résolutions.
→ besoin de descripteurs physiques non linéaires.

PFE – Simuler
un ciel
nuageux
évolutif

Eric Heitz

Partie I

1. Introduction
2. Etat de l'art
3. Physique des nuages convectifs

Partie II

4. Analyse du problème
5. Notre modèle

Partie III

6. Résultats
7. Conclusion

Merci pour votre attention :-)

Des questions ?