

Cyclogenesis: Simulating Hurricanes and Tornadoes

Jorge Alejandro Amador Herrera, Jonathan Klein, Daoming Liu (KAUST),
Wojtek Palubicki (Adam Mickiewicz University),
Soren Pirk (Christian-Albrechts-University (CAU)),
Dominik Michels (KAUST)

SIGGRAPH 2024

Alice Malosse – GDL – 26/02/2025

Introduction

La Cyclogénèse est la formation et le renforcement d'une zone de basse pression qui favorise la formation de cyclone tropical. Les cyclones sont des systèmes de tempête rotative qui se caractérisent par un centre de faible pression, une circulation fermée de bas niveau atmosphérique, et des vents forts.

Contribution :

- Un schéma basée physique qui prend en compte les turbulences microphysiques
- Un système d'équation fermer formulant l'effet de tourbillon
- Une dynamique d'émergence et de dissipation des phénomènes cyclonique

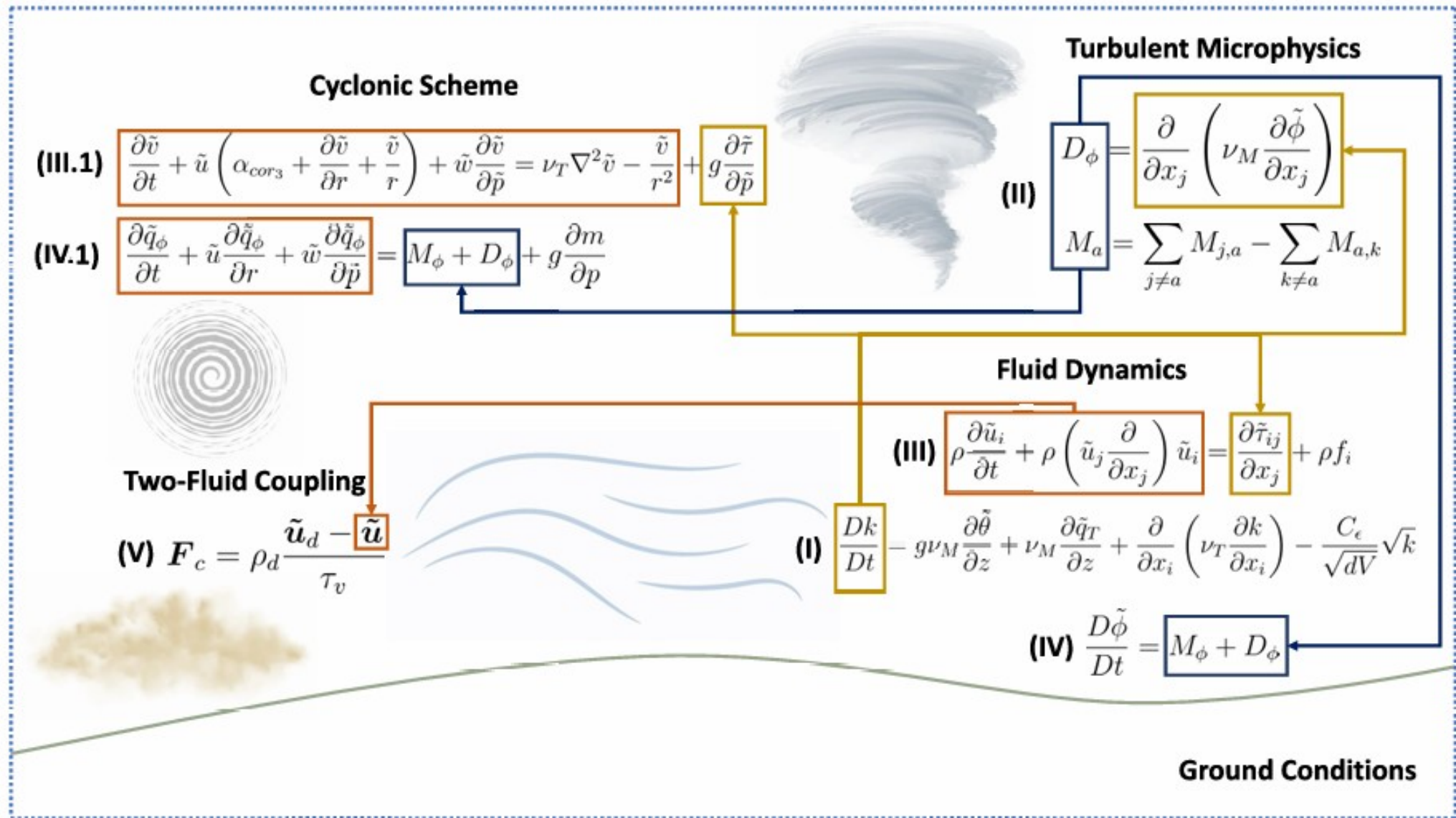


Compromis entre la complexité physique des modèles atmosphériques et l'interactivité

Related work

- Simulation de la météo
 - Simulation de nuages avec la mécanique des fluides, sans considération des turbulences ce qui ne permet pas de simuler un phénomène cyclonique.
- Phénomène tornadique
 - Premier modèle (2006) qui impose des conditions de rotations des vents aux frontières, donc très contraignant.
 - Deuxième modèle (2017) présente des résultats impressionnants : formation, évolution et décomposition en plusieurs vortex de la tornade. Mais un modèle utilisant un super-ordinateur et non-interactive.
- Modélisation des cyclones
 - Les échelles de modélisation sont trop petites pour simuler une tempête. Il existe des simulations de cumulonimbus mais pas de cluster de nuage qui pourrait évoluer vers une tempête.

Overview



Méthodologie : Equation de mouvement

La forme Reynolds-Average aux changements de Navier-Stokes peut être couplé aux changements de phases microphysique.

$u(x, t) = \tilde{u}(x) + u'(x, t)$ avec $\tilde{u}$ le terme moyen et u' le terme fluctuant

(III)

Moyenne du flux de mouvement

$$\rho \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \rho \left(\tilde{u}_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) \tilde{u}_i = \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\tilde{\tau}_{ij} = -\tilde{p}\delta_{ij} + 2\mu\tilde{S}_{ij} - \rho\tilde{u}'_i\tilde{u}'_j$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

Système d'équation ouvert

Tenseur de stress de Reynolds utilisant l'équation linéaire de viscosité du tourbillon de

Boussinesq₂

$$\overline{u'_i u'_j} = -2\nu_T \tilde{S}_{ij} + \frac{2}{3}k\delta_{ij},$$

Energie cinétique turbulente

(I)

$$\frac{Dk}{Dt} = g\nu_M \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} + \nu_M \frac{\partial \tilde{q}_T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_T \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \frac{C_\epsilon}{s_k} \sqrt{k}^3$$

Méthodologie : Turbulences Microphysiques

Système additionnel couplé aux équations de transport

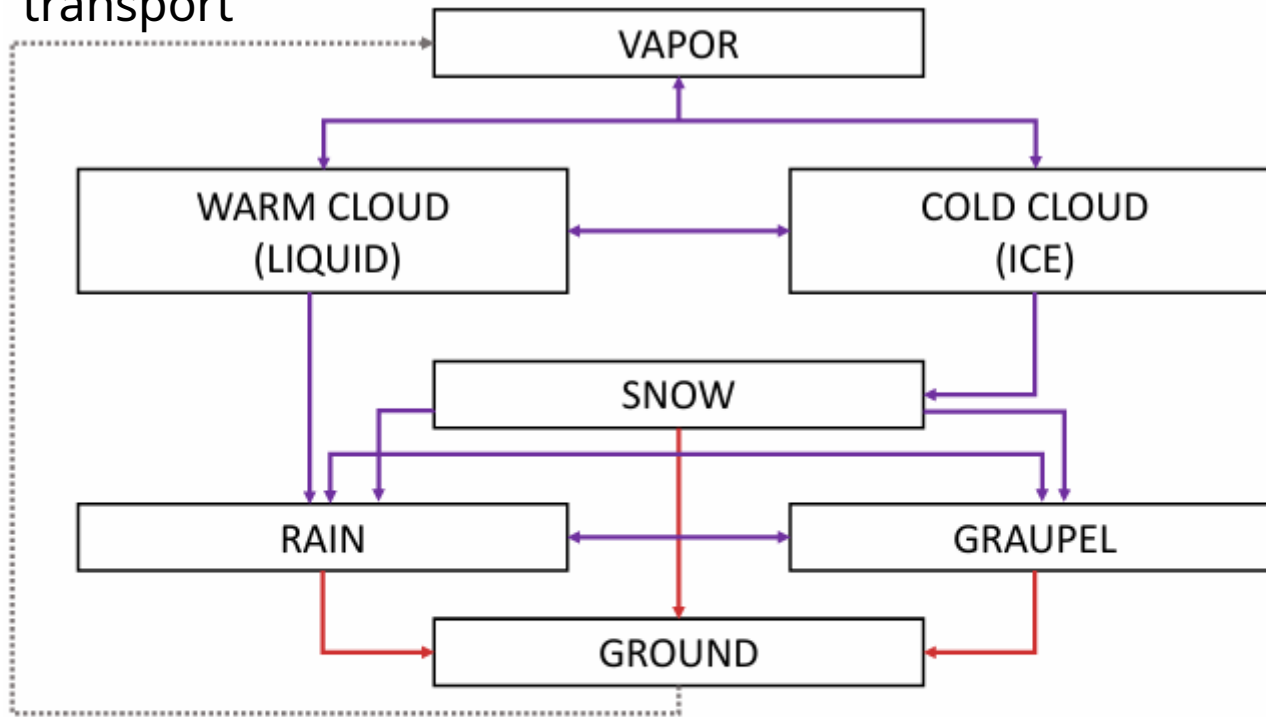


Fig. 4. Illustration of the turbulent microphysics model for the transport between different cloud and precipitation types. The scheme includes both microphysical matter transport M_ϕ as well as turbulence mixing D_ϕ per phase transition.

Paramétrisation microphysique

$$M_{a,b}(T, p, q_a, q_b) \text{ (a se transforme en b)}$$

Changement de phase d'un hydrométéore a :

$$(II) \quad M_a = \sum_{j \neq a} M_{j,a} - \sum_{k \neq a} M_{a,k}$$

Tourbillon (Eddy mixing) de la température et des hydrométéores :

$$(II) \quad D_\phi = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v_M \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x_j} \right)$$

Dynamique de la température et des hydrométéores :

$$(IV) \quad \frac{D\tilde{\phi}}{Dt} = M_\phi + D_\phi$$

Méthodologie : Paramétrisation Tornadique à deux fluides

Sachant que la poussière n'implique pas de changement microphysique

On utilise une équation RANS de moment nul :

$$\rho_{dust} \frac{D\widetilde{u}_{dust}}{Dt} = \nu_{dust} \nabla^2 \widetilde{u}_{dust} - \nabla \widetilde{p}_{dust} + \nabla \cdot \widetilde{\tau}_{dust} + F_{dust} + m_{dust} g$$

$$\nabla \cdot \widetilde{u}_{dust} = 0$$

F_{dust} se calcul avec une terme de couplage F_c entre l'air et la poussière

$$(V) \quad F_c = \rho_{dust} \frac{\widetilde{u}_{dust} - \widetilde{u}}{C_{dust}} \quad \text{avec} \quad C_{dust} = \frac{m_{dust}}{3\pi r_{dust} \nu_{dust}} \left(1 + \frac{Re}{60} + \frac{Re/4}{1 + \sqrt{Re}} \right)$$

Méthodologie : Schéma Cyclonique

A l'inverse des tornades, la première source d'énergie des cyclones est la chaleur latente. Dans ce sens le mouvement des tornades se base sur une circulation forcée conduite par la chaleur relâcher par convection.

On exprime donc la vitesse en coordonnées cylindriques.

Ce qui nous donne l'équation de RANS qui suit :

$$(III.1) \quad \frac{\partial \tilde{u}_{tan}}{\partial t} + \tilde{u}_{rad} \left(\alpha_{cor_3} + \frac{\partial \tilde{u}_{tan}}{\partial r} + \frac{\tilde{u}_{tan}}{r} \right) + \tilde{u}_{vert} \frac{\partial \tilde{u}_{tan}}{\partial \tilde{p}} = \nu_T \nabla^2 \tilde{u}_{tan} - \frac{\tilde{u}_{tan}}{r^2} + g \frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial \tilde{p}}$$

Et la dynamique de la température et des hydrométéores s'exprime :

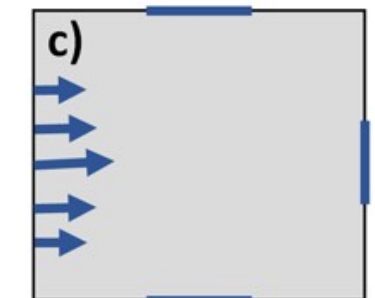
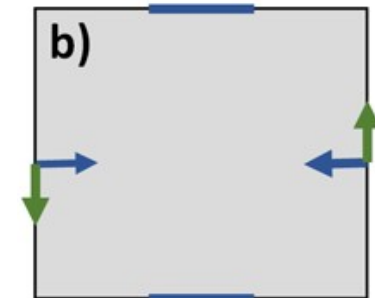
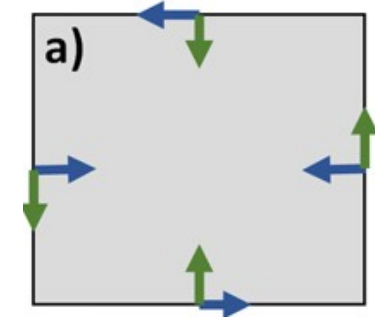
$$(IV.1) \quad \frac{\partial \tilde{q}_\phi}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{q}_\phi}{\partial r} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{q}_\phi}{\partial \tilde{p}} = M_\phi + D_\phi + g \frac{\partial m}{\partial p}$$

Mise en place

- Structure
 - Une grille de voxel stocke les données atmosphériques : vitesses sur les faces, énergie cinétique, ratio d'hydrométéores, température et vorticité au centre des voxels.
- Confinement de la vorticité
 - Permet de limité les effets de a dissipation numérique

Mise en place

- Dynamiques aux frontières
 - a) Conditions aux frontières utiliser dans les précédents modèles et qui implique un mouvement de rotation prédéfini aux frontières
 - b) Conditions utiliser sur le modèle et qui fonctionne sans prescription du mouvement de rotations aux frontières
 - c) Conditions aux frontières dynamiques avec entrée du vent par vague et qui fonctionne aussi sur le modèle



Résultats



Précédents travaux



Modèle présenté

Sans conditions de rotation aux frontières pas de vortex avec les anciennes méthodes

Résultats



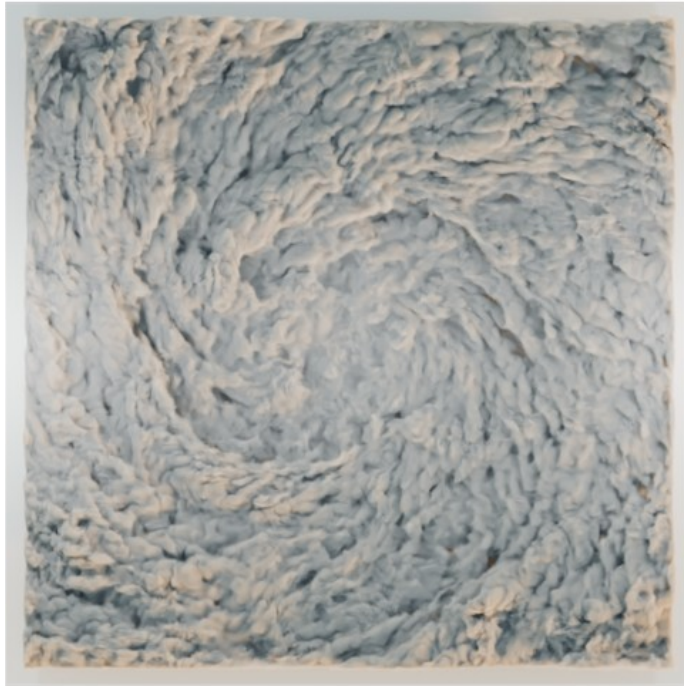
Précédents travaux



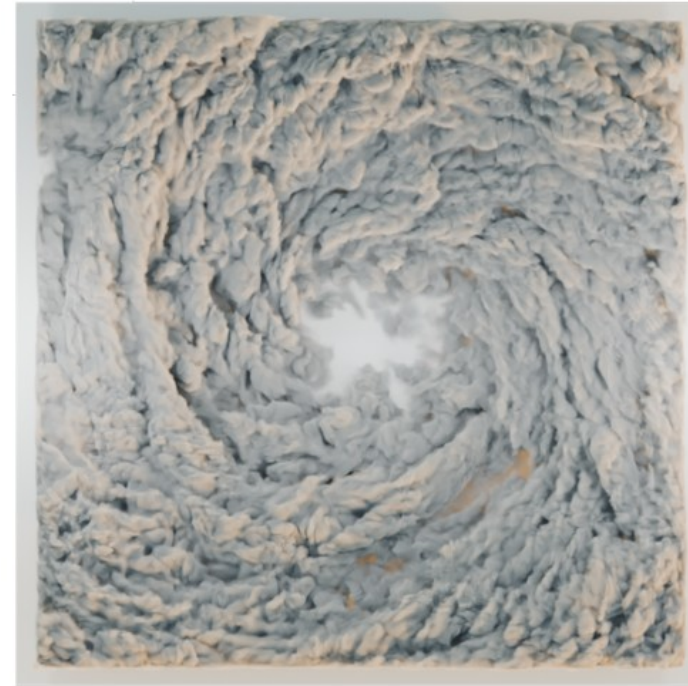
Modèle présenté

Les deux méthodes utilisent la formulation RANS, mais dans le deuxième cas le système d'équation est couplé avec les turbulences microphysique permettant d'avoir un système d'équation fermé

Résultats : Œil du cyclone



Précédents travaux



Modèle présenté

Reproduction de l'œil du cyclone

Résultats : Œil du cyclone

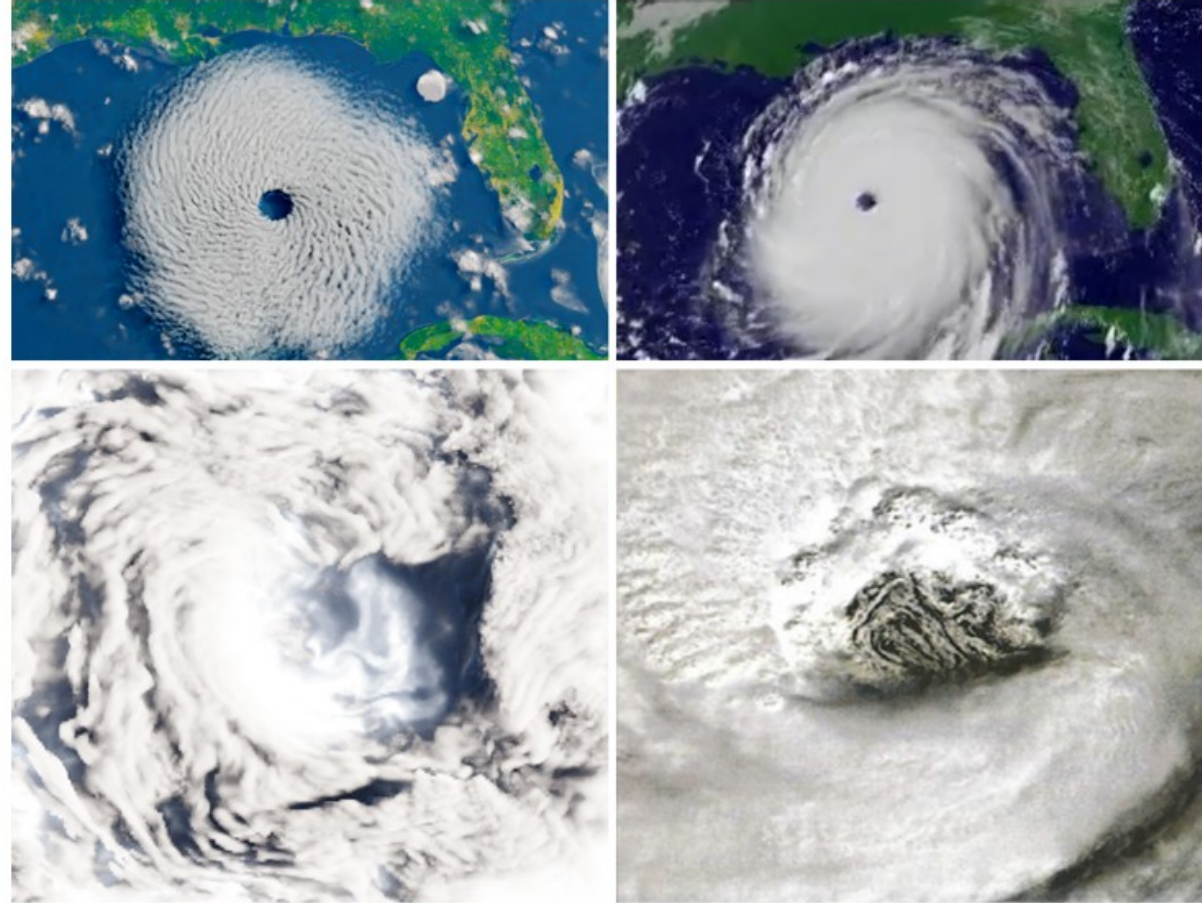
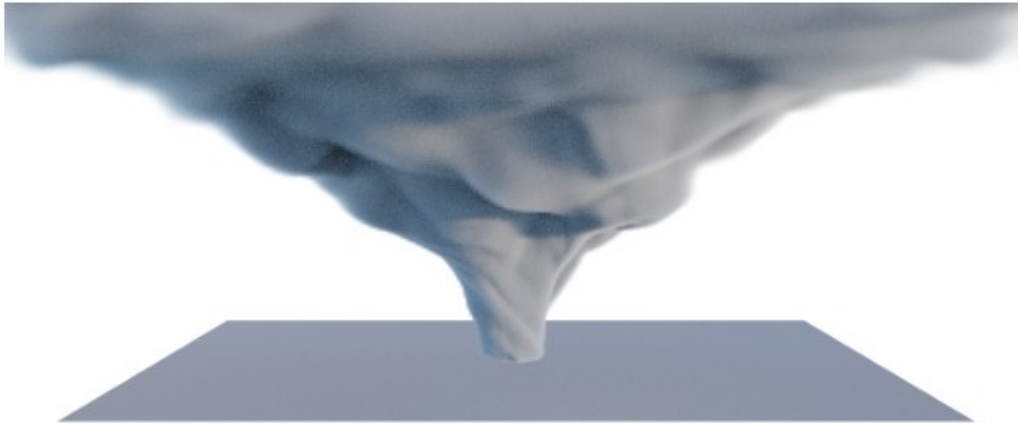


Fig. 20. Hurricane eye simulated using our hurricane module (left), and corresponding photo comparisons (right).

Résultats : Rendu



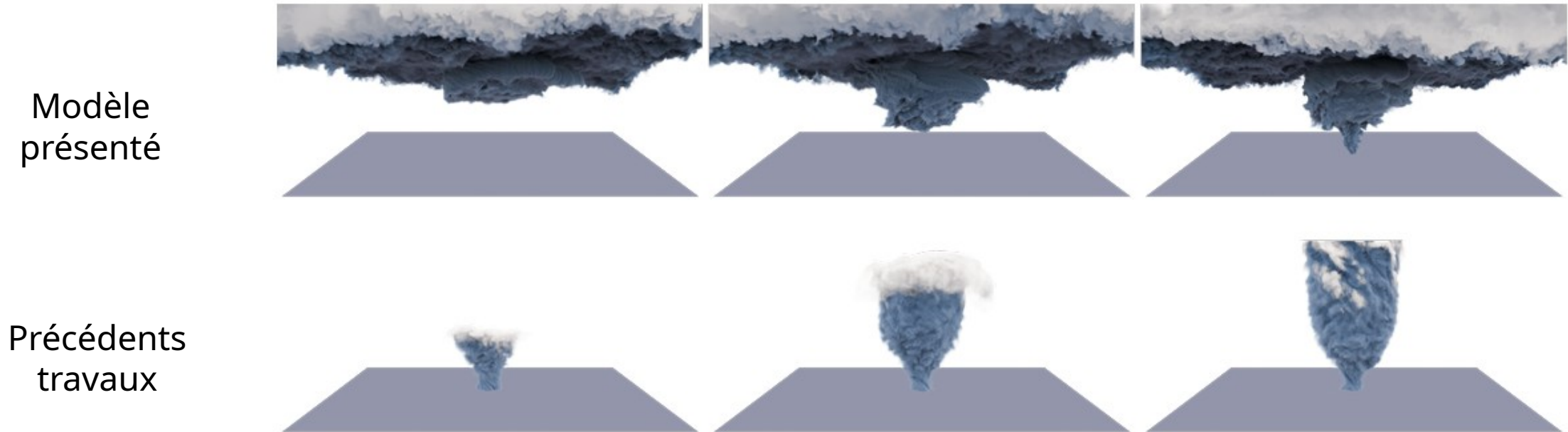
Précédents travaux



Modèle présenté

La simulation des turbulences permet aussi une amélioration du rendu

Résultats : Formation

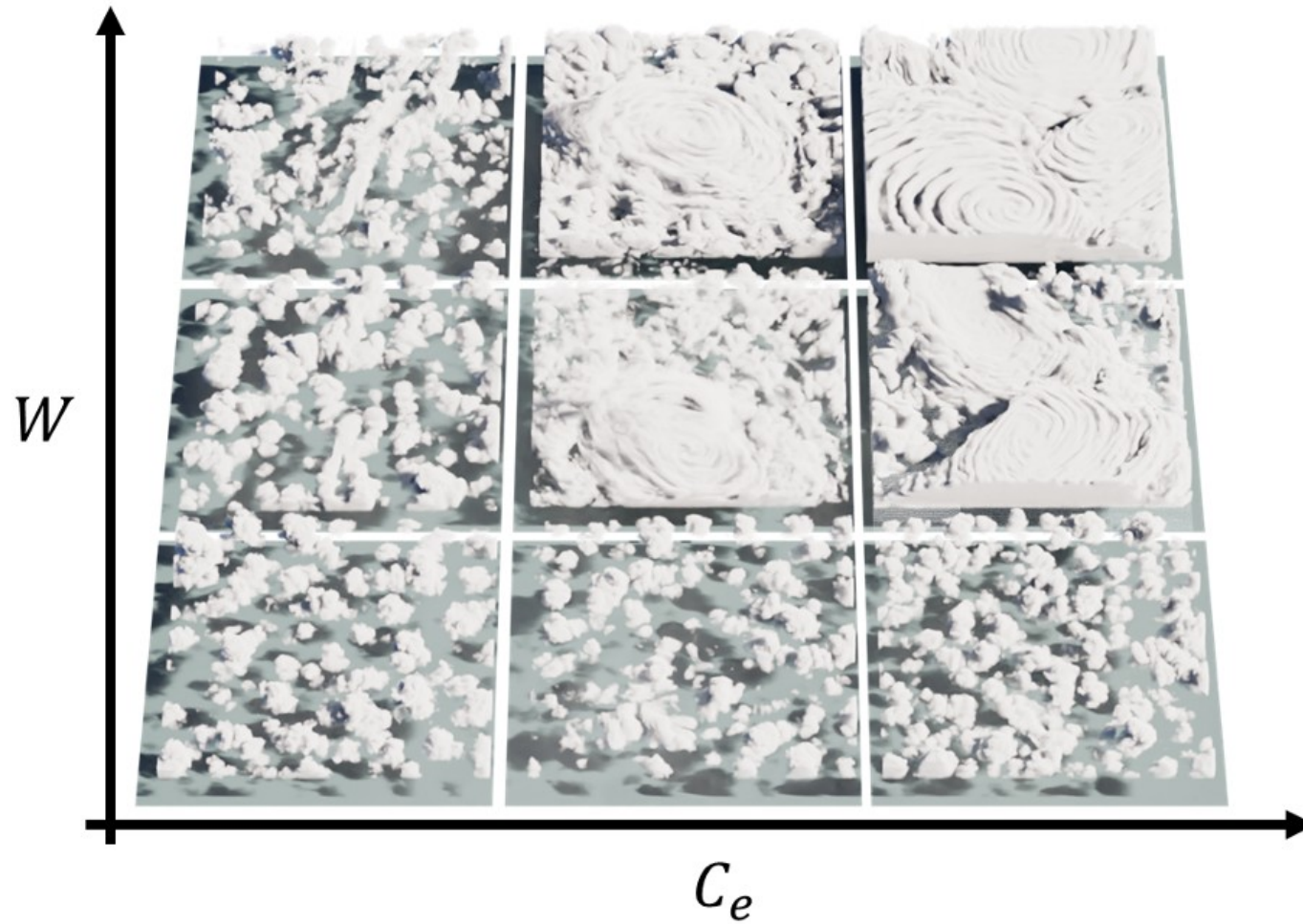


Reproduction des mouvements des nuages / poussière lors de la cyclogénèse.
Précédemment, les nuages étaient modélisés de bas en haut en suivant le sens des vents.
Le modèle présenté suit la direction de la condensation mais si les vents sont contraires.

Résultats : Formation et déclin



Résultats : Contrôle



Contrôle des vortex du cyclone

Résultats : Formes et Contrôle



Fig. 15. Variations of different types of tornadoes simulated using our framework (top) and corresponding photo comparisons (bottom): *Rope* (a), *funnel* (b, c), *wedge* (d, e), *bowl-shape* (f), *landspout* (g), *multi-vortex* (h).

Conclusion

[Computational Sciences Group — Project Page](#)