

# Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

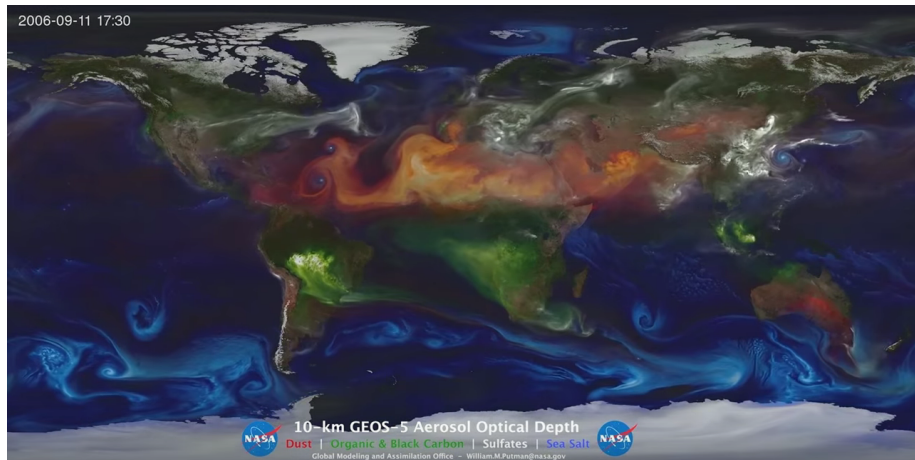
Thibault Hiron-Bédiée

14 juin 2022

# Parcours

- ▷ 2006–2009 : CPGE filière PCSI puis PSI/PSI\* ;
- ▷ 2009–2013 : Élève de l'ENS Cachan, département physique fondamentale :
  - 2011 : stage de recherche sur la glaciation homogène (nouvelle manip, KIT) ;
  - 2012 : préparation à l'agrégation, admissibilité ;
- ▷ 2012–2013 : master recherche en physique de l'atmosphère (UCA) ;
  - 2013 : stage de recherche, modélisation impact de bactéries sur un nuage ;
- ▷ 2013–2017 : doctorat en sciences de l'atmosphère sur les phénomènes de glaciation dans les nuages (KIT/UCA) ;
  - mission enseignement, UFR ST, département de physique ;
- ▷ 2018–2020 : post-doctorat, modélisation de l'évolution des isotopes stables de l'eau dans un nuage (UCA) ;
  - vacances à l'IUT d'Allier, département GTE ;
- ▷ 2020–2021 : enseignant contractuel, académies de Rennes puis de Nantes ;
- ▷ 2021–2022 : préparation à l'agrégation externe spéciale, univ. Rennes 1.

Petites particules (10 nm–10  $\mu$ m) en suspension dans l'atmosphère.

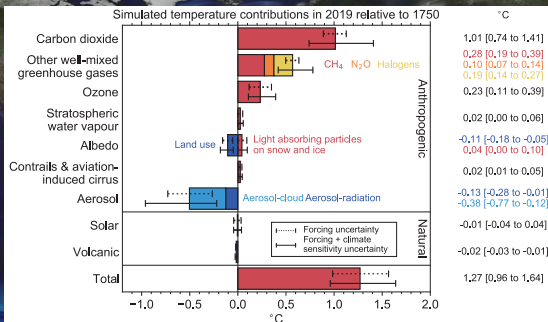


Répartition globale des particules d'aérosols à 10 km d'altitude.

Differentes natures : Soluble/insoluble, hydrophile/hydrophobique, lisse/rugueux, ...

Petites particules (10 nm–10 µm) en suspension dans l'atmosphère.

2006-09-11 17:30



10-km GEOS-5 Aerosol Optical Depth

Dust | Organic & Black Carbon | Sulfates | Sea Salt

Global Modeling and Assimilation Office - William.M.Putman@nasa.gov



Répartition globale des particules d'aérosols à 10 km d'altitude.

Differentes natures : Soluble/insoluble, hydrophile/hydrophobique, lisse/rugueux, ...

## Formation des nuages

Les nuages contiennent des gouttes d'eau et des cristaux de glace (hydrometeores)

La vapeur d'eau a besoin de particules d'aérosols (AP) pour former des hydrométéores

## Formation des nuages

Les nuages contiennent des gouttes d'eau et des cristaux de glace (hydrometeores)

La vapeur d'eau a besoin de particules d'aérosols (AP) pour former des hydrométéores

## Rôle des aérosols dans la formation des nuages

Deux moyens d'action pour les particules d'aérosols :

servir de base pour la formation de gouttes

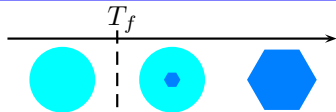
⇒ noyaux de condensation (CCN) ;

servir de base de développement des cristaux de glace

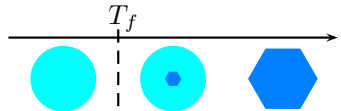
⇒ noyaux de congélation (IN).

Le rôle de CCN est assez bien compris, mais pas celui d'IN :  
Impact majeur de la glace sur le cycle de vie des nuages et sur les précipitations.

À basse températures, l'eau des gouttes change de phase : c'est la nucléation de la glace.



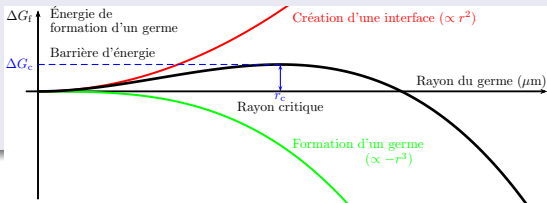
À basse températures, l'eau des gouttes change de phase : c'est la nucléation de la glace.



### Nucléation de la glace $\Rightarrow$ Changement de phase :

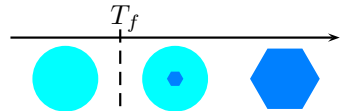
Réorganisation des molécules en un cristal (formation d'un germe et création d'une interface) ;

Croissance du germe.





À basse températures, l'eau des gouttes change de phase : c'est la nucléation de la glace.



### Nucléation de la glace $\Rightarrow$ Changement de phase :

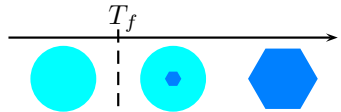
Réorganisation des molécules en un cristal (formation d'un germe et création d'une interface) ;

Croissance du germe.

Ceci résulte en une barrière d'énergie  $\Rightarrow$  état métastable de l'eau sous  $0^\circ\text{C}$ .  
Les gouttes d'eau pure gèlent généralement pour des températures inférieures à  $-36^\circ\text{C}$

$\Rightarrow$  **Nucléation homogène de la glace.**

À basse températures, l'eau des gouttes change de phase : c'est la nucléation de la glace.



Nucléation de la glace  $\Rightarrow$  Changement de phase :

Réorganisation des molécules en un cristal (formation d'un germe et création d'une interface) ;

Croissance du germe.

Ceci résulte en une barrière d'énergie  $\Rightarrow$  état métastable de l'eau sous  $0^\circ\text{C}$ .  
Les gouttes d'eau pure gèlent généralement pour des températures inférieures à  $-36^\circ\text{C}$

$\Rightarrow$  **Nucléation homogène de la glace.**

Dans l'atmosphère, la nucléation de la glace est observée à des températures jusqu'à  $-5^\circ\text{C}$

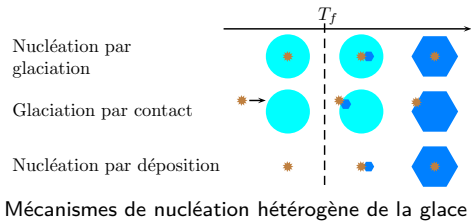
$\Rightarrow$  la nucléation homogène ne peut pas expliquer ces températures élevées !

Cristaux de glace observés à “hautes” températures

⇒ abaissement de la barrière d'énergie.

Les particules d'aérosol insolubles peuvent réduire l'énergie de formation du germe de rayon critique.

⇒ **Nucléation hétérogène**



Cristaux de glace observés à “hautes” températures

⇒ abaissement de la barrière d'énergie.

Les particules d'aérosol insolubles peuvent réduire l'énergie de formation du germe de rayon critique.

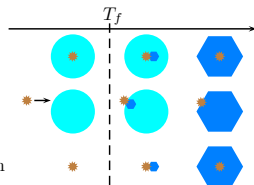
⇒ **Nucléation hétérogène**

Nucléation par glaciation

Glaciation par contact

Nucléation par déposition

Mécanismes de nucléation hétérogène de la glace



## Noyaux de congélation

Particules d'aérosol capables d'abaisser l'énergie de formation d'un germe critique.

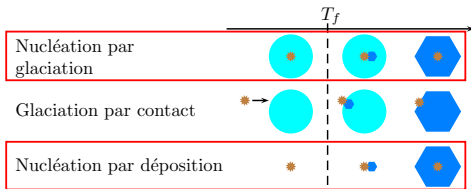
⇒ présence à la surface de **sites actifs**, sites préférentiels de nucléation de la glace.

Cristaux de glace observés à “hautes” températures

⇒ abaissement de la barrière d'énergie.

Les particules d'aérosol insolubles peuvent réduire l'énergie de formation du germe de rayon critique.

⇒ **Nucléation hétérogène**



Mécanismes de nucléation hétérogène de la glace

## Noyaux de congélation

Particules d'aérosol capables d'abaisser l'énergie de formation d'un germe critique.

⇒ présence à la surface de **sites actifs**, sites préférentiels de nucléation de la glace.

Quantifier le rôle des particules d'aérosol minérales sur la formation de la glace et de la pluie

## Quantifier le rôle des particules d'aérosol minérales sur la formation de la glace et de la pluie

Deux méthodes différentes avec des questions spécifiques : méthode expérimentale et modélisation.

### Étude expérimentale : Cold Stage, IMK-AAF (Allemagne)

Pour les particules minérales, le fait d'être un bon noyau de congélation par immersion implique-t-il une bonne capacité à nucléer la glace par déposition ?

### Étude de modélisation : DESCAM, LaMP (Clermont-Ferrand)

Quel est l'impact des différents mécanismes de nucléation de la glace, impliquant des particules minérales, sur le développement d'un nuage convectif ?

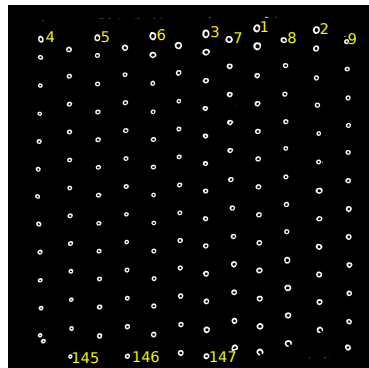
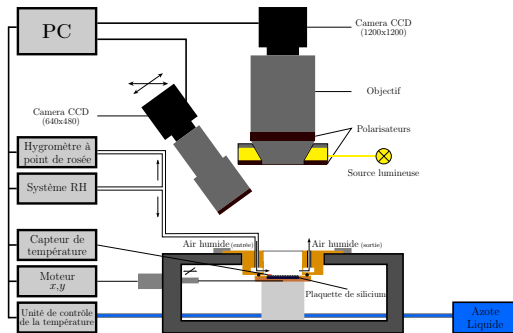
## Quantifier le rôle des particules d'aérosol minérales sur la formation de la glace et de la pluie

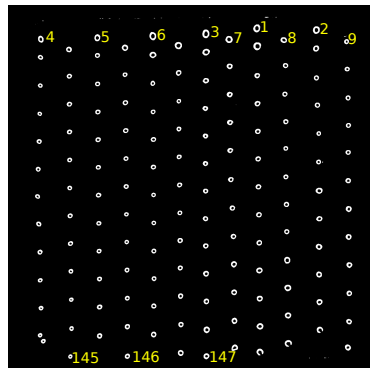
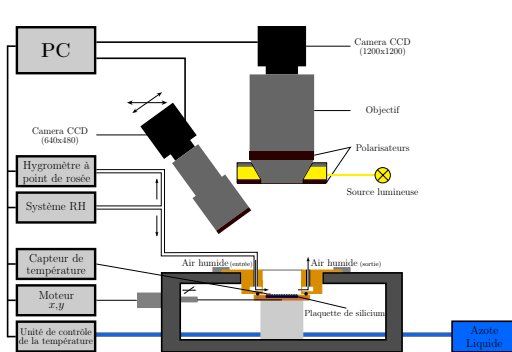
Deux méthodes différentes avec des questions spécifiques : méthode expérimentale et modélisation.

### Étude expérimentale : Cold Stage, IMK-AAF (Allemagne)

Pour les particules minérales, le fait d'être un bon noyau de congélation par immersion implique-t-il une bonne capacité à nucléer la glace par déposition ?

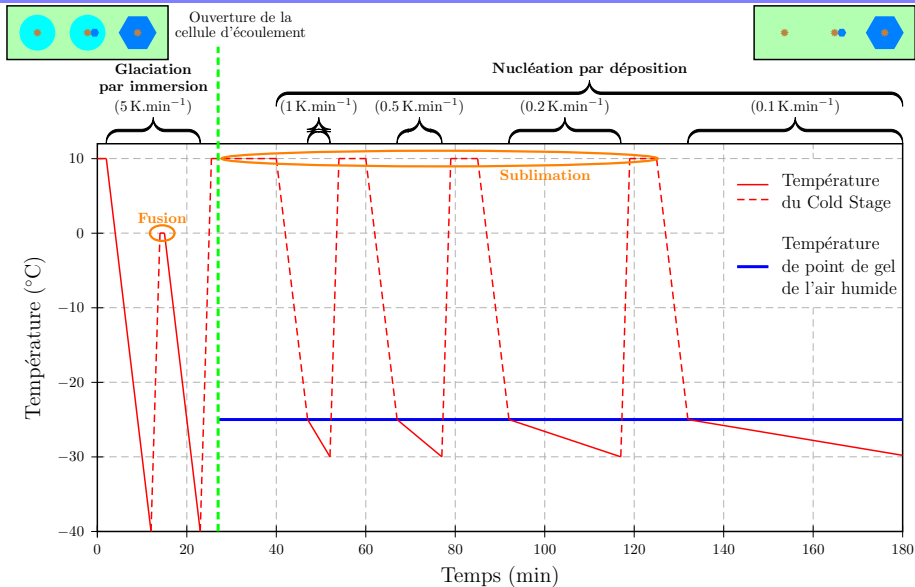


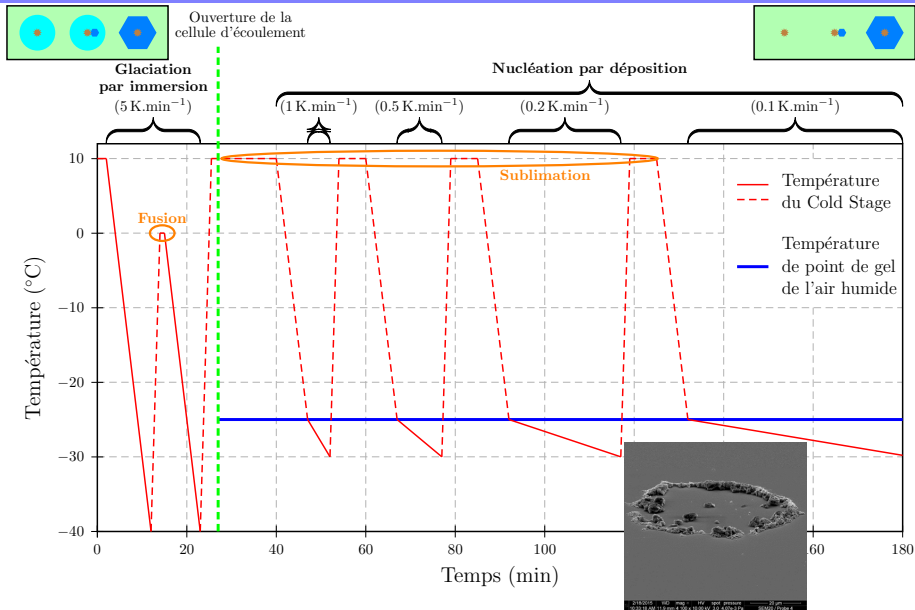




Suspension	A	B	C
Concentration ( $\text{g L}^{-1}$ )	$2,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-3}$
	$C_0$	$C_0/10$	$C_0/100$

Identification individuelle des gouttes





### Nombre de sites de nucléation

- A** et **B** : plusieurs site de nucléation par résidus (gauche et centre) ;
- C** : un seul site de nucléation par résidus (droite).

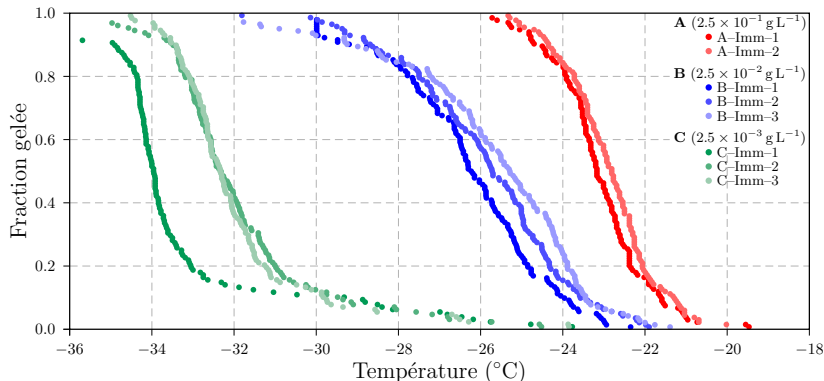
Cristaux formés sur les particules résiduelles des suspensions **A**, **B** et **C**

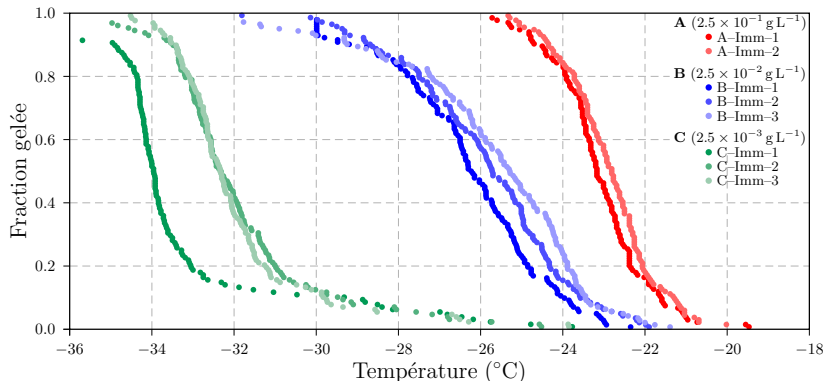
## Nombre de sites de nucléation

- A** et **B** : plusieurs site de nucléation par résidus (gauche et centre) ;
- C** : un seul site de nucléation par résidus (droite).

Cristaux formés sur les particules résiduelles des suspensions **A**, **B** et **C**

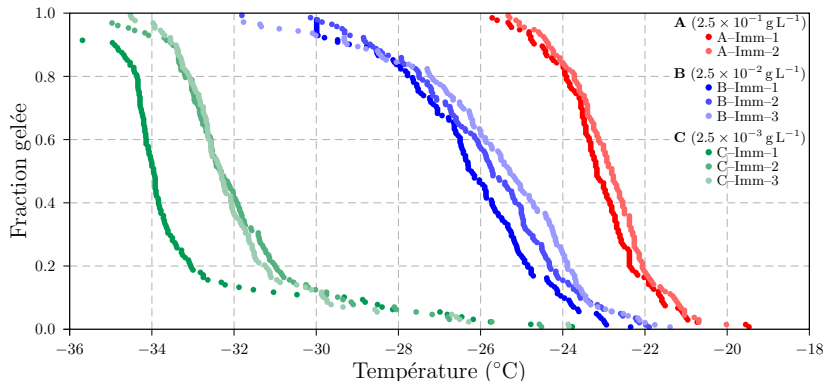
La relation entre la glaciation par immersion et la nucléation par déposition peut être obtenue à partir de l'expérience avec la suspension **C**.





Lien entre activité IN en glaciation par immersion et en nucléation par déposition ou préactivation des sites actifs ?





Lien entre activité IN en glaciation par immersion et en nucléation par déposition ou ~~préactivation des sites actifs.~~

Quantifier le rôle des particules d'aérosol minérales sur la formation de la glace et de la pluie

Deux méthodes différentes avec des questions spécifiques : méthode expérimentale et modélisation.

## Étude expérimentale : Cold Stage, IMK-AAF

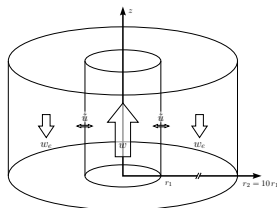
Pour les particules minérales, le fait d'être un bon noyau de congélation par immersion implique-t-il une bonne capacité à nucléer la glace par déposition ?

Quantifier le rôle des particules d'aérosol minérales sur la formation de la glace et de la pluie

Deux méthodes différentes avec des questions spécifiques : méthode expérimentale et modélisation.

Étude de modélisation : DESCAM, LaMP

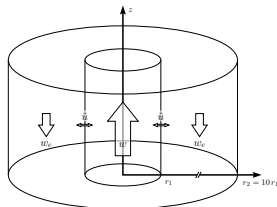
Quel est l'impact des différents mécanismes de nucléation de la glace, impliquant des particules minérales, sur le développement d'un nuage convectif ?



## Module dynamique

Modèle cylindrique à 1D5  
(Asai and Kasahara, 1967)

Initialisation dynamique à partir d'un orage  
très documenté (CCOPE)



## Module dynamique

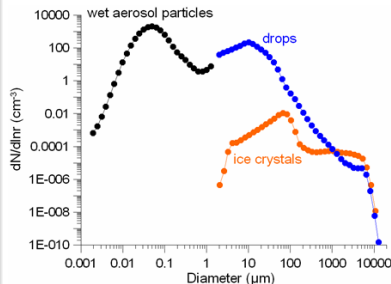
Modèle cylindrique à 1D5  
(Asai and Kasahara, 1967)

Initialisation dynamique à partir d'un orage très documenté (CCOPE)

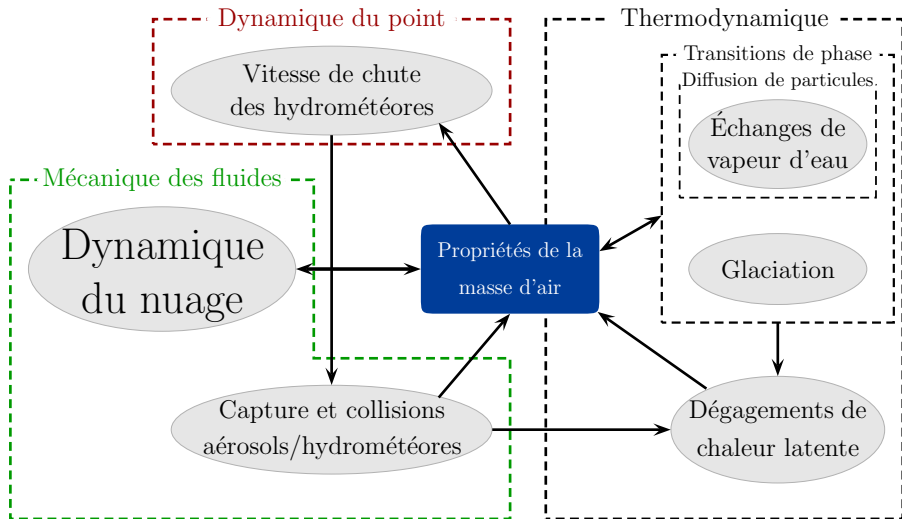
## Module microphysique

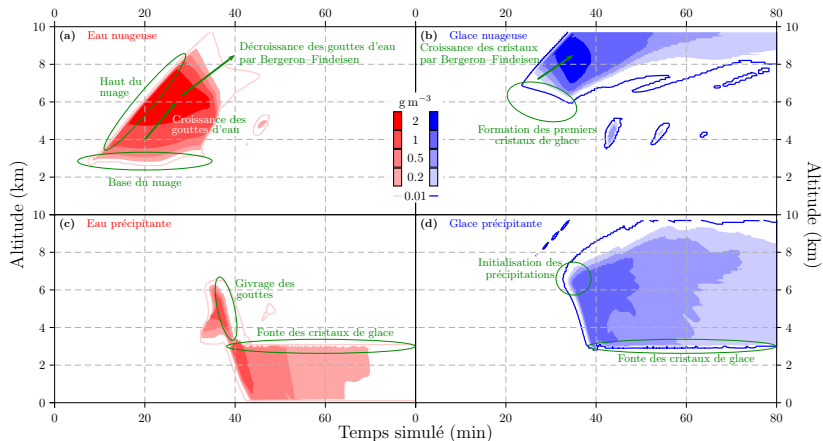
On suit le spectre en taille explicite en :

- nombre de particules d'aérosol,
- gouttes d'eau et cristaux de glace ;
- nombre, surface et masse totales de particules d'aérosol dans chacune des catégories ;
- 5 populations d'aérosol différents (fond & **different minéraux**)



Distributions en taille dans DESCAM





## Conclusion

La rétroaction microphysique  $\leftrightarrow$  dynamique donne une importance majeure à l'activité glaçogène à haute température dans un nuage convectif.

## Dynamique d'une parcelle d'air

Construction par étapes du mouvement d'une parcelle d'air :

- ▷ évolution adiabatique de l'atmosphère sec ;
- ▷ création du profil de pression ;
- ▷ modification du gradient de température ;
- ▷ application de la dynamique des fluides à une parcelle d'air sec ;
- ▷ définition des pressions de vapeur saturantes, parcelle humide ;
- ▷ ajout de la condensation et du dégagement de chaleur latente ;
- ▷ évaporation : première approche des enjeux de la modélisation.

## Enjeux de la modélisation

Plusieurs des étapes évoquées montrent la difficulté de modéliser un système complexe : instabilités, besoin de données expérimentales, compromis, ...





