

Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

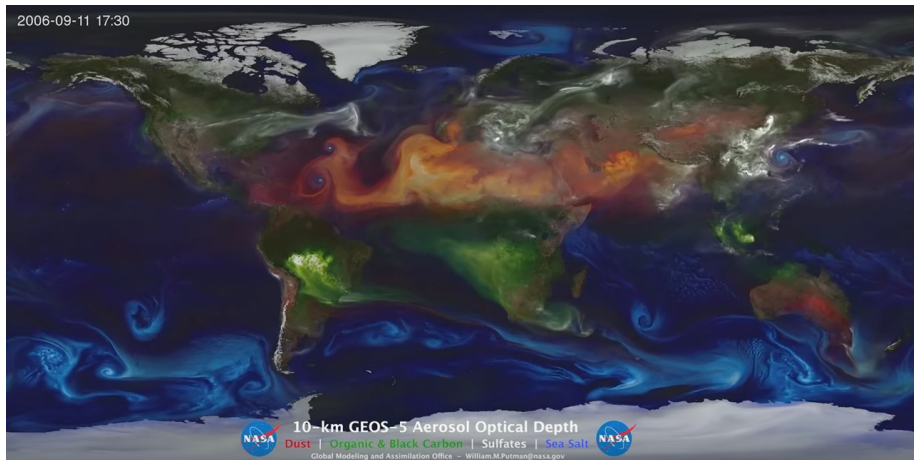
Thibault Hiron-Bédiée

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) ;
 - vacations 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 μ m) en suspension dans l'atmosphère.

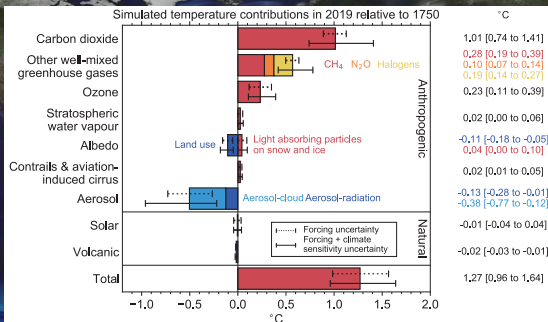


Répartition globale des particules d'aérosols à 10 km d'altitude.

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

Formation des nuages

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

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

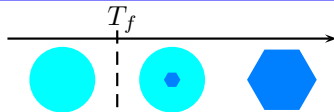
⇒ noyaux de condensation (CCN) ;

servir de base de développement des cristaux de glace

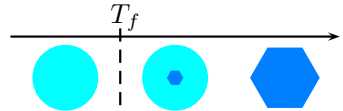
⇒ noyaux de congélation (IN).

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 basses températures, formation de cristaux de glace : nucléation.



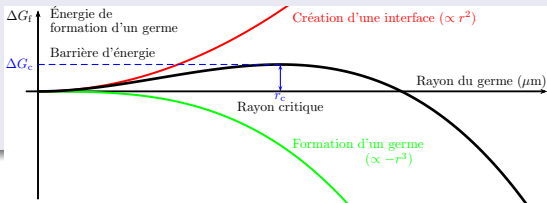
À basses températures, formation de cristaux de glace : nucléation.



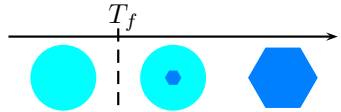
Nucléation de la glace \Rightarrow Changement de phase :

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

Croissance du germe.



À basses températures, formation de cristaux de glace : nucléation.



Nucléation de la glace \Rightarrow Changement de phase :

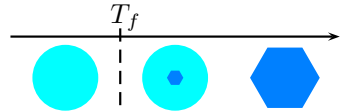
Réorganisation des molécules en un cristal (formation d'un germe et création d'une interface) ;

Croissance du germe.

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

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

À basses températures, formation de cristaux de glace : nucléation.



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°C .
Les gouttes d'eau pure gèlent généralement pour des températures inférieures à -36°C

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

Dans l'atmosphère, la nucléation de la glace est observée à des températures jusqu'à -5°C

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

Cristaux de glace observés à “hautes” températures \Rightarrow abaissement de la barrière d'énergie.

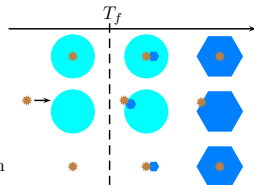
Les particules d'aérosol insolubles peuvent réduire l'énergie de formation du germe de rayon critique.

\Rightarrow **Nucléation hétérogène**

Nucléation par
glaciation

Glaciation par contact

Nucléation par déposition



Cristaux de glace observés à “hautes” températures \Rightarrow abaissement de la barrière d'énergie.

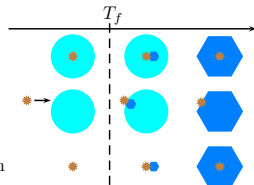
Les particules d'aérosol insolubles peuvent réduire l'énergie de formation du germe de rayon critique.

\Rightarrow **Nucléation hétérogène**

Nucléation par
glaciation

Glaciation par contact

Nucléation par dépôt



Noyaux de congélation

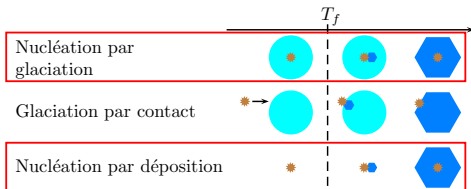
Particules d'aérosol capables d'abaisser l'énergie de formation d'un germe critique.

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

Cristaux de glace observés à “hautes” températures \Rightarrow abaissement de la barrière d'énergie.

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

\Rightarrow **Nucléation hétérogène**



Noyaux de congélation

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

\Rightarrow 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)

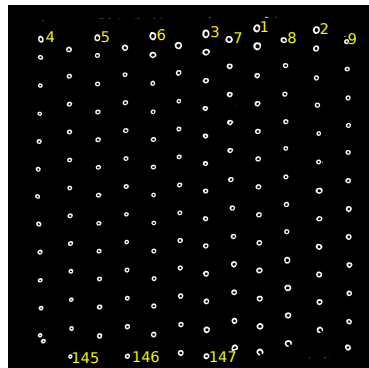
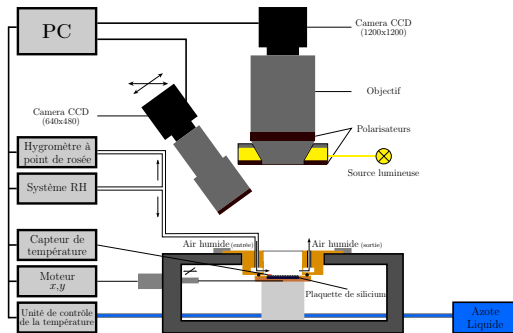
Quel est l'impact des différents mécanismes de nucléation de la glace, impliquant des particules minérales, sur le développement d'un nuage convectif ?

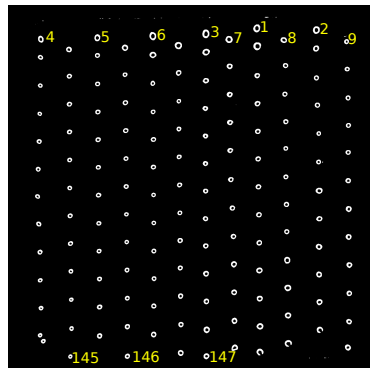
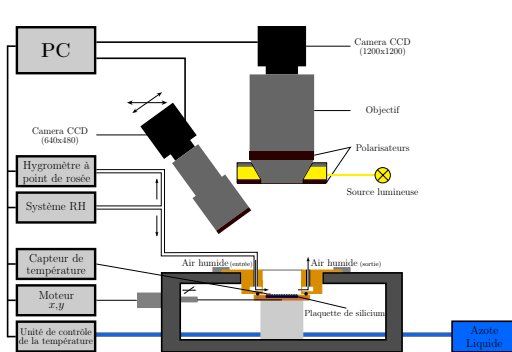
Quantifier le rôle des particules d'aérosol minérales sur la formation de la glace et de la pluie

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

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

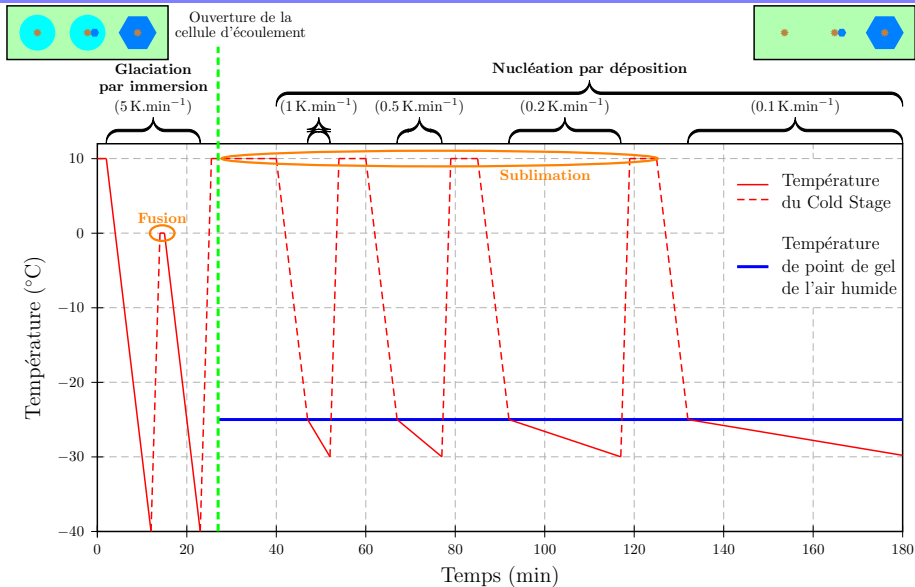
Pour les particules minérales, le fait d'être un bon noyau de congélation par immersion implique-t-il une bonne capacité à nucléer la glace par déposition ?

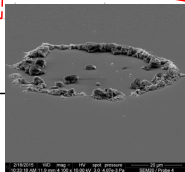




Suspension	A	B	C
Concentration (g L^{-1})	$2,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-3}$
	C_0	$C_0/10$	$C_0/100$

Identification individuelle des gouttes





Nombre de sites de nucléation

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

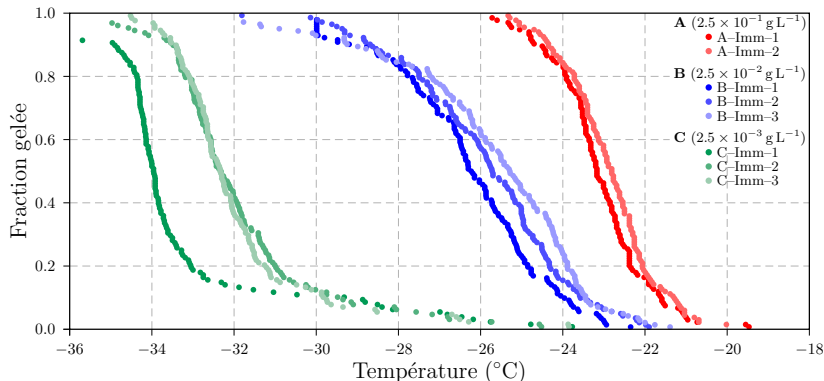
Cristaux formés sur les particules résiduelles des suspensions **A**, **B** et **C**

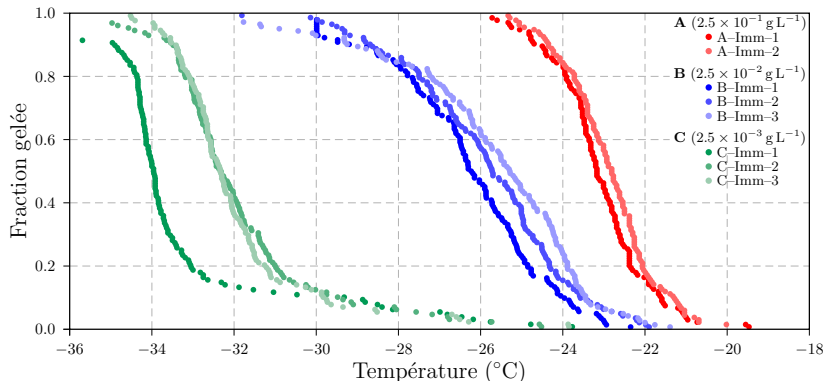
Nombre de sites de nucléation

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

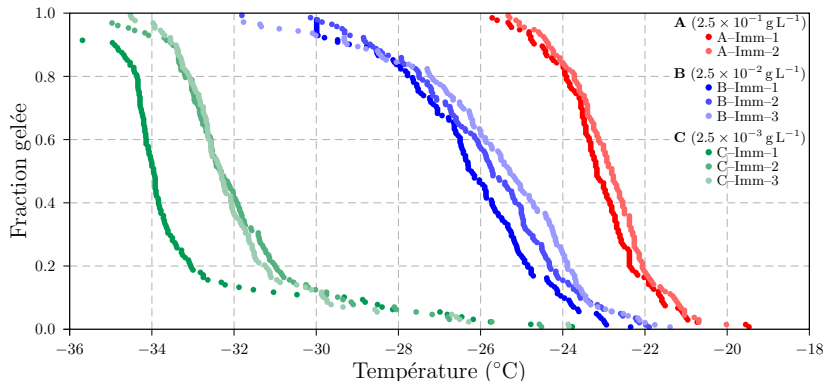
Cristaux formés sur les particules résiduelles des suspensions **A**, **B** et **C**

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

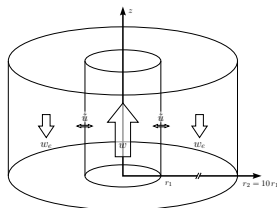
Pour les particules minérales, le fait d'être un bon noyau de congélation par immersion implique-t-il une bonne capacité à nucléer la glace par déposition ?

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

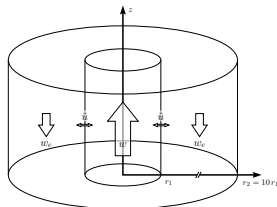
Quel est l'impact des différents mécanismes de nucléation de la glace, impliquant des particules minérales, sur le développement d'un nuage convectif ?



Module dynamique

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

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



Module dynamique

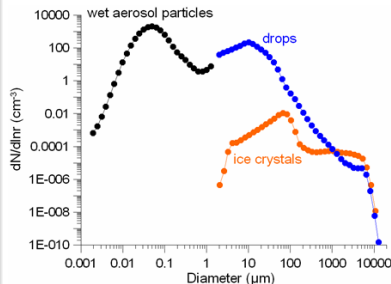
Modèle cylindrique à 1D5
(Asai and Kasahara, 1967)

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

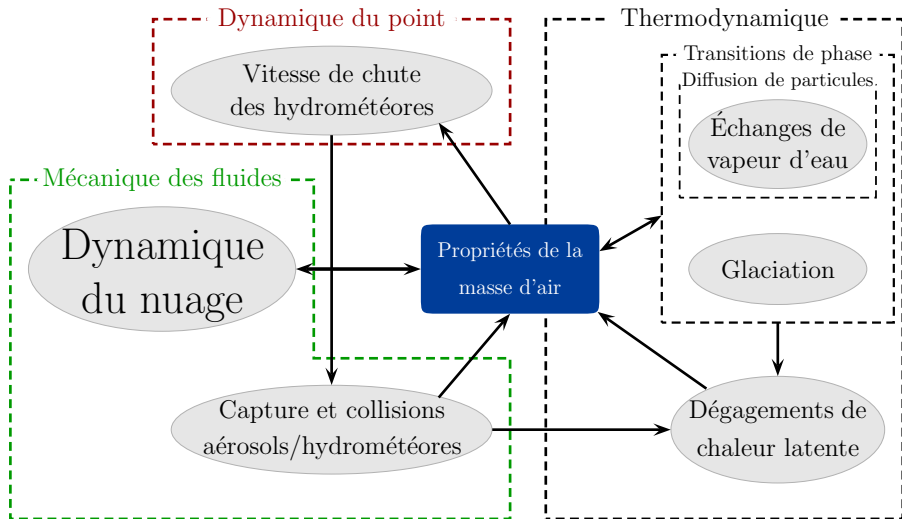
Module microphysique

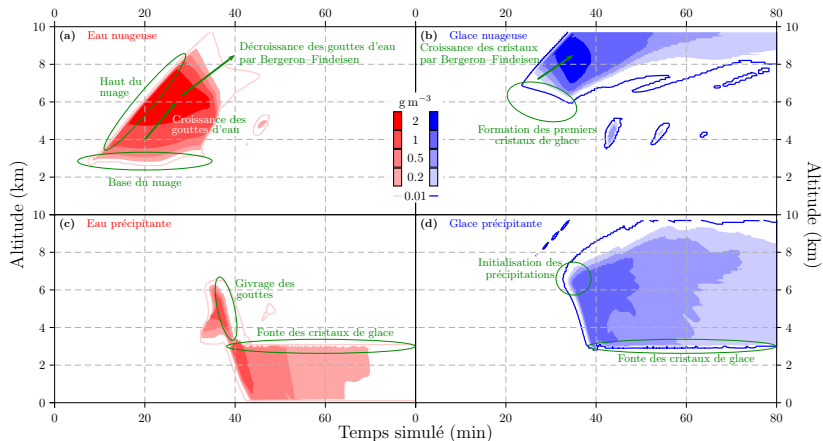
On suit le spectre en taille explicite en :

- 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'aérosols différents (fond & **différents 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 sèche ;
- ▷ 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, ...

