

# Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

---

Thibault HIRON–BÉDIÉE

Session 2022

## 1 Parcours

Après un baccalauréat scientifique (option SVT) obtenu en 2006, mon parcours post-bac a débuté au lycée Montesquieu du Mans en CPGE en section PCSI–PSI. Suite aux concours de 2008, où je n'étais admis qu'à la banque CCP, j'ai effectué une année de 5/2 au lycée Chateaubriand de Rennes à la recherche d'un autre environnement pour préparer les concours X–ENS et TPE/EIVP qui contenaient les écoles que je souhaitais intégrer. J'ai été admis aux deux concours lors de la session 2009.

J'ai alors intégré l'École Normale Supérieure (ENS) de Cachan dans le département de physique fondamentale. Lors du master 1 (2011), j'ai choisi comme option au premier semestre la physique de l'atmosphère et du climat, ce qui m'a conduit à effectuer mon stage de recherche à l'étranger à l'Institut de Météorologie et du Climat (IMK) de l'Institut de Technologie de Karlsruhe (KIT) en Allemagne, pays où j'avais déjà vécu pendant un an entre la seconde et la première.

Ma troisième année à l'ENS Cachan, j'ai présenté et ai été admissible au concours externe de l'agrégation, session 2012.

Lors de ma dernière année d'école, j'ai choisi un master 2 lié au Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP) de l'Université Clermont Auvergne (UCA, UBP à l'époque) de façon à poursuivre mon parcours dans la recherche en physique des nuages.

Dans le prolongement des stages de M1 et de M2, j'ai effectué entre octobre 2013 et septembre 2017 une thèse en sciences de l'atmosphère en cotutelle internationale dans les deux laboratoires m'ayant précédemment accueilli. J'ai enfin conclu mon parcours de recherche par deux ans de post-doc au LaMP.

Au cours de ces six années, j'ai demandé à enseigner à l'UCA, d'abord dans le cadre d'une mission d'enseignement lors de ma thèse puis en tant que contractuel lors de mon post-doc.

À la suite de ces années dans le domaine académique, j'ai souhaité me tourner exclusivement et de façon pérenne vers l'enseignement. J'ai alors profité d'un déménagement en Bretagne pour amorcer cette réorientation et effectuer deux remplacements en tant que contractuel pour les académies de Rennes et de Nantes d'octobre 2020 à juillet 2021.

Ces expériences ont confirmé mon intérêt pour l'enseignement et mon envie de présenter à nouveau les concours de l'éducation nationale, que j'ai préparés à l'université de Rennes 1.

## 2 Travaux de recherche

### 2.1 Contexte scientifique

Mes travaux de recherche s'inscrivent dans la thématique globale de la compréhension du système météorologique et climatique. De façon constante, les dernières années ont été enregistrées comme étant les plus chaudes depuis 1880 et la température moyenne annuelle devrait continuer à augmenter au cours de ce siècle. Ce réchauffement climatique s'accompagne de sécheresses sévères sur l'ensemble de la planète mais aussi d'inondations de plus en plus fréquentes (à ce titre, les douze derniers mois ont été particulièrement critiques). Ces catastrophes naturelles sont un problème de société dans la mesure où elles impactent fortement les ressources alimentaires et les infrastructures. Par conséquent, la compréhension des mécanismes sous-tendant la formation de la pluie est essentielle pour la prévision météorologique et pour prédire l'évolution des précipitations à l'échelle globale dans des climats changeants.

L'évolution des nuages et l'initialisation des précipitations sont fortement influencées par les particules d'aérosol, qui sont définies comme *un ensemble de particules solides ou liquides en suspension dans l'air, dont la taille varie généralement de 0,01 à 10 µm et qui séjournent dans l'atmosphère plusieurs heures au moins*. [Elles] *peuvent être d'origine naturelle ou anthropique* (définition du GIEC). On remarque ces particules, par exemple, lors de pics de pollution car elles absorbent et diffusent le rayonnement solaire incident de même que le rayonnement tellurique infrarouge.

L'interaction des particules d'aérosol avec les rayonnements solaire et tellurique ont un impact sur l'équilibre radiatif de la Terre, appelé effet direct ; la différence avec l'équilibre radiatif terrestre en 1750 est appelée forçage radiatif. Les propriétés optiques des particules d'aérosol et leur impact direct sur l'équilibre radiatif sont largement étudiés et le forçage radiatif net résultant est estimé avec un haut niveau de confiance.

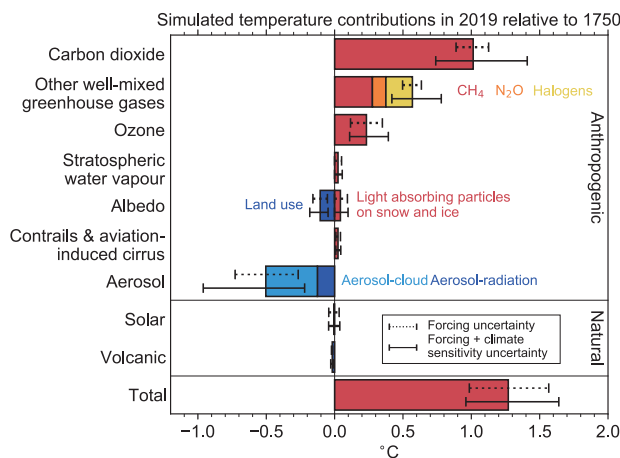


FIGURE 1 – Contribution des différents constituants de l'atmosphère au réchauffement climatique du fait du forçage radiatif généré (Figure 7.7, sixième rapport du GIEC, 2021)

La bonne compréhension de la formation de la glace est d'une importance cruciale dans la mesure où une très grande part des nuages contient de la glace (que ce soit dans des nuages en phase mixte ou dans des nuages contenant uniquement de la glace). Cette compréhension est d'autant plus essentielle qu'à mi-latitudes, la plupart des précipitations sont initiées dans la phase glace.

En outre, les nuages interagissent avec les rayonnements solaire et tellurique. Selon les caractéristiques des hydrométéores<sup>1</sup> qu'ils contiennent, les nuages se comportent différemment et peuvent soit augmenter soit diminuer le forçage radiatif. Les interactions aérosol–nuage ont par conséquent des implications radiatives puisqu'elles influencent fortement la taille et le nombre d'hydrométéores ainsi que leur phase ; on parle d'effet indirect. Les incertitudes concernant celui-ci sont supérieures à celles pour l'effet direct, étant donné que les processus de changement de phase sont encore assez mal compris. Par conséquent, le niveau de confiance dans le forçage radiatif net indirect des particules d'aérosol reste bas. (L'équivalent en variation de température est représenté en barres bleues sur la FIGURE 1)

1. ensemble des gouttes de nuages et des cristaux de glace

Ma thèse, intitulée « *Experimental and modelling study of heterogeneous ice nucleation on mineral aerosol particles and its impact on a convective cloud* »<sup>2</sup>, s'intéresse à l'interaction aérosol–nuage et cherche à approfondir notre compréhension du rôle de la formation des cristaux de glace stimulée par des aérosols minéraux sur l'évolution dynamique d'un nuage.

À cette occasion, mes activités de recherche ont été partagées entre les deux laboratoires : j'ai étudié de façon expérimentale la glaciation stimulée par du feldspath à l'institut de recherche climatique et météorologique du KIT ; et j'ai modélisé l'impact des processus de glaciation sur un nuage convectif au laboratoire de météorologie physique de l'UCA.

## 2.2 Physique des nuages

Dans la description d'un nuage, et particulièrement dans le modèle avec lequel je travaillais au cours de ma thèse, on distingue deux domaines de la physique en interaction l'un avec l'autre : d'une part la dynamique du nuage qui est basée sur la mécanique des fluides et d'autre part la microphysique qui étudie les interactions aérosol–nuage ainsi que l'évolution des populations d'hydrométéores et qui est basée sur la thermodynamique.

### 2.2.1 La dynamique des nuages

La formation des nuages nécessite que la masse d'air soit sursaturée en vapeur d'eau, c'est-à-dire que la pression de vapeur d'eau soit supérieure à la pression de vapeur saturante par rapport à l'eau liquide ou par rapport à la glace (humidité relative —  $RH$  ou  $RH_i$  — supérieure à 100%). Cette situation résulte dans la grande majorité des cas d'une élévation en altitude de la masse d'air, donnant lieu à un refroidissement de celle-ci. Comme la pression de vapeur saturante diminue avec la température, l'humidité relative de la masse d'air dépasse 100% ce qui permet aux gouttes d'eau ou aux cristaux de glace de croître, formant ainsi un nuage.

L'élévation des masses d'air peut se faire par trois moyens principaux :

- par orographie, lorsque la masse d'air est poussée par un vent horizontal sur un relief forçant celle-ci à monter en altitude. On peut alors observer, par exemple, des nuages orographiques (les images de nuage lenticulaire sur le mont Fuji au Japon en sont un exemple célèbre) ;
- par rencontre de masses d'air chaude et froide, où la masse d'air la plus chaude étant moins dense, elle est soulevée par la masse d'air la plus froide. C'est la situation présentée de façon courante par les bulletins météorologiques télévisés en plaine ;
- par chauffage, lorsque rayonnement solaire chauffe la surface terrestre, augmentant la température de la masse d'air au niveau du sol, la rendant moins dense que la masse d'air au dessus d'elle. L'équilibre hydrostatique de la colonne d'air n'est alors plus respecté et la masse d'air chauffée s'élève (suivant l'équation locale de conservation de la masse).

En plus de cet aspect mécanique de la dynamique des nuages, il faut prendre en compte l'impact de la thermodynamique liée à l'eau : les modifications des conditions d'humidité et de température donnent lieu à des transitions entre les trois phases de l'eau et donc à des transferts de chaleur latente ; Ces transferts d'énergie chauffent ou refroidissent la masse d'air, changeant ainsi sa densité, d'où une rétroaction sur la dynamique du nuage.

### 2.2.2 La microphysique : étude des interactions aérosol–nuage

Les particules d'aérosol jouent deux rôles majeurs dans la formation et l'évolution des nuages :

- noyau de condensation (CCN), c'est-à-dire que la particule d'aérosol sert de support à la vapeur d'eau pour se condenser jusqu'à la formation d'une goutte d'eau ;
- noyau de congélation (IN), c'est-à-dire que la particule d'aérosol sert de support à la glace pour se développer jusqu'à la formation d'un cristal de glace.

Le rôle de noyau de condensation est bien connu d'un point de vue théorique puisque les équations régissant la formation des gouttes d'eau ont été établies en 1936 par Hilding Koehler. Sa théorie établit la compétition entre l'impact d'une surface courbe sur la pression de vapeur saturante (effet Kelvin) et

---

2. Étude expérimentale et de modélisation de la nucléation hétérogène sur des particules d'aérosol d'origine minérale et de son impact sur un nuage convectif

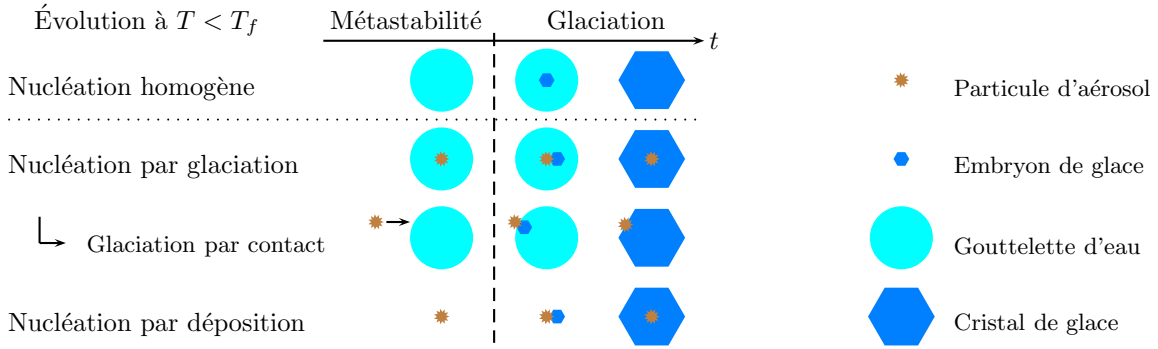


FIGURE 2 – Diagramme schématique de la formation de la glace comme décrite par Vali et al., 2015. La nucléation par glaciation contient notamment la glaciation par immersion et par contact, seul ce dernier est détaillé ici.

l'impact de la présence d'ions en solution au sein de la goutte sur la pression de vapeur saturante (loi de Raoult). Elle est cependant compliquée à mettre en oeuvre de façon opérationnelle et est remplacée dans les modèles par des paramétrisations expérimentales.

L'eau dans l'atmosphère se trouve souvent sous la forme d'un liquide en équilibre métastable puisqu'elle peut être en surfusion sur une large gamme de températures (entre 0 et  $-40^\circ\text{C}$ ). La formation des cristaux de glace implique la formation d'un embryon de cristal de glace (agencement cristallin de quelques molécules d'eau, appelé aussi germe) qui se développe au delà d'une taille critique, imposée par la formation d'une interface entre l'eau et la glace (ou l'air et la glace dans certains cas particuliers). Dans l'eau pure (glaciation homogène, FIGURE 2), cette taille critique peut être atteinte à partir de températures inférieures, de façon générale, à  $-36^\circ\text{C}$ .

Certaines particules d'aérosol ont la capacité d'abaisser la taille critique de l'embryon en facilitant la création de l'interface eau/glace ou air/glace ou en facilitant la croissance de l'embryon, permettant ainsi la formation de cristaux de glace à des températures aussi chaudes que  $-2^\circ\text{C}$ , on parle alors de glaciation hétérogène.

Celle-ci comprend différents mécanismes<sup>3</sup> (représentés sous la ligne pointillée en FIGURE 2) :

- (I) la nucléation par glaciation qui nécessite l'existence d'une gouttelette d'eau et qui comporte deux mécanismes principaux :
  - (a) la « glaciation par immersion [qui fait référence] à la nucléation de la glace initiée par une particule contenant un noyau de congélation (INP) [...] située dans un corps liquide » ;
  - (b) la « glaciation par contact [qui est] initiée par une INP [...] à l'interface air-eau lorsque l'INP entre en contact avec le liquide ou se forme à une triple interface air-liquide-particule » ;
- (II) la nucléation par déposition, définie comme la « nucléation de la glace à partir de vapeur sursaturée sur une INP [...] sans la formation préalable de liquide. »

### 2.3 Étude expérimentale de la glaciation

Pour modéliser la microphysique dans les modèles météorologiques et climatiques, des paramétrisations des phénomènes de glaciation sont nécessaires. Elles sont obtenues par plusieurs moyens complémentaires : *in situ* (matériel embarqué sur des avions ou sites de mesure en altitude<sup>4</sup>), à l'aide de chambres à nuage (reproduction en laboratoire de parcelles d'air suivant une évolution les plus proches possibles des conditions réelles<sup>5</sup>) ou par des mesures en laboratoire sur de petits échantillons.

C'est dans cette dernière catégorie que se trouve l'expérience développée durant mon travail de thèse. Lors de mon stage de master 1, j'avais mis en place une expérience sur support refroidi, communément appelé "cold stage" à l'aide de laquelle j'avais étudié la glaciation homogène. J'ai développé cette expérience au cours de ma thèse de façon à pouvoir étudier la glaciation hétérogène, que ce soit la glaciation par immersion ou la nucléation par déposition.

3. toutes les citations à suivre dans ce paragraphe, écrites en italique, sont directement extraites et traduites de Vali et al., 2015, Technical Note : A proposal for ice nucleation terminology. *ACP*, utilisé comme point de référence pour les définitions sur la nucléation de la glace.

4. par exemple au Jungfraujoch en Suisse, au Zugspitze en Allemagne ou au Puy-de-Dôme à Clermont-Ferrand

5. la plus grande chambre de ce type est situé à Karlsruhe et mesure  $86\text{ m}^3$

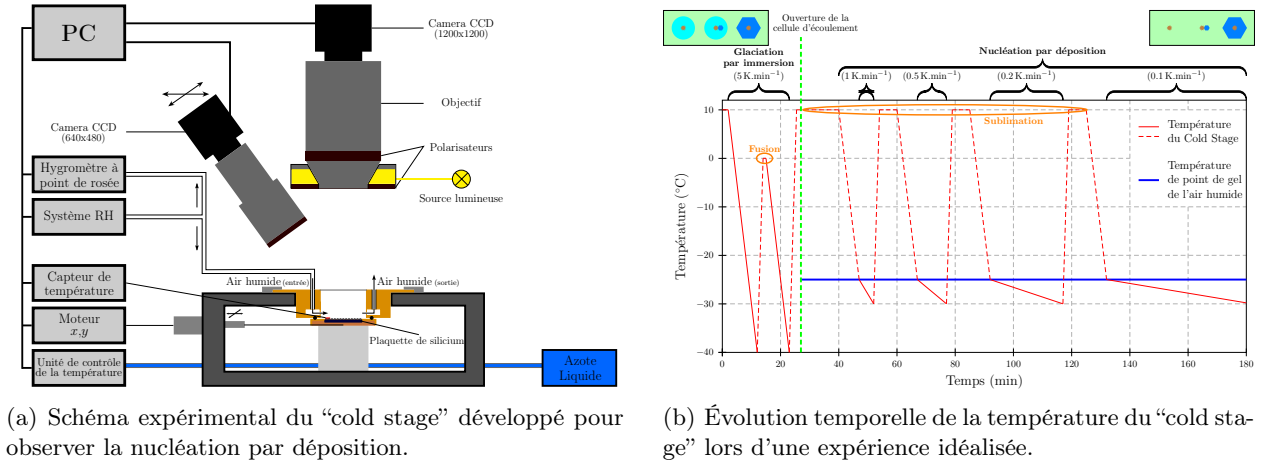


FIGURE 3 – Principe de l’expérience de “cold stage”

L’objectif de l’expérience, dont le schéma expérimental est présenté FIGURE 3a, est de mesurer les températures individuelles de glaciation d’un ensemble de gouttes contenant une suspension de particules de Feldspath, puis après évaporation des gouttes, de mesurer les conditions de température et d’humidité pour lesquelles un cristal de glace se développe sur les particules de feldspath résiduelles.

### 2.3.1 Méthode expérimentale

Au début de l’expérience, une seringue piézoélectrique permet de déposer des gouttes d’eau sur une plaque de silicium (l’ensemble est appelé échantillon ci-après) placée dans un support posé sur un cylindre d’argent dont on contrôle la température. La seringue génère des gouttes mono-dispersées d’un volume allant de 100 pL à quelques nL.

Durant l’expérience, l’échantillon est observé à l’aide d’une caméra CCD et éclairé par une source lumineuse polarisée. La caméra, associée à un analyseur, permet de détecter la glaciation des gouttes par dépolarisation de la lumière.

De façon à pouvoir également observer la nucléation par dépôt, j’ai développé une cellule d’écoulement minimisant le volume de la chambre autour de l’échantillon et permettant la circulation continue d’un flux d’air humide.

La température de point de gel de cet air est contrôlée par un mélangeur d’air sec et d’air saturé en eau puis mesurée à l’aide d’un hygromètre à miroir refroidi.

Une prise d’essai se déroule de la façon suivante (une vision schématique est proposé FIGURE 3b) :

- i. À la température de point de rosée de la pièce, des gouttes d’une suspension de particules de K-Feldspath sont déposées en une matrice de 9,6 mm de côté avec une distance inter-gouttes de 0,8 mm ( $t = 0$  min).
- ii. Glaciation par immersion ( $t \in ]0; 25 \text{ min}]$ ) :  
le “cold stage” est refroidi à  $5 \text{ K min}^{-1}$  jusqu’à  $-40^\circ\text{C}$  (température à laquelle l’ensemble des gouttes a gelé par glaciation homogène ou hétérogène) ;  
le “cold stage” est alors réchauffé à  $0^\circ\text{C}$  pour laisser fondre l’ensemble des cristaux de glace obtenus. Cette étape est répétée plusieurs fois puis le “cold stage” est réchauffé jusqu’à  $10^\circ\text{C}$ .
- iii. Ouverture de la cellule d’écoulement ( $t = 25$  min).
- iv. Nucléation par dépôt ( $t > 25$  min) :  
le “cold stage” est refroidi à  $5 \text{ K min}^{-1}$  jusqu’à la température de point de gel de l’air humide parcourant la cellule d’écoulement ;  
le “cold stage” est alors refroidi jusqu’à  $5^\circ\text{C}$  en dessous de la température de point de gel.  
Cette étape est répétée plusieurs fois pour des vitesses de refroidissement décroissantes : 1 ; 0,5 ; 0,2 ; 0,1  $\text{K min}^{-1}$ .  
Les cycles de nucléation par dépôt sont réalisés pour plusieurs températures à points de gel fixés (et mesurées par l’hygromètre à point de rosée) :  $-20$  ;  $-23$  ;  $-26$  ;  $-29,5$  et  $-34^\circ\text{C}$ .

Lors de l'analyse des données expérimentales, la position des gouttes est détectée par analyse d'image, puis l'évolution de la valeur moyenne des niveaux de gris de chaque goutte est analysée. On détecte la glaciation par une élévation soudaine du niveau de gris moyen dû à la dépolarisation. On obtient ainsi la fraction de gouttes gelées en fonction de la température et, le cas échéant, de l'humidité relative.

Lien avec les programmes scolaires

#### Programme de sup :

- Le fonctionnement de l'hygromètre à miroir froid peut être illustré à l'aide des diagrammes d'état ( $T, p$ ).

#### Programme de spé :

- Le fonctionnement du système d'humidification de l'air peut être étudié dans la filière PT dans le chapitre Thermodynamique et Mécanique des fluides appliquées aux machines thermiques.

### 2.3.2 Principaux résultats

Les courbes obtenues pour la glaciation par immersion pour trois suspensions de concentrations  $c_0$ ,  $c_0/10$  et  $c_0/100$  sont représentées FIGURE 4. Elles permettent de mettre en évidence deux aspects de la nucléation hétérogène :

- la nucléation hétérogène a lieu sur des sites actifs de nucléation de la glace (INAS), structures microscopiques facilitant la formation d'un embryon de cristal de glace en abaissant la taille critique du germe. Plus la concentration en particules de Feldspath est élevée, plus le nombre de sites actifs est grand. Par conséquent, la probabilité qu'un germe atteigne une taille critique est plus élevée et donc la température à laquelle la nucléation a lieu augmente (évolution entre les courbes vertes, bleues et rouges).
- lorsque la concentration en particules de Feldspath est suffisamment faible (courbes vertes), il y a au plus un seul site actif par goutte. Les cycles de glaciation successifs n'ont pas d'impact sur l'ordre dans lequel gèlent les gouttes contenant un site actif (fraction gelée inférieure à 0,15) et peu d'impact sur la température de glaciation. En revanche, les gouttes ne contenant pas de site actif (fraction gelée entre 0,15 et 1) gèlent dans un ordre aléatoire et voient leur température de glaciation légèrement augmenter après le premier cycle : elles ont été pré-activées.

Les données expérimentales obtenues ont permis dans un premier temps de développer deux nouvelles paramétrisations pour la glaciation par immersion et pour la nucléation par déposition, exprimées

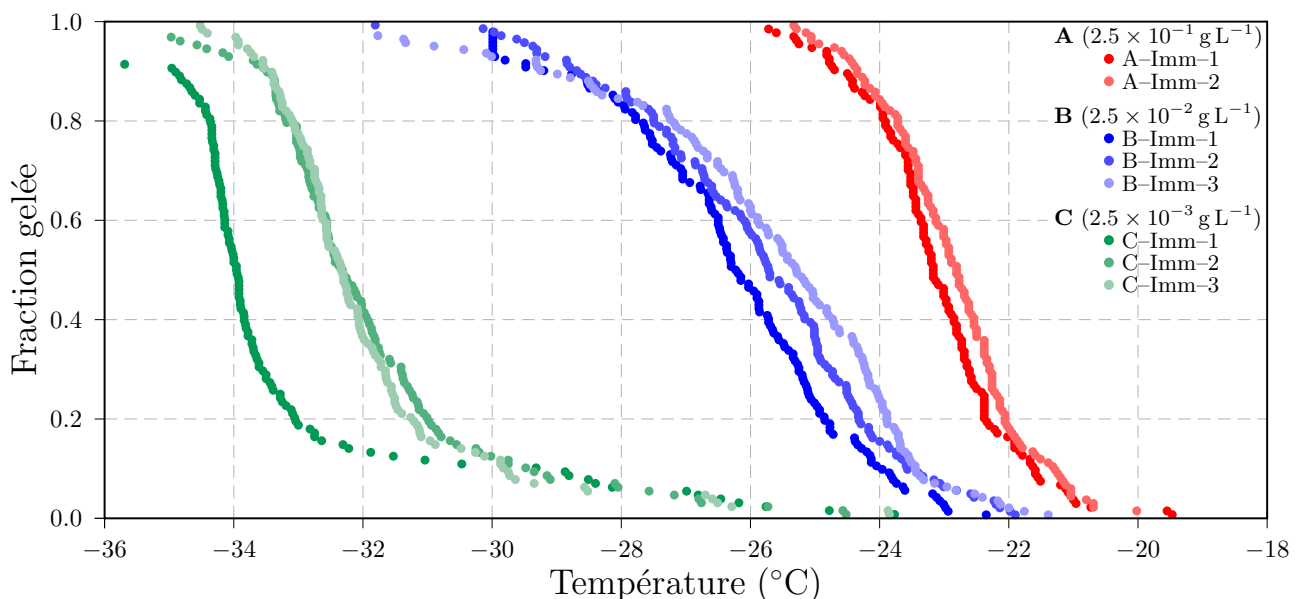


FIGURE 4 – Fraction gelée des gouttes en fonction de la température pour les suspensions **A** (points rouges), **B** (points bleus) et **C** (points verts).

sous la forme d'une densité INAS par unité de surface de particule de Feldspath en fonction de la température, utilisées ensuite dans l'étude en modélisation.

D'autre part, l'avantage de la configuration de l'expérience est que l'on connaît la position exacte de chaque goutte. On peut par conséquent comparer son comportement pour chacune des glaciations par immersion et nucléations par déposition successives pour en tirer des conclusions quant au lien entre les capacités glaçogènes des particules de Feldspath pour la glaciation par immersion et pour la nucléation par déposition.

Pour ce faire, lors de la prise d'essai avec la suspension de particules de Feldspath la plus faiblement concentrée, j'ai pu établir que les premières gouttes à geler par immersion étaient celles pour lesquelles les particules résiduelles après évaporation étaient les plus efficaces à former un cristal par nucléation par déposition. Ceci tend à montrer que les mêmes sites actifs sont impliqués pour la glaciation par immersion et pour la nucléation par déposition.

## 2.4 Étude du fonctionnement d'un nuage par modélisation

L'atmosphère étant un système complexe et étendu, il existe plusieurs types de modèles, faisant chacun un compromis sur un aspect de la description du système météorologique.

Les modèles numériques de prédiction météorologique (dits opérationnels) font appel à une description de la physique des nuages simplifiée en raison de leur large échelle et de leur contrainte de rapidité de calcul. Ils utilisent des paramétrisations pour l'étendue des nuages et la phase de l'eau les constituant. Ils n'intègrent pas de description des interactions aérosol–nuage.

Les modèles de recherche étant moins soumis à cette contrainte de rapidité de calcul, la modélisation de la microphysique peut être prise en compte de deux manières :

- les modèles à moment représentent les particules d'aérosol et les hydrométéores à l'aide d'une fonction prédéterminée (typiquement log–normale) et font évoluer leurs paramètres (centre, largeur, intégrale, ...) au cours des processus microphysiques ;
- les modèles à microphysique détaillée dans lesquels les particules d'aérosol et les hydrométéores sont répartis sur des classes de tailles prédéfinies et sont transférés d'une classe à l'autre au cours des processus microphysiques.

Le modèle que j'ai utilisé au cours de ma thèse et de mon post-doctorat, dénommé DESCAM (Detailed Scavenging Model) <sup>6</sup>, fait partie de la deuxième catégorie. Particules d'aérosol, gouttes d'eau et cristaux de glace sont répartis sur 39 classes de taille (de 1 nm à 7 µm pour les particules d'aérosol et de 1 µm à 7 mm pour les gouttes et leur équivalent en masse pour les cristaux) avec des distributions permettant de suivre le nombre de chacune des catégories, le nombre, la surface et la masse totales des particules d'aérosols comprises dans chacune des catégories.

Ces hauts niveaux de détail (de 6 à 47 distributions selon les simulations) rendent le modèle très lent en raison du très grand nombre de calculs à effectuer. Par conséquent, la modélisation de la dynamique du nuage est fortement simplifiée : l'atmosphère est représentée intégralement dans sa composante verticale mais la composante horizontale est limitée à deux cylindres concentriques où seul le cylindre intérieur voit se développer le nuage, le cylindre extérieur assurant l'équilibre dynamique de l'atmosphère.

### 2.4.1 Quelques modules physiques importants du modèle DESCAM

Pour traiter l'évolution du nuage, le modèle est organisé en modules, chacun correspondant à un aspect de la physique de l'atmosphère (dynamique ou microphysique). J'en présente quelques-uns dans cette partie.

**Module dynamique :** ce module résout l'équation de continuité (équations de conservation pour toutes les grandeurs conservatives) à l'aide d'un schéma numérique développé par Peter Smolarkiewicz.

**Module de calcul de vitesse de chute terminale des hydrométéores :** ce module calcule, entre autres, un coefficient de traînée et la viscosité de l'air. Puis la vitesse terminale est calculée en effectuant un calcul d'équilibre des forces.

---

6. Modèle détaillé de lessivage, conçu initialement pour étudier les pluies acides en calculant la proportion d'acide sulfurique rabattu au sol par les précipitations

**Modules d'échange de vapeur d'eau :** ces modules calculent les vitesses de croissance des particules d'aérosol humides, des gouttes d'eau et des cristaux de glace. Pour ce faire, on résout un problème de diffusion de particules pour les molécules d'eau permettant d'obtenir la variation du rayon d'un hydrométéore sphérique en fonction, notamment, de la sursaturation, des coefficients de diffusion thermique et de vapeur, de la tension de surface et du rayon de l'hydrométéore.

**Modules de glaciation :** ces modules calculent la formation des cristaux de glace par nucléation homogène ou hétérogène à partir de paramétrisations développées expérimentalement en fonction de la taille et de la composition des gouttes d'eau. Deux des paramétrisations provenaient des résultats obtenus dans l'expérience du "cold stage"

Ce sont ces modules qui ont été au centre de mon travail de recherche.

**Module thermodynamique :** suite aux changements de phase de l'eau (échange de vapeur, glaciation ou fonte), le dégagement de chaleur latente est calculé ainsi que l'évolution de la pression partielle en eau et de la température de l'air.

Le module a été réécrit pour mieux prendre en compte le processus de Bergeron–Findheisen, qui induit que la pression de vapeur saturante par rapport à la glace est plus faible que la pression de vapeur saturante par rapport à l'eau liquide. Par conséquent, la croissance des cristaux de glace se fait au détriment des gouttes d'eau.

#### Lien avec les programmes scolaires

Les différents modules font appel à un grand nombre de notions abordées en CPGE.

##### **Programme de sup :**

- L'étude de l'équilibre d'une masse d'air sèche permet de mettre en œuvre l'essentiel du thème 3, « *l'énergie : conversions et transferts* ».
- Il est possible dès la première année de complexifier légèrement cette étude en prenant en compte de façon simplifiée les changements d'états de l'eau lors de l'équilibre d'une masse d'air humide.

##### **Programme de spé :**

- L'apport du programme de deuxième année, et particulièrement dans la filière PC permet de complexifier l'étude de masses d'air à l'aide de la dynamique des fluides.
- Il est également possible d'illustrer les thématiques de la diffusion ou le coefficient de tension superficielle par la microphysique.

La métastabilité, les processus de glaciation et de Bergeron–Findheisen sont des problèmes qui dépassent les programmes de CPGE. Cependant, la plupart des outils permettant de les expliquer étant fournis, cela peut faire de très bon sujets d'ADS ou de TIPE.

Plus particulièrement, la mise en équation et la modélisation de l'évolution d'une parcelle d'air semblent tout à fait adaptés à l'apprentissage de la résolution de problèmes.

### 2.4.2 Description de la physique d'un nuage convectif

Après l'étude expérimentale des mécanismes de glaciation, je me suis intéressé à leur impact sur les nuages. Pour ce faire, j'ai étudié le rôle des différents mécanismes de glaciation et de différents types de particules minérales sur le développement d'un nuage convectif.

Pour illustrer l'ensemble des processus cités précédemment et leur rôle dans le fonctionnement du nuage convectif, l'évolution des contenus en eau en fonction de l'altitude au cours du temps est représentée FIGURE 5, telle que modélisée par DESCAM dans ma thèse.

Au début de la simulation, l'impact du rayonnement solaire sur l'échauffement du sol est pris en compte par une température au sol réhaussée de  $2,3^{\circ}\text{C}$  pendant 20 minutes. Ceci permet de lancer le moteur dynamique du nuage en créant une ascension de la masse d'air. Lorsqu'elle atteint l'altitude de 3 km, elle devient sursaturée en eau, ce qui initie la formation de gouttes d'eau et définit la base du nuage (a). Au fil de l'ascension, les gouttes croissent avec la baisse de la température (qui résulte, avant condensation, en une augmentation de l'humidité relative), ce qui définit le haut du nuage (a).



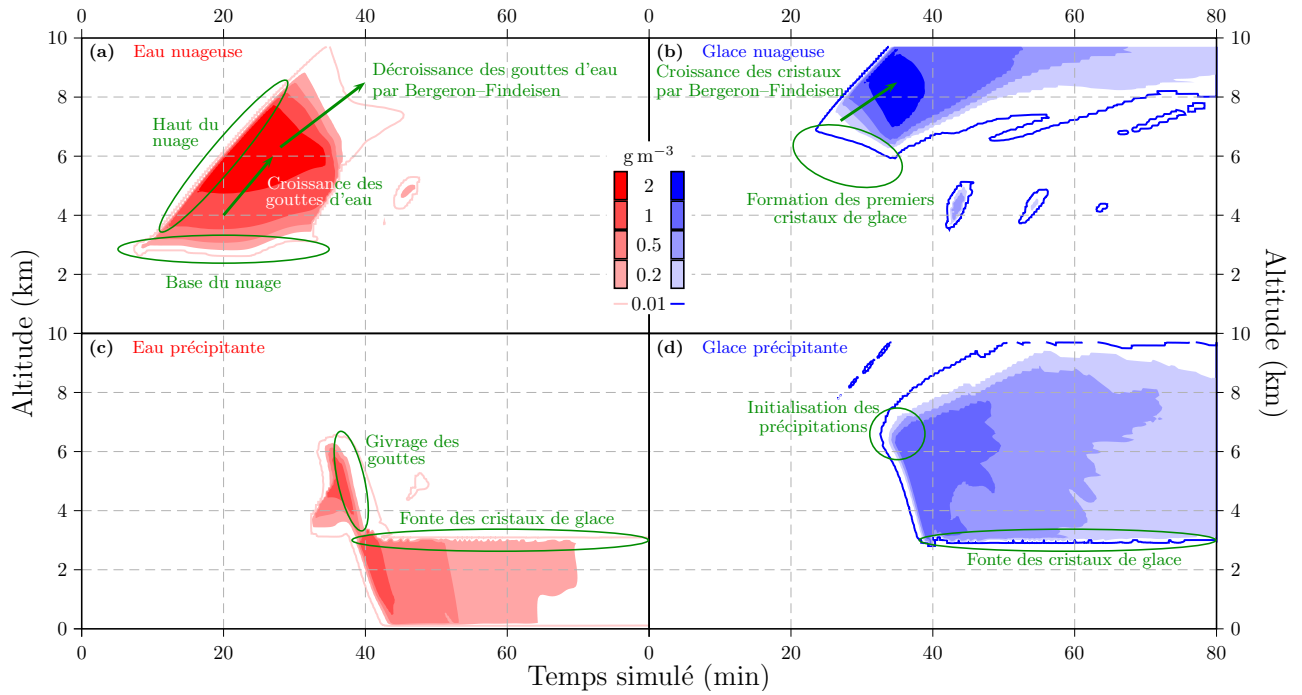


FIGURE 5 – Contenus en eau liquide ( $\text{g m}^{-3}$ , rouge) et contenus en glace ( $\text{g m}^{-3}$ , bleu) simulés par DESCAM en fonction de l'altitude et du temps. Les graphes (a) et (b) correspondent aux contenus non précipitants (vitesse verticale vers le sol inférieure à  $0,25 \text{ m s}^{-1}$ ), les graphes (c) et (d) correspondent aux contenus précipitants.

À partir d'une altitude de 6 km, la température est suffisamment basse pour que la nucléation hétérogène puisse débuter et que les premiers cristaux de glace soient formés (b). Alors, le processus de Bergeron-Findeisen stimule la croissance des cristaux de glace au détriment des gouttes d'eau (a/b). Au fur et à mesure de leur croissance, les cristaux de glace atteignent une taille suffisamment large pour vaincre le vent vertical et les précipitations débutent (d). Au cours de leur chute, les cristaux de glace collectent les gouttes d'eau par givrage (c).

### 2.4.3 Résultats obtenus en thèse

Le travail de modélisation consiste en une étude de cas réalisée en utilisant les particules minérales comme support de paramétrisations de la glaciation.

Au cours de tests en sensibilité, les différents mécanismes de formation des cristaux de glace (nucléation homogène et les trois types de nucléation hétérogène) ont été considérés ensemble ou séparément de façon à identifier l'impact de chacun des mécanismes sur l'évolution du nuage et sur les précipitations au sol. L'étude a permis de mettre en évidence l'importance de la température à laquelle les cristaux de glace se forment dans l'impact sur les précipitations. En effet, une nucléation hétérogène à haute température (jusqu'à  $-5^\circ\text{C}$ ) implique une formation précoce de la glace dans le développement du nuage qui amplifie fortement et retarde les précipitations mesurées au sol par plusieurs effets combinés (et concurrents) :

- le dégagement de chaleur latente à une altitude proche de la base du nuage renforce la dynamique du nuage et augmente ainsi la vitesse verticale au sein du nuage. Ainsi, la vitesse terminale des hydrométéores est plus faible que sans glaciation ;
- l'augmentation de la vitesse verticale fait que les hydrométéores atteignent une altitude plus élevée et doivent donc parcourir une plus grande distance avant d'atteindre le sol ;
- la présence commune de cristaux de glace et de gouttes d'eau soumet la masse d'air au processus de Bergeron-Findeisen. Ainsi, les cristaux de glace atteignent une taille plus grande que celle qu'auraient eu les gouttes d'eau et le volume des précipitations est ainsi augmenté.

D'autre part, à l'issue de cette étude comparant les différents mécanismes, un nouvel algorithme simplifié a été déterminé permettant de passer de 41 à 6 distributions afin de pouvoir intégrer ces nouvelles paramétrisations au modèle DESCAM à dynamique tridimensionnelle.

#### 2.4.4 Post-doctorat : étude des isotopes de l'eau

Mon post-doctorat a continué le développement du modèle DESCAM dans le cadre de l'ANR AC-AHC2<sup>7</sup> portée par Valérie Masson-Delmotte dans laquelle le LaMP était responsable de l'étude du devenir des isotopes stables de l'eau dans un nuage. J'ai donc développé un module de suivi des molécules d'eau contenant un atome d'oxygène-18 et de celles contenant un atome de deutérium au cours de l'évolution d'un nuage.

En raison de leurs neutrons supplémentaires, les molécules d'eau "lourde" n'ont pas le même comportement que l'eau de masse molaire  $18\text{ g mol}^{-1}$  lors des passages de la phase vapeur aux phases condensées. Par conséquent, ces molécules peuvent être le témoin de l'origine ou de l'histoire du nuage. En climatologie, les taux de d'oxygène-18 et de deutérium dans l'eau sont utilisés pour déterminer la température d'origine des précipitations.

Lors de cette étude, je cherchais notamment à savoir s'il était possible d'obtenir une information sur l'historique des changements de phase de l'eau condensée. Il semblerait que ce ne soit pas le cas, en raison d'une forte dépendance au processus microphysiques.

### 3 Compétences transverses

Ma formation à et par la recherche m'a permis d'acquérir une rigueur dans l'approche du travail et des problématiques.

Plus particulièrement, le fait d'avoir conduit un travail expérimental m'a imposé de développer un savoir faire basé sur la méthode et la précision. Cet aspect me semble particulièrement important étant donnée l'importance que peuvent revêtir les travaux pratiques dans certaines filières.

D'autre part, la démarche de modélisation « *occupe également une place centrale dans le programme pour former les étudiants* ». La façon de structurer un modèle de simulation correspond à une « résolution de problèmes » et l'étude du fonctionnement d'un nuage peut « *[viser] à exercer les étudiants à mobiliser de façon complémentaire connaissances et capacités pour répondre à un questionnement ou atteindre un but sans qu'aucune démarche de résolution ne soit fournie* ». <sup>8</sup>

Durant six années, j'ai développé un modèle de simulation, notamment par une refonte intégrale de l'ensemble du code et une mise aux normes Fortran 90, qui m'ont permis d'approfondir des questions de logique algorithmique. Python étant enseigné désormais dès le lycée, cette expérience de la programmation est applicable à tous niveaux, malgré la logique orientée objet de Python.

Cette logique se rapproche plus de celle de LabView, logiciel à l'aide duquel j'ai automatisé l'ensemble du fonctionnement de l'expérience de "cold stage", ainsi que le traitement des données au cours de ma thèse. J'ai donc pu acquérir une très bonne maîtrise de ce logiciel, qui est utilisé dans des établissements du supérieur pour certains travaux pratiques (c'est le cas par exemple à l'IUT de Montluçon).

Enfin, au cours de mon parcours, j'ai eu l'occasion de partager mes travaux lors de conférences internationales (sous la forme de posters et de présentations orales) à des publics divers, allant de la communauté restreinte (International Conference on Clouds and Precipitations, Manchester 2016) à la communauté au sens large (International Union for Geophysics and Geodesics, Prague 2015 et American Geophysics Union, San Francisco 2016 et Washington DC 2018) en passant par de l'intercommunauté (Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly, 2013). Mes activités de recherche ont par ailleurs donné lieu à la publication de trois articles dans des revues à comité de lecture, dont deux en premier auteur. Le volet expérimental de mon travail de thèse ayant été réalisé en Allemagne, j'ai eu à utiliser de façon quotidienne l'anglais et l'allemand dans des contextes de recherche et de la vie courante. Cela m'a permis d'acquérir une très bonne maîtrise des deux langues, particulièrement dans le vocabulaire scientifique.

Les différentes communications scientifiques ont contribué à mon approfondissement de l'anglais écrit et oral.

Si l'enseignement des langues n'est pas directement de la compétence de l'enseignant de physique-chimie, les sections européennes option physique, que ce soit en allemand ou en anglais, font appel aux compétences écrites et orales développées lors de mes deux années et demie passées à Karlsruhe.

---

7. Atmospheric circulation and Arctic hydrological cycle changes

8. Les deux longues citations sont issues du préambule du programme de première année

## 4 Activités d'enseignement

### 4.1 Doctorant contractuel à l'Université Clermont Auvergne (2013–2016)

Au cours de chacune des trois années de mon financement doctoral, j'ai enseigné à l'UFR de Sciences et Technologies de l'UCA aux second et quatrième semestres dans le cadre de travaux dirigés d'électro- et magnétostatique (22h TD par an, niveau L1), de travaux pratiques d'électrocinétique (22h TD par an, niveau L1) et d'algorithmie (20h TD par an niveau L2).

J'ai également suivi dans le cadre de ma formation doctorale deux modules destinés à l'enseignement :

- un module orienté sur la façon de structurer une séquence d'enseignement, suivi à l'INSPE de Chamalières,
- et un module dispensé par le département de psychologie sociale de l'UCA sur les enjeux notamment de l'évaluation et de la mise en confiance des élèves et étudiants.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Accompagnement de travaux pratiques et dirigés, correction de copies et mise en commun de la notation avec un collège d'enseignants.

### 4.2 Post-doctorant à l'UCA : IUT d'Allier (2019–2020)

Ma dernière année de post-doctorat a été effectuée dans l'antenne du LaMP à l'IUT d'Allier, sur le site de Montluçon. À cette occasion, j'ai découvert un nouveau public en travaillant en tant qu'enseignant vacataire au sein du département Génie Thermique et Énergie (GTE) dans le cadre de la mise à niveau mathématique des étudiants de première année (19h TD, rappels collège/lycée) puis en encadrant des travaux pratiques de métrologie (16h TD, première année) et de mécanique des fluides et transfert thermique (16h TD, deuxième année).

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Préparation d'une progression et transmission d'une rigueur dans l'approche des mathématiques appliquées à la physique. Travail en équipe sur des domaines de la physique appliquée (élargissement de mon champ de compétences).

### 4.3 Enseignant contractuel en maths–sciences, Ac. Rennes (2020)

Après la publication de mon dernier article lors de mon post-doctorat, ayant déménagé en Bretagne et souhaitant me consacrer à l'enseignement, j'ai candidaté auprès des académies de Rennes, de Nantes et de Caen pour travailler en tant qu'enseignant contractuel en maths–sciences et en sciences physiques. Le premier poste que j'ai occupé a été dans le lycée professionnel Bel Air de Tinténiac (35) où j'ai enseigné en classes de troisième métiers, seconde logistique, première carrosserie et terminale mécanique automobile et poids lourds. J'avais demandé à prendre un poste en lycée professionnel car le public de ces établissements est éloigné de ceux que j'avais pu rencontrer lors de mes expériences précédentes à l'UCA et qu'il était important pour moi d'élargir ma conception du métier d'enseignant.

Ce premier remplacement était pour deux semaines avant les vacances de la Toussaint et m'a permis de découvrir une nouvelle facette de la profession en étant face à des élèves mettant régulièrement en difficulté l'ensemble de la communauté éducative, me poussant ainsi à questionner mon positionnement devant la classe.

### 4.4 Enseignant contractuel en physique appliquée, Ac. Nantes (2020–2021)

À partir de la Toussaint et jusqu'à la fin de l'année scolaire, j'ai enseigné au LPO Fernand Renaudeau de Cholet (49) auprès de classes de première STI2D et de BTS Maintenance des Systèmes première et deuxième années.

Cette deuxième expérience m'a permis de continuer à travailler ma posture d'enseignant, cette fois avec un public plus proche de celui que j'avais connu lors de mes vacances à l'IUT d'Allier (la moitié de nos étudiants provenaient d'un bac STI2D) et avec un enseignement plus recentré sur mes compétences, n'ayant pas cette fois à enseigner les mathématiques. J'ai pu également participer à mes premiers conseils de classe et prendre en main les différents outils numériques utilisés dans l'enseignement secondaire.

Malgré les nombreuses difficultés conjoncturelles sur cette période (demi-jauge une semaine sur deux de mi-novembre à mi-janvier, classe entière en présentiel une semaine sur deux au printemps avec cours en distanciel l'autre semaine, entre autres), ce remplacement plus long, au cours duquel j'ai eu l'occasion de penser mon enseignement sur le temps long, m'a confirmé mon intérêt pour l'enseignement et conduit à m'inscrire pour la rentrée 2021 en préparation à l'agrégation à l'université de Rennes pour préparer la session 2022 du concours.

#### Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Ces deux dernières expériences m'ont permis de me familiariser avec le logiciel Pronote, d'apprendre les problématiques de gestion de classe et de découvrir le travail en commun avec l'ensemble de la communauté éducative (proviseure adjointe, conseillère principale d'éducation, assistants d'éducation, collègues et préparatrice de laboratoire). J'ai également dû réfléchir à la progression au cours de l'année et à la mise en place d'évaluations diagnostiques, formatives et sommatives.