

Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

Thibault Hiron-Bédiée

14 juin 2022

Diapo 1

Ce sur quoi il faut insister un peu :

- j'ai fait une CPGE, j'ai réussi en intégrant l'ENS (l'idée c'est que je connais ce monde là et que j'y ai "prosperé") ;
- j'ai choisi l'ENS parce que j'étais intéressé par l'enseignement et par la recherche ;
- au KIT, j'ai monté une nouvelle manip pendant mon stage ;
- la thèse est la continuité des deux stages ;
- le post-doc, c'est une super opportunité car ANR portée par Valérie Masson-Delmotte (présidente du GIEC), forte demande d'Andrea car seul étudiant à avoir creusé à fond le modèle et grosses modifications à faire pour développer le modèle vers les isotopes ;
- tout mon parcours dès l'entrée à l'ENS a été orienté vers l'enseignement (mettre en avant ce qui est en bleu de ce point de vue).

Ce dont on n'a pas grand chose à faire :

- où j'ai fait prépa
- pourquoi j'en ai changé
- pourquoi la 5/2

Diapo 2

Le sujet de thèse en français est écrit au tableau, le lire (?) et dire qu'on va présenter par la suite les différents termes de la thèse.

Expliquer très rapidement la thèse avec les mains : « *Étude de l'impact des poussières désertiques sur les transitions de phase de l'eau dans un nuage et les conséquences sur la dynamique d'un orage* »

Expliquer le forçage radiatif avec les mains au niveau prépa en 2 phrases en définissant le système, en faisant un bilan rapide des entrées sorties et les effets que ça a, en utilisant le vocabulaire adapté.

« *Forçage radiatif, modification du bilan radiatif de la Terre. Elle reçoit de l'énergie du soleil (UV-Visible), une partie est renvoyée, l'autre traverse l'atmosphère et est absorbée par la Terre. Celle-ci réémet cette énergie dans l'IR, rayonnement pour lequel l'atmosphère est moins transparent. L'énergie alors absorbée par l'atmosphère peut être redirigée vers la Terre d'où l'effet de serre. Le forçage radiatif est dû aux modifications des propriétés de l'atmosphère.* »

Loi de Stefan-Boltzmann, programme de PC/PC*, approche descriptive du rayonnement thermique, exercice classique de prépa.

Le but de ma thèse c'est de contribuer à la diminution de la barre d'erreur sur les aérosols.

Diapo 3

RAS

Diapo 4

Thermodynamique de PC/PC*.

Parler de différence de potentiel chimique donc loi de comportement en r^3 car $\propto N$ puis de création d'une interface donc tension de surface donc loi de comportement en r^2 car $\propto S$. On a donc un état métastable car il y a une barrière d'énergie à passer.

De plus, σ diminue avec la température décroissante et $\Delta\mu$ augmente donc la barrière d'énergie est abaissée. On peut aussi parler d'énergie d'activation vue en chimie par les élèves.

Pourquoi -36 pour la glaciation homogène : abaissement de la valeur de la barrière et statistique de Boltzmann :

$$N_i = N_{sat} \exp\left(-\frac{\Delta F_i}{kT}\right)$$

« Du fait de l'agitation thermique, de petits agrégats se forment, statistiquement (Boltzmann), certains atteignent la taille critique » Par conséquent la température de nucléation homogène dépend aussi de la taille de la goutte...

On peut parler ici aussi un peu, à l'occasion de la métastabilité de la germination/nucléation de Volmer

Diapo 5

On a ici un exemple d'interface solide-solide. On peut de nouveau parler de nucléation de Volmer et notamment de mouillage (CNT).

On parle des sites actifs, sites préférentiels de développement d'un germe.

Deux modes de nucléation hétérogène étudiés en thèse, principalement sur le Feldspath. Glaciation (immersion) et déposition.

Diapo 6

Ne pas lire le diapo directement mais exprimer les problématiques "avec les mains" :

- Pb exp : « Est-ce que les sites actifs sont les mêmes en immersion et en déposition ? »
- Pb mod : « Quel impact sur l'évolution du nuage ? »

C'est le plan de ma thèse.

Diapo 7

Avec les mains : quel est l'enjeu de la manip ?

⇒ Deux phénomènes différents avec les mêmes particules exactement que l'on compare en contrôlant l'ensemble des paramètres expérimentaux pour arriver à déterminer des comportements. → d'où la rigueur : manip exigeante.

Base de la manip : on regarde la formation de la glace à l'aide d'une caméra qui filme l'échantillon refroidi par contact avec un cylindre d'argent parcouru par de l'azote liquide. On peut contrôler l'humidité dans la cellule grâce à un système ad hoc et les gouttes déposées le sont de façon régulière sur la plaquette de silicium.

J'ai travaillé avec des suspensions de Feldspath de concentrations variables.

On repère indépendamment chaque goutte.

Développement de la manip' *Rightarrow* code LabView (On embarque la face avant et la vue d'ensemble du diagramme par bloc pour éventuellement montrer et que ce ne soit pas totalement abstrait).

- ⊗ Apprentissage d'un langage orienté objet → directement applicable à la logique Python (là aussi c'est assez vague...).
- ⊕ Construction et gestion d'une UI.
- ⊗ Pilotage informatisé, dialogue ordinateur/appareils, optimisation

Diapo 8

Montrer rapidement les petites schématisations de chacun des modes de glaciation pour dire "d'abord on fait par immersion puis on fait par déposition"

À l'ouverture de la cellule, "baisse de l'humidité en faisant circuler de l'air sec".

Diapo 9

Images issues des cycles de nucléation par déposition. La zone visible sur chaque image correspond à l'empreinte de la goutte originelle. On voit que pour les suspensions les plus concentrées, les cristaux de glace se forment à plusieurs endroits.

Pour la suspension la moins concentrée, il n'y a qu'un seul endroit sur lequel se forment les cristaux de glace : donc un seul site actif.

Diapo 10

Courbe issue de la glaciation par immersion, on se concentre sur la courbe verte qui correspond à la suspension la plus diluée.

- partie $FG > 0.2$ dépend du cycle de glaciation
- partie $FG < 0.2$ ne dépend pas du cycle de glaciation donc pas de préactivation des sites

Montrer l'interrogation que l'on a et dire que :

J'ai pu montrer dans ma thèse que par analyse des gouttes impliquées dans la glaciation et la nucléation que c'étaient toujours les mêmes qui étaient impliquées les premières. D'où la conclusion mise sur le transparent.

Diapo 11

Interaction Dynamique/Microphysique... C'est un peu une illustration des systèmes bouclés, même si il n'y a pas de commande ici.

Diapo 12

Le modèle a pour stratégie de décomposer la physique qui a lieu en petits morceaux qui interagissent entre eux.

On touche à plusieurs domaines de la physique bien connus des élèves de prépa (méca flux, méca du point, thermo, transitions de phases, diffusion de particules).

Au centre de tout ça, les propriétés de la masse d'air, des particules d'aérosol et des hydrométéores.

Diapo 13

En haut à gauche l'eau liquide montante, à droite la glace montante. En bas à gauche, l'eau liquide descendante, à droite, la glace descendante.

Formation du nuage à 3km d'altitude, développement de la glace à partir de 6km. Compétition entre les deux, or pression de vapeur saturante plus faible pour la glace, compétition aka Bergeron-Findeisen, la glace l'emporte.

Les hydrométéores grossissent et finissent par tomber : il pleut, les cristaux fondent à l'iso-zéro.

Conclusion écrite sur le transparent (on ne rentre pas dans les détails dans la présentation)

Diapo 14

Écrire au tableau les équations des différentes étapes (en amont éventuellement), passer relativement rapidement dessus en identifiant ce qui est faisable en TD/cours et ce qui est plus de l'ADS ou autre. Puis passer au programme et commenter la physique de l'on arrive à mettre en évidence assez rapidement. Et les enjeux de la modélisation (le code est conçu pour que ça se passe bien) !

Évolution adiabatique de l'air sec : profil de température

On cherche ici à obtenir l'équation d'évolution de la température avec l'altitude.

On part de l'équilibre hydrostatique :

$$\frac{dp}{dz} + \rho g = 0$$

On a donc une équation liant la différentielle de la pression et la masse volumique.

On sait que l'on cherche l'évolution de la température. Or l'air sec est considéré comme un gaz parfait. Ce qui signifie que l'on peut utiliser le premier principe de la thermodynamique pour une évolution adiabatique d'un système uniquement soumis aux forces de pression et que l'on peut écrire (cf cours de 1ère année) :

$$C_p dT = V dp$$

On arrive ainsi à un lien entre différentielle de température et masse volumique en divisant par la masse :

$$c_p dT = \rho dp$$

où c_p est la capacité thermique massique de l'air sec.

On en déduit le gradient de température de l'air sec :

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p}$$

Pour l'air sec, $g/c_p = 9,76 \text{ K km}^{-1} \simeq 10 \text{ K km}^{-1}$.

Création du profil de pression

On part de l'équation $dT = \frac{dp}{\rho c_p}$ que l'on renverse pour obtenir l'expression de la variation de pression :

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} &= -\frac{g}{\rho} \quad \text{or} \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (\text{Loi des GP}) \\ \frac{dp}{p} &= -\frac{Mg}{RT_0} \frac{dz}{\left(1 - \frac{g}{c_p T_0} z\right)} \end{aligned}$$

On retrouve alors la loi que l'on avait pour l'atmosphère isotherme avec une température qui est cette fois variable.

On intègre alors, sachant que la primitive de $(1 - a \cdot z)^{-1}$ est $-\ln(|x|)/a$ et on obtient l'expression de la pression en fonction de l'altitude :

$$p(z) = p_0 \exp\left(1 - \frac{gz}{c_p T_0}\right)^{\frac{Mc_p}{R}}$$

Modification du gradient de température

Dans la présentation on se contente d'écrire que $T(z) = -\Gamma_z z$ et on le justifie en parlant de gradient adiabatique humide. Que l'on explicite pas mais dont voici la démonstration (tirée du Diu de thermo p. 636)...

Attention, dans la suite, les grandeurs thermodynamiques sont écrites par unité de quantité de matière alors que jusqu'à présent on travaillait par unité de masse... Il faut donc penser à multiplier par M_a ou M_w pour passer de l'un à l'autre (et faire attention à celui qu'on utilise et où !)

On écrit la conservation de l'entropie au cours de l'évolution :

$$\frac{dS}{dz} = n_a \frac{ds_a}{dz} + n_v \frac{ds_v}{dz} + n_l \frac{ds_l}{dz} + \frac{dn_v}{dz} \frac{L}{T}$$

Le dernier terme correspond à la variation d'entropie due au changement d'état de l'eau qui se condense ou s'évapore lors de l'évolution de la parcelle.

Pour chacun des fluides, on a :

$$ds = \frac{c_p}{T}dT + \left. \frac{\partial s}{\partial p} \right|_T dp = \frac{c_p}{T}dT + \left. \frac{\partial s}{\partial p} \right|_T dp$$

on a utilisé ici l'égalité des dérivées croisées de dG aka relations de Maxwell.

D'autre part, avec la loi des gaz parfaits, on a : $\left. \frac{\partial v_g}{T} \right|_p = \frac{R}{p_g}$ et la dérivée du volume molaire du liquide est négligeable.

Enfin, par décomposition des pressions : $p_a = p - p_v = p - p_s(T)$ car on est à saturation en vapeur. De plus, par la loi des gaz parfaits, pour la parcelle, les nombres de moles et les pression partielles sont proportionnelles :

$$\frac{n_v}{n_a} = \frac{p_s}{p - p_s}$$

La transformation étant adiabatique réversible, on a $dS/dz = 0$, d'où :

$$0 = n_a \left(\frac{c_{p,a}}{T} \frac{dT}{dz} - \frac{R}{p} \frac{dp}{dz} \right) + n_v \left(\frac{c_{p,v}}{T} \frac{dT}{dz} - \frac{R}{p_s(T)} \frac{dp}{dz} \right) + n_l \frac{c_{p,l}}{T} \frac{dT}{dz} + \frac{dn_v}{dz} \frac{L}{T}$$

On néglige alors n_l et n_v par rapport à n_a et on divise par n_a :

$$0 = \left(\frac{c_{p,a}}{T} \frac{dT}{dz} - \frac{R}{p} \frac{dp}{dz} \right) + \frac{d}{dz} \left(\frac{p_s}{p - p_s} \right) \frac{L}{T}$$

On néglige maintenant p_s devant p :

$$0 = \left[\frac{c_p}{T} \frac{dT}{dz} - \frac{R}{p} \frac{dp}{dz} \right] + L \left[\frac{1}{p} \frac{dp_s}{dz} - \frac{p_s}{p^2} \frac{dp}{dz} \right]$$

On peut exprimer la variation de la pression de vapeur saturante à partir de la formule de Clapeyron :

$$L = T [v_v - v_l] \frac{dp}{dT}$$

puis en utilisant la loi des gaz parfaits

$$\frac{dp_s}{dz} = \frac{L p_s}{RT^2} \frac{dT}{dz}$$

Si on réintroduit maintenant l'expression de $\frac{dp_s}{dz}$ obtenue à partir de la relation de Clapeyron et l'expression de l'équilibre hydrostatique donnant $\frac{1}{p} \frac{dp}{dz}$ dans l'expression issue de la conservation de l'entropie au cours de la transformation, on obtient la formule du gradient adiabatique pour l'air saturé :

$$\left. \frac{dT}{dz} \right|_S^{sat} = - \frac{M_a g}{c_p} \left[\frac{1 + \frac{p_s(T)}{p} \frac{L}{RT}}{1 + \frac{p_s(T)}{p} \frac{L^2}{RT^2 c_p}} \right]$$

Une évaluation de cette formule pour l'atmosphère standard à 1013 hPa et $T = 288,15$ K donne un gradient de $-4,75$ K km⁻¹. Une évaluation à 616 hPa et $T = 262,15$ K donne un gradient de $-6,85$ K km⁻¹.

On a donc un ordre d'idée de ce que ça donne. Généralement, on considère que le gradient adiabatique de l'air humide est de l'ordre de -6 K km⁻¹.

Application de la dynamique des fluides à une parcelle d'air sec

On écrit l'équation d'Euler :

$$\rho \frac{dv}{dt} = - \frac{dp}{dz} - \rho g$$

Dans le code on se contente directement de discrétiser cette équation, mais pour obtenir Brunt-Väisälä, il faut retravailler un peu l'équation.

$$\begin{aligned}\frac{dv(t)}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} - g \\ \frac{d^2\delta z(t)}{dt^2} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} - g\end{aligned}$$

avec δz une petite variation d'altitude de la parcelle. On a supposé au départ l'air comme étant à l'équilibre hydrostatique donc $\frac{dp}{dz} = \rho_e g$:

$$\frac{d^2\delta z(t)}{dt^2} = -g \frac{\rho_e - \rho}{\rho}$$

Or, $\rho = \frac{pM}{RT}$, on peut donc réexprimer l'équation précédente en fonction de la température :

$$\frac{d^2\delta z(t)}{dt^2} = -g \frac{T - T_e}{T_e}$$

On remarque qu'une différence de température positive entre la masse d'air sec et l'environnement résulte en une ascension de la parcelle et qu'une différence négative résulte en une descente de la parcelle.

On introduit alors la température potentielle, qui correspond à la température qu'aurait la parcelle à une pression de 1013 hPa si elle subissait une transformation adiabatique (loi de Laplace) : $\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$.

$$\frac{d^2\delta z(t)}{dt^2} = -g \frac{\theta - \theta_e}{\theta_e}$$

En supposant qu'en z_0 , $\theta(z_0) = \theta_e(z_0)$ et en développant à l'ordre 1 en δz θ_e au numérateur, on obtient :

$$\frac{d^2\delta z(t)}{dt^2} = -\frac{g}{\theta_e} \frac{d\theta_e}{dz} \delta z = -N^2 \delta z$$

N est appelé pulsation de Brunt-Väisälä et on reconnaît une équation différentielle du second ordre. Ceci explique la sinusoïde observée dans la simulation.

Définition des pressions de vapeur saturante, parcelle humide

On donne juste le fait que $p_{\text{sat}} = f(T)$. On peut mentionner que la relation de Clapeyron permet d'obtenir :

$$\frac{dp_{\text{sat}}}{dT} = \frac{L}{T v_v}$$

soit en écrivant la loi des gaz parfaits pour remplacer le volume molaire par la pression partielle (donc la pression de vapeur saturante, de la vapeur d'eau) :

$$\frac{d}{dT} \ln p_{\text{sat}} = \frac{L}{R M_w T^2}$$

On ajoute le fait que l'humidité participe à la masse volumique.

$$p = p_{\text{sec}} + p_w = \rho_{\text{sec}} R_{\text{sec}} T + \rho_v R_v T = \rho_{\text{humide}} R_{\text{humide}} T$$

Avec R_{sec} , R_v et R_{humide} les constantes spécifiques des gaz (en $\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$)

$$\begin{aligned}\rho_{\text{humide}} &= \frac{\rho_{\text{sec}} R_{\text{sec}} + \rho_v R_v}{R_{\text{humide}}} \\ \rho_{\text{humide}} &= \frac{\rho_{\text{sec}} R_{\text{sec}} + \rho_v R_v}{R_{\text{sec}} + r R_v} \cdot (1 + r)\end{aligned}$$

La pression partielle de l'eau est très petite devant celle de l'air sec, on écrit donc $p_{\text{sec}} \simeq p$ et on néglige la pression partielle de l'eau pour obtenir :

$$\rho_{\text{humide}} = \frac{pM}{RT} \cdot \left(\frac{1 + r}{1 + 1.608r} \right)$$

on rappelle que $M/M_w = 1.608$.

Ajout de la condensation et du dégagement de chaleur latente

Pas d'équation pour la condensation : on écrit juste que si l'humidité relative est supérieure à 1, on condense l'excès.

La chaleur latente dégagée se calcule en faisant un bilan d'énergie (premier principe de la thermo) sur la parcelle d'air :

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{libere}} &= \mathcal{E}_{\text{absorbee}} \\ \mathcal{L}_v \cdot \rho_{w,\text{cond}} &= c_p \cdot \rho(z) \cdot \frac{dT}{dz}\end{aligned}$$

Remarque : on a ici une énergie par unité de volume de la parcelle

$$\mathcal{L}_v \cdot \frac{(p_w - p_{\text{sat},w})M_w}{RT} = c_p \cdot \rho(z) \cdot \frac{dT}{dz}$$

d'où la variation de la température (échauffement) dû au dégagement de chaleur latente :

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\mathcal{L}_v \cdot M_w}{c_p \cdot \rho(z)} \cdot (p_w - p_{\text{sat},w})$$

Évaporation : première approche des enjeux de la modélisation

On fait très avec les mains puisque de base, c'est juste l'opération inverse de la condensation.

Bonus : redémonstration de la loi de Laplace pour les gaz parfaits

On a déjà écrit le premier principe pour l'enthalpie. Si on l'écrit pour l'énergie interne on obtient $C_v dT = -pdV$. Comme $\rho = \frac{m}{V}$, on a naturellement $dV = -m \frac{d\rho}{\rho^2}$ d'où en remettant dans l'équation du premier principe pour l'énergie interne :

$$dT = \frac{p}{c_v} \frac{d\rho}{\rho^2}$$

On remplace alors dT dans l'expression pour l'enthalpie et on retrouve la loi de Laplace.