

Comment expliquer simplement la formation des nuages ?

Aymeric Spiga

Laboratoire de météorologie dynamique, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris

aymeric.spiga@upmc.fr

Dans l'atmosphère terrestre, un nuage est un amas de gouttelettes d'eau liquide (ou de particules de glace) en suspension dans l'air. Sa formation fait intervenir un passage de l'eau de la phase vapeur (gaz) à la phase liquide ou solide appelé condensation (condensation solide dans le cas de la glace).

Il est souvent avancé qu'un nuage se forme lorsque l'air se refroidit, car « l'air froid peut contenir moins de vapeur d'eau que l'air chaud, donc il y a condensation ». Cette affirmation, bien que couramment énoncée (et présente dans certains livres) est erronée et trompeuse, et ce pour plusieurs raisons. Voyons pourquoi, et commençons par définir quelques termes (pour simplifier, on se limite dans cet article à la formation des nuages d'eau liquide).

Définir la condensation, l'évaporation et l'équilibre liquide-vapeur

L'eau est présente dans l'atmosphère et à la surface de la Terre sous trois phases – solide, liquide, gazeuse – dans l'ordre de la plus à la moins ordonnée, ou encore de la moins à la plus déformable. Dans la phase solide, les molécules d'eau sont liées par des liaisons chimiques ; dans la phase liquide, elles sont liées beaucoup plus faiblement par des liaisons hydrogène (électrostatiques) entre l'hydrogène

d'une molécule d'eau et l'oxygène d'une autre molécule d'eau ; dans la phase gazeuse, les molécules sont libres de se déplacer.

L'évaporation est le passage de molécules d'eau de la phase liquide vers la phase gazeuse. À l'interface entre liquide et gaz, des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau peuvent se rompre. La probabilité de ce type d'événement est plus importante si l'agitation thermique, qui dépend de l'énergie cinétique des molécules d'eau dans la phase liquide, est grande. Ce phénomène qui se produit à l'échelle microscopique est représenté macroscopiquement (c'est-à-dire statistiquement pour un très grand nombre de molécules d'eau) par la température de l'eau.

La condensation est le passage de molécules d'eau de la phase gazeuse à la phase liquide. À l'interface entre liquide et gaz, des molécules d'eau en phase gazeuse se lient à des molécules d'eau liquide par le biais de liaisons hydrogène. La probabilité de ce type d'événement est plus importante si les chocs des molécules d'eau de la phase gazeuse sur l'interface sont plus fréquents. Ce phénomène d'échelle microscopique est représenté macroscopiquement par la pression partielle de la vapeur d'eau.

De ces définitions nous déduisons un grand principe : lorsque de l'eau est présente sous forme vapeur et liquide, il y a toujours à la fois évaporation et condensation. Le taux d'évaporation (nombre de particules évaporées par unité de surface et par unité de temps)

But pédagogique : Clarifier la compréhension de la condensation nuageuse

Public : Lycéens et grand public passionnés de physique et/ou de météorologie, étudiants à l'université (cursus scientifique)

Matériel nécessaire : Aucun

Site internet : Non

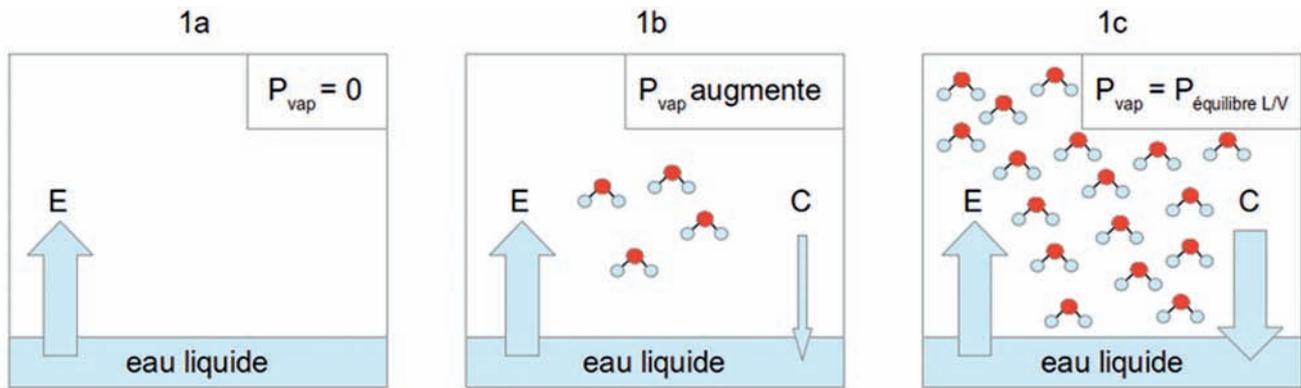


Figure 1. Une expérience de pensée pour comprendre l'équilibre liquide-vapeur. La description du schéma est donnée dans le texte. E est le taux d'évaporation, C est le taux de condensation, P_{vap} est la pression partielle de vapeur d'eau (pression exercée uniquement par la vapeur d'eau).

dépend principalement de la température de l'eau. Le taux de condensation dépend principalement de la pression partielle de la vapeur d'eau.

Continuons par une expérience de pensée (figure 1). Soit une enceinte sous vide (ne contenant aucune molécule de gaz). Introduisons dans cette enceinte une quantité donnée d'eau liquide (figure 1a). Comme décrit ci-dessus, il y a spontanément évaporation avec un taux d'évaporation qui reste approximativement constant au cours de l'expérience – à supposer, ce qui est raisonnable sur une courte durée, que la température de l'eau ne varie pas.

Des molécules d'eau s'échappent donc au-dessus du liquide et forment une phase gazeuse dont la pression partielle augmente peu à peu (figure 1b). Des molécules d'eau de cette phase gazeuse subissent à leur tour un phénomène de condensation et repassent en phase liquide. Néanmoins, au début de l'expérience, le taux de condensation est très petit, car la quantité de molécules d'eau dans la phase gazeuse est très petite, donc la pression partielle qu'elles exercent est extrêmement faible.

Ainsi, au début de l'expérience, le taux d'évaporation domine le taux de condensation, le bilan est en faveur d'une augmentation des molécules d'eau dans la phase gazeuse. Cependant, au fur et à mesure que l'expérience se déroule, le nombre de molécules d'eau dans la phase gazeuse augmente : la pression partielle de l'eau augmente, donc le taux de condensation augmente. Ce phénomène va continuer jusqu'à ce que le système atteigne un équilibre dans lequel les taux de condensation et d'évaporation se compensent exactement (figure 1c). Il s'agit du célèbre équilibre liquide-vapeur, qui

correspond à une valeur particulière de pression partielle de vapeur d'eau (qu'on peut qualifier de pression d'équilibre liquide-vapeur).

Le vocabulaire consacré pour ce phénomène en thermodynamique n'aide pas à clarifier les esprits, car cette valeur particulière de pression est souvent appelée pression de vapeur « saturante », alors qu'aucun élément du système n'est parvenu à saturation : il s'agit simplement d'un équilibre stationnaire. Le terme « stationnaire » est important, car il indique que la quantité de vapeur d'eau ne varie plus dans l'enceinte... mais n'exclut nullement que les échanges par évaporation et condensation continuent. Simplement, ce qui est perdu pour la phase gazeuse par condensation est compensé par ce qui est gagné par évaporation. La situation est similaire à celle du niveau de l'eau dans une baignoire qui peut rester constant si le débit d'eau versé par le robinet compense le débit d'eau perdu dans le siphon.

Discuter l'influence de la température sur la formation des nuages

Revenons à la phrase citée au début de cet article. À la lumière des éléments précédents, la notion que l'air peut contenir plus ou moins de vapeur d'eau semble absurde (Bohren, 2001). D'ailleurs, l'expérience de pensée ci-dessus ne suppose nullement que l'enceinte contienne d'autres molécules que de l'eau en phase gazeuse. Le résultat est le même que l'on commence à vide ou avec de l'air parfaitement sec. La question est plutôt de savoir quel est l'équilibre liquide-vapeur dans la

situation considérée, ce qui n'est lié qu'aux molécules d'eau et nullement aux autres molécules composant l'air sec !

On peut alors penser la formation de nuages par le biais de l'équilibre liquide-vapeur. Prenons le cas d'un nuage déjà formé, où eau liquide et vapeur d'eau coexistent :

- si la pression partielle de vapeur d'eau est inférieure à la valeur d'équilibre liquide-vapeur, les échanges par évaporation dominent les échanges par condensation ;
- si la pression partielle de vapeur d'eau est supérieure à la valeur d'équilibre liquide-vapeur, les échanges par condensation dominent les échanges par évaporation.

Dans les deux cas, le déséquilibre entre condensation et évaporation fournit un mécanisme de rappel pour que la pression partielle de vapeur d'eau dans le nuage soit toujours très proche de la valeur d'équilibre liquide-vapeur. La quantité de vapeur d'eau (et d'eau liquide) dans une situation donnée est donc indiquée par la valeur de pression de vapeur d'eau à l'équilibre.

Prenons le cas où un nuage n'est pas formé, et donc où uniquement de l'eau sous forme vapeur est présente :

- si la pression de vapeur d'eau est inférieure à la valeur d'équilibre liquide-vapeur, de la condensation d'eau liquide survient, mais reste très marginale devant l'évaporation qui domine les échanges entre phase liquide et phase vapeur. La formation de gouttelettes nuageuses est très peu probable ;
- si la pression de vapeur d'eau approche ou dépasse la valeur d'équilibre liquide-vapeur, les échanges par condensation deviennent comparables, voire dominent les échanges par évaporation, rendant possible la formation de gouttelette nuageuses.

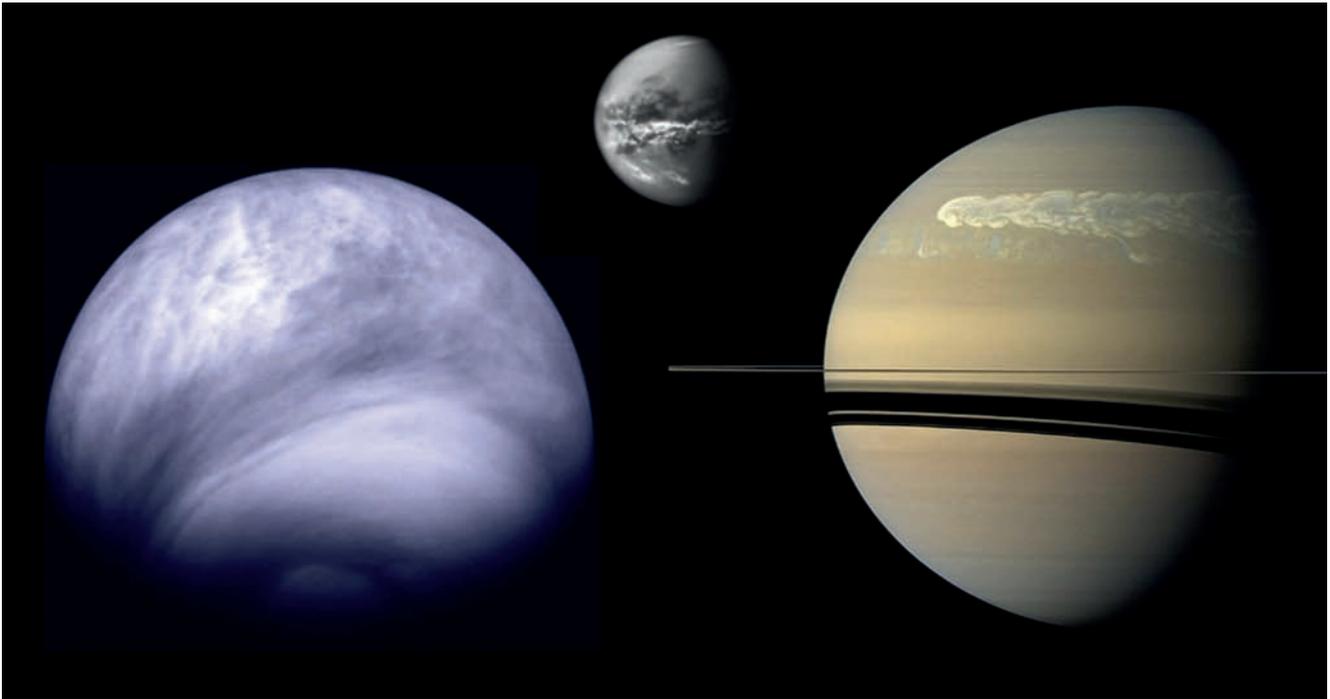


Figure 2. La formation de nuages sur les autres planètes que la Terre nous rappelle que le principe même de la formation des nuages obéit à des principes physiques précis, qui sont avant tout fonction du condensat considéré et de la température de l'atmosphère. De gauche à droite : nuages d'acide sulfurique sur Vénus (image de la mission *Venus Express* de l'ESA), nuages de méthane sur Titan (image de la mission *Cassini* de la Nasa), nuages d'eau et d'ammoniac sur Saturne (image de la mission *Cassini* de la Nasa).

Nous arrivons alors à l'explication rigoureuse du lien entre température de l'air et formation de nuages. La valeur de pression de vapeur d'eau à l'équilibre pour une température donnée peut être prédite par la loi de Clausius-Clapeyron. Sans rappeler les détails de cette loi, qui peut être trouvée dans tout bon manuel de thermodynamique, nous pouvons garder en tête le fait que la pression de vapeur d'eau à l'équilibre augmente exponentiellement avec la température. Lorsque la température diminue, cette pression de vapeur à l'équilibre chute donc de manière très marquée. Ce phénomène est un des éléments clé de la formation des nuages.

Nous pouvons alors proposer comme alternative à la phrase d'introduction les deux phrases suivantes : « Un nuage se forme lorsque l'air se refroidit, car la quantité de vapeur d'eau dans l'air est donnée par l'équilibre liquide-vapeur (dans lequel condensation et évaporation sont équilibrées) qui dépend fortement de la température de l'air. Le refroidissement de l'air rend brièvement la condensation dominante sur l'évaporation, avant qu'un nouvel équilibre ne soit atteint où la quantité de vapeur d'eau a diminué au profit de la quantité d'eau liquide, donc a contribué à épaissir le nuage. » Nous notons que le même type de description peut être donné pour le cas inverse où l'air se réchauffe et le nuage se dissipe. Par

ailleurs, les phrases proposées ne laissent planer aucun doute sur le fait qu'un nuage est formé de gouttelettes d'eau liquide (et non de vapeur d'eau comme on l'entend parfois).

Notons enfin que la description proposée fonctionne pour toute espèce condensable, par exemple sur d'autres planètes que la Terre (Sánchez-Lavega *et al.*, 2004), et présente l'avantage de reposer sur une loi physique très générale qui ne présuppose pas nécessairement que le condensat soit de l'eau. Ainsi, elle peut s'appliquer tout aussi bien aux nuages de méthane sur Titan, aux nuages d'acide sulfurique sur Vénus qu'aux nuages d'ammoniac sur les planètes géantes (figure 2).

S'ouvrir à la complexité de la physique des nuages

La formulation que nous énonçons n'est pas seulement plus exacte que celle citée au début de cet article. Elle offre l'avantage de laisser entrevoir des subtilités de la formation des nuages qui sont habituellement passées sous silence.

Tout d'abord, dans l'atmosphère, la phase liquide se condense en gouttelettes d'allure sphérique, facilitées par la

présence de noyaux de condensation (aérosols en suspension dans l'atmosphère). Ainsi, au cours de la discussion qui précède, nous avons opéré sans le dire un glissement d'une interface plane dans le réservoir à une interface sphérique dans la gouttelette nuageuse. Ce glissement sémantique est en fait lourd de sens, scientifiquement parlant. La réalité étant que la pression de vapeur d'équilibre pour une surface plane est plus faible que pour une interface courbe. Pour nous en convaincre, souvenons-nous que les molécules d'eau dans la phase liquide sont liées à leurs voisines par des liaisons hydrogène. Or elles ont plus de voisines dans le cas d'une interface plane que dans le cas d'une interface courbe (figure 3). Le taux d'évaporation est donc plus grand pour une interface courbe que pour une interface plane, toutes choses étant égales par ailleurs. La quantité de vapeur d'eau à l'équilibre liquide-vapeur est donc plus élevée pour une interface courbe que pour une interface plane. Nous introduisons ainsi le phénomène dit de « sursaturation » (à nouveau un terme qui essaie de composer avec le terme impropre de « saturation » initialement adopté) qui nous indique que la pression de vapeur pour une interface courbe peut être égale à la valeur d'équilibre calculée pour une interface plane sans qu'un nuage ne se forme. Ouvrir son auditoire sur de telles subtilités (qui se prolongent par des

concepts de microphysique que nous n'avons pas le loisir de discuter ici) est impossible avec la phrase simpliste énoncée au tout début de cet article.

Par ailleurs, nous avons considéré le cas simplifié d'une phase gazeuse en équilibre avec une phase liquide. L'atmosphère peut néanmoins être suffisamment froide pour que la phase solide de l'eau entre en considération. Il convient alors de discuter de la composition du nuage (en gouttes d'eau liquide ou en particules de glace) en faisant appel à des concepts thermodynamiques sur trois phases au lieu de deux. Le cas de l'équilibre liquide-vapeur reste néanmoins tout aussi illustratif, sans induire en erreur un lecteur qui voudrait ensuite aller plus loin dans sa compréhension des nuages.

Reconnaissons néanmoins que ces explications un peu longues sont probablement un élément de justification de la popularité de la phrase rappelée en introduction. L'on pourrait alors argumenter que, même fautive et réductrice, cette phrase reste valide en tant que métaphore. Elle demeure néanmoins très trompeuse, même d'un point de vue métaphorique. La confusion la plus grave à laquelle la phrase conduit est celle de laisser penser que l'air agit comme une « éponge » à vapeur d'eau qui pourrait se dilater en fonction de la température. L'image d'une éponge peut laisser penser, à tort, à une analogie entre l'ad/absorption dans les sols et la formation des nuages.

La formation des nuages est un exemple d'application directe de concepts fondamentaux de la physique. Savoir

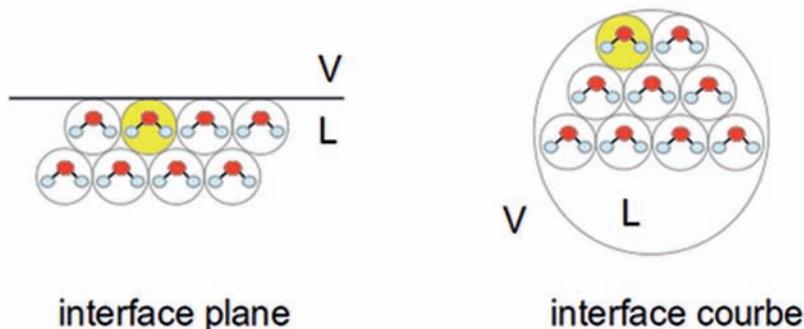


Figure 3. Vue schématique d'une interface plane et d'une interface courbe (gouttelette nuageuse) [inspirée par Babin, 2010]. Les molécules d'eau sont stylisées par des petites billes et le contact entre des billes voisines représente les liaisons hydrogène. V est la phase vapeur et L la phase liquide. Cette représentation schématique n'a aucune ambition de représenter la réalité (faite d'interactions tridimensionnelles complexes et de molécules qui sont tout sauf des billes), mais d'illustrer l'effet de la courbure de l'interface sur l'évaporation. Dans le cas par exemple d'une interface plane, la molécule d'eau en jaune est liée par liaison hydrogène à quatre molécules voisines, alors qu'elle n'est liée qu'à trois voisines dans le cas de l'interface courbe. L'évaporation est donc plus efficace dans le cas d'une interface courbe, ce qui est exprimé par une formule mathématique que l'on appelle équation de Kelvin.

comment ils se forment n'enlève rien à leur beauté poétique et permet de donner un exemple extrêmement concret, dans la vie quotidienne de tout un chacun, de la puissance de la physique pour expliquer les phénomènes naturels.

Remerciements

Je remercie Camille Risi et Olivier Boucher pour leur invitation à rédiger cet article et leurs remarques constructives. Un grand merci au rapporteur anonyme de l'article dont les suggestions ont permis de clarifier le propos. Le contenu ici présenté est dérivé de cours d'introduction à la météorologie donnés au niveau licence et master à l'université Pierre-et-Marie-Curie. Je

remercie Jean-Baptiste Madeleine et Francis Codron pour des discussions toujours constructives lors de la préparation de ces cours

Bibliographie

- Bohren C.F., 2001. *Clouds in a glass of beer, Simple experiments in atmospheric physics*, Dover Publications, 224 p.
- Babin S.M., *Water vapor myths, A brief tutorial*, copyright 1998-2010, disponible à l'adresse : <http://fermi.jhuapl.edu/people/babin/vapor/index.html> [consulté le 15 septembre 2016].
- Sánchez-Lavega A., Pérez-Hoyos S., Hueso R., 2004. Clouds in planetary atmospheres: A useful application of the Clausius-Clapeyron equation. *Am. J. Phys.*, 72, 767-774.