

# Mise en évidence de la chaleur latente liée à l'évaporation et à la condensation de l'eau

## Applications au fonctionnement des orages

**Camille Risi, Venance Journé, Jean-Louis Dufresne, Jean-Yves Grandpeix, Aymeric Spiga**

Laboratoire de météorologie dynamique, Institut Pierre-Simon Laplace / CNRS / Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris

camille.risi@lmd.jussieu.fr

Nous présentons ici deux expériences très simples dont le but est de mettre en évidence les échanges d'énergie qui se produisent durant l'évaporation puis la condensation de l'eau (Dufresne, 2000). Ces échanges sont liés à l'enthalpie de changement d'état qui accompagne le passage d'un état physique à un autre état. On continue cependant d'utiliser le terme de « chaleur latente » qui s'est répandu au XIX<sup>e</sup> siècle avant que les concepts de thermodynamique ne soient mieux établis. On parle ainsi improprement de dégagement de chaleur latente lors de la condensation et d'absorption de chaleur latente lors de l'évaporation. Pour les plus petits, il n'est pas nécessaire d'introduire ces termes, on peut se contenter de parler d'effets refroidissant ou réchauffant lors des changements d'état de l'eau. Chacune des deux expériences proposées permet d'illustrer l'importance de cette notion en météorologie, en prenant l'exemple concret des orages. Ainsi, elles constituent une suite logique de l'expérience du nuage formé dans une bouteille (Risi *et al.*, 2014), composant un ensemble permettant d'explorer les processus de formation des nuages et des orages.

**But pédagogique :** mettre en évidence les échanges d'énergie liés à l'évaporation et à la condensation de l'eau ; montrer l'importance de cette notion en météorologie, en prenant l'exemple concret des orages.

**Public :** du CE2 au lycée, discours adaptable.

**Matériel nécessaire :** un petit pulvérisateur ; de l'eau chaude ; un chauffe-plats (ou une plaque chauffante) dont la température est uniforme ; deux récipients identiques, à fond plat, en pyrex, d'environ 5 à 10 cm de hauteur, avec leur couvercle (tel qu'on peut en trouver dans toute droguerie) ; un thermomètre à sonde (facultatif), un thermomètre infrarouge (facultatif), un ventilateur (facultatif).

**Site internet :**

[www.ipsl.fr/Pour-tous/Espace-pedagogique](http://www.ipsl.fr/Pour-tous/Espace-pedagogique)  
[www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/Manip](http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/Manip)

ambiante). Le pulvérisateur permet de disperser un liquide sous la forme de très fines gouttelettes. L'eau est pulvérisée en direction de la sonde du thermomètre qui, initialement, mesure la température ambiante. Il indique alors que la température diminue de plusieurs degrés (figure 1). En

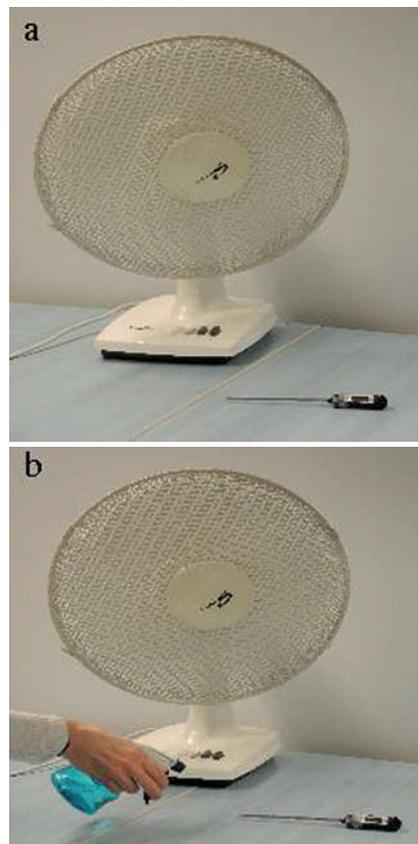


Figure 1. Dispositif (ventilateur, thermomètre et pulvérisateur) illustrant le protocole expérimental. a) Avant pulvérisation de l'eau, la température affichée est de 23,9 °C. b) Après pulvérisation de l'eau en direction du thermomètre, la température baisse jusqu'à 17,2 °C.

## La chaleur latente liée à l'évaporation

### Protocole expérimental

On prépare tout d'abord un pulvérisateur avec de l'eau chaude (c'est-à-dire d'une température nettement supérieure à la température

l'absence de thermomètre, on peut aussi pulvériser l'eau chaude sur la main d'une personne volontaire et lui demander quelle est la sensation ressentie. La réponse sera une sensation de froid. Dans les deux cas, il est possible d'accentuer le refroidissement en utilisant un ventilateur (figure 1).

Quand on demande au public ce qui explique le refroidissement ou la sensation de froid, il répond souvent que c'est parce que l'eau est froide. Mesurer la température de l'eau chaude à l'intérieur du pulvérisateur ou simplement faire toucher le pulvérisateur permet de réfuter cette hypothèse.

## Explication

Comment expliquer le refroidissement ou la sensation de froid quand l'eau est pulvérisée ? Il s'agit d'amener le public à se rendre compte qu'après pulvérisation les fines gouttelettes d'eau déposées sur le thermomètre (ou sur la main) s'évaporent : elles « passent » sous forme gazeuse, c'est-à-dire sous forme de vapeur d'eau, qui est invisible. On appelle ce changement d'état l'évaporation, ou encore la vaporisation.

Il n'est pas nécessaire de faire bouillir l'eau pour l'évaporer. L'évaporation se produit dès que l'air est suffisamment sec. Le taux d'évaporation (que l'on mesure en kg d'eau par m<sup>2</sup> de surface d'eau liquide et par seconde) est proportionnel à la différence  $q_{\text{sat}}(T_s) - q_a$ , où  $q_a$  est l'humidité volumique de l'air en kg d'eau par m<sup>3</sup> d'air,  $T_s$  est la température à la surface de l'eau liquide et  $q_{\text{sat}}(T_s)$  est l'humidité

volumique à saturation à la température  $T_s$  (c'est-à-dire la quantité maximale d'eau par unité de volume pouvant exister sous forme de gaz avant qu'elle ne se condense). L'évaporation se produit dès lors que l'air est sous-saturé ( $q_a < q_{\text{sat}}(T_s)$ ). Elle est d'autant plus forte que l'air est sec ( $q_a$  est faible). Dans un cas extrême inverse, si l'air est très humide, comme par exemple en Inde pendant la mousson ou bien au hammam, l'évaporation ne peut se produire. L'air est tellement humide que si de l'eau s'évapore, une même quantité de vapeur d'eau se condense aussitôt.

Pour constater que l'évaporation entraîne le refroidissement, il est possible de faire une analogie avec une activité quotidienne : en sortant du bain, on a froid, car l'eau sur le corps s'évapore et le refroidit. De même, la transpiration permet au corps de réguler sa température, car, en s'évaporant, la sueur absorbe la chaleur du corps. En Inde, en été, où l'air est trop humide pour que l'eau ne s'évapore, la sueur ne peut s'évaporer, ce qui rend la chaleur plus difficile à supporter.

L'eau qui s'évapore refroidit son environnement, car l'évaporation nécessite de l'énergie. Pour s'en rendre compte, on peut demander comment faire évaporer le plus rapidement possible l'eau d'une casserole : intuitivement, on propose de la chauffer. En effet, il faut apporter de l'énergie à l'eau pour qu'elle s'évapore. Il faut briser les liaisons qui maintiennent les molécules ensemble, ce qui demande de l'énergie. Si l'on n'apporte pas d'énergie à l'eau pour qu'elle s'évapore, alors elle puise

l'énergie nécessaire dans son environnement en le refroidissant. Comme cela a été dit ci-dessus, l'eau sur le corps qui s'évapore à la sortie du bain puise essentiellement son énergie dans la chaleur de la peau, expliquant la sensation de froid. Cette énergie, appelée « chaleur latente » ou encore « enthalpie de changement d'état », est élevée : l'évaporation d'un gramme d'eau consomme environ six fois plus d'énergie que son chauffage de 0 à 100 °C !

Le protocole proposé permet de maximiser l'évaporation de l'eau. D'une part, le fait de pulvériser de l'eau en fines gouttelettes accélère l'évaporation, car la surface d'échange entre l'eau et l'air est plus grande. D'autre part, le taux d'évaporation est proportionnel à la vitesse de l'air près de la surface de l'eau. En effet, en l'absence de vent, la vapeur d'eau issue de l'évaporation reste à proximité de la surface liquide et devient vite saturée, ce qui limite l'évaporation. En présence d'un mouvement d'air, la vapeur d'eau est chassée, ce qui entretient le processus d'évaporation. C'est pourquoi le ventilateur placé à proximité du thermomètre accélère l'évaporation. Dans la vie quotidienne, le meilleur moyen de ne pas avoir froid en sortant du bain est d'éviter les courants d'air.

## Application aux orages

L'effet refroidissant de l'évaporation a des conséquences dans le fonctionnement des orages. Un nuage associé à la formation d'un orage est de type cumulonimbus (figure 2a), caractérisé par sa forme de champignon, avec une colonne ascendante centrale (le pied du

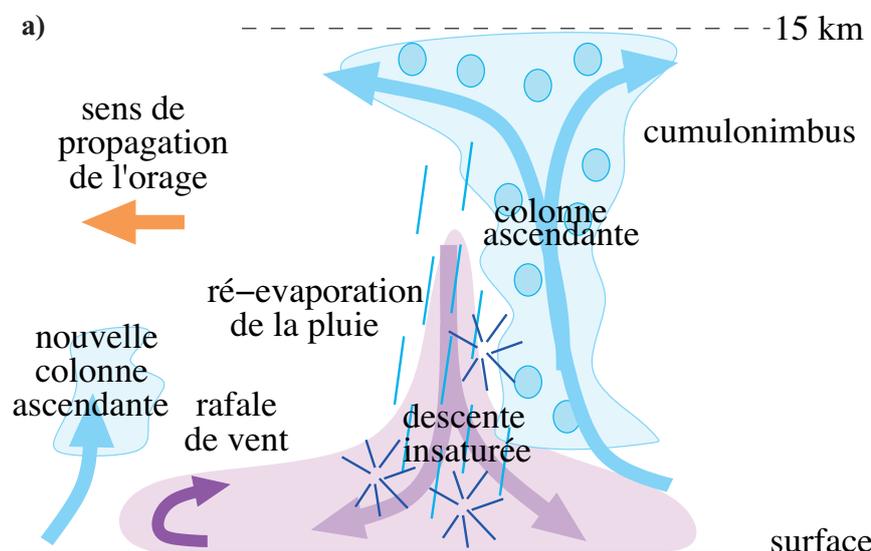


Figure 2. a) Schéma d'un orage, constitué d'un cumulonimbus. b) Nuage de poussière annonçant l'arrivée d'un orage au Mali. L'orage est bordé à l'avant par un front de rafales de vent soulevant la poussière.

champignon) et une « enclume » (le chapeau du champignon). Dans le nuage, la vapeur d'eau se condense pour former des gouttelettes qui tombent lorsqu'elles sont suffisamment grosses. Une partie de cette pluie s'évapore partiellement lors de sa chute, soit parce que l'air environnant relativement sec provenant de la moyenne troposphère est incorporé dans le nuage, soit parce que des gouttes de pluie tombent à l'extérieur du nuage, dans un air environnant qui n'est pas saturé en eau. L'évaporation de la pluie refroidit l'air. Or, un air plus froid est plus dense, ce qui le fait descendre. Par ailleurs, le mouvement descendant de l'air peut être amplifié par l'effet de viscosité des précipitations sur l'air, la pluie entraînant avec elle l'air qui l'entoure (de même qu'ouvrir le robinet à grand jet dans la douche provoque un mouvement descendant de l'air). Ces deux mécanismes provoquent des descentes d'air froid appelées « descentes précipitantes ».

En atteignant le sol, ces descentes d'air froid alimentent des « poches froides » qui s'étalent en produisant des courants de densité (qui sont des courants dont l'étalement en surface est provoqué par la différence de densité par rapport à l'air environnant). Ces poches provoquent des rafales de vent au front de ces courants. C'est pour cette raison que l'on constate souvent de fortes rafales juste avant l'arrivée d'un orage. Les rafales sont nécessaires à la propagation des orages. En effet, elles provoquent le soulèvement de l'air à l'avant des nuages d'orage et permettent ainsi la formation d'une nouvelle colonne ascendante. Ainsi, l'orage se propage par régénération de nouvelles colonnes ascendantes à proximité des rafales (figure 2).

## La chaleur latente liée à la condensation

### Protocole expérimental

Sur un chauffe-plats, on dispose deux récipients avec leur couvercle, identiques, à fond plat, en pyrex (figure 3). Les récipients sont disposés sur le chauffe-plats en marche au moins une heure avant l'expérience pour s'assurer que la température est bien uniforme et à l'équilibre. L'un des

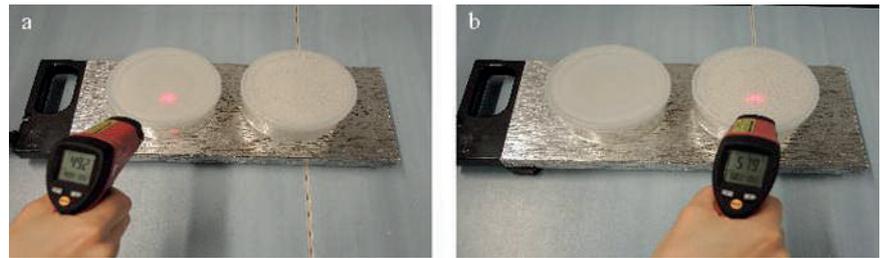


Figure 3. Protocole expérimental illustrant le chauffe-plats, les récipients fermés par leur couvercle et le thermomètre infrarouge. a) La température mesurée sur le couvercle du récipient vide est de 49,2 °C. b) Celle mesurée sur le couvercle du récipient contenant de l'eau est de 57,9 °C.

récipients contient quelques millimètres d'eau ; l'autre est vide. On questionne le public : y a-t-il un couvercle plus chaud que l'autre et, si oui, lequel ? Puis on compare la température des deux couvercles, soit avec un thermomètre infrarouge (figure 3), soit tout simplement avec la main. On constate que le couvercle le plus chaud est celui du récipient qui contient de l'eau.

### Explication

Pour quelle raison le couvercle du récipient contenant de l'eau est-il plus chaud que l'autre ? On remarque la présence de petites gouttes d'eau sous le couvercle du récipient contenant de l'eau (figure 3). L'eau au fond du récipient s'est évaporée, la vapeur se condensant ensuite au contact du couvercle relativement froid par rapport au fond du récipient chauffé par le chauffe-plats. Contrairement à l'effet refroidissant de l'évaporation, la condensation a un effet réchauffant. Dans le récipient vide, des mouvements de convection de l'air transfèrent la chaleur du chauffe-plats vers le couvercle (figure 4a). Ces mouvements se produisent aussi dans le récipient contenant de l'eau, mais en outre, la condensation libère un

supplément d'énergie, ce qui explique la température plus élevée du couvercle (figure 4b).

Tandis que l'évaporation nécessite de l'énergie, la condensation en libère. Les deux phénomènes impliquent la même quantité de chaleur latente, absorbée dans le premier cas, dégagée dans le second. Dans la vie quotidienne, la condensation peut être ressentie de façon très désagréable : par exemple, en passant la main au-dessus d'une casserole d'eau bouillante, on croit que « la vapeur brûle ». En réalité, ce n'est pas la vapeur qui brûle, mais l'énergie libérée lors de la condensation de cette vapeur sur la main. L'air à 100 ou 150 °C ne brûle pas s'il est sec, mais l'air humide suffisamment chaud peut provoquer des brûlures très graves en raison de l'apport de chaleur par condensation.

### Application aux orages

Le fait que la condensation libère de l'énergie a également des conséquences dans le fonctionnement des orages. Aux latitudes tempérées, en été, on observe souvent des cumulus, qui sont des nuages de beau temps de basse altitude (entre 300 m et 3 km) (figure 5a). Les jours orageux, ils se transforment en

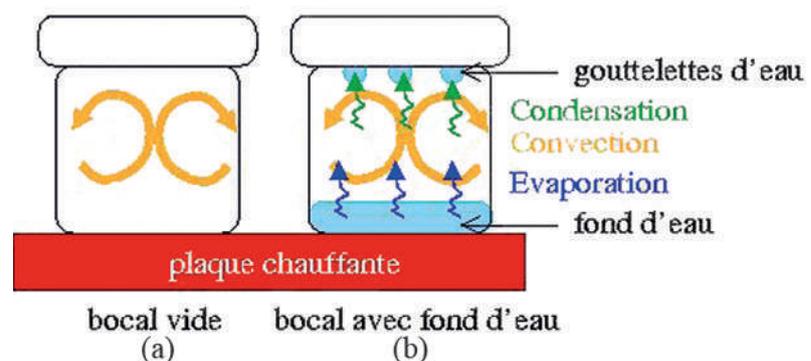


Figure 4. Schéma expliquant la raison pour laquelle le couvercle du récipient contenant de l'eau est plus chaud que celui du récipient vide. Dans les deux récipients, la chaleur est transférée par convection du chauffe-plats vers le couvercle. Dans le récipient contenant de l'eau, la condensation de l'eau qui s'est évaporée libère en outre un excédent d'énergie au contact du couvercle.

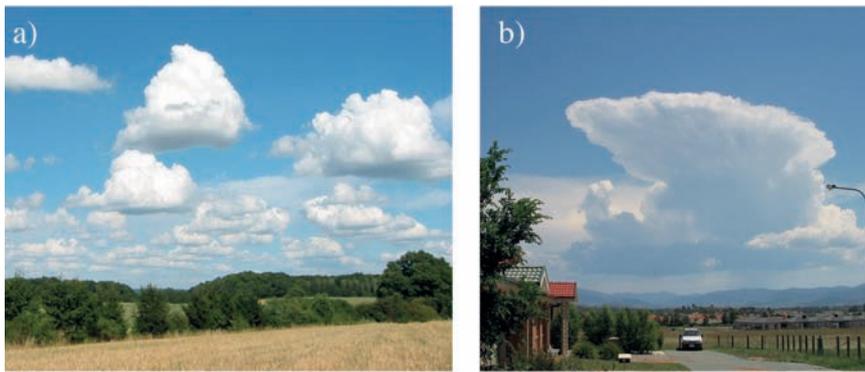


Figure 5. a) Cumulus de beau temps. b) Cumulonimbus. Crédit photo : a) Thierry Lombry, b) Karen Hedley, 2008.

cumulonimbus, qui s'étendent jusqu'à 10 ou 15 km d'altitude (figure 5b). Les nuages d'extension intermédiaire sont rares. Quand un cumulus s'étend verticalement et forme une colonne convective, celle-ci atteint son altitude maximale en moins d'une heure. C'est l'énergie libérée lors de la condensation qui explique cette montée d'air si rapide et à des altitudes si élevées.

La pression atmosphérique à une altitude donnée représente le poids de l'atmosphère surplombant cette altitude. C'est pourquoi la pression diminue avec l'altitude. Quand une parcelle d'air s'élève dans une colonne convective, sa pression se met rapidement à l'équilibre avec celle du milieu atmosphérique ambiant et donc diminue. Cette

diminution de pression (détente) de la parcelle d'air peut être considérée comme adiabatique : il n'y a pas d'échange de chaleur avec l'environnement (les panaches ascendants ont typiquement un diamètre supérieur au kilomètre, ce qui limite les échanges thermiques avec l'extérieur à la bordure du panache ; de plus, les échanges radiatifs sont négligeables). En conditions adiabatiques, la détente refroidit l'air. Dans le cas d'un air très sec, il n'y a pas de condensation et la température de l'air ascendant suit la courbe rouge de la figure 6, appelée « adiabatique sèche ». Dans le cas de la figure, la parcelle d'air devient plus froide, donc plus dense, que son environnement donné par la courbe noire, et redescend par gravité : l'ascendance centrale du cumulonimbus

ne peut pas se développer. Au contraire, dans le cas où l'air est suffisamment humide, la vapeur d'eau se condense à partir d'un niveau appelé « niveau de condensation » (figure 6). En présence de condensation, la chaleur latente libérée conduit la parcelle d'air à moins se refroidir que dans le cas d'un air sec (courbe bleue sur la figure 6, appelée « adiabatique humide »). Lorsque la parcelle d'air atteint une certaine altitude, appelée « niveau de convection libre », elle devient plus chaude que son environnement. Moins dense, elle continue de s'élever en vertu de la poussée d'Archimède. Rien ne peut alors la freiner dans son ascension : en effet, plus la parcelle monte, plus elle se condense, et plus la chaleur latente libérée est importante, atténuant ainsi son refroidissement. La parcelle d'air monte ainsi jusqu'à l'altitude où sa température redevient inférieure à celle de son environnement. On appelle cette altitude le « niveau d'équilibre ». Ce niveau se trouve généralement au sommet de la troposphère, où la température commence à augmenter avec l'altitude (figure 6).

## Conclusion

Ces deux expériences très simples sont riches en enseignements à plusieurs niveaux. Elles permettent d'expliquer des phénomènes de la vie quotidienne (fraîcheur à la sortie du bain, rôle de la transpiration, brûlures en passant la main au-dessus d'une casserole) et de mieux comprendre le fonctionnement des orages (extension verticale, fronts de rafales, propagation des orages). Le mécanisme évaporation-condensation est le principal mécanisme d'échange d'énergie sur Terre. Sur les  $160 \text{ W m}^{-2}$  de rayonnement solaire absorbé en moyenne par la surface de la Terre,  $80 \text{ W m}^{-2}$  environ sont « évacués » par évaporation de l'eau à la surface, le reste étant perdu par rayonnement infrarouge ( $60 \text{ W m}^{-2}$ ) et par convection sèche ( $20 \text{ W m}^{-2}$ ).

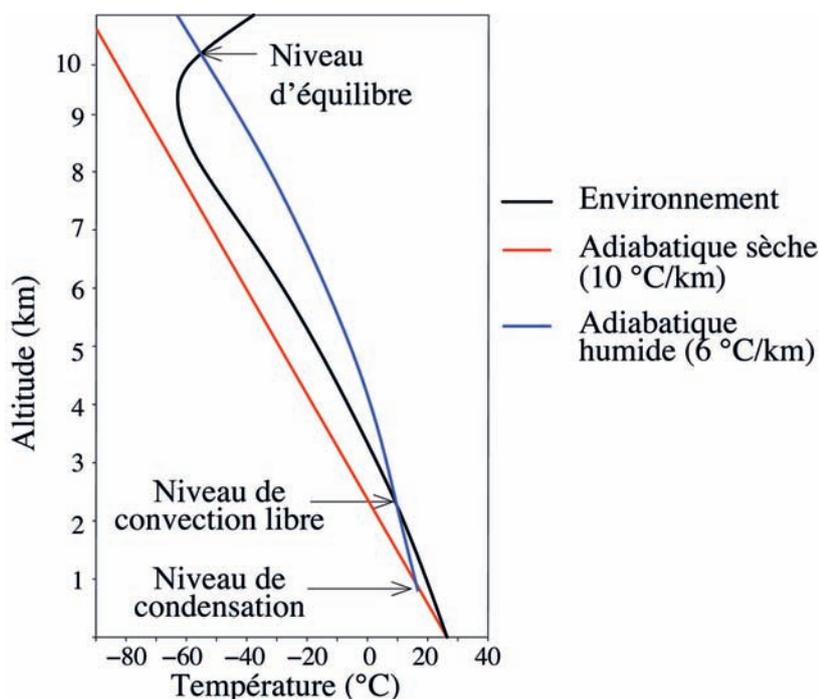


Figure 6. Diagramme altitude-température expliquant le devenir d'une parcelle d'air ascendante. La courbe noire correspond à la température de l'environnement. La courbe rouge, appelée « adiabatique sèche », correspond au devenir d'une parcelle d'air qui monte sans condensation. La courbe bleue, appelée « adiabatique humide », correspond au devenir de cette même parcelle si la vapeur d'eau se condense.

## Bibliographie

Dufresne J.-L., 2000. La Physique du climat. In : *Graines de Sciences 2*. Le Pommier, Paris, 77-100.

Risi C., Dufresne J.-L., Grandpeix J.-Y., Labetoulle S., Sèze G., Spiga A., 2014. L'expérience du nuage dans une bouteille. *La Météorologie*, 86, 20-22.