



HAL
open science

Étude thermodynamique de la troposphère terrestre par analogie avec le processus de distillation à reflux infini.

Marc Mallet

► **To cite this version:**

Marc Mallet. Étude thermodynamique de la troposphère terrestre par analogie avec le processus de distillation à reflux infini.. 2014. hal-00943666

HAL Id: hal-00943666

<https://hal.science/hal-00943666>

Submitted on 8 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude thermodynamique de la troposphère terrestre par analogie avec le processus de distillation à reflux infini.

Marc MALLET
ex-Maître de Conférences à l'IUT de Chimie de Mont Saint Aignan
Université de ROUEN

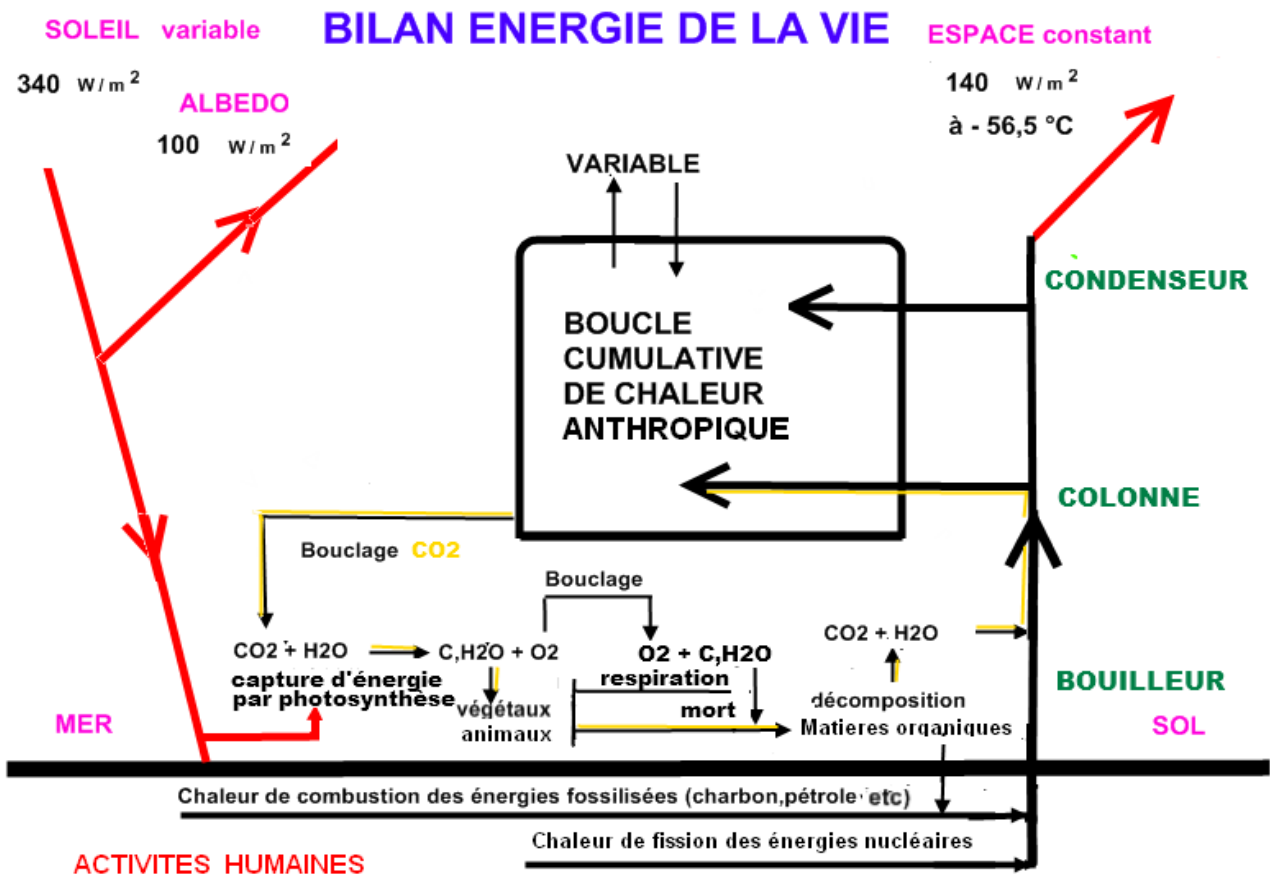
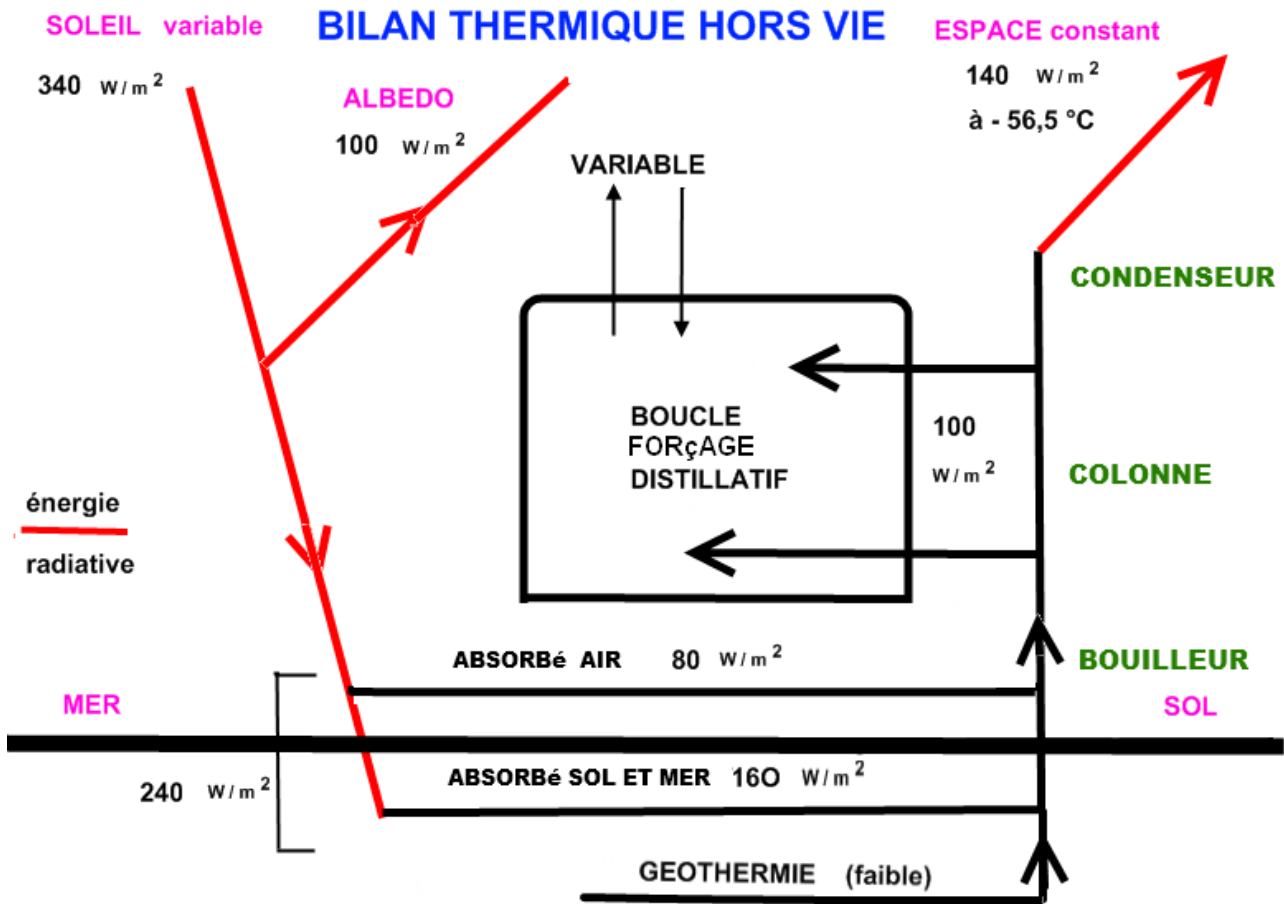
Beaucoup de climatologues supposent que le flux d'énergie radiative que la Terre reçoit du Soleil est, tout le moins en moyenne, égal au flux radiatif que la Terre ré-envoie dans l'espace^{1 2}. Cette hypothèse est inexacte car la Terre formerait alors un système en équilibre stationnaire dynamique dont l'énergie interne serait constante et le réchauffement climatique serait donc impossible. Ceci ne correspond pas aux observations constatées. Pour des raisons ultérieurement justifiées, nous pensons que seule l'émission radiative de la Terre vers l'espace est constante jour et nuit depuis l'apparition du dioxyde de carbone sur Terre.

Il devient donc nécessaire pour permettre cette différence d'envisager un réservoir de chaleur+ travail pouvant se remplir ou se vider selon que la Terre reçoit plus ou moins d'énergie qu'elle n'est capable d'en rayonner dans l'espace. C'est la troposphère terrestre qui joue ce rôle : ainsi s'expliquent les variations climatiques (jour et nuit, saison, période glaciaire et interglaciaire) qui sont observées sur Terre depuis des millions d'années. Pour tenir compte de ces remarques ainsi que des données déjà proposées pour les transferts thermiques dans la troposphère, nous envisageons les bilans sans vie et avec vie fournis dans cette publication. Nous développons ci-dessous une analogie avec le fonctionnement d'une colonne à distiller en reflux infini pour justifier l'essentiel du comportement thermodynamique de la troposphère.

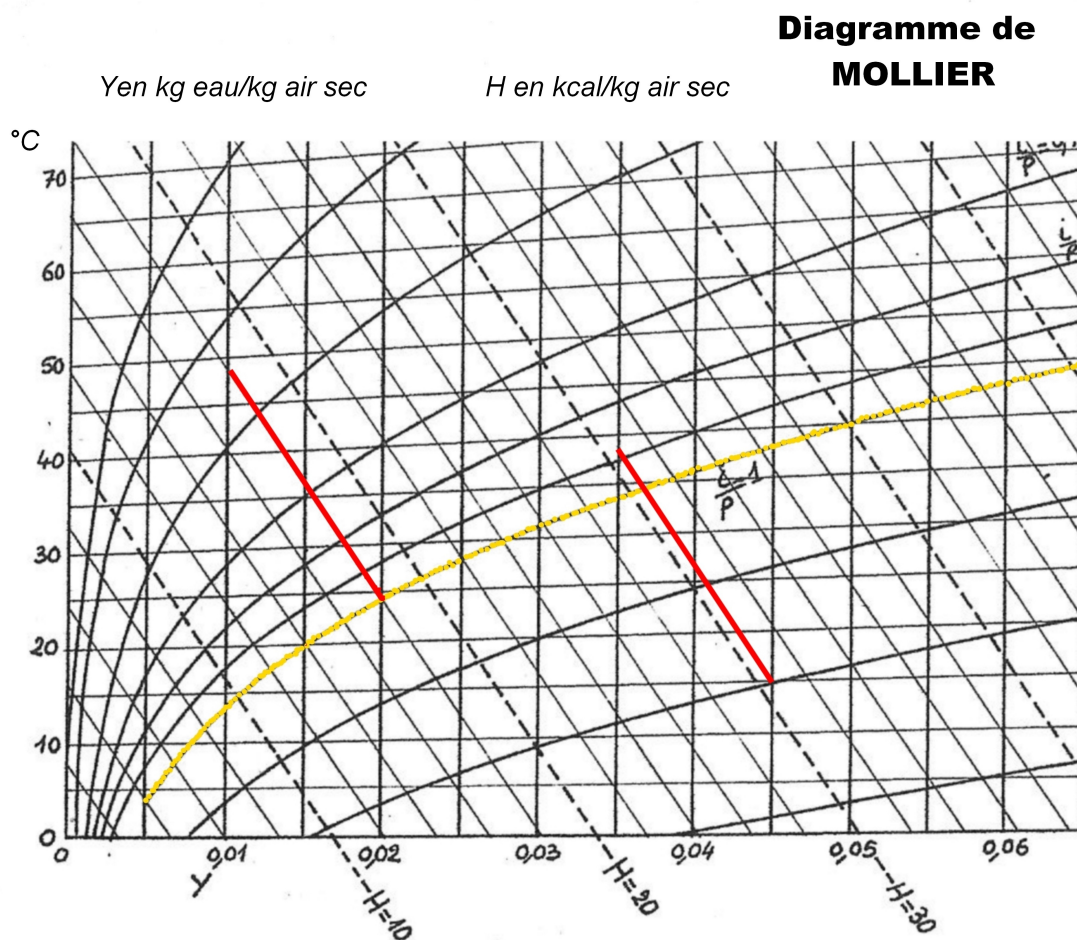
Dans une colonne à distiller on fait coexister deux phases à contre courant, l'une montant sous la forme d'une vapeur créée par le chauffage d'un bouilleur et l'autre descendant sous forme liquide après qu'un condenseur situé en haut de la colonne ait permis le changement de phase. Il faut s'arranger pour qu'un échange de chaleur et de matières s'effectue à tous les niveaux pour améliorer la séparation des composés dans le mélange qui est distillé. Pour cela on utilise le barbotage de la vapeur dans le liquide en aménageant des plateaux successifs ou un garnissage dispersant les phases. On constate alors, après un certain temps où la colonne se met en équilibre, une diminution progressive de la température quant on s'élève dans la colonne ainsi qu'une séparation par niveaux plus ou moins réussie des différents constituants du bouilleur en fonction décroissante de la température d'ébullition des composés à l'état pur. Il devient possible de récupérer assez purifiés les différentes espèces chimiques du mélange. Pour cela il ne faut pas renvoyer en tête de colonne tout le liquide récupéré dans le condenseur car le bilan matière ne pourrait pas être satisfait quant on pratique un soutirage. Si on renvoie tout le liquide on travaille en reflux dit infini et la colonne devient improductive mais acquiert des propriétés particulières. C'est une analogie avec ce type de fonctionnement que nous proposons pour la troposphère.

1 René Moreau L'air et l'eau edpsciences Université de Grenoble page 29

2 R Delmas G Mégie V-H Peuch Physique et Chimie de l'atmosphère Belin page 116 et 416



La diminution de la température avec l'altitude jusqu'à la stratosphère est un truisme. La circulation à contre-courant d'un air qui monte et d'un air qui descend est aussi facilement observée. Beaucoup pensent que l'air chaud s'élève par convection car il est plus léger que l'air froid, mais peu de gens pensent que c'est aussi parce l'air humide est plus léger que l'air sec. Il y a donc un flux chaud et humide qui s'élève face à un flux froid et sec qui descend. Le fait que l'air humide soit plus léger que l'air sec comme ne le croit pas la majorité des personnes questionnées à ce sujet vient du fait qu'en appliquant la théorie des gaz parfaits, la densité d'un gaz est proportionnelle à sa masse molaire, ce qui fait 18 pour la vapeur d'eau et 29 pour l'air. Il existe dans la troposphère des structures en colonnes juxtaposées qui résistent assez bien aux cisaillements que pourrait engendrer le déplacement horizontal de l'air sous l'action du vent: ce sont les colonnes de Taylor. Ces structures verticales tourbillonnaires se divisent en un type ascendant et un type descendant qui assurent un bilan-matière analogue à un reflux infini. Comment s'effectue le transport de chaleur et de matière (essentiellement la vapeur d'eau) entre ces deux « phases » ? La chaleur passe naturellement du milieu chaud vers le milieu froid, c'est à dire de la phase montante à la phase descendante. Pour la vapeur d'eau, il faut envisager une analogie avec le comportement d'une solution diluée homogène soumise à une différence de température. Dans la zone chauffée, la vitesse des particules augmente avec l'énergie cinétique correspondante, mais du fait que le libre parcours moyen est peu modifié, le nombre de chocs intermoléculaires augmente également. D'après le principe d'égalisation des énergies élémentaires, il devient nécessaire de diminuer le nombre de ces chocs dans la partie chaude en faisant migrer du soluté de la partie chauffée vers la partie froide. Le soluté (ici l'eau vapeur) passe donc de la « phase » chaude qui s'élève à la « phase » froide qui descend. Ces deux transferts se conjuguent dans un effet commun qui font donc que les deux phases sont **freinées** : la phase chaude montante par refroidissement et alourdissement et la phase froide descendante par réchauffage et allègement. Le transfert horizontal de chaleur et de matière est donc favorisé. L'analogie avec la colonne à distiller est donc bien réelle.



Dans une colonne à distiller en reflux infini on constate que dans le condenseur s'accumule le composé le plus volatil et que la température devient stable et égale à la température d'ébullition de ce dernier. Dans la troposphère le dernier condensable est le gaz carbonique. La température de condensation devrait donc être égale à celle provoquant la désagrégation du cristal moléculaire du dioxyde de carbone,

c'est à dire la température de son point triple $-56,4^{\circ}\text{C}$ ³. Cette température est bien en effet celle observée dans la tropopause au sommet des colonnes de Taylor:⁴ elle est bien constante et vaut $-56,5^{\circ}\text{C}$. Cette égalité au dixième de degré près peut difficilement être une coïncidence: elle prouve la validité du modèle proposé ici.

Pour optimiser le pouvoir séparateur d'une colonne à distiller il convient de la rendre adiabatique, c'est à dire éviter un échange de chaleur avec l'extérieur: pour cela on la calorifuge. Il faut aussi que son débit liquide-vapeur interne soit proche de l'engorgement, c'est à dire le moment où la circulation à contre-courant ne peut plus s'effectuer à cause des pertes de charge trop importantes. Pour cela on règle la puissance du bouilleur. En reflux infini, ces contraintes disparaissent: le pouvoir séparateur devient indépendant de l'adiabaticité de la colonne et la puissance de chauffage du bouilleur doit être simplement suffisante pour créer une phase montante. Donc pour la troposphère, les échanges de chaleur et de matière entre les colonnes de Taylor ainsi que la puissance de chauffage du sol selon l'ensoleillement solaire ne modifient pas les caractéristiques de la séparation. Cette propriété tend donc à stratifier horizontalement les couches atmosphériques en les superposant dans un état stable. C'est ce qui s'observe en haut de la troposphère. Pour la partie basse par contre, il existe un élément perturbateur qui est dû à la condensation de la vapeur d'eau. Nous avons déjà fait observer que l'air humide chargé en vapeur d'eau est plus léger que l'air sec. Au cours de cette condensation, l'air devient plus lourd car plus sec, mais aussi plus léger car chauffé par la chaleur latente de condensation de l'eau. Ce phénomène qui met en jeu deux effets contradictoires est source de turbulences d'autant plus que la chaleur se dégage dans la phase condensée et met forcément un certain temps pour passer dans l'air. Le diagramme de Mollier⁵ de l'air humide nous permet de quantifier ces effets. Une évolution isenthalpique (pression constante) et adiabatique (sans échange de chaleur) montre que la condensation de 10 grammes de vapeur d'eau élève la température d'un kilogramme d'air sec d'environ 25°C . Ces valeurs sont tout à fait compatibles à ce qui s'observe dans la troposphère où la saturation en vapeur d'eau à 40°C est de 50 g par kilogramme d'air. Ces effets antagonistes de la condensation de la vapeur d'eau sont probablement à l'origine de la turbulence constatée dans la couche limite qui existe à partir du sol. Dans cette zone d'épaisseur très variable, la vapeur d'eau est piégée par l'effet de distillation qui veut que le gaz le plus « lourd » reste au niveau du bouilleur, le sol pour la troposphère. Ce phénomène turbulent cesse quand il n'y a plus de vapeur d'eau condensable c'est à dire en dessous de 0°C . C'est bien ce qui semble être constaté dans la troposphère. Hors humidité condensable, quand l'air est sec, la troposphère est dans un état stable avec des températures décroissantes avec l'altitude. Un effet distillatif explique facilement cette décroissance linéaire: Dans les colonnes de Taylor, les teneurs en différents gaz sont très peu différentes entre les colonnes montantes et descendantes. Cela entraîne dans la construction simplifiée de Mac Cabe et Thiele⁶ une valeur presque égale du x et du y c'est à dire une courbe d'équilibre proche de la première diagonale qui est justement une droite.

Dans certaines conditions assez rares, les colonnes de Taylor sont détruites et les deux flux montant et descendant sont nettement séparés, ce qui empêche les échanges de chaleur et de matière dans le plan horizontal. C'est le cas des tornades et des cyclones. La troposphère est percée soit par le bas soit par le haut. Dans une tornade, l'air trop chaud et peu dense s'élève en tourbillonnant, ce qui crée au centre de ce tourbillon une aspiration de l'air froid et sec de la haute troposphère qui descend alors plus ou moins près vers le sol. Dans le cas d'un cyclone l'air froid et sec est suffisamment dense pour atteindre le sol et s'y étaler aussi longtemps que son allègement par chauffage et humidification lui permet de remonter. Les énergies mises en jeu peuvent devenir considérables. Par-contre, il existe entre la troposphère et la stratosphère une zone calme correspondant au condenseur d'une colonne à distiller où se concentrent horizontalement les vents provenant des airs ascendants : les jet-stream. En effet il existe entre le haut de la troposphère et le bas de la stratosphère une couche d'air quasiment infranchissable mécaniquement. La troposphère est stable car chauffée par le bas (il n'y a plus de vapeur d'eau condensable) et la stratosphère aussi car chauffée par le haut avec le rayonnement solaire. Ces atmosphères ne peuvent donc pas s'interpénétrer. Cette séparation correspond à la tropopause qui est à $-56,5^{\circ}\text{C}$, température de condensation du dioxyde de carbone, le gaz le plus volatil de l'air et qui fixe donc la quantité d'énergie rayonnée dans l'espace à partir de la Terre (sol + eau). La loi de Stefan donne la valeur proche de 140 W/m^2 : celle-ci est constante jour et nuit et ne pourra pas être modifiée tant qu'il y aura du dioxyde de carbone dans l'air. Ce rayonnement est sûr de traverser la stratosphère car celle-ci est à une température supérieure et réémet donc tout ce qu'elle absorbe en temps que corps noir. Ainsi se justifie l'hypothèse affirmée dans l'introduction. Nous proposons le schéma donnant le bilan énergétique de la Terre avec un réservoir de chaleur dans la troposphère plus ou moins rempli en fonction de la chaleur variable venant du soleil. Un autre schéma montre la modification apportée par l'apparition de la Vie sur Terre et ses conséquences sur le remplissage du réservoir de chaleur que constitue la troposphère. Sur ces schémas, il n'y a pas de

3 Paul Arnaud Cours de chimie physique DUNOD page 236

4 René Moreau L'air et l'eau Edp-sciences Université de Grenoble page 58 page 271

5 Air humide Techniques de l'Ingénieur BE1 B2 230 249 rue de Crimée 75019 PARIS

6 Techniques de l'Ingénieur Méthodes de calcul Génie des Procédés J2 Page 611 et suivantes

7 Techniques de l'Ingénieur Contrôle et régulation Génie des Procédés J2 Page 615 et suivantes

mécanisme d'effet de serre dû à l'atmosphère car l'énergie mise en jeu par ce phénomène est insignifiante devant celle correspondant à l'effet de distillation. En effet, le faible rayonnement IR issu du sol est rapidement absorbé sous forme de chaleur par l'air ambiant. On peut vérifier ce fait car la peau humaine perçoit facilement le rayonnement IR sous forme de chaleur. Le chauffage des radiateurs IR situés à l'entrée des magasins est facilement repéré par l'homme grâce à son effet directif à courte distance, mais dès qu'on s'éloigne, on ne perçoit plus que la chaleur diffusée dans l'air et on devient incapable de situer où est la source de chauffage émettant les IR. Et pourtant cette source émet un rayonnement plus intense que celui venant du sol. Seul le Soleil se fait sentir par son rayonnement IR à travers l'air, car il rayonne à une puissance près de 8 000 fois plus intense ! (rapport au cube des températures absolues des sources). L'effet de serre du dioxyde de carbone a été imaginé pour justifier le placage au niveau du sol de la chaleur et de la vapeur d'eau tel que cela est observé expérimentalement. Les propriétés d'une distillation à reflux infini affirment facilement ces faits sans aucun besoin d'un quelconque effet de serre. Il s'agit donc d'un forçage distillatif.

L'analyse thermodynamique proposée ici s'exprime avec une quantité de chaleur qui est une grandeur **mesurable** permettant des calculs, cela est plus performant qu'une analyse basée sur la température qui n'est qu'une grandeur **repérable** impropre aux calculs. De plus cette analyse explique facilement la température de la tropopause de $-56,5^{\circ}\text{C}$ comme étant celle correspondant à la destruction du cristal moléculaire de dioxyde de carbone solide. Cette quasi égalité de ces deux températures ne semble par avoir déjà été remarquée à ce jour. L'hypothèse que la couche limite atmosphérique soit causée par l'antagonisme des propriétés apparaissant lors de la condensation de la vapeur d'eau dans l'air semble pouvoir être un sujet d'étude complémentaire. Les hypothèses émises dans cette publication sont de nature à réorienter la compréhension thermodynamique de la troposphère.