

VOLUME 2

Énergie, température et thermodynamique

Suivre l'énergie, du Soleil à l'air qui nous entoure

COLLECTION ATMOSPHERE - VERSION SIMPLIFIÉE

Édition du 9 octobre 2026

D'où vient la chaleur qui fait vivre la météo ? Pourquoi l'air se refroidit-il quand il monte ? Pourquoi une nuit claire est-elle plus froide qu'une nuit couverte ? Ce cours suit l'énergie, depuis le Soleil jusqu'à l'air de votre jardin, avec des chiffres vérifiés et des calculs simples.

Dans chaque chapitre : des explications avec des exemples, deux questions de quiz, un exercice et les réponses. Puis : 15 calculs corrigés sur le bilan énergétique, trois cas pratiques, un quiz de dix questions, un glossaire et un défi avancé.

Un crayon et une calculatrice suffisent. Les constantes physiques sont réelles et arrondies ; les données des exercices sont inventées pour apprendre. Elles ne décrivent pas la météo actuelle.

Objectif : comprendre comment l'énergie entre, circule et ressort, puis expliquer avec méthode la température et la pression que l'on mesure.

Comment utiliser ce cours ?

Une notion, un calcul, un corrigé

Lisez l'explication. Faites le quiz et l'exercice avant de regarder le corrigé. Chaque chapitre apporte une pièce du même puzzle : l'énergie reçue, puis transformée, puis mesurée.

Chapitre	Vous allez apprendre à...
1. Le Soleil, source d'énergie	Calculer ce que la Terre reçoit et absorbe
2. Réflexion, absorption, effet de serre	Comprendre le rôle des surfaces et des gaz
3. Conduction, convection, rayonnement	Suivre la chaleur, y compris la chaleur cachée de l'eau
4. Mesurer la température	Lire une échelle et une variation
5. Stable ou instable ?	Prévoir si l'air monte ou reste en place
6. Pression et baromètre	Relier pression, altitude et température
7. Transformations adiabatiques	Calculer le refroidissement d'un air qui monte
8. Équilibre et déséquilibre	Comprendre pourquoi la Terre se réchauffe

Les constantes utilisées

Grandeur	Valeur arrondie
Constante solaire	$1\,361\text{ W/m}^2$
Albédo planétaire moyen	0,30
Constante de Stefan-Boltzmann	$5,67 \times 10^{-8}\text{ W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$
Capacité thermique massique de l'air sec	$1\,005\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
Capacité thermique massique de l'eau liquide	$4\,186\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
Chaleur latente de vaporisation de l'eau	$2,5 \times 10^6\text{ J/kg}$
Chaleur latente de fusion de la glace	$3,34 \times 10^5\text{ J/kg}$
Masse volumique de l'air au niveau de la mer	$1,2\text{ kg/m}^3$

Force 1/3 : facile. Force 2/3 : intermédiaire, plusieurs étapes. Force 3/3 : avancé, croiser les données et discuter les limites. Un watt par mètre carré (W/m^2) est une puissance reçue ou émise par chaque mètre carré ; un joule (J) est une quantité d'énergie.

1. Le Soleil, source d'énergie

Un flux, puis une moyenne

Presque toute l'énergie qui fait fonctionner la météo vient du Soleil. Au sommet de l'atmosphère, une surface placée face au Soleil reçoit environ $1\,361\text{ W/m}^2$: c'est la constante solaire, mesurée par satellite. Elle varie de 0,1 % environ au cours du cycle solaire de onze ans.

La Terre est une sphère éclairée d'un seul côté. Le disque qui intercepte la lumière a une surface quatre fois plus petite que la sphère entière. En moyenne sur toute la planète et sur l'année, chaque mètre carré reçoit donc $1\,361 / 4$, soit environ 340 W/m^2 .

Ce chiffre est une moyenne. À midi en été sous les tropiques, le flux dépasse $1\,000\text{ W/m}^2$ au sol ; pendant la nuit polaire, il est nul pendant des semaines. La moyenne sert aux bilans ; elle ne décrit pas un lieu et une heure.

Ce qui est réfléchi et ce qui est absorbé

Une partie de la lumière repart vers l'espace sans être absorbée : c'est l'albédo. Pour la planète entière, il vaut environ 0,30. Nuages, neige, glace et déserts clairs en sont les principaux responsables. Sur 340 W/m^2 , environ 100 W/m^2 sont renvoyés et environ 240 W/m^2 sont absorbés par l'atmosphère et la surface.

Étape du bilan	Valeur arrondie
Flux au sommet de l'atmosphère, face au Soleil	$1\,361\text{ W/m}^2$
Moyenne sur toute la sphère	340 W/m^2
Réfléchi vers l'espace (albédo 0,30)	$\approx 100\text{ W/m}^2$
Absorbé par le système Terre-atmosphère	$\approx 240\text{ W/m}^2$
Émis vers l'espace en infrarouge	$\approx 240\text{ W/m}^2$

La Terre renvoie de l'énergie vers l'espace

Tout corps émet un rayonnement qui dépend de sa température. La Terre émet dans l'infrarouge. Pour que sa température reste stable, elle doit émettre autant qu'elle absorbe : environ 240 W/m^2 en moyenne. La loi de Stefan-Boltzmann relie ce flux à une température d'émission d'environ 255 K, soit $-18\text{ }^\circ\text{C}$.

Or la température moyenne de la surface est voisine de $15\text{ }^\circ\text{C}$. L'écart de $33\text{ }^\circ\text{C}$ vient de l'atmosphère, qui absorbe l'infrarouge émis par le sol et en renvoie une partie vers le bas : c'est l'effet de serre naturel, détaillé au chapitre 2.

Chapitre 1 : quiz et exercice

Quiz

1. La moyenne de 340 W/m^2 est-elle reçue en permanence en chaque point du globe ?
2. Que désigne l'albédo d'une planète ?

Exercice

Difficulté : Force 1/3 - facile

CALCUL. Le flux au sommet de l'atmosphère vaut $1\,361 \text{ W/m}^2$. Calculez la moyenne sur toute la sphère, puis la part réfléchi si l'albédo vaut 0,30, puis la part absorbée. Arrondissez à l'unité.

Corrigé

Quiz : 1. Non, c'est une moyenne sur toute la planète et sur l'année ; le flux réel dépend du lieu, de la saison et de l'heure. 2. La fraction du rayonnement solaire renvoyée vers l'espace sans être absorbée.

Exercice : $1\,361 / 4 = 340 \text{ W/m}^2$ en moyenne. Réfléchi : $0,30 \times 340 = 102 \text{ W/m}^2$. Absorbé : $340 - 102 = 238 \text{ W/m}^2$. Dans les bilans, on écrit souvent 100 et 240 W/m^2 en valeurs arrondies.

À retenir : La Terre absorbe environ 240 W/m^2 et doit en émettre autant pour rester en équilibre.

2. Réflexion, absorption, effet de serre

Chaque surface a son albédo

L'albédo planétaire de 0,30 cache de grandes différences : une neige fraîche renvoie jusqu'à 80 ou 90 % de la lumière, un océan calme moins de 10 % quand le Soleil est haut. Deux surfaces voisines recevant le même flux n'absorbent donc pas la même énergie. Ces valeurs dépendent aussi de l'angle du Soleil et de l'état de la surface.

Surface	Albédo indicatif	Part absorbée
Neige fraîche	0,80 à 0,90	10 à 20 %
Nuages épais	0,60 à 0,80	20 à 40 %
Prairie, culture	0,15 à 0,25	75 à 85 %
Forêt sombre	0,05 à 0,20	80 à 95 %
Océan, Soleil haut	0,05 à 0,10	90 à 95 %

L'atmosphère absorbe surtout l'infrarouge

Le Soleil, à près de 5 800 K, émet surtout dans le visible, vers 0,5 micromètre ; la Terre, à 288 K, dans l'infrarouge, vers 10 micromètres. L'air laisse passer l'essentiel du visible : 160 W/m^2 sont absorbés au sol, contre 80 W/m^2 dans l'air, surtout par la vapeur d'eau, les nuages et l'ozone.

Pour l'infrarouge, c'est l'inverse : la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et les nuages en absorbent une grande partie, puis le réémettent dans toutes les directions, y compris vers le bas. Le sol est ainsi chauffé par le Soleil le jour et par l'atmosphère jour et nuit.

Le bilan à la surface

Flux moyen à la surface	Valeur arrondie
Solaire absorbé par le sol	160 W/m^2
Infrarouge reçu de l'atmosphère	342 W/m^2
Infrarouge émis par le sol	398 W/m^2
Chaleur sensible vers l'air	21 W/m^2
Chaleur latente, par évaporation	82 W/m^2

Moyennes mondiales d'après le GIEC (2021). Le sol reçoit plus d'infrarouge venant de l'air que de lumière solaire : c'est la marque de l'effet de serre.

Chapitre 2 : quiz et exercice

Quiz

1. Entre une neige fraîche et une forêt sombre, quelle surface absorbe le plus d'énergie solaire ?
2. L'effet de serre agit-il surtout sur la lumière visible ou sur l'infrarouge émis par la Terre ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. À midi, un flux solaire de 800 W/m^2 atteint deux parcelles voisines : une prairie d'albédo 0,20 et une neige d'albédo 0,80. Calculez l'énergie absorbée par chaque surface, puis l'écart. Que peut-on en conclure sur leur réchauffement ?

Corrigé

Quiz : 1. La forêt sombre, qui absorbe 80 à 95 % du flux contre 10 à 20 % pour la neige. 2. Sur l'infrarouge émis par la Terre, que la vapeur d'eau, le CO_2 et les nuages absorbent et réémettent.

Exercice : Prairie : $800 \times (1 - 0,20) = 640 \text{ W/m}^2$. Neige : $800 \times (1 - 0,80) = 160 \text{ W/m}^2$. Écart : 480 W/m^2 . La prairie reçoit quatre fois plus d'énergie, mais sa température dépend aussi de l'évaporation, du vent et de la chaleur transmise au sol. L'écart d'énergie ne donne pas directement un écart de température.

À retenir : L'énergie absorbée dépend de l'albédo ; la température qui en résulte dépend de tous les flux.

3. Conduction, convection, rayonnement

Trois façons de transporter la chaleur

La chaleur passe d'un endroit à un autre de trois manières. Par conduction, elle traverse la matière de proche en proche, sans déplacement d'ensemble : une cuillère chauffe dans une tasse. Par convection, c'est un fluide en mouvement qui transporte la chaleur : l'air chauffé au contact du sol s'élève. Par rayonnement, l'énergie voyage sous forme d'ondes, même dans le vide : c'est ainsi que le Soleil nous atteint.

Mode	Exemple quotidien	Rôle dans l'atmosphère
Conduction	Une poignée métallique froide	Seulement les premiers millimètres d'air au contact du sol
Convection	L'eau qui tourne dans une casserole	Thermiques, cumulus, brises, orages
Rayonnement	La chaleur d'un radiateur à distance	Énergie solaire reçue, infrarouge émis et renvoyé

L'air est un mauvais conducteur. Par une journée ensoleillée, le sol chauffe l'air en contact direct, puis des bulles d'air chaud, les thermiques, montent et distribuent la chaleur sur des centaines de mètres. La nuit, le sol se refroidit par rayonnement et l'air près du sol devient plus froid que l'air au-dessus.

La chaleur latente, l'énergie cachée de l'eau

Évaporer 1 kg d'eau demande environ 2,5 millions de joules sans que la température de l'eau change. Cette énergie est stockée dans la vapeur. Quand la vapeur se condense en nuage, elle restitue la même quantité de chaleur à l'air. C'est le moteur caché des orages et des cyclones.

Un exemple de calcul : évaporer une lame d'eau de 1 mm sur 1 m², soit 1 kg, consomme 2,5 × 10⁶ J. Étale sur une journée de 86 400 s, cela représente un flux moyen de 29 W/m². Les 82 W/m² du bilan mondial correspondent donc à environ 2,8 mm d'évaporation par jour, soit un peu plus de 1 000 mm par an.

Chaleur sensible et chaleur latente

La chaleur sensible modifie la température que l'on mesure. La chaleur latente est transportée sans changer la température, jusqu'à la condensation. Sur une surface humide, l'essentiel de l'énergie solaire sert à évaporer : le sol reste relativement frais. Sur un sol sec, la même énergie chauffe l'air et la surface : la température grimpe. Une ville après la pluie et un désert à midi illustrent ces deux situations.

Chapitre 3 : quiz et exercice

Quiz

1. Par une journée ensoleillée, quel mode transporte l'essentiel de la chaleur du sol vers les premières centaines de mètres d'air ?
2. L'évaporation refroidit-elle ou réchauffe-t-elle la surface d'où l'eau s'évapore ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. Sur un champ irrigué, 3 mm d'eau s'évaporent en une journée sur chaque mètre carré. Calculez la masse d'eau évaporée par mètre carré, l'énergie consommée avec $2,5 \times 10^6$ J/kg, puis la puissance moyenne correspondante sur 86 400 s.

Corrigé

Quiz : 1. La convection : l'air chauffé au contact du sol s'élève et transporte la chaleur. 2. Elle la refroidit, car l'énergie prélevée part dans la vapeur.

Exercice : 3 mm sur 1 m² représentent 3 litres, soit 3 kg. Énergie : $3 \times 2,5 \times 10^6 = 7,5 \times 10^6$ J.
Puissance moyenne : $7,5 \times 10^6 / 86\,400 \approx 87$ W/m². C'est l'ordre de grandeur du flux de chaleur latente d'un sol bien arrosé en été.

À retenir : L'eau transporte de l'énergie sans changer de température ; elle la restitue en se condensant.

4. Mesurer la température

Trois échelles pour une même grandeur

La température décrit l'agitation des molécules. En France, les bulletins utilisent le degré Celsius. La physique utilise le kelvin, dont le zéro correspond à l'absence d'agitation : $K = ^\circ C + 273,15$. Quelques pays utilisent le degré Fahrenheit : $^\circ F = ^\circ C \times 1,8 + 32$.

Repère	$^\circ C$	K	$^\circ F$
Fusion de la glace	0	273,15	32
Ébullition de l'eau à 1 013 hPa	100	373,15	212
Valeur commune aux deux échelles	-40	233,15	-40
Température moyenne de la surface terrestre	≈ 15	≈ 288	≈ 59
Température d'émission de la Terre	-18	255	≈ 0

Un écart de température a la même valeur en kelvins et en degrés Celsius : une hausse de $3^\circ C$ est une hausse de 3 K. Les formules de ce cours, comme la loi de Stefan-Boltzmann, demandent des kelvins.

Mesurer dans les règles

La température de l'air se mesure sous abri ventilé, entre 1,25 et 2 m au-dessus d'un sol naturel, à l'écart des bâtiments. Un thermomètre au soleil ou au-dessus du bitume mesure autre chose : une surface peut dépasser de 20 à $30^\circ C$ l'air situé juste au-dessus.

Repères reconnus par l'OMM : $56,7^\circ C$ à Furnace Creek, en Californie, le 10 juillet 1913 ; $-89,2^\circ C$ à Vostok, en Antarctique, le 21 juillet 1983. En France hexagonale, le record est de $46,0^\circ C$ à Vérargues, dans l'Hérault, le 28 juin 2019. La normale annuelle 1991-2020 de la France hexagonale est de $12,97^\circ C$, contre $12,55^\circ C$ pour 1981-2010, selon Météo-France.

Le cycle de la journée

Le minimum se produit le plus souvent peu après le lever du Soleil, et le maximum en milieu ou en fin d'après-midi. Le décalage vient du bilan : tant que le sol reçoit plus d'énergie qu'il n'en perd, il continue de chauffer, même si le Soleil baisse déjà.

L'amplitude est grande par ciel clair, air sec et vent faible, loin de la mer : $15^\circ C$ d'écart sont courants en été dans l'intérieur des terres. Elle est faible sous un ciel couvert, par vent fort ou en bord de mer : parfois 3 ou $4^\circ C$ seulement, car les nuages renvoient l'infrarouge vers le sol la nuit et bloquent le Soleil le jour.

Chapitre 4 : quiz et exercice

Quiz

1. Combien vaut 20°C en kelvins ?
2. À quel moment de la journée la température minimale se produit-elle le plus souvent ?

Exercice

Difficulté : Force 1/3 - facile

RELEVÉS FICTIFS. Sous abri, une station mesure 4°C à 06 h et 19°C à 15 h. Calculez l'amplitude de la journée. Convertissez 19°C en kelvins puis en degrés Fahrenheit. L'amplitude vaut-elle 15 K ?

Corrigé

Quiz : 1. $20 + 273,15 = 293,15\text{ K}$. 2. Peu après le lever du Soleil, quand le sol commence à recevoir plus d'énergie qu'il n'en perd.

Exercice : Amplitude : $19 - 4 = 15^{\circ}\text{C}$. Conversion : $19 + 273,15 = 292,15\text{ K}$ et $19 \times 1,8 + 32 = 66,2^{\circ}\text{F}$. Oui, un écart de 15°C est un écart de 15 K, car les deux échelles ont le même pas.

À retenir : Les formules physiques utilisent le kelvin ; un écart de température ne change pas entre $^{\circ}\text{C}$ et K.

5. Stable ou instable ?

La méthode de la particule

Pour savoir si l'air va monter, on imagine une bulle d'air, la particule, que l'on soulève. En montant, elle rencontre une pression plus faible, se dilate et se refroidit : d'environ 9,8 °C par kilomètre tant qu'elle n'est pas saturée, et d'environ 6 °C par kilomètre une fois saturée, parce que la condensation libère de la chaleur. Cette seconde valeur varie entre 4 et 7 °C/km selon la température.

On compare ensuite la particule à l'air qui l'entoure, dont le profil est mesuré par radiosondage. Si elle est plus chaude, elle est moins dense et continue de monter : l'air est instable. Si elle est plus froide, elle redescend : l'air est stable. Dans l'atmosphère standard, la température baisse en moyenne de 6,5 °C par kilomètre.

Gradient mesuré dans l'air	Particule non saturée	Particule saturée
Plus de 9,8 °C/km	Instable	Instable
Entre 6 et 9,8 °C/km	Stable	Instable
Moins de 6 °C/km	Stable	Stable
Température qui augmente avec l'altitude (inversion)	Très stable	Très stable

Un exemple chiffré

Au sol, l'air est à 20 °C. À 1 000 m, le radiosondage indique 13 °C, soit un gradient de 7 °C/km. Une particule sèche soulevée jusqu'à 1 000 m atteint $20 - 9,8 = 10,2$ °C. Elle est plus froide que les 13 °C de l'environnement : elle redescend. L'air est stable pour cette particule.

Si la même particule est saturée dès le départ, elle n'atteint que $20 - 6 = 14$ °C. Elle est plus chaude que l'environnement : elle continue de monter. La situation est stable pour l'air sec et instable pour l'air saturé : c'est l'instabilité conditionnelle, typique des après-midi d'orage.

Ce que l'on voit dans le ciel

Air stable : stratus, brouillard, ciel laiteux, fumées qui s'étalent à l'horizontale, pollution piégée dans les vallées. Air instable : cumulus bourgeonnants, cumulonimbus, averses et rafales. Une inversion nocturne se forme par ciel clair quand le sol se refroidit ; une inversion de subsidence se forme sous un anticyclone, quand l'air descend et se réchauffe en altitude.

Chapitre 5 : quiz et exercice

Quiz

1. Une particule soulevée se retrouve plus froide que l'air qui l'entoure. Monte-t-elle ou redescend-elle ?
2. L'air se refroidit de 8 °C par kilomètre. Est-il stable, instable ou conditionnellement instable ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

PROFIL FICTIF. Au sol : 24 °C. À 1 000 m : 17 °C. À 2 000 m : 11 °C. Calculez le gradient de chaque tranche. Une particule sèche soulevée du sol à 1 000 m : quelle température a-t-elle ? Est-elle plus chaude ou plus froide que l'air ? Même question si elle est saturée dès le sol, avec 6 °C/km.

Corrigé

Quiz : 1. Elle redescend : plus froide, elle est plus dense ; l'air est stable. 2. Conditionnellement instable : 8 est compris entre 6 et 9,8.

Exercice : Gradients : $(24 - 17) / 1 = 7$ °C/km, puis $(17 - 11) / 1 = 6$ °C/km. Particule sèche : $24 - 9,8 = 14,2$ °C, plus froide que les 17 °C de l'air : stable. Particule saturée : $24 - 6 = 18$ °C, plus chaude que 17 °C : instable. L'humidité décide ici du comportement de l'air.

À retenir : Comparez toujours la particule soulevée à l'air qui l'entoure, à la même altitude.

6. Pression et baromètre

La pression, c'est le poids de l'air

L'air a une masse et pèse sur tout ce qu'il surplombe. Au niveau de la mer, la pression standard vaut 1 013,25 hPa : une colonne d'air d'un mètre carré de section pèse environ dix tonnes. Plus on monte, moins il reste d'air au-dessus : près du sol, la pression baisse d'environ 1 hPa tous les 8 m.

Niveau de pression	Altitude indicative, atmosphère standard
1 013 hPa	Niveau de la mer
850 hPa	Environ 1 500 m
700 hPa	Environ 3 000 m
500 hPa	Environ 5 500 m
300 hPa	Environ 9 000 m

Ces altitudes sont des repères moyens. Dans l'air froid, plus dense, la pression baisse plus vite ; dans l'air chaud, moins vite. Les cartes d'altitude utilisent cette propriété : à 500 hPa, une surface de pression plus haute que la moyenne signale une colonne d'air plus chaude.

Ramener au niveau de la mer

Un baromètre à 400 m d'altitude lit toujours moins qu'un baromètre au bord de la mer. Pour comparer des stations, on ramène les mesures au niveau de la mer en ajoutant le poids de l'air manquant : environ 1 hPa par 8 m. Une station à 400 m qui lit 960 hPa correspond à près de 1 008 hPa au niveau de la mer. Les isobares des cartes sont tracées avec ces valeurs réduites.

Un anticyclone est une zone de pression relativement élevée, souvent au-dessus de 1 020 hPa ; une dépression, une zone relativement basse, souvent sous 1 000 hPa. Ces chiffres sont des repères, pas des définitions : ce qui compte, c'est le centre par rapport aux environs.

Température, densité et tendance

À pression égale, l'air chaud est moins dense : à 1 013 hPa, un mètre cube d'air pèse 1,23 kg à 15 °C et 1,17 kg à 30 °C. C'est pourquoi l'air chauffé au sol s'élève et l'air refroidi s'accumule dans les creux la nuit.

La tendance de pression sur trois heures est une information utile : une baisse de 3 hPa ou plus en trois heures accompagne souvent l'approche d'une perturbation. Il existe aussi une marée barométrique, d'environ 1 hPa d'amplitude aux latitudes tempérées, avec deux maximums vers 10 h et 22 h en heure solaire. Repères extrêmes vérifiés : 870 hPa au cœur du typhon Tip le 12 octobre 1979, et 1 083,8 hPa à Agata, en Sibérie, le 31 décembre 1968.

Chapitre 6 : quiz et exercice

Quiz

1. Quand on monte en altitude, la pression diminue-t-elle ou augmente-t-elle ?
2. À pression égale, l'air chaud est-il plus dense ou moins dense que l'air froid ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. Une station à 320 m d'altitude lit 975 hPa. Avec la règle de 1 hPa pour 8 m, estimez sa pression ramenée au niveau de la mer. Une station côtière voisine, à 5 m d'altitude, lit 1 012 hPa. Quel est l'écart entre les deux valeurs réduites ? Laquelle des deux stations se trouve sous la pression la plus élevée ?

Corrigé

Quiz : 1. Elle diminue, car il reste moins d'air au-dessus. 2. Moins dense : il occupe plus de volume pour la même masse.

Exercice : $320 / 8 = 40$ hPa à ajouter : $975 + 40 = 1\,015$ hPa. La station côtière, presque au niveau de la mer, reste à 1 012 hPa environ. Écart : $1\,015 - 1\,012 = +3$ hPa. Une fois réduite, la station de l'intérieur se trouve sous la pression la plus élevée, alors que son baromètre affiche une valeur plus basse.

À retenir : Deux pressions ne se comparent qu'après réduction au même niveau.

7. Transformations adiabatiques

Sans échange de chaleur

Une transformation est adiabatique quand l'air change de température sans recevoir ni céder de chaleur à son entourage. C'est le cas d'une particule qui monte ou descend assez vite. En montant, elle rencontre une pression plus faible, se dilate et dépense de l'énergie pour repousser l'air voisin : elle se refroidit. En descendant, elle est comprimée et se réchauffe, comme l'air dans une pompe à vélo.

Le taux de refroidissement d'une particule non saturée vaut $g / c_p = 9,81 / 1\,005 = 0,0098$ K par mètre, soit $9,8$ °C par kilomètre : c'est le gradient adiabatique sec. Il ne dépend ni du lieu ni de la saison. Une fois la particule saturée, la condensation libère de la chaleur et le refroidissement tombe à environ 6 °C par kilomètre : c'est le gradient adiabatique saturé.

Le niveau de condensation

Dans une particule qui monte, le point de rosée baisse lui aussi, mais lentement : environ $1,8$ °C par kilomètre. L'écart entre température et point de rosée se referme donc d'environ 8 °C par kilomètre. La particule devient saturée à une hauteur voisine de 125 m par degré d'écart initial : c'est le niveau de condensation, où se forme la base du nuage.

Altitude	Température	Point de rosée
Sol	25 °C	13 °C
500 m	20,1 °C	12,1 °C
1 000 m	15,2 °C	11,2 °C
1 500 m, base du nuage	10,3 °C	10,3 °C
2 500 m, dans le nuage	4,3 °C	4,3 °C

Exemple : avec 25 °C et un point de rosée de 13 °C, l'écart vaut 12 °C et la base se forme vers $125 \times 12 = 1\,500$ m. Au-dessus, la particule se refroidit de 6 °C par kilomètre.

L'effet de foehn

Un air à 20 °C aborde une montagne de $2\,000$ m avec un niveau de condensation à $1\,000$ m. Il monte en se refroidissant de $9,8$ °C/km jusqu'à $1\,000$ m : 10 °C. Puis, saturé, de 6 °C/km jusqu'au sommet : 4 °C. Il pleut ou il neige sur ce versant. De l'autre côté, l'air redescend sans nuage et se réchauffe de $9,8$ °C/km : $4 + 19,6 \approx 24$ °C au pied du versant abrité. Il est plus chaud de 4 °C et plus sec qu'au départ : la chaleur libérée par la condensation est restée dans l'air, et l'eau est tombée sur l'autre versant.

Chapitre 7 : quiz et exercice

Quiz

1. Un air qui descend sans échange de chaleur se réchauffe-t-il ou se refroidit-il ?
2. Quel gradient utilise-t-on pour une particule qui monte sans être saturée ?

Exercice

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

VALEURS FICTIVES. Au sol, l'air est à 22 °C avec un point de rosée de 10 °C. Estimez la hauteur de la base du nuage avec 125 m par degré d'écart. Calculez la température à cette base avec 9,8 °C/km, puis la température à 3 000 m si la particule continue de monter saturée, avec 6 °C/km.

Corrigé

Quiz : 1. Il se réchauffe, par compression. 2. Le gradient adiabatique sec, 9,8 °C par kilomètre.

Exercice : Écart : $22 - 10 = 12$ °C, donc base vers $125 \times 12 = 1\,500$ m. Température à la base : $22 - 9,8 \times 1,5 = 7,3$ °C. De 1 500 à 3 000 m, soit 1,5 km saturé : $7,3 - 6 \times 1,5 = -1,7$ °C. À 3 000 m, le nuage contient donc des gouttelettes en surfusion et des cristaux de glace.

À retenir : 9,8 °C/km tant que l'air n'est pas saturé, environ 6 °C/km ensuite.

8. Équilibre et déséquilibre

Un équilibre, pas une immobilité

La Terre est en équilibre radiatif quand elle émet vers l'espace autant d'énergie qu'elle en absorbe : environ 240 W/m^2 en moyenne. Cet équilibre est une moyenne sur l'année et sur le globe. À chaque instant, le jour et la nuit, l'été et l'hiver, les tropiques et les pôles sont loin de l'équilibre.

Entre l'équateur et 35° de latitude environ, la surface absorbe plus qu'elle n'émet ; au-delà, c'est l'inverse. L'atmosphère et l'océan transportent l'excédent vers les pôles : environ 5 à 6 PW, soit 5 à 6 millions de milliards de watts, au maximum du transport vers 35° de latitude. Vents, courants-jets, perturbations et courants marins sont la conséquence de ce déséquilibre entre latitudes.

Le déséquilibre actuel

Les activités humaines ont fait passer le dioxyde de carbone de 280 ppm avant l'ère industrielle à près de 420 ppm en 2023. L'atmosphère retient davantage d'infrarouge : la Terre absorbe un peu plus qu'elle n'émet. Le GIEC estime ce déséquilibre à $0,79 \text{ W/m}^2$ sur la période 2006-2018, et plusieurs études récentes le situent au-delà de 1 W/m^2 depuis 2020.

Grandeur, d'après le GIEC (2021)	Valeur
Forçage radiatif des activités humaines, 1750-2019	$2,72 \text{ W/m}^2$
Déséquilibre énergétique de la Terre, 2006-2018	$0,79 \text{ W/m}^2$
Part de l'énergie en excès stockée dans l'océan	$\approx 91 \%$
Équivalent annuel de $0,8 \text{ W/m}^2$ sur tout le globe	$\approx 1,3 \times 10^{22} \text{ J}$

Le chiffre paraît faible. Sur les $5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2$ de la planète et les $3,16 \times 10^7$ secondes d'une année, $0,8 \text{ W/m}^2$ représentent $1,3 \times 10^{22} \text{ J}$, soit une vingtaine de fois la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire, voisine de 600 EJ. La plus grande part réchauffe l'océan, le reste fond les glaces et réchauffe les continents et l'air.

Rétroactions et sensibilité

Une surface plus chaude émet davantage : c'est la réponse de Planck, qui freine le réchauffement. Sans aucune autre rétroaction, un doublement du CO_2 réchaufferait la surface d'environ $1,2^\circ\text{C}$. Mais une atmosphère plus chaude contient plus de vapeur d'eau, elle-même gaz à effet de serre, et la fonte des glaces réduit l'albédo : ces rétroactions amplifient la réponse. Le GIEC estime la sensibilité climatique à l'équilibre très probablement entre $2,5$ et 4°C pour un doublement du CO_2 , avec une meilleure estimation de 3°C .

Chapitre 8 : quiz et exercice

Quiz

1. Un système en équilibre radiatif émet-il autant d'énergie qu'il en absorbe ?
2. Où va la plus grande part de l'énergie en excès accumulée actuellement par la Terre ?

Exercice

Difficulté : Force 3/3 - avancé

CALCUL. Le déséquilibre vaut $0,8 \text{ W/m}^2$ sur une surface terrestre de $5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2$. Calculez la puissance totale en watts, puis l'énergie accumulée en un an de $3,16 \times 10^7 \text{ s}$. Comparez-la à la consommation mondiale d'énergie primaire, voisine de 600 EJ, soit $6 \times 10^{20} \text{ J}$. Pourquoi ce stockage ne se traduit-il pas par une hausse rapide de la température de l'air ?

Corrigé

Quiz : 1. Oui, c'est la définition de l'équilibre radiatif. 2. Dans l'océan, qui en stocke environ 91 %.

Exercice : Puissance : $0,8 \times 5,1 \times 10^{14} = 4,1 \times 10^{14} \text{ W}$. Énergie annuelle : $4,1 \times 10^{14} \times 3,16 \times 10^7 = 1,3 \times 10^{22} \text{ J}$. Rapport : $1,3 \times 10^{22} / 6 \times 10^{20} \approx 21$. L'énergie est surtout absorbée par l'océan, dont la capacité thermique est immense : il se réchauffe lentement, en profondeur, et restitue cette chaleur sur des décennies.

À retenir : Un petit déséquilibre, maintenu sur des années et sur toute la planète, représente une énergie considérable.

Quinze calculs du bilan énergétique

De l'espace à la surface

Chaque calcul reprend une notion des chapitres précédents. Faites-le avant de lire la solution, avec les constantes de la page 2.

Calcul 1 - La moyenne sur la sphère

Le flux face au Soleil vaut $1\,361\text{ W/m}^2$. Quelle est la moyenne sur toute la planète ? Solution : la sphère a une surface quatre fois plus grande que le disque éclairé : $1\,361 / 4 = 340\text{ W/m}^2$.

Calcul 2 - Réfléchi et absorbé

Avec un albédo de 0,30, combien de W/m^2 sont réfléchis et absorbés ? Solution : $0,30 \times 340 = 102\text{ W/m}^2$ réfléchis ; $340 - 102 = 238\text{ W/m}^2$ absorbés, arrondis à 100 et 240.

Calcul 3 - La température d'émission

Quelle température a un corps qui émet 240 W/m^2 ? Solution : avec la loi de Stefan-Boltzmann, $F = \sigma T^4$, on cherche $T = (240 / 5,67 \times 10^{-8})^{(1/4)} = (4,23 \times 10^9)^{(1/4)} = 255\text{ K}$, soit $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Astuce : prendre deux fois la racine carrée.

Calcul 4 - L'effet de serre naturel

La surface est à $15\text{ }^\circ\text{C}$ alors que la Terre émet comme un corps à $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Solution : $15 - (-18) = 33\text{ }^\circ\text{C}$. C'est le réchauffement apporté par l'atmosphère, surtout par la vapeur d'eau et le CO_2 .

Calcul 5 - La couleur du rayonnement

La loi de Wien donne la longueur d'onde du maximum d'émission : $\lambda = 2\,898 / T$, en micromètres avec T en kelvins. Solution : Soleil à $5\,778\text{ K}$, $\lambda = 0,50\text{ }\mu\text{m}$, dans le visible. Terre à 288 K , $\lambda = 10,1\text{ }\mu\text{m}$, dans l'infrarouge. C'est pourquoi l'atmosphère traite les deux rayonnements différemment.

Quinze calculs du bilan énergétique

Lumière, chaleur et eau

Calcul 6 - L'angle du Soleil

Un flux de $1\,000\text{ W/m}^2$ arrive perpendiculairement à une surface. Que reçoit cette surface si le Soleil est à 60° de la verticale, puis à 30° ? Solution : le flux reçu vaut $1\,000 \times \cos(\text{angle})$. À 60° : $1\,000 \times 0,5 = 500\text{ W/m}^2$. À 30° : $1\,000 \times 0,866 = 866\text{ W/m}^2$. Le Soleil bas de l'hiver et des hautes latitudes chauffe moins pour cette raison.

Calcul 7 - L'énergie d'une journée

Combien d'énergie représente 340 W/m^2 pendant une journée ? Solution : $340 \times 86\,400\text{ s} = 2,94 \times 10^7\text{ J}$, soit $29,4\text{ MJ/m}^2$, ou $8,2\text{ kWh/m}^2$. Un watt maintenu pendant une seconde vaut un joule.

Calcul 8 - Chauffer l'air et l'eau

Quelle énergie faut-il pour élever de 1°C un mètre cube d'air, puis un mètre cube d'eau ? Solution : air, $1,2\text{ kg} \times 1\,005 = 1\,206\text{ J}$, environ $1,2\text{ kJ}$. Eau, $1\,000\text{ kg} \times 4\,186 = 4,19 \times 10^6\text{ J}$. L'eau demande près de 3 500 fois plus d'énergie que l'air à volume égal : c'est pourquoi la mer tempère le climat des côtes.

Calcul 9 - L'émission d'un sol à 15°C

Combien émet une surface à 15°C qui se comporte comme un corps noir ? Solution : $T = 288\text{ K}$; $288^4 = 6,88 \times 10^9$; $F = 5,67 \times 10^{-8} \times 6,88 \times 10^9 = 390\text{ W/m}^2$. Le bilan mondial donne 398 W/m^2 parce que la température réelle de la surface émettrice diffère un peu de 15°C .

Calcul 10 - L'évaporation en watts

Quel flux représente l'évaporation de 1 mm par jour ? À combien de millimètres correspondent les 82 W/m^2 du bilan ? Solution : 1 mm sur 1 m^2 est 1 kg ; $2,5 \times 10^6\text{ J} / 86\,400\text{ s} = 29\text{ W/m}^2$. Puis $82 / 29 = 2,8$ mm par jour, soit environ 1 030 mm par an, l'ordre de grandeur des précipitations moyennes mondiales.

Quinze calculs du bilan énergétique

Océan, glace et déséquilibre

Calcul 11 - Réchauffer l'océan

Une couche d'eau de 50 m reçoit 100 W/m^2 nets. Combien de temps faut-il pour la réchauffer de 1°C ? Solution : énergie par mètre carré, $50 \text{ m} \times 1\,000 \text{ kg/m}^3 \times 4\,186 = 2,09 \times 10^8 \text{ J}$. Durée : $2,09 \times 10^8 / 100 = 2,09 \times 10^6 \text{ s}$, soit 24 jours. L'océan réagit lentement aux changements de flux.

Calcul 12 - Faire fondre la glace

Une plaque de glace de 10 cm d'épaisseur reçoit 100 W/m^2 nets. Combien de temps dure la fonte ? Solution : masse, $0,1 \text{ m} \times 917 \text{ kg/m}^3 = 91,7 \text{ kg}$ par mètre carré. Énergie, $91,7 \times 3,34 \times 10^5 = 3,06 \times 10^7 \text{ J}$. Durée, $3,06 \times 10^7 / 100 = 3,06 \times 10^5 \text{ s}$, soit 3,5 jours, sans que la température de la glace dépasse 0°C .

Calcul 13 - Le bilan de la surface

Avec les flux du chapitre 2, calculez le bilan net de la surface. Solution : $160 + 342 - 398 - 21 - 82 = +1 \text{ W/m}^2$. La surface reçoit légèrement plus qu'elle ne perd : c'est l'ordre de grandeur du déséquilibre actuel. Les valeurs sont arrondies ; la décimale n'a pas de sens ici.

Calcul 14 - L'énergie accumulée en un an

Que représente un déséquilibre de $0,8 \text{ W/m}^2$ sur une année ? Solution : $0,8 \times 5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2 \times 3,16 \times 10^7 \text{ s} = 1,3 \times 10^{22} \text{ J}$. La consommation mondiale d'énergie primaire est voisine de $6 \times 10^{20} \text{ J}$ par an : le déséquilibre représente une vingtaine de fois cette consommation.

Calcul 15 - La chaleur de la condensation

Dans un nuage, 7 g de vapeur se condensent par kilogramme d'air. De combien cette chaleur pourrait-elle réchauffer l'air ? Solution : $0,007 \times 2,5 \times 10^6 = 17\,500 \text{ J}$ par kilogramme d'air. Avec $1\,005 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, cela représente $17\,500 / 1\,005 \approx 17^\circ\text{C}$. Cette chaleur est libérée progressivement pendant l'ascension : c'est elle qui ramène le refroidissement de $9,8$ à environ 6°C par kilomètre.

Cas A : une parcelle au soleil

Données fictives

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

À midi, par ciel clair, une parcelle de sol reçoit les flux suivants. Le sol se comporte comme un corps noir pour l'infrarouge.

Grandeur	Valeur fictive
Flux solaire incident	900 W/m ²
Albédo de la parcelle	0,25
Infrarouge reçu de l'atmosphère	330 W/m ²
Température de la surface	35 °C

1. Calculez le flux solaire absorbé par la parcelle.
2. Calculez l'infrarouge émis par la surface avec $F = \sigma T^4$, en convertissant 35 °C en kelvins.
3. Calculez le bilan radiatif net : solaire absorbé + infrarouge reçu - infrarouge émis.
4. Où va cet excédent ? Si 60 % partent en chaleur latente, quelle lame d'eau s'évapore en une heure ?

Aide

Pour la puissance quatrième, élevez deux fois au carré. Pour passer des watts à l'énergie d'une heure, multipliez par 3 600 s. Pour passer de l'énergie à une masse d'eau, divisez par $2,5 \times 10^6$ J/kg ; 1 kg sur 1 m² correspond à 1 mm.

Faites vos calculs avant de lire les corrigés des trois cas.

Cas B : une nuit d'inversion

Profil fictif à 06 h, ciel clair, vent faible

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

Altitude au-dessus du sol	Température
2 m	1 °C
100 m	5 °C
300 m	7 °C
800 m	4 °C
1 500 m	0 °C

1. Entre quels niveaux la température augmente-t-elle avec l'altitude ? Comment s'appelle cette couche ?
2. Calculez le gradient entre 300 m et 1 500 m, en °C/km. Cette tranche est-elle stable ou instable pour une particule non saturée ?
3. Une cheminée rejette des fumées à 50 m. Peuvent-elles s'élever librement ? Pourquoi ?
4. Le ciel clair et le vent faible de la nuit sont-ils cohérents avec ce profil ? Expliquez avec le bilan radiatif du sol.
5. Que devient ce profil dans la matinée, après le lever du Soleil ?

Aide

Une particule qui monte de 2 m à 100 m se refroidit d'environ 1 °C alors que l'air autour passe de 1 à 5 °C. Comparez les deux températures à 100 m.

Répondez avec un calcul, son unité et une phrase expliquant la limite.

Cas C : traversée d'une montagne

Données fictives

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

Un air à 18 °C, avec un point de rosée de 8 °C, aborde au niveau de la mer une chaîne de montagnes dont la crête est à 2 500 m. Il redescend ensuite jusqu'au niveau de la mer sur l'autre versant, sans nuage. Utilisez 125 m par degré d'écart, 9,8 °C/km pour l'air non saturé et 6 °C/km pour l'air saturé.

1. À quelle hauteur se forme la base du nuage sur le versant exposé au vent ?
2. Quelle est la température de l'air à cette base ?
3. Quelle est la température de l'air à la crête, à 2 500 m ?
4. Quelle est la température de l'air une fois redescendu au niveau de la mer sur le versant abrité ?
5. Comparez les températures de départ et d'arrivée. D'où vient la différence ? Que dire de l'humidité ?

Aide

Découpez le trajet en trois étapes : montée sèche jusqu'à la base du nuage, montée saturée jusqu'à la crête, descente sèche jusqu'au niveau de la mer. Convertissez les hauteurs en kilomètres avant de multiplier par le gradient.

Ce calcul suppose que toute l'eau condensée tombe sur le versant exposé et que l'air ne se mélange pas : c'est une idéalisation.

Corrigés des trois cas

A. La parcelle au soleil

1. $900 \times (1 - 0,25) = 675 \text{ W/m}^2$.

2. $35 \text{ °C} = 308,15 \text{ K}$; $308^4 = 9,00 \times 10^9$; $F = 5,67 \times 10^{-8} \times 9,00 \times 10^9 = 510 \text{ W/m}^2$.

3. $675 + 330 - 510 = +495 \text{ W/m}^2$.

4. L'excédent part en chaleur sensible vers l'air, en chaleur latente par évaporation et en conduction vers le sous-sol. Chaleur latente : $0,60 \times 495 = 297 \text{ W/m}^2$, soit $297 \times 3\,600 = 1,07 \times 10^6 \text{ J}$ en une heure ; $1,07 \times 10^6 / 2,5 \times 10^6 = 0,43 \text{ kg/m}^2$, soit environ 0,4 mm d'eau évaporée par heure.

Le sol ne chauffe pas indéfiniment : plus il est chaud, plus il émet et plus il cède de chaleur à l'air, jusqu'à ce que les flux s'équilibrent.

B. La nuit d'inversion

1. Entre 2 m et 300 m : la température passe de 1 à 7 °C. C'est une inversion de température, ici une inversion de rayonnement.

2. $(7 - 0) / 1,2 \text{ km} = 5,8 \text{ °C/km}$, inférieur à 9,8 : stable pour une particule non saturée.

3. Non. Une fumée partant de 50 m à environ 3 °C se refroidit en montant alors que l'air se réchauffe : elle devient plus dense que son entourage et s'étale sous le sommet de l'inversion.

4. Oui. Par ciel clair, le sol émet de l'infrarouge sans recevoir celui des nuages ; par vent faible, l'air froid n'est pas mélangé avec l'air plus doux du dessus. Le sol et les premiers mètres d'air se refroidissent davantage que le reste de la couche.

5. Le Soleil réchauffe le sol, puis l'air par le bas. L'inversion est détruite de bas en haut dans la matinée ; le brouillard éventuel se dissipe et les fumées peuvent enfin se mélanger sur une plus grande épaisseur.

C. La montagne

1. Écart $18 - 8 = 10 \text{ °C}$, base vers $125 \times 10 = 1\,250 \text{ m}$.

2. $18 - 9,8 \times 1,25 = 5,8 \text{ °C}$.

3. De 1 250 à 2 500 m, soit 1,25 km saturé : $5,8 - 6 \times 1,25 = -1,7 \text{ °C}$.

4. Descente sèche de 2,5 km : $-1,7 + 9,8 \times 2,5 = 22,8 \text{ °C}$, soit environ 23 °C.

5. L'air arrive environ 5 °C plus chaud qu'au départ. La chaleur libérée par la condensation est restée dans l'air, tandis que l'eau est tombée sur le versant exposé. Le point de rosée a baissé : l'air est plus sec. C'est l'effet de foehn.

Quiz final

Dix questions pour revoir l'essentiel

Difficulté : Force 2/3 - intermédiaire

Chaque question peut valoir 1 point, pour un total sur 10. Répondez avant de regarder le corrigé.

1. Quelle est la valeur approximative de la constante solaire ?
2. Quel est l'albédo moyen de la Terre ?
3. Quelle est la température d'émission de la Terre vue de l'espace ?
4. Quel rayonnement l'effet de serre retient-il surtout ?
5. Quelle énergie faut-il pour évaporer 1 kg d'eau ?
6. Convertissez 25 °C en kelvins.
7. Quel est le gradient adiabatique sec ?
8. L'air se refroidit de 5 °C par kilomètre. Est-il stable ou instable pour une particule saturée ?
9. Près du sol, de combien la pression baisse-t-elle quand on monte de 80 m ?
10. Où est stockée la plus grande part de l'énergie en excès accumulée par la Terre ?

Après le quiz

Pour chaque erreur, retrouvez le chapitre concerné. Reformulez l'idée avec vos mots. Le score sert à repérer les notions à revoir, pas à certifier une compétence professionnelle.

Corrigé du quiz final

Les réponses

Question	Réponse
1	Environ $1\,361\text{ W/m}^2$
2	Environ 0,30
3	Environ $-18\text{ }^\circ\text{C}$, soit 255 K
4	L'infrarouge émis par la surface terrestre
5	Environ $2,5 \times 10^6\text{ J}$, soit 2,5 MJ
6	$25 + 273,15 = 298,15\text{ K}$
7	$9,8\text{ }^\circ\text{C}$ par kilomètre
8	Stable : 5 est inférieur à $6\text{ }^\circ\text{C/km}$
9	Environ 10 hPa, avec 1 hPa pour 8 m
10	Dans l'océan, à environ 91 %

Trois erreurs fréquentes

Confondre une puissance et une énergie : 340 W/m^2 est un flux ; multiplié par une durée en secondes, il donne des joules par mètre carré.

Oublier les kelvins : dans $F = \sigma T^4$, une température en degrés Celsius donne un résultat faux. Convertissez toujours avant de calculer.

Comparer une particule et l'air environnant à des altitudes différentes : la stabilité se juge au même niveau, après avoir appliqué le bon gradient.

Une notion comprise : _____

Une notion à revoir : _____

Les mots à retenir

Un petit glossaire

Mot	Explication simple
Albédo	La fraction du rayonnement solaire renvoyée sans être absorbée
Constante solaire	Le flux reçu face au Soleil au sommet de l'atmosphère, $1\,361\text{ W/m}^2$
Loi de Stefan-Boltzmann	Un corps émet un flux proportionnel à la puissance quatrième de sa température en kelvins
Effet de serre	Le réchauffement de la surface dû à l'infrarouge renvoyé par l'atmosphère
Chaleur sensible	La chaleur qui modifie la température mesurée
Chaleur latente	L'énergie stockée dans la vapeur d'eau et libérée à la condensation
Convection	Le transport de chaleur par un fluide en mouvement
Gradient adiabatique	Le refroidissement d'une particule qui monte : $9,8\text{ °C/km}$ sèche, environ 6 °C/km saturée
Niveau de condensation	La hauteur où une particule soulevée devient saturée, base du nuage
Inversion	Une couche où la température augmente avec l'altitude
Température potentielle	La température qu'aurait une particule ramenée à $1\,000\text{ hPa}$ sans échange de chaleur
Déséquilibre énergétique	La différence entre l'énergie absorbée et l'énergie émise par la Terre

Pour continuer

Relevez pendant une semaine la température minimale, la température maximale et la nébulosité. Comparez l'amplitude des journées claires et des journées couvertes.

La bonne habitude : un flux en W/m^2 , une énergie en joules, une température en kelvins dans les formules. Puis une explication qui suit l'énergie, de son entrée à sa sortie.

Défi avancé : lire un radiosondage simplifié

Une journée d'orage possible

Difficulté : Force 3/3 - avancé

Durée conseillée : 40 à 50 minutes. Calculatrice autorisée. Données entièrement fictives. Le sondage est réalisé à 12 h UTC au-dessus d'une plaine située au niveau de la mer.

Pression	Altitude	Température	Point de rosée
1 000 hPa	0 m	26 °C	14 °C
900 hPa	900 m	19 °C	12 °C
850 hPa	1 450 m	17 °C	11 °C
700 hPa	3 000 m	5 °C	0 °C
500 hPa	5 600 m	-12 °C	-20 °C

Questions

1. Calculer le gradient de température de chaque tranche, en °C/km. Classer chaque tranche : stable, conditionnellement instable ou instable.
2. Calculer la température potentielle de l'air au sol et à 900 hPa avec $\theta = T \times (1\,000 / p)^{0,286}$, T en kelvins. Que montre la comparaison ?
3. Pour une particule partant du sol à 12 h : hauteur du niveau de condensation avec 125 m par degré, température à ce niveau avec 9,8 °C/km, puis comparaison avec l'air environnant à la même altitude, interpolé entre 1 450 m et 3 000 m.
4. En milieu d'après-midi, le sol atteint 32 °C avec un point de rosée inchangé de 14 °C. Reprendre la question 3, puis poursuivre l'ascension saturée avec 6 °C/km jusqu'à 3 000 m et 5 600 m. La convection peut-elle se développer ?
5. Entre le niveau de condensation de l'après-midi et 5 600 m, calculer le refroidissement réel de la particule et celui qu'elle aurait subi sans condensation. En déduire la masse de vapeur condensée par kilogramme d'air, avec $2,5 \times 10^6$ J/kg et 1 005 J/(kg·K).
6. Rédiger une synthèse de 60 à 90 mots donnant les principaux résultats et au moins deux limites de la méthode.

Conseil : travaillez tranche par tranche, en convertissant les épaisseurs en kilomètres, et notez à chaque niveau la température de la particule et celle de l'air.

Corrigé du défi avancé

Démarche et explications, questions 1 à 3

1. Gradients : de 0 à 900 m, $(26 - 19) / 0,9 = 7,8$ °C/km ; de 900 à 1 450 m, $(19 - 17) / 0,55 = 3,6$ °C/km ; de 1 450 à 3 000 m, $(17 - 5) / 1,55 = 7,7$ °C/km ; de 3 000 à 5 600 m, $(5 + 12) / 2,6 = 6,5$ °C/km. Les tranches à 7,8 ; 7,7 et 6,5 °C/km sont comprises entre 6 et 9,8 : conditionnellement instables. La tranche 900-1 450 m, à 3,6 °C/km, est stable : c'est une couche d'arrêt.

2. Au sol : $T = 299,15$ K et $p = 1\,000$ hPa, donc $\theta = 299,15$ K. À 900 hPa : $T = 292,15$ K ; $(1\,000 / 900)^{0,286} = 1,031$; $\theta = 292,15 \times 1,031 = 301,1$ K. La température potentielle augmente avec l'altitude : une particule sèche soulevée du sol serait plus froide que l'air à 900 m. L'air est stable pour un soulèvement sec, ce qui confirme le gradient de 7,8 °C/km inférieur à 9,8.

3. Écart $26 - 14 = 12$ °C, niveau de condensation vers $125 \times 12 = 1\,500$ m. Température de la particule : $26 - 9,8 \times 1,5 = 11,3$ °C. Air environnant à 1 500 m : $17 - 7,7 \times 0,05 = 16,6$ °C. La particule est plus froide de 5 °C : elle ne monte pas seule. À 12 h, un cumulus ne se forme que si un relief ou un front force le soulèvement.

Démarche et explications, questions 4 à 6

4. Écart $32 - 14 = 18\text{ °C}$, niveau de condensation vers $125 \times 18 = 2\,250\text{ m}$. Particule : $32 - 9,8 \times 2,25 = 9,9\text{ °C}$. Air à $2\,250\text{ m}$: $17 - 7,7 \times 0,8 = 10,8\text{ °C}$. La particule reste plus froide de $0,9\text{ °C}$. Ascension saturée jusqu'à $3\,000\text{ m}$: $9,9 - 6 \times 0,75 = 5,4\text{ °C}$ contre 5 °C pour l'air : la particule devient plus chaude. À $5\,600\text{ m}$: $5,4 - 6 \times 2,6 = -10,2\text{ °C}$ contre -12 °C : elle reste plus chaude de $1,8\text{ °C}$. Au-dessus de $3\,000\text{ m}$ environ, la convection est libre : un léger soulèvement suffit pour qu'un cumulonimbus se développe dans l'après-midi.

5. Entre $2\,250\text{ m}$ et $5\,600\text{ m}$, soit $3,35\text{ km}$, la particule passe de $9,9$ à $-10,2\text{ °C}$: refroidissement de $20,1\text{ °C}$. Sans condensation : $9,8 \times 3,35 = 32,8\text{ °C}$. Différence : $12,7\text{ °C}$ apportés par la chaleur latente. Énergie : $12,7 \times 1\,005 = 12\,760\text{ J}$ par kilogramme d'air. Vapeur condensée : $12\,760 / 2,5 \times 10^6 = 0,0051\text{ kg}$, soit environ 5 g par kilogramme d'air.

6. Exemple de synthèse : « Le sondage fictif de 12 h est conditionnellement instable au-dessus de $1\,450\text{ m}$, avec une couche stable entre 900 et $1\,450\text{ m}$. La particule de surface reste plus froide que l'air jusqu'à $2\,250\text{ m}$. Après réchauffement du sol à 32 °C , elle devient plus chaude que l'air au-dessus de $3\,000\text{ m}$: une convection profonde est possible l'après-midi. Limites : gradient saturé fixé à 6 °C/km , interpolation linéaire des niveaux, absence de mélange avec l'air environnant, vent et évolution du point de rosée non pris en compte. »

Barème proposé sur 20

Travail	Points
Gradients et classification	4
Température potentielle et interprétation	3
Niveau de condensation et comparaison à 12 h	3
Ascension de l'après-midi et niveau de convection libre	4
Chaleur latente et vapeur condensée	3
Synthèse claire et limites	3

Une démarche correcte avec une erreur d'arrondi peut recevoir une partie des points. Ce barème sert à l'entraînement.