

Météorologie et aérologie

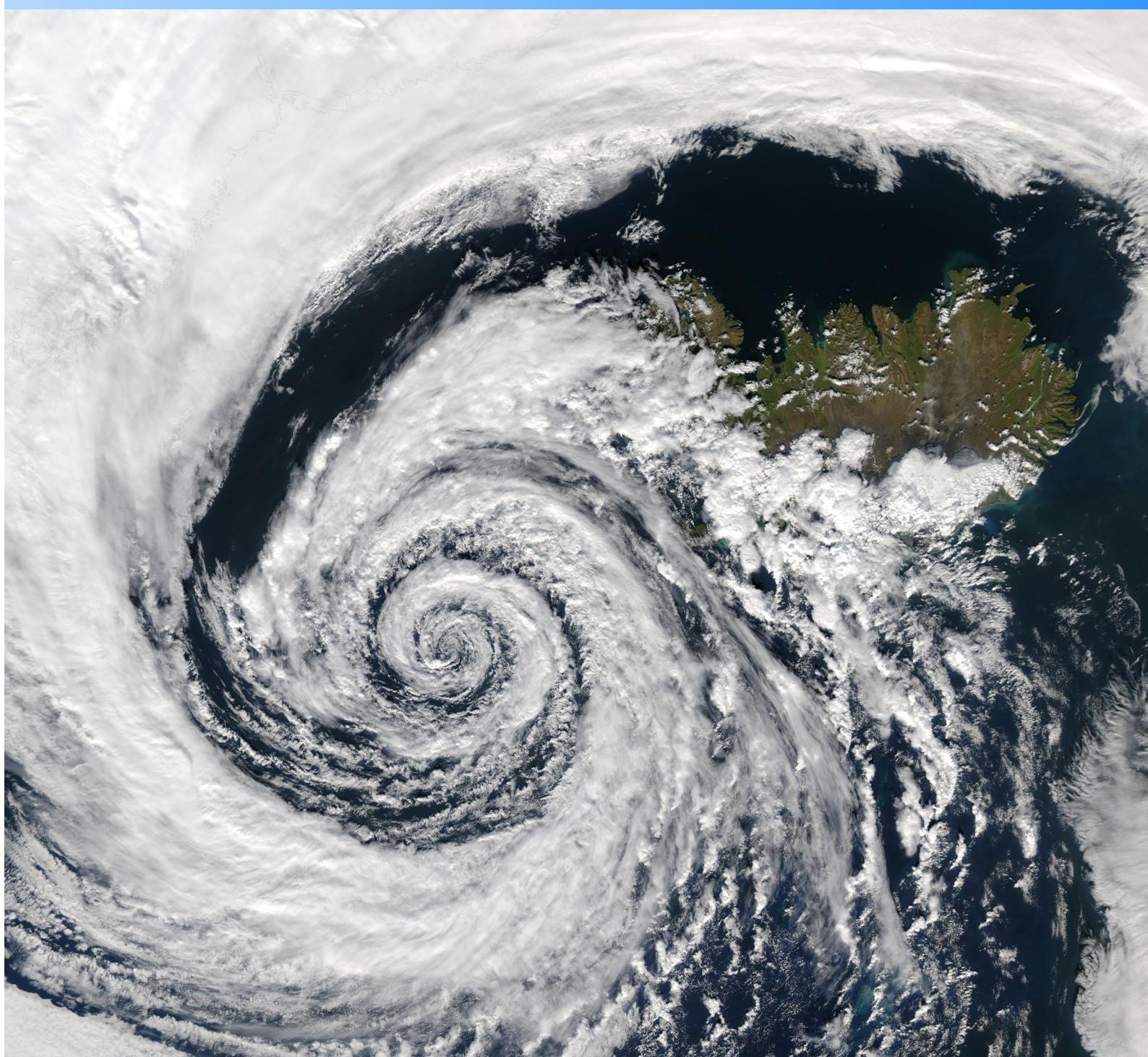


Table des matières

1. Température, pression et vent	5
1.1. Formation atmosphérique	5
1.2. Atmosphère terrestre : composition et couches	6
1.3. Modèle standard de l'atmosphère	7
1.4. Température et échanges thermiques	7
1.5. Pression et vent	10
1.6. Circulation, fronts et masses d'air	13
2. Nuages et précipitations	15
2.1. Stabilité et instabilité de masse d'air	15
2.2. Saturation de l'air	17
2.3. Classification des nuages	17
3. Phénomènes dangereux pour l'aéronautique	20
3.1. Brumes et brouillard	20
3.2. Givrage	21
3.3. Cumulonimbus	23
3.4. Ondes orographiques et turbulences	23
4. Phénomènes météorologiques locaux	24
4.1. Effet de Fœhn	24
4.2. Brise de mer, brise de terre et vents locaux	24
4.3. Courants jet	25
5. Information météorologique	25
5.1. Les cartes météorologiques	25
5.2. Les messages météorologiques	29

1. Température, pression et vent

1.1. Formation atmosphérique

L'atmosphère terrestre s'est formée il y a environ 4,6 milliards d'années, en même temps que la Terre. À cette époque, la planète était une boule de magma en fusion, issue de l'accrétion de poussières et de gaz issus de la nébuleuse solaire. La toute première atmosphère, appelée atmosphère primitive, était composée principalement d'hydrogène et d'hélium, mais elle a rapidement été soufflée par le vent solaire, car la Terre ne possédait pas encore de champ magnétique protecteur.

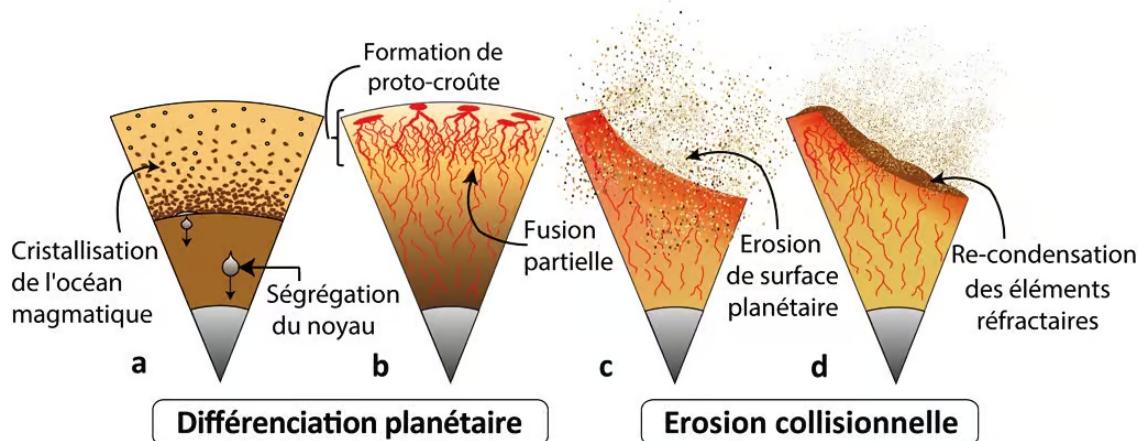


Figure 1 – Différenciation planétaire.

Une seconde atmosphère s'est formée grâce au dégazage volcanique. Les éruptions ont libéré de grandes quantités de gaz, comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ammoniac et d'autres gaz volcaniques. Cette atmosphère était très différente de celle d'aujourd'hui : elle ne contenait presque pas d'oxygène.

Au fil du temps, la Terre s'est refroidie, ce qui a permis à la vapeur d'eau de se condenser et de former les océans. Ces océans ont commencé à absorber une partie du dioxyde de carbone de l'atmosphère, réduisant son effet de serre. Ensuite, les premières formes de vie, notamment les cyanobactéries, sont apparues il y a environ 3,5 milliards d'années. Par photosynthèse, elles ont commencé à produire de l'oxygène, modifiant peu à peu la composition de l'air.

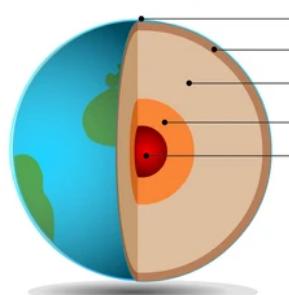


Figure 2 – Coupe terrestre.

Cet oxygène s'est d'abord accumulé dans les océans et les roches, puis a commencé à s'accumuler dans l'atmosphère. Vers 2,4 milliards d'années, un événement appelé « Grande Oxydation » a marqué l'apparition significative d'oxygène dans l'air. Cela a permis la formation de la couche d'ozone, qui protège la surface terrestre des rayons ultraviolets.

1.2. Atmosphère terrestre : composition et couches

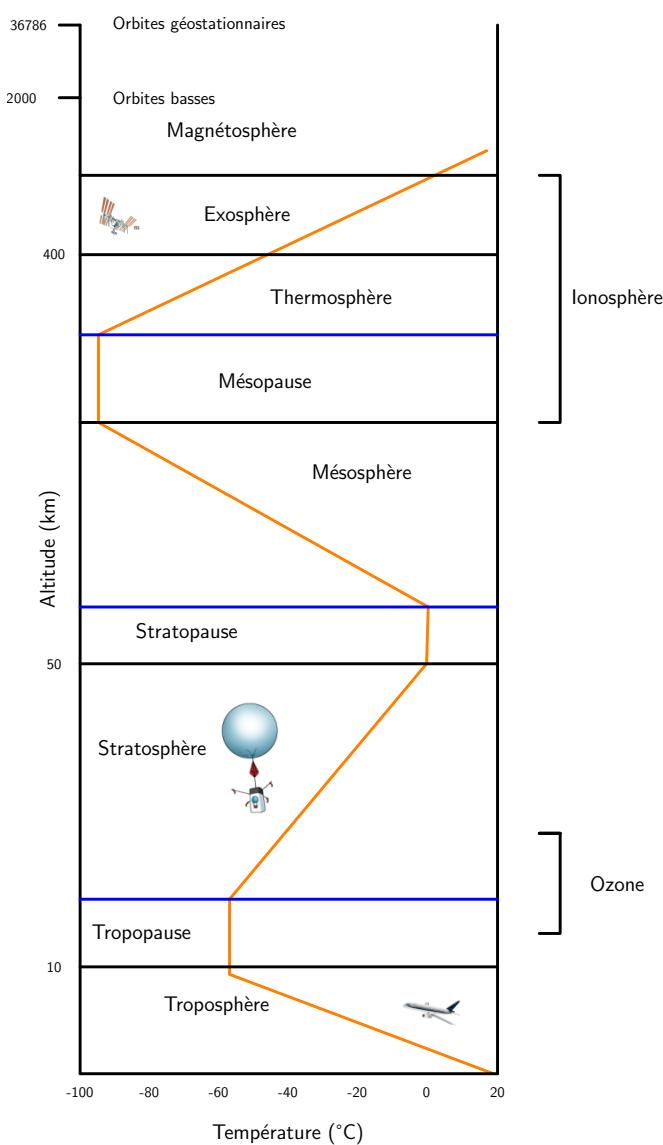
L'atmosphère terrestre désigne l'enveloppe gazeuse qui entoure notre planète. Les gaz sont maintenus autour de la Terre par _____ qui les retient et les empêche de s'échapper vers l'espace.

L'air atmosphérique est un mélange d'air sec, de vapeur d'eau et de poussières. L'air sec (99,97 %) est composé de diazote (N_2) à 78 %, de dioxygène (O_2) à 21 %, d'argon (Ar) à 0,9 % ; auxquels s'ajoutent des traces d'hélium, de dioxyde de carbone et de dihydrogène ainsi que d'autres gaz rares et des poussières.

Les gaz y sont donc concentrés près du sol. 99 % de la masse de l'atmosphère se situe entre 0 et 30 km. La pression atmosphérique décroît rapidement avec l'altitude.

L'épaisseur moyenne de notre atmosphère est d'environ 600 km. Elle fluctue, selon l'activité solaire notamment, entre 350 et 800 km.

Au-delà de cette altitude, on est dans _____ : ce n'est pas le vide qui y règne, on y rencontre encore quelques très rares particules gazeuses. Ces particules ne sont plus retenues par la gravité terrestre et peuvent s'échapper vers l'espace. Les satellites en orbite haute y gravitent.



Détaillons les différentes couches de l'atmosphère :

- _____ : située entre 80 km et 500 km, on peut y retrouver les satellites en orbite basse et les stations spatiales ;
- _____ : située entre 50 km et 80 km, la température moyenne qui y règne est de -100°C et la plupart des météorites brûlent en entrant dans cette partie de l'atmosphère ;
- _____ : située entre la tropopause (à 11 km) et 50 km de haut, elle contient la majeure partie de la couche d'ozone ;
- _____ : située de la surface de la Terre jusqu'à une hauteur de 11 km, c'est dans cet environnement qu'évoluent les aéronefs ;
- inclus dans l'exosphère, se trouve la magnétosphère dans laquelle les phénomènes physiques sont organisés par le champ magnétique terrestre. On regroupe parfois la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère sous le nom d'_____.

1.3. Modèle standard de l'atmosphère

L'état de l'atmosphère peut être décrit par un certain nombre de paramètres :

- la température ;
- la pression ;
- l'humidité ;
- le vent.

Pour différents besoins, notamment en aéronautique, il est nécessaire de donner un certain nombre de points de référence pour lequel l'atmosphère est normalisée. Ceci permet de décrire les performances des aéronefs en fonction de ce modèle dans les manuels de vol. Ainsi, les valeurs de référence sont :

1. au niveau de la mer, la pression standard est 1013,25 hPa (hectopascals) ;
2. au niveau de la mer, la température standard est de 15 °C (ou 288,15 K) ;
3. la masse volumique standard est 1,225 kg·m⁻³.

À partir de ces valeurs, on crée un modèle physique appelé modèle standard (ou ISA pour *International Standard Atmosphere*) en considérant que les paramètres de l'atmosphère évoluent selon les courbes suivantes.

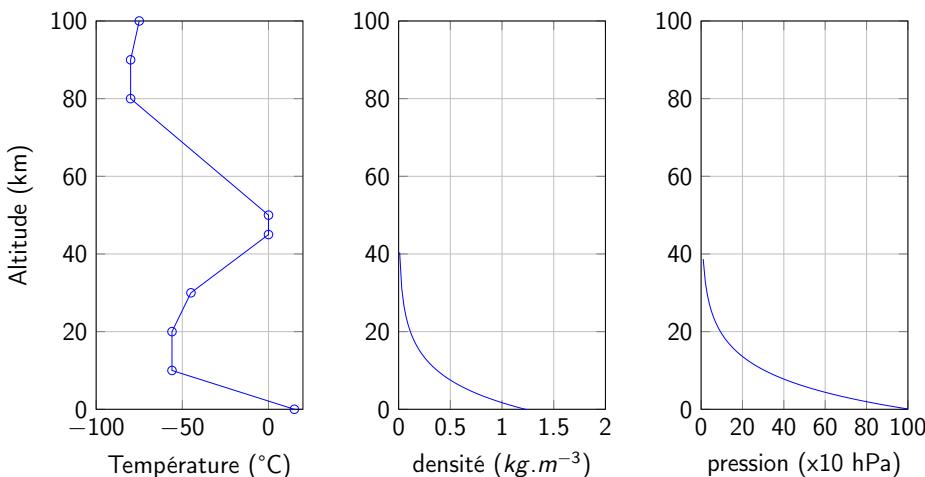


Figure 3 – ISA (modèle de 1976).

À partir de ces courbes, on peut donc en déduire de façon théorique les valeurs de température et pression en altitude. Toutefois, lorsque les conditions du jour ne sont pas de 1013,25 hPa et 15 °C au niveau de la mer, il va falloir apporter des corrections.

1.4. Température et échanges thermiques

La température est une grandeur physique mesurée à l'aide d'un thermomètre et définie en physique de la façon suivante pour un gaz (comme l'atmosphère) : elle mesure le degré d'agitation thermique des particules qui constituent ce gaz. Elle est généralement mesurée en degrés Celsius, Fahrenheit ou Kelvin. On a les relations suivantes entre les unités :

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 \times T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad \text{et} \quad T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

Dans le graphique précédent, on peut remarquer que jusqu'à 11 km d'altitude (espace dans lequel évoluent les aéronefs), la courbe est proche d'une droite. Ainsi, on peut considérer qu'il existe une relation affine entre la température et l'altitude :

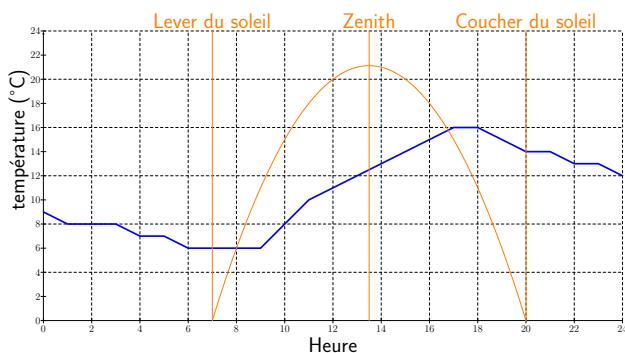
la température décroît de _____ Celsius ou Kelvin
lorsque l'altitude augmente de _____.

Ainsi, dans la troposphère, la température diminue lorsque l'altitude augmente, pour atteindre une valeur proche de $-56,5^{\circ}\text{C}$ à sa limite supérieure. La tropopause — transition entre la troposphère et la stratosphère — marque l'entrée dans une couche d'inversion de température, c'est à dire que la température se met à augmenter avec l'altitude.

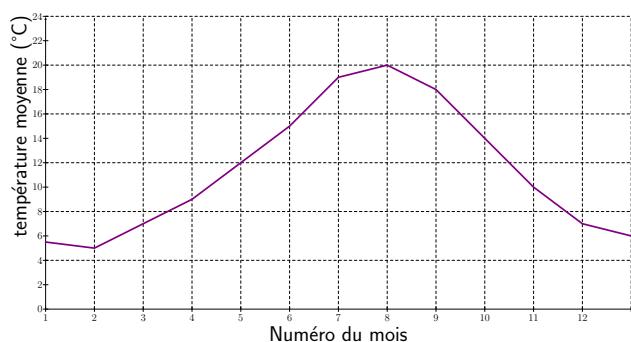
Exercice 1

On se trouve à une altitude de 400 m et on mesure une température de 7°C . Quelle température fait-il au niveau de la mer ?

À un lieu donné, la température moyenne au niveau de la mer est variable selon les saisons et oscille également au cours d'une journée autour d'une valeur moyenne.



(a) Sur une journée (avril 2025)



(b) Sur une année (2020)

Figure 4 – Variations de température pour un lieu donné (Paris).

Les variations quotidiennes et saisonnières sont directement liées à l'angle des rayons du soleil avec la surface éclairée. L'éclairement est plus intense au moment de la journée où le soleil est à son zénith. Sur une année, la durée d'ensoleillement varie en fonction de la position de la Terre sur son orbite et de l'angle d'incidence des rayons solaires (compte tenu de l'inclinaison de l'axe de la terre). Les quatre saisons des régions tempérées sont plutôt réduites à deux dans les zones intertropicales et ont des durées très différentes aux pôles. En Arctique, il existe deux saisons principales : un long hiver sombre et glacial de neuf mois et un bref été de trois mois très frais.

Les transferts thermiques, appelés plus communément _____, font varier la température d'un système. Ils se manifestent sous trois formes :

- la _____, par contact matériel ;
- la _____ (mouvement vertical) ou l'advection (mouvement horizontal) par brassage de fluide, liquide ou gazeux ;
- le _____, par l'émission et la propagation d'ondes électromagnétiques (lumière visible ou infrarouge).

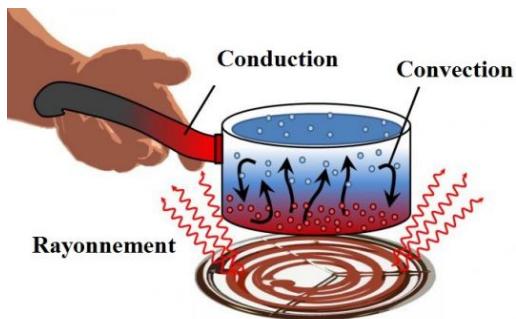


Figure 5 – Échanges thermiques.

Remarque : La signification du mot « chaleur » dans le langage courant peut porter à confusion (notamment avec la température). S'il est vrai que les transferts thermiques spontanés se font des corps chauds vers les corps froids (c'est un principe physique), il est néanmoins possible de réaliser un transfert thermique d'un corps froid vers un corps chaud, à l'aide d'une machine thermique comme un réfrigérateur. Lors d'un changement d'état, par exemple lors de l'ébullition, un corps pur ne change pas de température alors qu'il échange de l'énergie sous forme de chaleur.

L'exemple le plus simple de situation mettant en jeu un transfert thermique est celui de deux corps en contact ayant des températures différentes. Le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid par conduction ; sa température diminue, le désordre, l'agitation thermique, diminue. En contrepartie, la température du corps froid augmente, l'agitation thermique augmente en son sein.

Le rayonnement solaire est partiellement absorbé par la surface de la Terre, qui le rediffuse sous forme d'infrarouges vers les basses couches de l'atmosphère. On donne la figure suivante avec des pourcentages indicatifs.

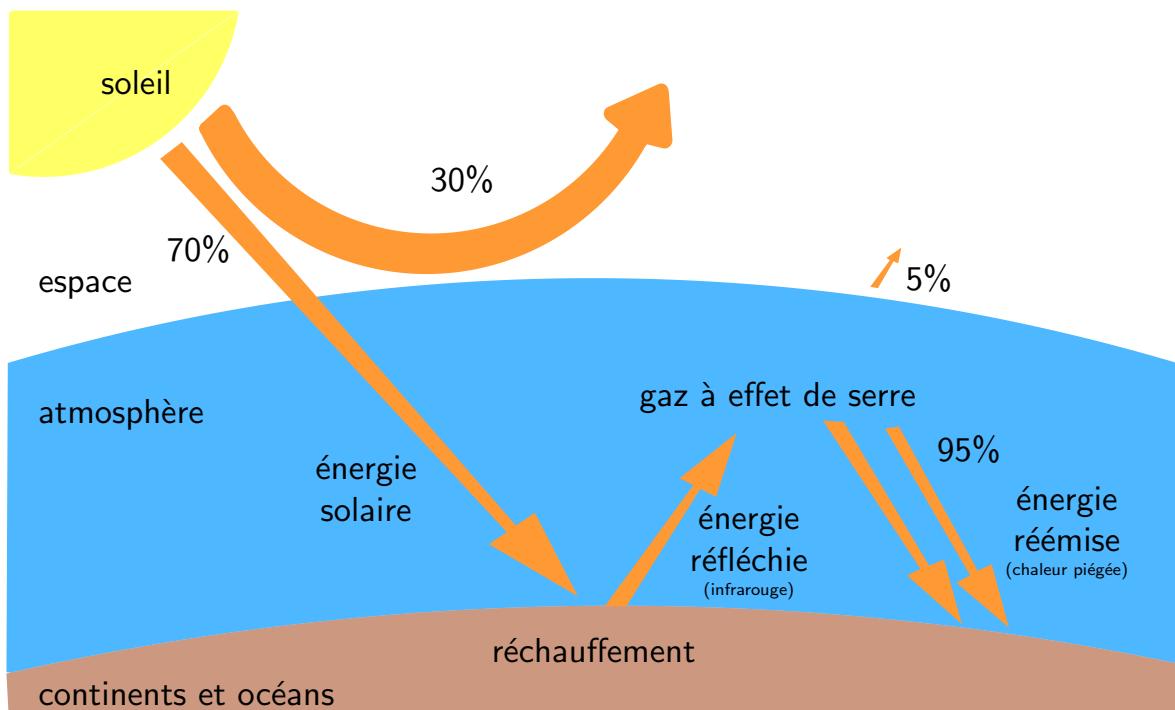


Figure 6 – Bilan radiatif.