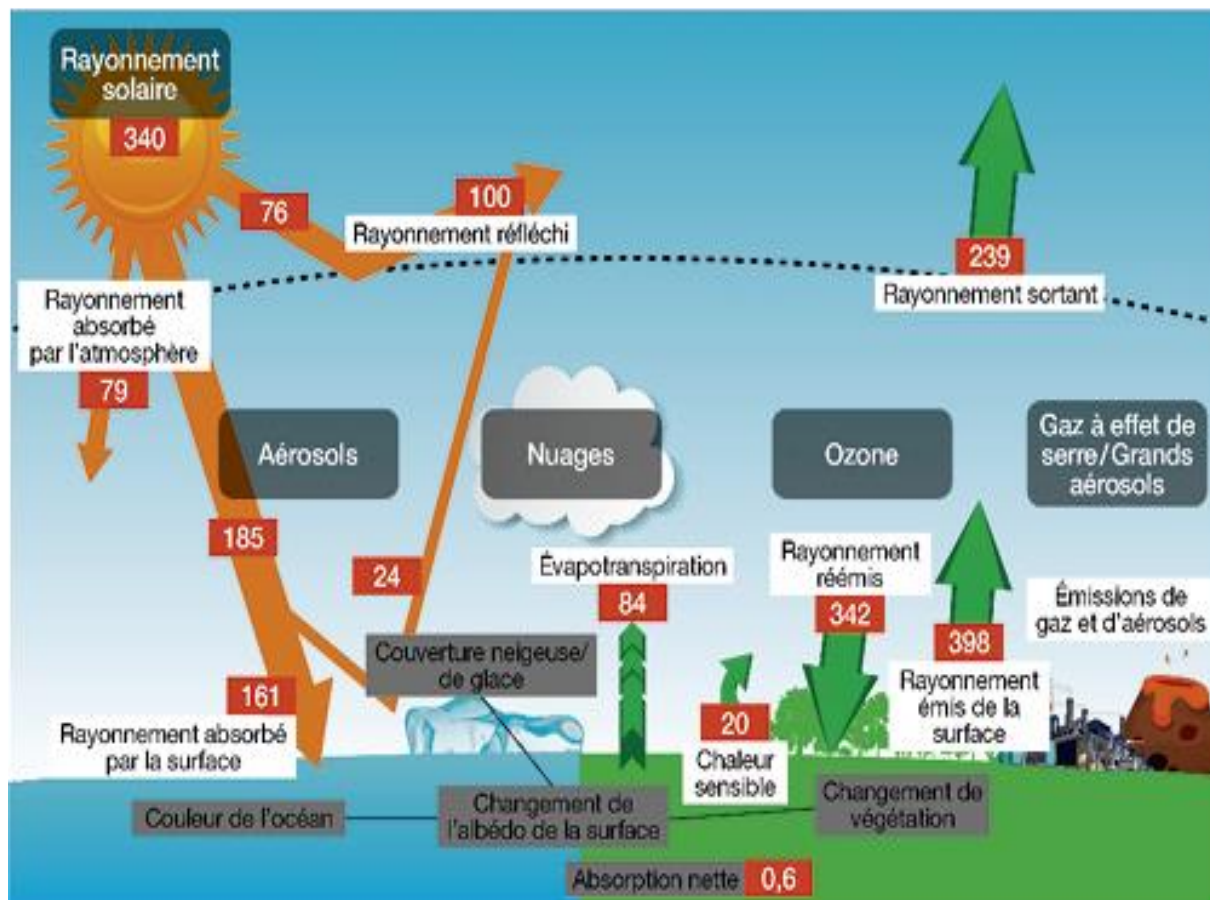


# PHYSIQUE

## DF2 – Semestre 2



## Changement climatique

LCC

Daniel Bayard, Fabrice Desse, Damien Gollut, Valérie Jacquier, Romaine Theler

## Table des matières

|       |                                                                                                             |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introduction .....                                                                                          | 4  |
| 1.1   | Comment sait-on que notre planète se réchauffe ? .....                                                      | 4  |
| 1.2   | Différence entre météorologie et climat .....                                                               | 4  |
| 1.3   | Les facteurs qui modifient le climat.....                                                                   | 5  |
| 1.4   | Le GIEC .....                                                                                               | 9  |
| 1.5   | Le système climatique et les modèles climatiques.....                                                       | 11 |
| 1.6   | Exercices du chapitre 1 .....                                                                               | 14 |
| 1.7   | Corrigé des exercices du chapitre 1.....                                                                    | 16 |
| 2     | Notions de base .....                                                                                       | 18 |
| 2.1   | Température .....                                                                                           | 18 |
| 2.1.1 | Approche historique des échelles de mesure de la température .....                                          | 18 |
| 2.1.2 | Définition de la température.....                                                                           | 19 |
| 2.1.3 | Une nouvelle échelle de température : le kelvin .....                                                       | 19 |
| 2.2   | Energie thermique et chaleur.....                                                                           | 20 |
| 2.2.1 | Définition de l'énergie thermique .....                                                                     | 20 |
| 2.2.2 | Définition de la chaleur .....                                                                              | 21 |
| 2.2.3 | Unités de la chaleur.....                                                                                   | 22 |
| 2.2.4 | Relation entre chaleur et augmentation de température.....                                                  | 22 |
| 2.3   | Puissance .....                                                                                             | 23 |
| 2.4   | Flux énergétique.....                                                                                       | 24 |
| 2.5   | Le kilowatt-heure .....                                                                                     | 25 |
| 2.6   | Rendement énergétique.....                                                                                  | 26 |
| 2.7   | Consommation d'énergie en Suisse (extrait de <a href="http://www.bfs.admin.ch">www.bfs.admin.ch</a> ) ..... | 27 |
| 2.8   | Exercices du chapitre 2 .....                                                                               | 29 |
| 2.9   | Corrigés des exercices du chapitre 2 .....                                                                  | 36 |
| 3     | Le changement climatique.....                                                                               | 39 |
| 3.1   | Source d'énergie : le rayonnement électromagnétique .....                                                   | 39 |
| 3.1.1 | Lumière et ondes électromagnétiques .....                                                                   | 39 |
| 3.1.2 | Charge électrique soumise à une onde EM.....                                                                | 41 |
| 3.1.3 | Rayonnement du corps noir .....                                                                             | 42 |
| 3.2   | Les Gaz à effets de serre et leurs effets .....                                                             | 44 |
| 3.2.1 | Introduction.....                                                                                           | 44 |
| 3.2.2 | Gaz à effet de serre .....                                                                                  | 46 |
| 3.3   | Bilan énergétique de la Terre.....                                                                          | 49 |

|       |                                                                  |    |
|-------|------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1 | Réflexion et absorption du rayonnement solaire.....              | 49 |
| 3.3.2 | Le rayonnement de la Terre.....                                  | 50 |
| 3.3.3 | Equilibre thermique .....                                        | 52 |
| 3.3.4 | Rétroactions .....                                               | 54 |
| 3.4   | Exercices du chapitre 3 .....                                    | 55 |
| 3.5   | Corrigés des exercices du chapitre 3 .....                       | 65 |
| 4     | Calcul de la température de la Terre .....                       | 68 |
| 4.1   | Introduction.....                                                | 68 |
| 4.2   | Calcul de la température de la Terre sans effet de serre .....   | 69 |
| 4.3   | Calcul de la température de la Terre avec effet de serre .....   | 71 |
| 4.4   | Exercices du chapitre 4 .....                                    | 74 |
| 4.5   | Corrigés des exercices du chapitre 4 .....                       | 77 |
| 5     | Les pompes à chaleur.....                                        | 79 |
| 5.1   | Processus irréversibles.....                                     | 79 |
| 5.2   | Fonctionnement d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur ..... | 80 |
| 5.3   | Sources d'énergie utilisées par une pompe à chaleur .....        | 84 |
| 5.3.1 | L'air comme source de chaleur.....                               | 85 |
| 5.3.2 | Le sol comme source de chaleur (géothermie).....                 | 85 |
| 5.3.3 | L'eau comme source de chaleur .....                              | 85 |
| 5.3.4 | Coefficient de performance (COP) .....                           | 86 |

# 1 - Introduction

## 1.1 Comment sait-on que notre planète se réchauffe ?

Le réchauffement climatique est un phénomène lourd de conséquences, que ce soit au niveau de la modification des régimes de précipitations, de la disparition de la biodiversité ou encore de la transformation des zones habitables.



Figure 1 : ours polaire

## 1.2 Différence entre météorologie et climat

Le graphique ci-dessous montre l'évolution de la température moyenne à la surface du globe au cours du temps (entre 1850 et 2020). Les courbes de différentes couleurs correspondent à des ensembles de mesures indépendantes.

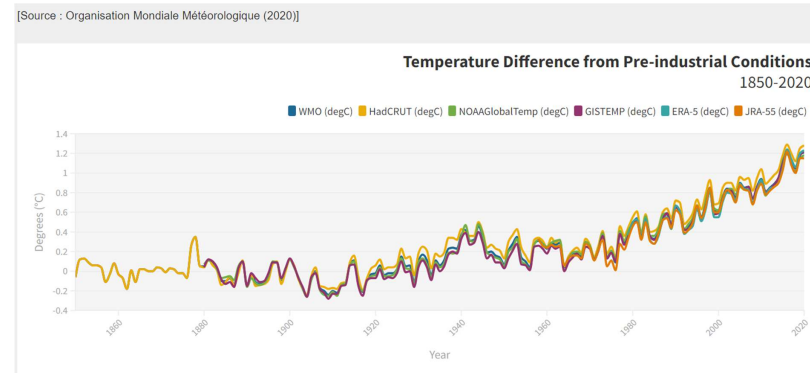


Figure 2: Evolution de la température entre 1850 et 2020

Quelle est la différence principale entre météo et climat ?

La météo étudie des variations locales à très court terme (heures voire jours), alors que l'étude du climat se préoccupe de variations à long terme de la température moyenne sur la surface du globe.

Remarque sur le graphique : Puisque toutes les courbes montrent une augmentation de température depuis 1900, l'axe vertical montre en réalité l'écart de température par rapport à la période 1850-1900, d'où la valeur de 0°C pour cette période.

## 1.3 Les facteurs qui modifient le climat

### Deux types de causes

Le moteur principal du climat est la quantité de rayonnement solaire qui parvient jusqu'à la Terre. Normalement, il existe un équilibre entre le rayonnement solaire absorbé par la Terre et l'énergie thermique qu'elle restitue dans l'espace. Cet équilibre est schématisé de manière très simplifiée dans la figure ci-dessous. Le chapitre 3 nous permettra d'étudier de manière beaucoup plus détaillée cet équilibre et ses variations afin de comprendre la température de la Terre et son évolution.

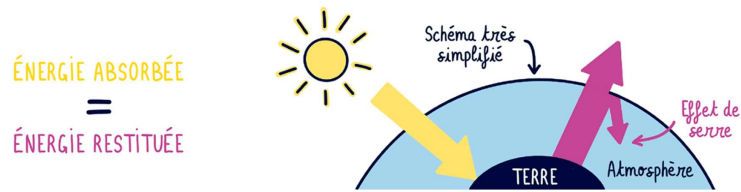


Figure 3 : Schéma très simplifié de l'équilibre radiatif

C'est une perturbation de cet équilibre qui induit un changement climatique global. Les causes de cette perturbation peuvent être classées en deux catégories :

- causes naturelles
- causes anthropiques c'est-à-dire dues aux activités humaines

### Les variations de température sur Terre avant l'ère préindustrielle

Les cycles de périodes glaciaires et interglaciaires ont été causés principalement par des variations de la quantité d'énergie solaire reçue à la surface de la Terre. Ces variations proviennent des fluctuations cycliques de l'activité solaire et des variations cycliques des paramètres de l'orbite terrestre qu'on appelle cycles de Milankovitch. Il y en a trois principaux :

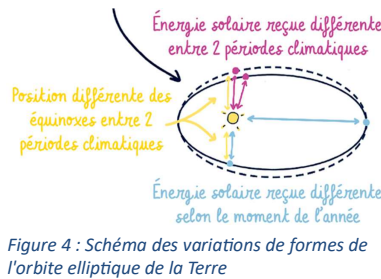


Figure 4 : Schéma des variations de formes de l'orbite elliptique de la Terre

- Le cycle de l'excentricité qui représente la variation de la forme de l'orbite terrestre.
- Le cycle de l'obliquité qui correspond à la variation de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre.
- Le cycle de la précession qui indique la rotation de l'axe de rotation de la Terre.

En combinant l'effet de ces trois cycles de fréquences différentes comme présentés sur la figure ci-dessous, on peut expliquer les variations de températures des différents âges glaciaires (dernière ligne). Les zones indiquées en gris correspondent aux périodes de réchauffement inter-glaciaires séparant deux périodes de glaciation.

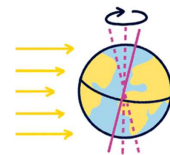


Figure 5 : Schéma des variations liées à l'axe de rotation de la Terre

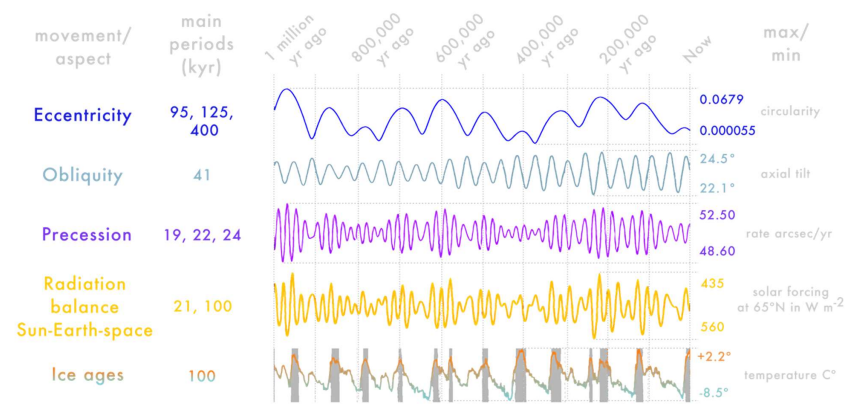


Figure 6: Cycles de Milankovitch, cycle solaire et variation de température

Nous pouvons connaître l'évolution du climat des 150 dernières années grâce aux relevés météorologiques mesurés par différents instruments.

Pour toutes les époques antérieures - ce qu'on appelle le paléoclimat - les scientifiques s'appuient sur des archives naturelles basées sur des prélèvements de carottes de glace dans les régions polaires, de coquilles d'organismes marins, de roches, de sédiments, de fossiles, ou encore de cernes des arbres.

Si vous voulez aller plus loin, le [graphique](#) (voir lien) présente les estimations géologiques de la variabilité de la température de la Terre durant les 400 derniers millions d'années.

## Les variations de température sur Terre après l'ère préindustrielle

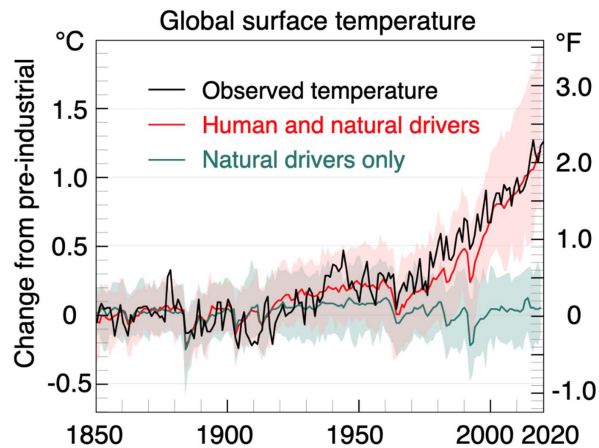


Figure 7: Ecart des températures depuis 1880 calculé par rapport à la moyenne préindustrielle de 1850-1900. La ligne noire montre des températures de surface moyennes annuelles mesurées par la NASA. Les lignes colorées correspondent aux simulations du modèle climatique CMIP6. La ligne verte tient compte uniquement des facteurs naturels : le Soleil et le volcanisme. La ligne rouge présente la combinaison des facteurs naturels et anthropiques.

## Les variations de CO<sub>2</sub> atmosphérique avant et après l'ère préindustrielle

La figure ci-dessous présente la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique tiré des carottes de glace sur le site de Vostok en Antarctique. Attention au bas du graphique, l'échelle du temps est inversée : ici, lorsqu'on va vers la droite on remonte dans le passé jusqu'à -400'000 ans. L'échelle indiquée au sommet montre la profondeur du carottage jusqu'à plus de 3'000 mètres. L'indication ppm signifie « partie par million » correspond à 1/10<sup>6</sup>.

On observe que de très grands volumes de CO<sub>2</sub> ont été dégazés lors de 5 grandes perturbations climatiques (réchauffements interglaciaires) au cours des 500 derniers millions d'années. Les conséquences ont été un réchauffement de l'atmosphère, une acidification des océans et des extinctions massives.

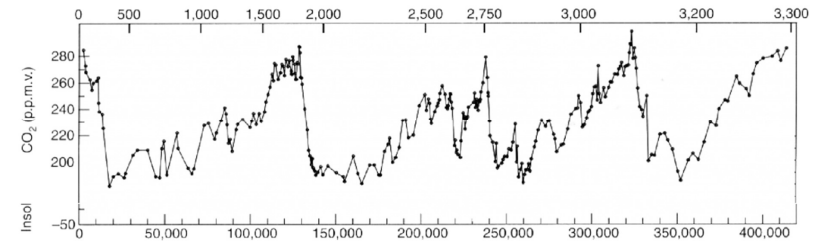


Figure 8 : Variation des teneurs de l'atmosphère en gaz carbonique sur 400'000 ans tirée du forage de Vostok.

Sur la figure suivante, on présente les augmentations des concentrations de trois gaz à effet de serre depuis 1850 : le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O).

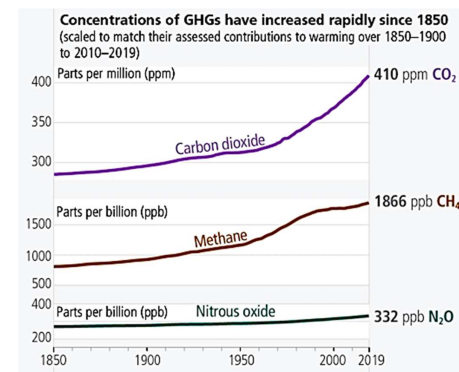


Figure 9: Concentrations de trois gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis 1850

L'augmentation récente du CO<sub>2</sub> atmosphérique est de plus en plus rapide (la pente est de plus en plus raide) : sur la dernière décennie elle était de 2 ppm/an alors qu'elle n'était que de 0.5 ppm/an il y a 50 ans.

## 1.4 Le GIEC

Le **GIEC** signifie « **G**roupe d'**e**xperts **I**ntergouvernemental sur l'**E**volution du **C**limat ». En anglais, il se traduit par **IPCC**, « l'**I**ntergouvernemental **P**anel on **C**limate **C**hange ».

Le GIEC a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNU) en vue de fournir des évaluations détaillées de **l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques** sur les changements

climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade.

Le GIEC est une **association de pays** qui rassemble **195** états-membres et son secrétariat général est basé à Genève.

Le GIEC n'est **pas un laboratoire de recherche**. Son travail consiste non pas à effectuer ses propres recherches mais à **analyser la littérature publiée et à synthétiser les résultats** obtenus dans les laboratoires du monde entier.

Le GIEC publie des rapports scientifiques **chaque 6-7 ans** pour **aider les responsables politiques dans l'élaboration de leur politique climatique**. Aucune instruction n'est directement donnée aux décideurs, mais divers scénarios et risques liés aux changements climatiques sont présentés.

Des centaines de scientifiques du monde entier sont répartis en **4 groupes de travail** représentés dans la figure ci-dessous :



Figure 10: Groupes de travail du GIEC

Des centaines d'experts travaillent à établir les rapports d'évaluation du GIEC comme auteurs principaux. Ils ont recours à des centaines d'autres experts spécifiques en tant qu'auteurs collaborateurs. Puis des milliers d'autres experts-examineurs vérifient ces rapports afin de **garantir l'exhaustivité, l'objectivité et la transparence** de la communauté scientifique. Finalement des équipes d'éditeurs-réviseurs s'assurent que toutes les observations et remarques ont bien été prises en compte.

En 2022, le budget du GIEC était d'un peu moins de huit millions d'euros. Cet argent sert à financer l'organisation des réunions, le secrétariat (qui comptait 13 salariés en 2021), les déplacements des chercheurs de pays en développement et la traduction des rapports. Les scientifiques ne sont pas rémunérés par le GIEC pour le travail et les déplacements, mais par les ministères de leur pays ou les organismes de recherche.

Depuis sa création, le GIEC a publié **6 rapports** : en 1990, 1995, 2001, 2007, 2014 et 2023.

Ils ont permis d'établir un **consensus scientifique** sur le **réchauffement climatique** et **l'influence des activités humaines** sur le système climatique.

## 1.5 Le système climatique et les modèles climatiques

Le **système climatique** est l'ensemble des interactions complexes entre :

- l'atmosphère
- l'hydrosphère (océans)
- la cryosphère : toutes les surfaces de glace et de neige
- la lithosphère : l'enveloppe rigide de la Terre c'est-à-dire la croûte terrestre et son manteau supérieur
- la biosphère : tous les écosystèmes c'est-à-dire l'ensemble des organismes vivants et leurs milieux de vie

... qui sous l'effet du rayonnement solaire détermine le climat de la Terre.

Les différentes composantes du système climatique et quelques principales interactions sont présentées dans la figure qui suit.

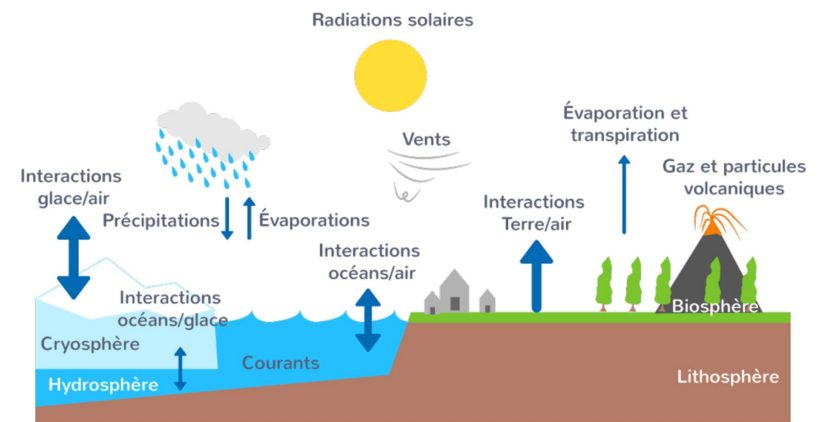


Figure 11 : Schéma du système climatique

Etant donné le grand nombre des composants et la complexité des interactions, le seul moyen de faire des prévisions concernant le climat est l'utilisation de modélisations par ordinateur.

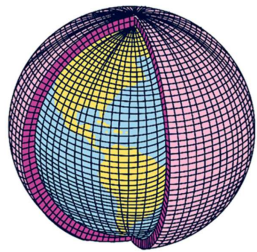


Figure 12 : Schéma du maillage de la Terre utilisé pour des modèles climatiques temporel).

Pour simuler toutes ces données à l'échelle de la planète et générer des **modèles climatiques**, on découpe les couches superficielles du globe terrestre en mailles (latitude, longitude, altitude / profondeur) comme sur le schéma ci-contre. Les programmes calculent l'évolution temporelle des différentes variables (température, pression, ...) de chacune des composantes du système climatique à intervalle de temps régulier (= le pas de temps du maillage temporel).

Les modèles climatiques se sont améliorés au fil des années en prenant en compte de plus en plus de paramètres. Leur résolution a été considérablement augmentée grâce à la révolution numérique permettant ainsi de réduire la taille des mailles spatiales et temporelles.

Cela représente quand même une très grande quantité de données à gérer et faire évoluer. En effet, la réalisation d'une simulation de 2'000 ans avec un maillage de 100 km prend quasiment une année entière à l'heure actuelle !

Les modèles climatiques sont bien évidemment testés, retestés, évalués et validés pendant plusieurs années et par plusieurs équipes internationales. Ils doivent notamment être capables de :

- Simuler avec exactitude les climats passés
- Représenter les tendances récentes du climat observées
- Reproduire les caractéristiques saisonnières du climat dans chaque région

La figure ci-dessous présente les projections de températures à l'aide des modèles de 2021 réalisées sur la base des mesures de 1970-2014. CMIP6 signifie qu'il s'agit des derniers modèles climatiques utilisés pour le 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC. Les observations de la température de surface sont en noir et les modèles sont en rouge et gris.

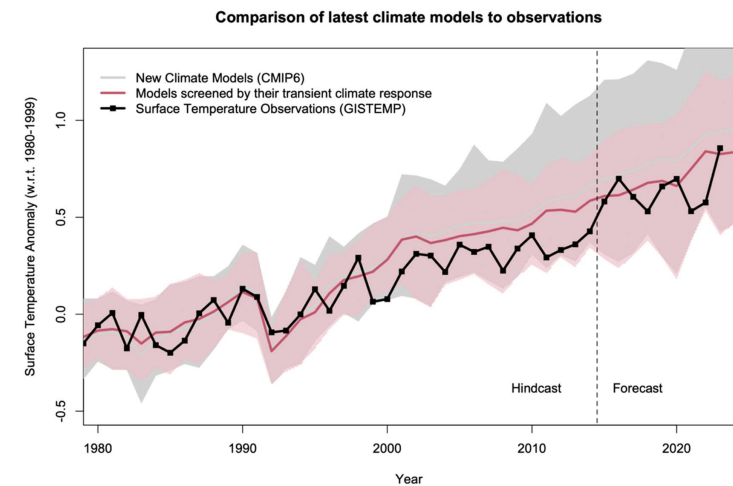


Figure 13: Projections des températures selon le GIEC (CMIP6) et comparaison avec les observations

## 1.6 Exercices du chapitre 1

### Exercice 1

Regarder la vidéo ci-dessous et observer comment les températures évoluent dans le temps jusqu'en 2020 tout en variant à la surface du globe.

[Anomalies de températures de 1880 à 2021 - Nasa - YouTube](#)

Déterminer l'augmentation de température moyenne de la Terre entre 1880 et 2021 :  $\Delta T =$  \_\_\_\_\_

Depuis quand la température de la surface de la Terre semble-t-elle augmenter ? \_\_\_\_\_

### Exercice 2

Déterminer sur la Figure 2 l'augmentation moyenne de la température de la Terre entre 1850 et 2020. Obtient-on le même résultat que pour l'Exercice 1 ?

$\Delta T =$

### Exercice 3

Observez la figure Figure 7 et répondez à la question suivante : Les facteurs naturels peuvent-ils expliquer le réchauffement climatique que l'on observe depuis la période 1850-1900 ?

### Exercice 4

Citez trois principales causes naturelles et anthropiques du changement climatique.

Causes naturelles :

Causes anthropiques :

### Exercice 5

- a) Sur la Figure 8, quel est l'écart de concentrations de  $\text{CO}_2$  entre les valeurs minimale et maximale observées sur les 400'000 ans ?
- b) Sur la Figure 8, observez le 2<sup>ème</sup> pic en partant de la gauche. Sur quelle échelle temporelle s'est faite la forte variation (partie droite du pic) pour passer d'environ 190 ppm à plus de 280 ppm de  $\text{CO}_2$  ?
- c) Sur la Figure 9, quelle est l'augmentation de concentration de  $\text{CO}_2$  observé sur les 170 dernières années ?
- d) En comparant les réponses précédentes, quelle conclusion principale peut-on en tirer ?

### Exercice 6

Observez la Figure 13. Est-ce que les deux modèles représentés remplissent les conditions de validité ?

## 1.7 Corrigés des exercices du chapitre 1

### Exercice 1

$\Delta T$  = environ 1.5°C. Les pôles augmentent beaucoup plus rapidement que l'équateur.

La température augmente de manière significative depuis environ 1970.

### Exercice 2

La température a augmenté d'environ 1.2 °C depuis 1850.

### Exercice 3

Causes naturelles :

- le volcanisme
- les fluctuations de l'activité solaire
- les variations des paramètres de l'orbite terrestre

Causes anthropiques :

- une augmentation des gaz à effet de serre (aérosols, CO<sub>2</sub>, ...)
- un amincissement de la couche d'ozone
- une forte exploitation des sols (cultures excessives, déforestation, ...)

### Exercice 4

On observe que les facteurs naturels n'expliquent en aucun cas l'évolution si rapide de l'élévation de la température.

### Exercice 5

a) La concentration de CO<sub>2</sub> minimale est d'environ 180 ppm et la valeur maximale d'environ 290 ppm, elle ne dépasse jamais les 300 ppm. Cela correspond donc à une variation d'environ 110 ppm.

b) Il faut environ 10'000 ans pour effectuer cette forte augmentation de 90 ppm (partie droite du 2<sup>ème</sup> pic en partant de la gauche).

c) On a observé une augmentation d'environ 130 ppm (d'environ 280 à 410 ppm) sur seulement les 170 dernières années !

d) Depuis la révolution industrielle, la hausse des émissions du CO<sub>2</sub> est principalement due aux activités humaines.

A titre comparatif, sur une année, les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la combustion d'énergies fossiles combinées à la déforestation sont 110 fois plus importantes que celles de 1'500 volcans !

### Exercice 6

Concernant les deux modèles, ils reproduisent les températures observées jusqu'en 2014 dans l'intervalle des valeurs probables.

De plus, les prévisions faites sont globalement en accord avec ce qui a été observé depuis 2015.

Entre les deux modèles, c'est le rouge qui semble être le plus proche en moyenne des températures observées ces dernières années.

## 2 - Notions de base

### 2.1 Température

#### 2.1.1 Approche historique des échelles de mesure de la température

On a su mesurer la température bien avant de comprendre de quoi il s'agissait vraiment. Visionne le film et réponds aux questions de l'exercice 1 page 29.

<https://mediacast.eduvs.ch/m/2845>

Le physicien suédois **Anders Celsius** fit construire en 1741 un thermomètre à mercure, qui prenait comme points de référence le **point de congélation de l'eau** (qu'il désigna comme le point à 0°C) et le **point d'ébullition de l'eau** (qu'il désigna comme le point à 100°C).



#### Expérience

*Refaites l'expérience d'Anders Celsius !*

Matériel : un tube en verre rempli avec un liquide, un mélange de glace et d'eau et une bouilloire remplie avec la bonne quantité d'eau.

*Déroulement de l'expérience*

☞ Le tube rempli avec le liquide se trouve depuis un certain temps déjà dans cette salle de classe. On peut raisonnablement supposer que la température du liquide correspond à celle de la salle de classe. Marquer la hauteur du liquide à l'aide d'un crayon (finement).

☞ Plonger maintenant le tube dans l'eau glacée. Mélanger prudemment jusqu'au moment où le niveau du liquide reste inchangé. Marquer à nouveau la hauteur du liquide.



☞ Faire bouillir de l'eau à 100°C et plonger le tube dans l'eau bouillante. Marquer encore une fois la hauteur du liquide.

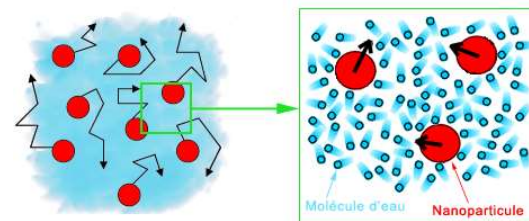
La marque qui a été faite au début indique le niveau du liquide à température de la salle de classe. Déterminer de la manière la plus précise possible cette température, en utilisant le procédé de Celsius.

Réponse : La température de la salle de classe vaut : .....

Vérification sur un thermomètre déjà gradué :  
 $T_{\text{salle de classe}} = \dots\dots\dots$

#### 2.1.2 Définition de la température

En 1827, le botaniste Robert Brown observa sous un microscope du pollen dispersé dans de l'eau et remarqua que les grains de pollen suivaient un mouvement continu et irrégulier : c'est ce que l'on appelle le **mouvement brownien**.



Ce mouvement, venant des chocs des molécules d'eau sur les grains de pollen, est d'autant plus important que la température est élevée. On peut donc lier la température à l'agitation moléculaire. Toutefois, toutes les molécules n'ont pas forcément la même vitesse : on remarque que les molécules ayant une plus grande masse ont une vitesse plus faible que les molécules les plus légères alors qu'elles ont toutes la même agitation thermique. On définit alors la température ainsi :

La température est une **mesure de l'agitation thermique** des molécules d'un corps. Plus ces molécules sont agitées, c'est-à-dire plus l'**énergie cinétique moyenne par molécule** est importante, plus la température du corps est élevée.

#### 2.1.3 Une nouvelle échelle de température : le kelvin

Lorsqu'aucune molécule ne bouge, on atteint la température la plus basse possible qui se trouve être à - 273°C. Lord Kelvin y définit une autre échelle de température avec son zéro kelvin, noté 0 K ou **zéro absolu**

comme température la plus basse. Les échelles Celsius et Kelvin sont donc décalées de 273 degrés, avec par exemple le 0°C correspondant à 273 K.

Le **zéro absolu**, ou **0 K** (kelvin), est la température la plus basse que l'on puisse imaginer, celle pour laquelle l'agitation moléculaire est nulle.

On vérifie expérimentalement que 0 K correspond à -273°C.

## 2.2 Energie thermique et chaleur

### 2.2.1 Définition de l'énergie thermique

Nous avons vu précédemment que l'énergie totale d'un système isolé était conservée.

Plaçons une bille au-dessus d'un verre d'eau et lâchons-la. Pendant la chute, l'énergie potentielle gravitationnelle diminue, ce qui se traduit par une augmentation de l'énergie cinétique de la bille. Toutefois, à la fin, la bille est immobile au fond du verre d'eau : il n'y a plus d'énergie cinétique. Où est passée l'énergie potentielle gravitationnelle qui a été perdue pendant la chute ? D'après le principe de conservation de l'énergie, elle ne peut tout simplement pas avoir disparu !

À l'aide d'un thermomètre très précis, on pourrait constater que l'eau dans le verre est légèrement plus chaude qu'avant la chute de la bille. L'énergie potentielle gravitationnelle a été transformée en **énergie thermique**. Dans une substance liquide ou gazeuse, l'énergie thermique correspond à l'énergie « microscopique » associée à la vibration des molécules, à leur rotation sur elles-mêmes ainsi qu'au mouvement désordonné qui fait en sorte qu'elles se déplacent dans tous les sens en rebondissant les unes sur les autres. Dans une substance solide, les molécules sont fixes et l'énergie thermique est essentiellement associée à leur vibration. Lorsque l'énergie thermique d'une substance augmente, elle nous apparaît plus chaude ; lorsque l'énergie thermique diminue, elle nous apparaît plus froide.

Il convient de bien distinguer les notions d'énergie thermique, de chaleur et de température, qui sont des notions bien distinctes en physique.

**L'énergie thermique**, notée  $E_{\text{therm}}$ , est définie comme la somme des énergies cinétiques de toutes les molécules du corps (gaz, liquide ou solide). Elle s'exprime en joules.

En augmentant la température d'un corps, on augmente l'énergie cinétique moyenne par molécule, donc on augmente aussi la somme des énergies cinétiques. Une augmentation de température est donc à mettre en relation avec une augmentation d'énergie thermique du corps, mais ces deux grandeurs reflètent des notions différentes !

Prenons l'exemple de deux corps identiques qui ont une même température. Si on les met ensemble, leur température ne changera pas alors que l'énergie thermique de l'ensemble double. On dit que **l'énergie thermique est une grandeur extensive**, dans le sens où l'énergie thermique d'un ensemble de corps est la somme des énergies thermiques de ces corps. **La température**, qui correspond à une sorte de densité d'énergie, **est une grandeur intensive** : on ne peut pas additionner les températures du corps pour obtenir la température de l'ensemble.

### 2.2.2 Définition de la chaleur

Imaginons que l'on chauffe de l'eau, par un moyen ou un autre (bougie, plaque électrique, chauffe-eau). L'eau voit son énergie thermique augmenter : on dit que l'eau reçoit de la chaleur. Si on refroidit cette eau, on dit qu'elle cède ou fournit de la chaleur. Dans les deux cas, il y a variation (transfert dans un sens ou dans l'autre) d'énergie thermique : c'est la définition de la chaleur.

La **quantité de chaleur  $Q$**  est l'**énergie thermique transférée** d'une région de haute température à une région de basse température :

$$Q = \Delta E_{\text{therm}}$$

Son unité est le joule (J).

Lorsqu'on chauffe une substance, on lui transfère de l'énergie thermique en la mettant en contact avec un environnement qui a une température plus élevée. C'est le cas par exemple lorsque l'on met une casserole remplie d'eau sur une plaque électrique chauffée. La plaque est à une température plus élevée que l'eau, et donc l'eau gagne de l'énergie à travers la chaleur.

Lis la définition de la chaleur ci-dessus très attentivement. On ne parle de chaleur que lorsqu'il y a un **processus d'échange**. Un corps ne contient pas de chaleur ! (mais il contient de l'énergie thermique).

En particulier, fais attention à ce que la chaleur **n'est pas** dans ces expressions courantes :

1. La chaleur *n'est pas* de l'énergie contenue dans une substance chaude. Par exemple, l'expression « L'eau bouillante contient beaucoup de chaleur. » est incorrecte : l'eau bouillante contient beaucoup d'énergie thermique.
2. La chaleur *n'est pas* un rayonnement. Par exemple, dire que « Il faisait si chaud que le trottoir rayonnait de la chaleur. » est incorrect : de l'énergie quitte le trottoir sous la forme d'un rayonnement électromagnétique.
3. La chaleur *n'est pas* la température élevée d'un environnement. Par exemple, l'expression « La chaleur dans l'air est oppressante. » est incorrecte : en été, l'air a une température élevée.

### 2.2.3 Unités de la chaleur

Jusque dans les années 1850, le statut de la chaleur n'était pas clair. La théorie qui prédominait était celle du *calorique*, du nom d'un fluide hypothétique qui s'écoulerait d'une substance à une autre en causant des variations de température. De là provient une unité de la chaleur appelée **calorie (cal)**, définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau de 14,5°C à 15,5°C.

D'une fois que la relation entre l'énergie dans les processus thermiques et mécaniques est devenue claire, il n'y eut plus besoin d'unités différentes pour l'énergie thermique et l'énergie mécanique. L'unité de la chaleur dans le système international est donc le **joule (J)**.

On a la conversion suivante :

$$1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J}$$

### 2.2.4 Relation entre chaleur et augmentation de température

Lorsque nous chauffons un corps, sa température s'élève. Nous pouvons ainsi affirmer qu'un corps a été chauffé par l'effet qui en résulte, c'est-

à-dire son changement de température, que nous pouvons mesurer facilement. On le notera par  $\Delta T$ .

Si la température augmente, c'est que le corps subit une augmentation de son énergie thermique. Il a donc reçu de la chaleur, que l'on note  $Q$ . Cette chaleur est ainsi la cause de son élévation de température.

L'expérience nous montre que, si on apporte une même quantité d'énergie à différentes substances, l'élévation de température ne sera pas la même pour toutes les substances. Elle nous montre également que si on double la masse de la substance à chauffer, il faut doubler la quantité d'énergie à apporter pour atteindre la même élévation de température.

Considérons un corps (solide, liquide ou gazeux) de masse  $m$  formé d'une certaine substance. Pour augmenter sa température de  $\Delta T$ , il faut fournir une quantité d'énergie

$$Q = \Delta E_{\text{therm}} = mc\Delta T$$

où  $c$ , la chaleur massique, dépend de la nature de la substance.

Dans le SI,  $Q$  est en joules,  $m$  est en kilogrammes et  $\Delta T$  est en kelvins. Ainsi, la chaleur massique s'exprime en joules par kilogramme et par kelvins (J/(kg · K)).

La **chaleur massique** indique la quantité de chaleur  $Q$  qu'il faut fournir à un corps de masse  $m = 1 \text{ kg}$  pour le chauffer de  $\Delta T = 1 \text{ K}$  (ou 1°C). Plus la chaleur massique d'une substance est grande, plus il faut fournir de chaleur pour augmenter sa température d'une certaine valeur.

L'eau a ainsi une grande chaleur massique, ce qui veut dire qu'il faut fournir une grande quantité d'énergie pour élever la température d'une masse d'eau donnée de 1°C (4 fois plus que pour une même masse d'air par exemple, et 10 fois plus que pour la même masse de fer !). Les conséquences sur le climat sont très importantes car les grandes masses d'eau océaniques peuvent emmagasiner le jour puis restituer la nuit de grandes quantités d'énergie thermique (provenant du Soleil) sans pour autant que leur température ne varie beaucoup. Les océans sont ainsi d'excellents régulateurs de la température du globe terrestre.

### 2.3 Puissance

La **puissance  $P$**  est définie comme le **taux de variation de l'énergie par rapport au temps  $\Delta t$** . En hommage à James Watt, un physicien écossais

dont les travaux sur les machines à vapeur, à la fin du 18<sup>e</sup> siècle, ont contribué à la révolution industrielle, l'unité SI de la puissance est le **watt** (W) : 1 W = 1 J/s.

Comme la vitesse correspond au taux de variation de la position par rapport au temps, on peut dire que la puissance est à l'énergie ce que la vitesse est à la position. Lorsque la position change, il y a une vitesse ; lorsque l'énergie change, il y a une puissance. On peut associer une puissance au taux de variation de n'importe quel type d'énergie : cinétique, potentielle, thermique, etc. Lorsqu'on apporte de la chaleur à un système, son énergie thermique augmente et on peut déterminer la puissance en calculant la variation d'énergie par unité de temps :

$$P_{therm} = \frac{\Delta E_{therm}}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t}$$

Si la chaleur apportée sert à augmenter de  $\Delta T$  la température d'un corps de masse  $m$ , on a :  $Q = mc\Delta T$ , où  $c$  est la chaleur massique du corps, et donc :

$$P_{ther} = \frac{mc\Delta T}{\Delta t}$$

## 2.4 Flux énergétique

L'énergie thermique peut être transférée sous la forme d'un rayonnement électromagnétique, appelé **rayonnement thermique** : les ondes électromagnétiques transportent l'énergie à travers l'espace (aussi à travers le vide).

Comme nous le verrons au chapitre 3, un objet émet des ondes électromagnétiques à partir de sa surface, et cela quelle que soit sa température. Les caractéristiques de ce rayonnement varient selon la température et les propriétés de la surface de l'objet. A température ambiante, le rayonnement thermique se situe surtout dans la région infrarouge, ce qui signifie que les yeux humains ne peuvent détecter ce rayonnement (mais les caméras infrarouges de vidéo surveillance le peuvent). Lorsque la température de surface de l'objet augmente, celui-ci commence à briller d'une couleur rouge visible, comme les éléments chauffants d'un grille-pain. A une température suffisamment élevée, l'objet brillant devient blanc, comme le Soleil.

Le rayonnement émis par le Soleil est isotrope, c'est-à-dire qu'il est émis dans des quantités égales dans toutes les directions. Il est aussi émis à un rythme constant. Cela signifie que la quantité d'énergie émise par unité de temps est constante : en d'autres termes, la puissance du Soleil est constante.

Une infime partie de ce rayonnement arrive sur la Terre. Si on place une surface perpendiculaire à ce rayonnement, on peut mesurer la quantité d'énergie qui arrive sur Terre par unité de temps et par unité de surface. C'est ce que l'on appelle le **flux solaire**.

On a la définition suivante :

Le **flux énergétique  $F$**  ou la **puissance rayonnée** est la mesure de la puissance totale  $P$  (= quantité d'énergie par unité de temps) d'un rayonnement électromagnétique émise ou reçue par une surface (réelle ou virtuelle)  $S$ .

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\Delta E / \Delta t}{S}$$

Son unité est le (J/s)/m<sup>2</sup> ou le W/m<sup>2</sup>.

Connaissant le flux solaire, on peut calculer la puissance solaire récoltée par une surface collectrice placée perpendiculairement au rayonnement :

$$P = F \cdot S$$

Et, de là, l'énergie solaire  $\Delta E$  récoltée pendant un certain intervalle de temps  $\Delta t$  :

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = F \cdot S \cdot \Delta t$$

Ainsi, si on double la surface, la quantité d'énergie reçue sera doublée. De même, si on garde la même surface mais que l'on double le temps, la quantité d'énergie reçue aura doublé.

## 2.5 Le kilowattheure

Dans la vie courante, on utilise rarement le joule mais plutôt le **kilowattheure (kWh)**. Attention ! Bien que le terme « kilowattheure » contienne le terme « watt », il ne s'agit pas d'une unité de puissance

mais bien d'énergie. Un kilowattheure est égal à 1 kilowatt (1000 W) multiplié par 1 heure, donc à une puissance multipliée par un intervalle de temps, ce qui correspond bien à une variation d'énergie, que l'on peut convertir en joules :

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 1'000 \text{ W} \cdot 3'600 \text{ s} = 10^3 \cdot 3.6 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{s} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$$

Un appareil de 1000 W qui fonctionne pendant 1 h consomme une énergie de 1 kWh. Les compteurs électriques mesurent habituellement la quantité d'énergie électrique consommée en kWh.

### Quelle puissance un être humain est-il capable de fournir en pédalant ?

<https://youtu.be/S4O5voOCqAQ>

Comme la vidéo l'indique, Robert, champion surentraîné, a été capable de produire 700 W, mais sur un très court laps de temps. C'est le maximum possible ! Pour un effort plus long, disons sur une demi-heure, Robert serait capable de tenir avec une puissance de 400 W. C'est la limite qui semble acceptable, sans suspicion de dopage...

Un humain standard qui ne dispose pas de telles capacités, fournira entre 200 et 250 W, disons 200 W pour être conservateur.

Pour résumer :

- un champion cycliste : 400 watts
- un humain sans entraînement : 200 watts

## 2.6 Rendement énergétique

Le **rendement énergétique**  $\eta$  d'une machine ou d'un processus (par exemple une combustion ou la production d'un carburant) est le pourcentage de l'énergie consommée par la machine ou le processus qui sera transformée en énergie utile :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie consommée}} = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance consommée}}$$

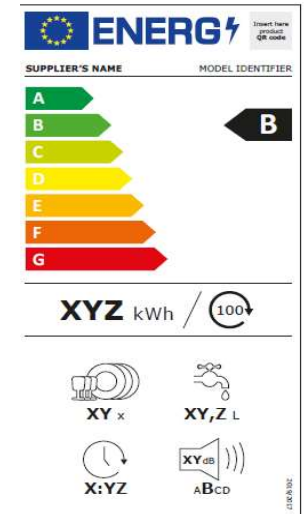
On l'exprime en %.

Mis à part les corps de chauffe (radiateurs électriques, plaques de cuisine, fers à repasser, etc.) qui ont un rendement de 100%, la plupart des systèmes consommant de l'énergie ont des « pertes » sous forme d'énergie thermique (moteurs électriques ou à carburant, ampoules électriques, appareils électroménagers etc.). Ces « pertes » peuvent être

plus ou moins importantes selon le type d'appareil. Par exemple, dans une ampoule à incandescence, on désire transformer de l'énergie électrique en énergie lumineuse. Or, seulement 5 % de l'énergie électrique est transformée en énergie lumineuse, ce qui correspond au rendement énergétique de ce type d'ampoule. Le reste de l'énergie n'a pas disparu : il est transformé en énergie thermique.

Les étiquettes posées sur les appareils électroménagers, les appareils électroniques ou autres indiquent généralement la puissance consommée et non pas la puissance utile (ou, pour les appareils qui fonctionnent en continu, tels que les frigos, elles indiquent l'énergie consommée annuellement).

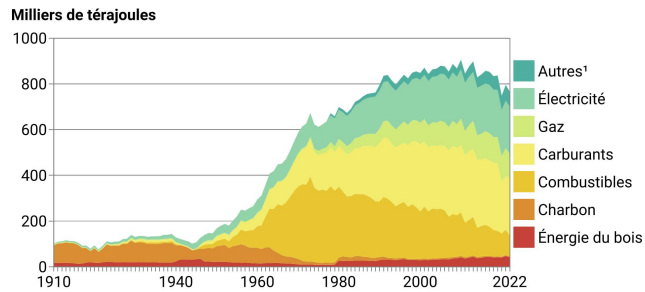
Pour connaître le rendement énergétique d'un appareil, il faudrait alors mesurer la puissance utile et faire le rapport avec la puissance mentionnée sur l'étiquette, ce que l'on ne peut pas forcément faire lors de l'achat d'un nouvel appareil. Pour aider les consommateurs dans leur choix, l'étiquette-énergie doit obligatoirement mentionner les caractéristiques de l'appareil ainsi que son efficacité énergétique. Ce chiffre, issu d'un calcul complexe, permet de classer l'appareil dans l'une des sept classes d'efficacité énergétique définie par des lettres (de A, pour le plus efficace, jusqu'à G), avec des barres de couleur allant du vert (pour la meilleure efficacité) au rouge, comme illustré ci-contre pour un lave-vaisselle.



## 2.7 Consommation d'énergie en Suisse (extrait de www.bfs.admin.ch)

Avant d'arriver au consommateur final, l'énergie extraite de la nature doit être transformée en énergie dite *finale*, c'est-à-dire prête à l'emploi, disponible au compteur et directement facturable : le litre d'essence à mettre dans sa voiture, l'électricité disponible à la prise, etc. La transformation et le transport de l'énergie ne vont pas sans pertes, qui peuvent atteindre, selon les années, jusqu'à un quart de l'énergie extraite.

### Consommation finale d'énergie selon les agents énergétiques



Source: OFEN – Statistique globale de l'énergie © OFS 2023

La consommation d'énergie est déterminée à court terme par la conjoncture et les conditions météorologiques. À plus long terme, elle dépend principalement de l'évolution démographique et économique, des progrès technologiques et des changements dans les modes de vie. Depuis 1950, la consommation finale d'énergie en Suisse a presque quintuplé, même si elle s'est stabilisée depuis le début du millénaire environ, avant de diminuer légèrement ces dernières années. En 2022, la consommation finale d'énergie était de 765 060 térajoules (1 térajoule =  $1 \text{ TJ} = 10^{12} \text{ J}$ ). La forte augmentation de la consommation d'énergie dans les années 1950 et 1960 coïncide avec l'arrivée sur le marché des produits pétroliers, qui ont peu à peu remplacé le charbon. Un sommet a été atteint au début des années 1970. Le pétrole représentait alors près de 80% de la consommation d'énergie. Depuis, l'électricité, le gaz naturel, le bois et d'autres sources d'énergie ont gagné en importance.

En 2019, environ la moitié de l'énergie consommée en Suisse était dérivée de produits pétroliers : les carburants ont représenté 35% de la demande et les combustibles pétroliers 14%. Le gaz a couvert 14% de la demande, et l'électricité "seulement" 25% du total. En Suisse, on importe donc environ 75% de l'énergie que l'on consomme, et la plupart de cette énergie est non renouvelable (énergie fossile).

## 2.8 Exercices du chapitre 2

### Exercice 1

Visionne la vidéo suivante, puis réponds aux questions :

<https://mediacast.eduvs.ch/m/2845>

1. Comment fonctionnaient les premiers thermomètres ?

2. Quel était leur principal défaut ?

3. Quelles sont les trois échelles de température introduites au XVIII<sup>ème</sup> siècle ?

### Exercice 2

Quelles sont les différences entre les agitations thermiques d'un solide, d'un liquide et d'un gaz ?

a) Réponds à la question à l'aide de la simulation suivante :

[https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter-basics/latest/states-of-matter-basics\\_fr.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter-basics/latest/states-of-matter-basics_fr.html)

b) Que se passe-t-il lorsque l'on chauffe ou refroidit un solide, un liquide ou un gaz ?

c) Quelle température a-t-on atteint lorsque les particules ne bougent plus ?

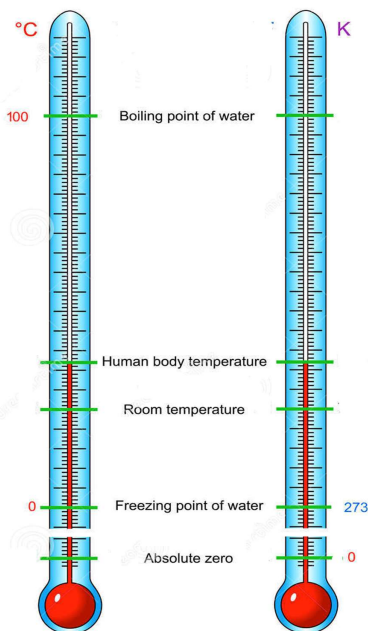
### Exercice 3

La température d'un lac à 15°C correspond à :  $15 + 273 = 288 \text{ K}$ .

L'hélium peut être liquéfié à pression ambiante sous une température de  $-269^\circ\text{C}$ , soit  $-269 + 273 = 4 \text{ K}$ .

a) En t'aidant des deux exemples ci-dessus, complète les deux échelles de température ci-contre aux 5 points particuliers donnés.

b) La température moyenne de l'Univers est de 2,7 kelvins. Transforme cette température en  $^\circ\text{C}$  :



### Exercice 4

Dans le corps des animaux, les réactions chimiques entre la nourriture et l'oxygène de l'air produisent de l'énergie : il est d'usage encore aujourd'hui de la mesurer en calories.

Quel est l'équivalent d'énergie en joules d'un petit pain au chocolat contenant 540 kcal ?

### Exercice 5

Pour élever la température de 90 ml d'eau liquide de  $2^\circ\text{C}$ , il faut fournir 754 J. Détermine la chaleur massique de l'eau liquide.

### Exercice 6

Combien de temps faut-il pour faire bouillir 5 dl d'eau initialement à  $20^\circ\text{C}$  à l'aide d'une bouilloire dont la puissance est de 800 W, en supposant

que toute la chaleur est transférée à l'eau ? La température d'ébullition de l'eau est de  $100^\circ\text{C}$  dans les conditions normales de pression. Pour la chaleur massique de l'eau, utilise le résultat de l'Exercice 5.

### Exercice 7

Hors atmosphère, on a mesuré que sur  $1 \text{ m}^2$  de surface perpendiculaire au rayonnement solaire arrivait chaque seconde une énergie de 1367 J. Ainsi, le flux solaire hors atmosphère est de  $1367 \text{ (J/s)/m}^2$ .

En réalité, le rayonnement solaire doit traverser l'atmosphère terrestre avant d'arriver au sol pour être exploité. Lors de bonnes conditions météorologiques, on obtient encore au sol un flux d'environ  $1'000 \text{ (J/s)/m}^2$ . Si l'on prend la moyenne annuelle sur toute la surface du globe, on obtient un flux moyen de  $342 \text{ (J/s)/m}^2$ .

a) La Terre a un rayon de 6'370 km. Calcule la puissance solaire moyenne arrivant sur Terre (aide : vue du Soleil, la surface de la Terre est un disque).

b) Sachant que la consommation mondiale annuelle d'énergie est de 400 EJ ( $E = \text{exa} = 10^{18}$ ), détermine avec cette puissance solaire moyenne en combien de temps le Soleil nous amène l'équivalent de cette consommation annuelle.

### Exercice 8

(<https://www.ecoco2.com/blog/compter-lenergie-et-si-on-remplacait-les-kwh-par-un-equivalent-humain/>)

Et si on remplaçait le kilowattheure par un équivalent humain ?

Dans la vidéo de l'Académie des Arts de Suède reprise ci-dessous, Robert Förstemann, un champion cycliste allemand aux cuisses impressionnantes, relève un défi pas comme les autres : il va devoir pédaler et mettre toute son énergie pour tenter d'alimenter un grille-pain et faire griller une tranche de pain. A ton avis, combien d'énergie humaine est nécessaire pour relever ce défi ?

Vérifie ta réponse en visionnant la vidéo :

<https://youtu.be/S4O5voOCaAQ>

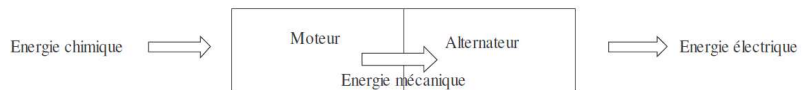
### Une nouvelle unité de mesure : la personne-heure

Nous disposons donc désormais d'un nouvel étalon (sic) de puissance, l'être humain sans entraînement particulier. Et nous pouvons traduire des gestes du quotidien dans ce nouveau système de mesure.

Par exemple, combien de temps notre personne « standard » devra-t-elle pédaler pour regarder la télévision pendant deux heures, sachant que le téléviseur en mode image consomme 63 W ? Donne la réponse en personne-heure et en personne-minute.

### Exercice 9

Un groupe électrogène est constitué d'un moteur à essence accouplé à un alternateur. Le moteur consomme 2,7 l d'essence par heure et fournit une puissance mécanique de 4,3 kW. L'alternateur fournit une puissance électrique de 3,8 kW.



- Calculer le rendement de l'alternateur.
- Si un litre d'essence contient une quantité d'énergie chimique potentielle de 11,61 kWh, calculer le rendement du moteur.
- Calculer le rendement du groupe électrogène.

### Exercice 10

Après une année d'activité, la centrale de pompage-turbinage de Nant de Drance a produit 950 GWh d'électricité et pompé 1170 GWh. Quel est son rendement ? Pourquoi la centrale est-elle quand même rentable économiquement ?

### Exercice 11

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), la demande mondiale de pétrole a atteint en juin 2023 un record de 103 millions de barils par jour. Le baril, qui est l'unité utilisée dans les milieux industriels et financiers, équivaut à environ 159 litres. 1 litre de pétrole peut fournir environ 10 kWh d'énergie.

Calcule, en térajoules, la quantité d'énergie consommée mondialement sur un seul jour de juin 2023.



### Exercice 12

Chez une personne en bonne santé et dont la corpulence est stable, la puissance moyenne sur 8 h correspond à environ 150 W. Combien de temps faudrait-il alors à une personne pour produire la même quantité

d'énergie qu'un baril de pétrole ? On suppose qu'elle travaille 42 h par semaine, 47 semaines par année.

### Exercice 13

Nous avons vu que lorsqu'on apportait de la chaleur à un système, la température de ce dernier augmentait. Cela est le cas pour autant que le système ne change pas d'état. Lorsqu'il y a un changement d'état, par exemple de l'état solide à l'état liquide, la chaleur apportée est utilisée pour casser les liaisons entre les molécules et la température ne change pas tant que tout le système ne se retrouve pas à l'état liquide. L'énergie à apporter pour le changement d'état est proportionnelle à la masse  $m$  du système :  $Q = mL_f$ , où  $L_f$  est appelée *chaleur latente de fusion* et dépend de la substance. La chaleur latente de fusion de l'eau par exemple vaut 333,55 kJ/kg (il faut apporter 333,55 kJ pour faire fondre 1 kg de glace).

En 1962, la compagnie Humble Oil (ancien nom d'Exxon) se vantait ainsi de sa production de pétrole : « Cette immensité de glace n'a pas fondu depuis des siècles. Mais aujourd'hui, si l'énergie produite par Humble Oil était convertie en chaleur, elle pourrait, chaque seconde, faire fondre 80 tonnes de ce glacier. »



- a) Quelle quantité de barils de pétrole produisait-elle par heure ?
- b) La combustion d'un litre d'essence produit approximativement 2,3 kg de CO<sub>2</sub>. Or 1 kg de CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère correspond à environ 15 kg de glace de glaciers fondue (Marzeion, B., Kaser, G., Maussion, F. et al. Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss. *Nature Clim Change* **8**, 305–308 (2018)). Si votre voiture consomme 6 l aux 100 km, quelle est la quantité de glace – glacier fondue par kilomètre ?

## 2.9 Corrigés des exercices du chapitre 2

### Exercice 1

Voir correction en classe.

### Exercice 2

Voir correction en classe.

### Exercice 3

a) La conversion des K en °C est donnée par :

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273 \quad \text{ou} \quad T(^{\circ}C) = T(K) - 273$$

Zéro absolu : 0 K et -273 °C

Température de la pièce : 293 K et 20 °C

Température du corps humain : 310 K et 37 °C

b) La température moyenne de l'Univers est de  $2,7 - 273 = -271,3^{\circ}C$  (et oui, c'est plutôt très froid !)

### Exercice 4

$$540 \text{ kcal} = 2262,6 \text{ kJ}$$

### Exercice 5

Connues :  $m = 0,09 \text{ kg}$

$$\Delta T = 2^{\circ}C$$

$$Q = 754 \text{ J}$$

On cherche :  $c$

Loi physique :  $Q = mc\Delta T$

$$\text{Calculs} : c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{754}{0,09 \cdot 2} = 4190 \text{ J/(kg} \cdot ^{\circ}C)$$

### Exercice 6

Connues :  $m = 0,5 \text{ kg}$

$$\Delta T = 100 - 20 = 80^{\circ}C$$

$$P_{\text{therm}} = 800 \text{ W}$$

On cherche :  $\Delta t$

Loi physique :  $P_{\text{therm}} = \frac{mc\Delta T}{\Delta t}$

$$\text{Calculs} : \Delta t = \frac{mc\Delta T}{P_{\text{therm}}} = \frac{0,5 \cdot 4190 \cdot 80}{800} = 209,5 \text{ s} = 3 \text{ min } 30 \text{ s}$$

### Exercice 7

$$a) S = 4\pi R^2 = 5,08 \cdot 10^{16} \text{ m}^2$$

$$P = F \cdot S = 342 \cdot 5,08 \cdot 10^{16} = 1,7 \cdot 10^{17} \text{ J/s}$$

$$b) P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta t = \frac{\Delta E}{P} = 2352 \text{ s}$$

### Exercice 8

$$\Delta t = \frac{63 \cdot 2}{200} = 0,63 \text{ personne-heure} = 37,8 \text{ personne-minutes}$$

### Exercice 9

$$a) \eta = \frac{P_{\text{él}}}{P_{\text{méc}}} = \frac{3,8}{4,3} = 88\%$$

$$b) \eta = \frac{E_{\text{méc}}}{E_{\text{chim}}} = \frac{P_{\text{méc}} \cdot \Delta t}{\text{nombre de litres} \cdot \text{énergie fournie par litre}} = \frac{4,3 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h}}{2,7 \cdot 11,61 \text{ kWh}} = 13,7 \%$$

$$c) \eta = \frac{E_{\text{él}}}{E_{\text{chim}}} = \frac{P_{\text{él}} \cdot \Delta t}{\text{nombre de litres} \cdot \text{énergie fournie par litre}} = \frac{3,8 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h}}{2,7 \cdot 11,61 \text{ kWh}} = 12 \%$$

### Exercice 10

$$\eta = \frac{E_{\text{él}}}{E_{\text{méc}}} = \frac{950 \text{ GWh}}{1170 \text{ GWh}} = 81 \%$$

La centrale est rentable car on pompe lorsque la demande en électricité est faible (p.ex. la nuit) et le prix du kWh est bas, alors que l'on turbine lorsque le prix du kWh est élevé.

### Exercice 11

$$E = 103 \cdot 10^6 \left( \frac{\text{barils}}{j} \right) \cdot 159 \text{ (l)} \cdot 10 \text{ (kWh)} = 1,64 \cdot 10^{11} \left( \frac{\text{kWh}}{j} \right) = 5,9 \cdot 10^{17} \left( \frac{J}{j} \right) \\ = 590'000 \left( \frac{TJ}{j} \right)$$

### Exercice 12

Connues :  $P_h = 150 \text{ W}$ , 1 baril = 159 l, 1 litre fournit 10 kWh

$$E_{\text{baril}} = 159 \text{ (l)} \cdot 10 \left( \frac{\text{kWh}}{\text{l}} \right) = 1590 \text{ kWh}$$

$$E_h = P_h \cdot \Delta t \Leftrightarrow \Delta t = \frac{E_h}{P_h} = \frac{1590000 \text{ (Wh)}}{150 \text{ (W)}} = 10'600 \text{ h} = 5 \text{ ans } 17 \text{ semaines et } 2 \text{ jours}$$

### Exercice 13

$$a) Q = mL_f = 80'000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \cdot 3600 \text{ (s)} \cdot 333'550 \left( \frac{J}{\text{kg}} \right) = 9,6 \cdot 10^{13} \text{ (J)} = 26,7 \cdot 10^6 \text{ (kWh)}$$

Or 1 baril fournit environ 159 litres  $\cdot$  10 kWh = 1590 kWh.

Donc Humble Oil produisait, chaque heure,  $\frac{26,7 \cdot 10^6}{1590} = 16'800$  barils environ.

b) 6 litres/100 km correspondent à 13,8 kg CO<sub>2</sub>/100 km et donc à 207 kg glace fondue/100 km.

On a donc environ 2 kg de glace-glacier fondue par km.

## 3 - Le changement climatique

### 3.1 Source d'énergie : le rayonnement électromagnétique

#### 3.1.1 Lumière et ondes électromagnétiques

L'année dernière, en optique, nous avons utilisé le modèle des rayons lumineux pour décrire le chemin de la lumière, sans nous intéresser à la nature de cette dernière. Nous allons voir qu'en réalité, la lumière est une onde électromagnétique (EM).

##### 3.1.1.1 Qu'est-ce qu'une onde ?

Nous avons tous déjà vu des ondes qui se propagent en cercles de plus en plus larges lorsque l'on jette une pierre dans un lac. Le mouvement de l'onde est très différent de celui des particules d'eau : les particules se relèvent et s'abaissent, alors que l'onde s'éloigne du centre. Un bouchon de liège le montre très clairement, car il se relève et s'abaisse en suivant le mouvement réel de l'eau, au lieu d'être emporté par l'onde. C'est la même chose lorsque l'on fait la ola dans un stade : vue de loin, la ola se déplace dans les gradins. Mais de près, on constate qu'aucune matière ne suit ce mouvement : les spectateurs restent à leur place. La seule chose qui se déplace, c'est « l'endroit où les gens sont debout ».

Une onde peut être caractérisée par deux concepts physiques :

- la longueur d'onde, définie comme la distance qui sépare le creux d'une onde du creux de l'onde suivante, ou la crête d'une onde de la crête de l'onde suivante (voir schéma ci-dessous). Elle est notée  $\lambda$  (lambda) et son unité est le mètre.

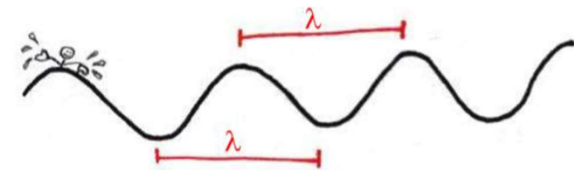


Figure 14: longueur d'onde

- la vitesse de propagation (ou célérité) de l'onde, notée  $c$  pour une onde EM. La vitesse de propagation d'une onde varie en fonction du milieu dans lequel elle se propage et de sa longueur d'onde.

### 3.1.1.2 La lumière : une onde électromagnétique

#### Milieu de propagation

Contrairement aux ondes mécaniques, qui ont besoin d'un milieu pour se déplacer (ex : l'eau pour l'onde sur la surface du lac, les gens pour la ola), la lumière se propage aussi dans le vide ! L'analogie des vagues à la surface de l'eau correspond pour la lumière à des « vagues » dans le champ électromagnétique. C'est pourquoi on dit que la lumière est une onde électromagnétique (EM). La notion de champ électromagnétique dépasse le cadre de ce cours, mais pour les curieux, voici une vidéo qui présente la notion de champ électromagnétique :

[https://youtu.be/\\_xcmDVGQnsE](https://youtu.be/_xcmDVGQnsE).

Les ondes lumineuses se propagent à la vitesse de la lumière, c'est-à-dire environ  $3 \cdot 10^8$  m/s (dans le vide et dans l'air).

#### Longueur d'onde

La longueur d'onde d'une onde EM détermine le type d'onde. Les longueurs d'onde de la lumière visible (que nos yeux peuvent percevoir) sont comprises entre 380 nm pour le violet et 780 nm pour le rouge (voir figure ci-dessous).

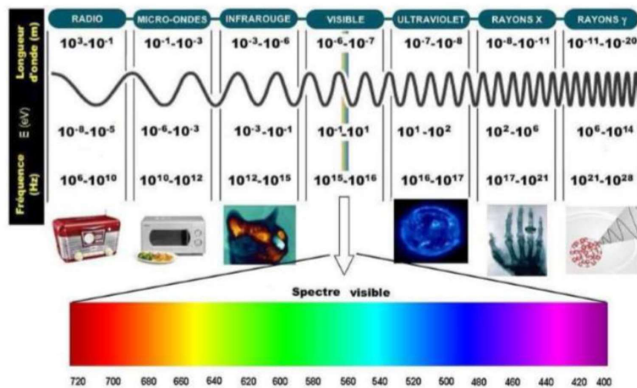


Figure 15 : spectre des ondes EM

Comme on le voit sur la figure ci-dessus, la lumière visible par les yeux humains représente néanmoins une toute petite partie du spectre des ondes EM. Lorsque la longueur d'onde dépasse les 780 nm, on passe dans le régime des infrarouges (IR), puis des micro-ondes et enfin des ondes radio. Au contraire, si la longueur d'onde devient plus petite que 380 nm, on passe dans le régime des ultraviolets (UV), des rayons X et enfin des rayons gamma. Ainsi, les ondes wifi, TV, radio, téléphoniques, la lumière visible ou encore les rayons X du radiologue sont toutes de même nature : il s'agit d'ondes EM, à différentes longueurs d'onde.

On notera que plus la longueur d'onde est petite, plus la quantité d'énergie transportée par l'onde est importante. Ceci explique que les ondes de votre poste radio ne sont pas nocives pour l'être humain, mais que de fortes doses de rayons UV ou de rayons X sont dangereuses pour la santé.

### 3.1.2 Charge électrique soumise à une onde EM

Lorsqu'une particule chargée est soumise à une onde EM, elle subit une force électrique, telle qu'illustrée dans le schéma ci-dessous.

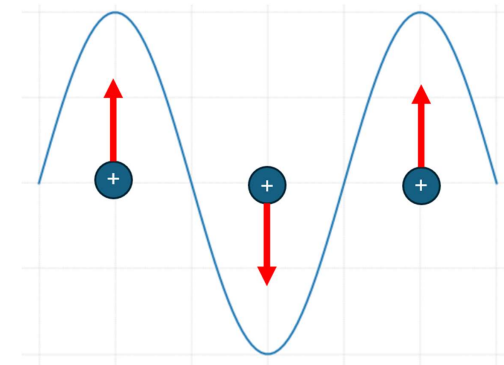


Figure 16 : force électrique exercée par une onde EM sur une charge positive

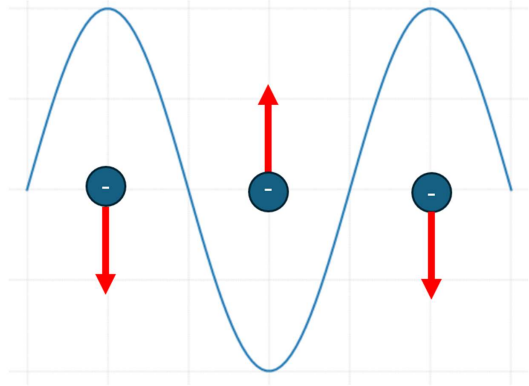


Figure 17 : force électrique exercée par une onde EM sur une charge négative

Lors du passage de l'onde, la charge subit donc alternativement une force vers le haut puis vers le bas : elle va donc osciller de haut en bas. Comme illustré sur le schéma, selon le signe de la charge (positif ou négatif), l'oscillation de la particule chargée est identique ou en opposition avec l'oscillation de l'onde.

L'origine de cette force vient de la nature de l'onde EM. Rappelez-vous que nous avons dit plus haut qu'une onde EM est une « vague » dans le champ électromagnétique. Lors du passage d'une onde EM, il y a donc un champ électrique qui oscille entre une valeur positive et une valeur négative. Ce champ induit donc une force électrique sur une particule chargée, tantôt dans un sens tantôt dans l'autre.

### 3.1.3 Rayonnement du corps noir

Lorsqu'un corps est à une température supérieure au zéro absolu, il contient de l'énergie thermique. Les atomes qui constituent ce corps vibrent donc (cf cours sur la température). De même qu'une charge soumise à une onde EM se met à osciller, une charge qui oscille émet des ondes EM. Ainsi, un corps qui contient de l'énergie thermique va rayonner cette énergie, sous forme de rayonnement EM. Ce rayonnement est appelé « rayonnement corps noir ». Ce rayonnement

ne dépend pas du type de matière dont est composé le corps<sup>1</sup>, mais il a deux caractéristiques, qui dépendent uniquement de la température :

- Le rayonnement est émis dans une gamme de longueur d'onde autour d'une valeur  $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$ , où  $T$  est la température du corps et  $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$  est la constante de Wien.
- Le flux rayonné (c'est à dire, l'énergie émise par seconde par  $\text{m}^2$  qui se mesure en  $\text{J/s/m}^2$ ) vaut  $F = \sigma \cdot T^4$ , où  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J/s} \cdot \text{m}^2/\text{K}^4$  est la constante de Boltzmann et  $T$  la température du corps.

On représente généralement les caractéristiques du rayonnement corps noir d'un corps donné par une courbe telle que celles représentées ci-dessous.

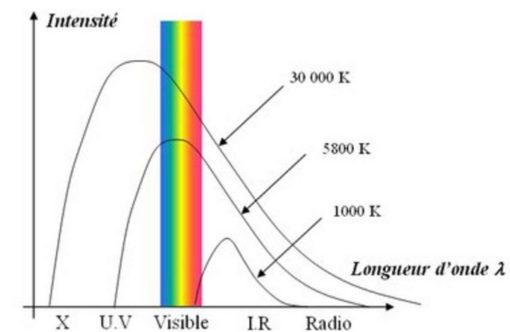


Figure 18 : intensité du flux du rayonnement corps noir en fonction de la longueur d'onde pour 3 astres différents.

Sur le graphique, on voit trois courbes qui correspondent à l'intensité du flux émis par 3 corps à 3 températures différentes.

<sup>1</sup> En réalité, la quantité de rayonnement thermique émis par un corps (la Terre par exemple) dépend également des caractéristiques de sa surface (couleur, texture, superficie exposée, etc.). Un matériau noir par exemple, rayonnera beaucoup d'énergie, contrairement à un métal poli (20 à 30 fois moins). Cependant, la dépendance à la température est tellement importante (puissance émise proportionnelle à  $T^4$  !) qu'en première approximation, on peut dire que la puissance rayonnée ne dépend que de la température du corps.

- 30 000 K : température typique de surface d'une étoile bleue (exemple : Omicron Scorpï dans la constellation du scorpion)
- 5800 K : température moyenne de surface du Soleil
- 1000 K : environ la température de surface moyenne de Vénus (en réalité c'est plutôt autour de 700 K)

Pour chacun de ces trois corps, la courbe représente l'intensité du rayonnement pour chaque longueur d'onde. Ainsi  $\lambda_{max}$ , introduite précédemment, correspond au sommet de la courbe. On voit donc que le Soleil rayonne dans les UV, le visible et les IR, avec une intensité maximale dans le visible. Les corps plus froids, comme par exemple Venus ou la Terre, rayonnent principalement dans les IR.

## 3.2 Les gaz à effets de serre et leurs effets

### 3.2.1 Introduction

La Terre est chauffée par le Soleil. Le Soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible (voir Figure 19). Ce rayonnement transporte l'énergie solaire, indispensable à toute vie terrestre.

On constate sur la Figure 19 que toute l'énergie émise par le Soleil et qui arrive sur la Terre (courbe jaune) ne parvient pas à la surface de la Terre (courbe rouge). En effet, une partie du rayonnement est réfléchi par l'atmosphère et les nuages (26%), tandis qu'une autre partie (19%) est absorbée par les molécules à effet de serre (comme les molécules d'O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ou CO<sub>2</sub>). Néanmoins une majeure partie du rayonnement solaire (55 %) arrive sur la surface de la Terre.

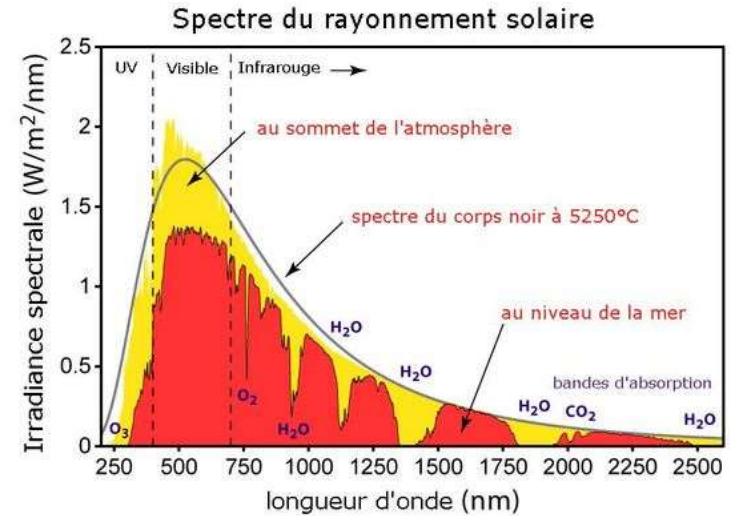


Figure 19: spectre de rayonnement, tiré de <https://www.irl-france.fr/>

Comment se fait-il que l'atmosphère terrestre laisse passer le rayonnement solaire ?

Le rayonnement qui arrive sur Terre se trouve principalement dans **le spectre du visible** (longueurs d'onde comprises entre 400 à 750 nm). Or **ce rayonnement n'est pas absorbé** par les molécules constituant l'atmosphère, en particulier par les gaz à effet de serre, tels que le CO<sub>2</sub>, le H<sub>2</sub>O ou le méthane CH<sub>4</sub>.

Ce n'est pas le cas du rayonnement émis par la Terre. Celui-ci est principalement situé dans **l'infrarouge** (longueur d'onde supérieure à 800 nm) (Figure 20). Comme on le verra dans les exercices ci-dessous, **ce rayonnement est absorbé par les gaz à effet de serre de l'atmosphère**.

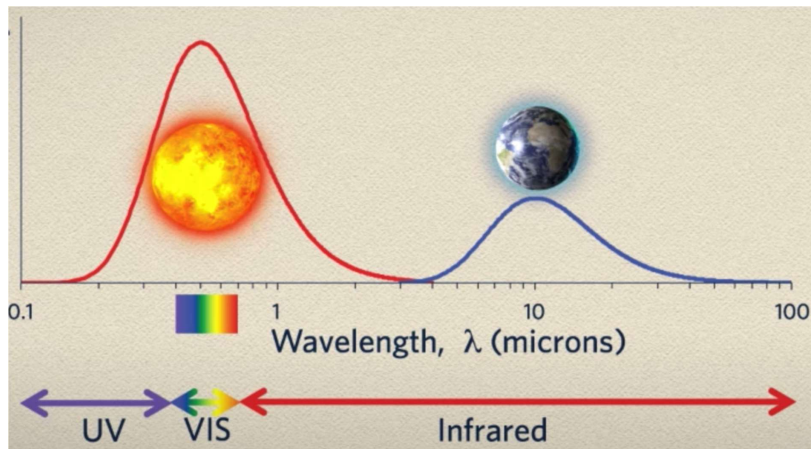


Figure 20: rayonnement émis par la Terre et le Soleil, Source : NASA et chaîne YouTube Climate Literacy

### 3.2.2 Gaz à effet de serre

Pour quelle raison l'absorption dépend-elle de la longueur d'onde ? C'est ce que nous allons comprendre grâce à diverses simulations.

L'atmosphère de la Terre est essentiellement constituée de molécules d'Azote ( $N_2$ ), d'Oxygène ( $O_2$ ), d'Argon et d'une faible minorité de gaz à effet de serre (Figure 21). Explorons comment ces différentes molécules vont interagir avec le rayonnement grâce à la simulation ci-dessous.

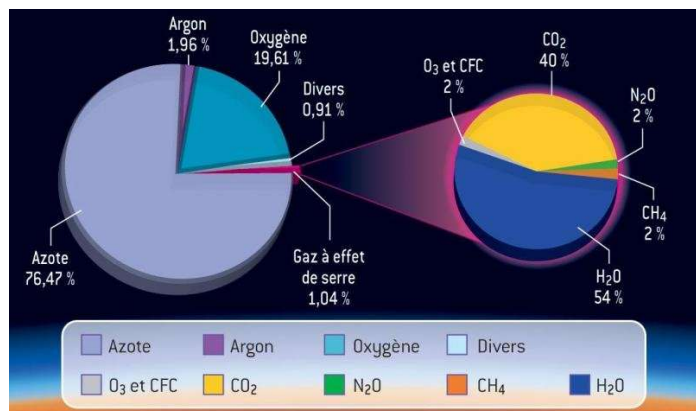


Figure 21: composition de l'atmosphère terrestre.

### Simulation absorption atmosphère terrestre, partie 1 :

Ouvrir la simulation suivante : [Graasp Player](#) (absorption et réémission).

Effectuer les étapes suivantes :

- Cliquer sur une molécule de **Diazote (Autres Gaz en bas à droite)**, puis cliquer sur les **deux cases circulaires** de gauche pour l'insérer deux fois.
- Insérer de même une molécule de **Dioxygène** dans une seule case, puis une molécule d'**Argon** dans la dernière case.
- Puis activer **Lumière visible (En haut de la barre de droite)** et cliquer sur **Play** pour visualiser le rayonnement visible provenant du Soleil (longueur d'onde courte).
- Ensuite, activer **Infrarouge** pour visualiser le rayonnement émis par la surface de la Terre (longueur d'onde longue).

En conclusion :

Pour quelle raison ?

Le rayonnement électromagnétique n'interagit pas avec des molécules biatomiques, car ces dernières n'ont pas de charges apparentes. Ce n'est par exemple pas le cas pour une molécule d'eau  $H_2O$ . Celle-ci peut être représentée électriquement par deux charges électriques égales mais de signes opposés, qui sont situées à faible distance l'une de l'autre. On appelle cet agencement de charges un **dipôle**. Dans les molécules biatomiques, comme l' $O_2$ , le positionnement des charges de signes opposées se superposent et il n'y a pas de dipôle. Pour que la molécule soit excitée et entre en vibration, il doit y avoir une interaction avec l'onde électromagnétique. Or ceci ne se produit que quand l'onde électromagnétique fait vibrer le dipôle.

On dit que l'atmosphère est transparente pour les gaz biatomiques ( $O_2$ ,  $N_2$ ). Si l'atmosphère était seulement composée de ces molécules, elle serait totalement transparente. C'est comme si elle n'était simplement pas là. La surface de la Terre aurait alors la même température en moyenne que la Lune,  $-18^\circ C$  !

## Simulation absorption atmosphère terrestre, partie 2 :

Utilisez la même simulation que précédemment : [Graasp Player](#) (absorption et réémission)

- Dans la section **Gaz à effet de serre** : choisir une molécule de **Méthane** et l'insérer dans la case circulaire la plus à gauche.
- Placer à côté une molécule de **Dioxyde de carbone**, puis une molécule d'**Eau** et une molécule de **Protoxyde d'azote**.
- Activer **Lumière visible** et cliquer sur **Play** (longueur d'onde courte). Que constate-t-on ?
- Ensuite, activer **Infrarouge** (longueur d'onde longue). Que constate-t-on ?

Visiblement, les gaz à effet de serre laissent passer le rayonnement provenant du Soleil, mais pas celui provenant de la Terre. Pour quelle raison ces dipôles absorbent-ils uniquement un rayonnement situé dans l'IR (infrarouge) ? Afin de répondre à cette question, visionnez la vidéo suivante (en anglais) :

[Dancing molecules \(How greenhouse gases work\) \(youtube.com\)](#)

Résumer ci-dessous les faits principaux de la vidéo

En conclusion :

## 3.3 Bilan énergétique de la Terre

Afin de déterminer la température à la surface de la Terre, un bilan énergétique doit être effectué. Déterminons pour cela ce qui se passe une fois que le rayonnement solaire a traversé l'atmosphère. Regardons ensuite ce qui est émis par la Terre et absorbé par les gaz à effet de serre. Une fois ces grandeurs connues, nous pourrions déterminer la température à la surface de la Terre.

### 3.3.1 Réflexion et absorption du rayonnement solaire

Une fois arrivé sur Terre, le rayonnement est en partie absorbé par la Terre et en partie réfléchi, en fonction du type de surface rencontrée.

Expérimentalement on constate qu'une surface blanche réfléchit plus de rayonnement qu'une surface noire. Pour s'en convaincre il suffit de se mettre au Soleil avec un T-shirt blanc et un T-shirt noir et on constate que le T-shirt noir chauffe beaucoup plus rapidement. Ainsi, les surfaces de la Terre qui sont couvertes de neige ou de glace réfléchiront davantage d'énergie que les déserts de sable ou de rocher, qui eux se réchaufferont davantage.



Figure 22: un pull noir se réchauffera beaucoup plus rapidement au Soleil qu'un pull blanc

On définit l'**albédo** comme étant la fraction de la lumière qui est réfléchie ou diffusée par un corps. Ainsi, l'albédo moyen de la surface terrestre est d'environ 8%. La fonte de la banquise ou les variations d'occupation des sols (ex : déforestation), entraînent une diminution de

cet albédo, autrement dit, une diminution de la capacité de la Terre à renvoyer directement le rayonnement solaire dans l'espace.

Si l'on se réfère à la Figure 23, on constate que 19% du rayonnement est absorbé par les vapeurs d'eau et les nuages (en effet, le rayonnement provenant du Soleil ne se fait pas uniquement dans le visible, mais également en partie dans l'IR). Il y a 26% du rayonnement initial qui est réfléchi par l'atmosphère et les nuages. Finalement il reste 55% du rayonnement initial qui arrive à la surface de la Terre. 8% de ce rayonnement est alors réfléchi par le sol, ce qui correspond à 4% du rayonnement solaire initial.

Si l'on tient compte de la réflexion par l'air (6%), les nuages (20 %) et le sol (4%), l'albédo **total** terrestre vaut 30% (Figure 23).

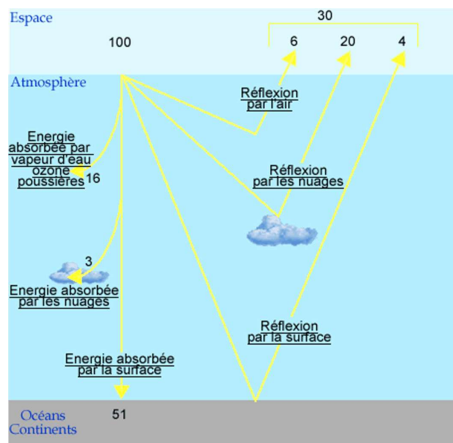


Figure 23: absorption et réflexion du rayonnement solaire, source <https://planet-terre.ens-lyon.fr/>

### 3.3.2 Le rayonnement de la Terre

Comme présenté au chapitre 3, tout corps ayant une certaine température émet un rayonnement à cause de l'oscillation continue et désordonnée des atomes qui le constituent. Ce rayonnement thermique est caractérisé par une gamme de fréquence continue et large (voir Figure 15). Ainsi, par exemple (Figure 24), le corps humain émet en permanence des ondes infrarouges invisibles (que l'on peut observer grâce à une caméra IR).



Figure 24: image infrarouge, tiré de <https://www.maxisciences.com/>

Afin de visualiser ce rayonnement terrestre, utilisez la simulation « rayonnement thermique » : [Graasp Player](#)

La simulation « rayonnement thermique » montre la surface de la Terre.

- Cliquer sur **vue Microscopique** pour voir cette surface d'un point de vue microscopique, comme un arrangement régulier d'atomes.
- Désactiver **Electrons** pour ne montrer que les noyaux positifs des atomes.
- Cliquer sur **Play** pour observer l'agitation thermique des atomes de la surface de la Terre. Cette agitation est due au fait que la surface de la Terre a une certaine *température*.
- Pour comprendre ce que mesure la température, augmenter la température avec le curseur sur le **thermomètre**.
- Ramener la température à **15°C**, (température moyenne de la Terre).
- Puisque les noyaux d'atomes (charges positives) sont tous en train de vibrer, que devraient-ils produire dans l'espace au-dessus d'eux ?
- Tester votre prédiction en cliquant sur **Rayonnement**.
- Afficher la **Grille**, dont les carrés font 1000 nm de côté. Puis cliquer sur Pause.

- Quelle est la longueur d'onde (moyenne) du rayonnement émis par la surface de la Terre ?

En réalité, à une température donnée, tous les atomes ne vibrent pas à la même fréquence, mais à des fréquences plus ou moins élevées autour d'une moyenne. La simulation n'illustre que cette fréquence moyenne et la longueur d'onde moyenne émise. Afin de voir l'ensemble des longueurs d'ondes émises :

- Désactiver **Electrons**, Cliquer sur **Play** et **Rayonnement**. Puis afficher **Distribution des longueurs d'onde** pour visualiser l'ensemble des longueurs d'ondes émises par la surface de la Terre.
- Varier la température pour observer comment la distribution de longueurs d'onde varie.

On appelle "rayonnement thermique" les ondes électromagnétiques émises par la vibration des atomes d'un corps à une certaine température. Contrairement aux transitions électroniques entre deux niveaux dans un atome, qui émettent du rayonnement de longueur d'onde bien déterminée, le rayonnement thermique correspond toujours à une distribution de longueurs d'onde.

### 3.3.3 Equilibre thermique

Toute matière (par exemple un nuage ou du gaz) à une **température constante** est en équilibre thermique. Elle absorbe autant d'énergie qu'elle en émet.

Un objet exposé au rayonnement d'une source de température plus élevée et isolé voit sa température augmenter ainsi que l'énergie qu'il émet, jusqu'à ce qu'il atteigne une nouvelle température d'équilibre, où l'énergie du rayonnement qu'il émet est égale à celle du rayonnement qu'il absorbe.

Si vous placez votre tasse de thé dans le vide spatial, elle émettrait de l'énergie jusqu'à ce que sa température soit très proche du zéro absolu (qui est la température dans le vide spatial).

Dans ce qui suit, nous supposerons la Terre en équilibre thermique. Il s'en suit qu'il y a autant d'énergie qui arrive sur la Terre que d'énergie qui repart dans l'espace.

Complétons maintenant la Figure 23 avec la quantité d'énergie émise par la Terre. Nous avons déjà vu comment l'énergie provenant du Soleil était répartie. Il y a 30% du rayonnement solaire qui arrive sur la Terre qui est réfléchi (soit par la Terre et l'atmosphère (10%), soit par les nuages (20%)), 19% qui est absorbé par les nuages et les vapeurs d'eau, et le reste, c'est-à-dire 51% qui est absorbé par la surface terrestre.

Intéressons-nous maintenant à l'énergie émise par la Terre. La Terre (qui est en équilibre thermique) est à une certaine température  $T$ . A cette température, la Terre émet un certain flux : c'est le rayonnement terrestre. Sur le schéma de la Figure 25, il correspond à  $391 \text{ J/(s m}^2\text{)}$ .

Ce rayonnement va être partiellement absorbé par les gaz à effet de serre. Les gaz à effet de serre ayant eux-mêmes une certaine température, ils vont émettre du rayonnement IR, dont une partie retourne sur Terre ( $151 \text{ J/(s m}^2\text{)}$  flux GES<sup>2</sup>). Le flux sortant de l'atmosphère ( $240 \text{ J/(s m}^2\text{)}$ , flux atmosphère) se compose du rayonnement terrestre non absorbé par les GES ainsi que du rayon IR émis par les GES en direction de l'espace.

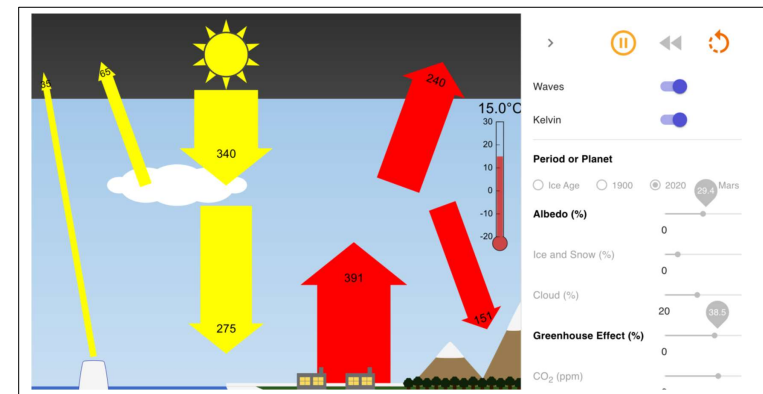
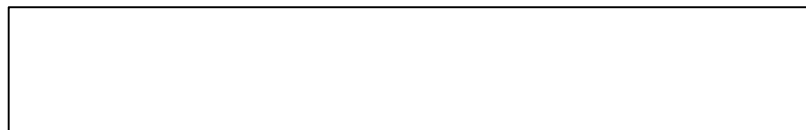


Figure 25 : flux terrestre

En conclusion, un système est en équilibre si :

<sup>2</sup> GES : Gaz à Effet de Serre.



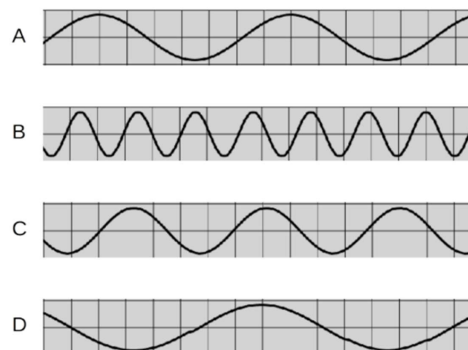
### 3.3.4 Rétroactions

On peut améliorer le modèle en incluant les rétroactions. Le changement climatique conduit à une augmentation des températures sur Terre. La quantité de vapeur d'eau que peut absorber l'atmosphère dépend de la température, ainsi cette quantité augmente également. La vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre, la température de la Terre augmente encore plus fortement. Il s'agit d'une rétroaction positive.

## 3.4 Exercices du chapitre 3

### Exercice 1

Voici quatre ondes EM :



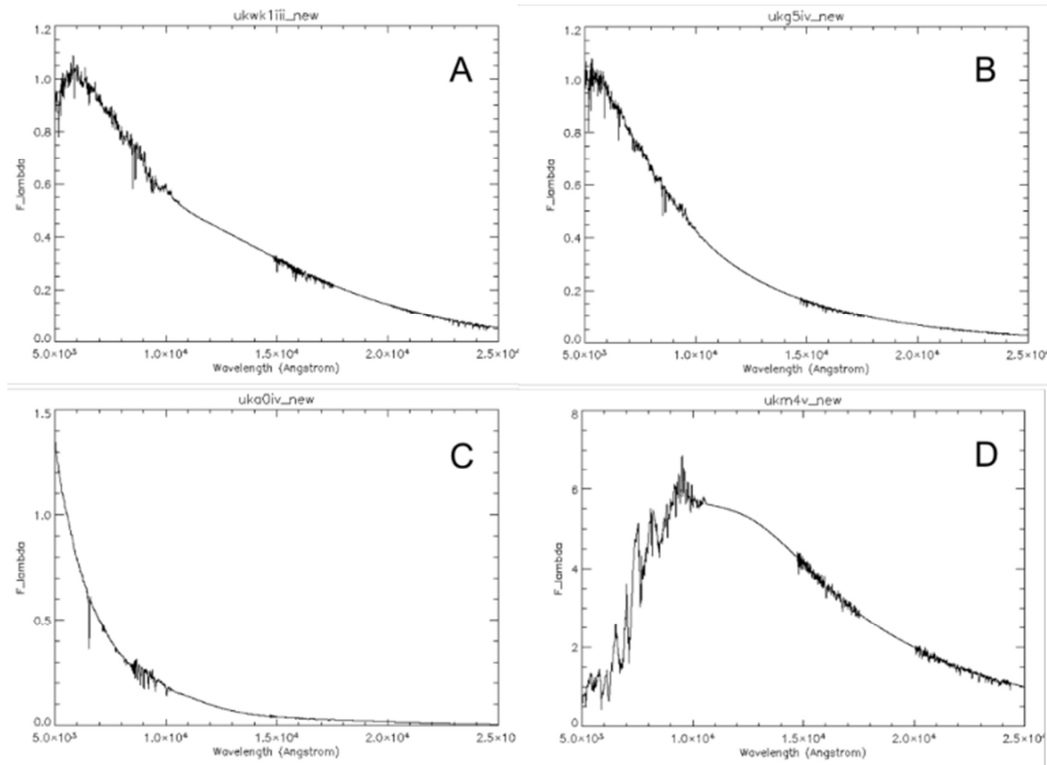
- Mesurer approximativement la longueur d'onde de chacune de ces ondes en utilisant le quadrillage, avec l'échelle 1 carreau = 100 nm.
- En vous aidant du schéma de la page précédente, classer ces ondes dans la gamme de spectre correspondant : infrarouge (IR), visible (VIS) ou ultraviolet (UV).

### Exercice 2

Voici ci-après les distributions du flux rayonné en fonction de la longueur d'onde de quatre étoiles différentes (Ivanov et al, 2004).

- Pour chaque étoile, marquer d'un trait vertical la position de  $\lambda_{max}$ .
- Lire graphiquement la valeur de  $\lambda_{max}$  (1 nm = 10 Angström) pour chaque courbe.
- A partir de  $\lambda_{max}$ , calculer la température de surface de chacune de ces 4 étoiles.

d) A partir de la température de surface, calculer le flux total (puissance par unité de surface) rayonné par chaque étoile.



#### Exercice 4

Le flux solaire (=quantité d'énergie par seconde reçue par  $m^2$ ) est de  $340 J/s/m^2$ . En vous référant aux pourcentages de la Figure 23, vérifiez si les valeurs indiquées sur la Figure 26 (GIEC) sont correctes (ordre de grandeur).

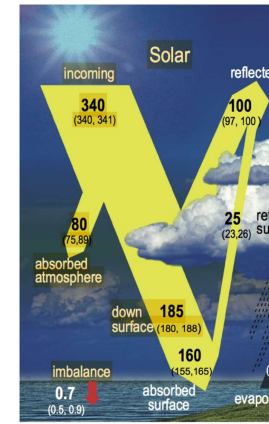


Figure 26: bilan énergétique, source : <https://scnat.ch/fr>

Flux réfléchi :

Flux absorbé par l'atmosphère :

Flux absorbé par la surface de la Terre :

#### Exercice 3

a) À partir de la température moyenne de la surface du Soleil (5800 K) déterminer la longueur d'onde émise par le Soleil. Est-ce que cela coïncide avec la valeur maximale sur le schéma B ci-dessus ?

b) À partir de la température de surface de la Terre (288 K) déterminer la longueur d'onde émise par la Terre. Est-ce que cela coïncide avec la valeur maximale sur le schéma ci-dessus ?

### Exercice 5

Dans le modèle simplifié ci-dessous (Figure 27), on suppose qu'il n'y a pas d'énergie absorbée par l'atmosphère. L'albédo vaut 29.4%. Attribuer une valeur aux flux manquants (dans les cases blanches).

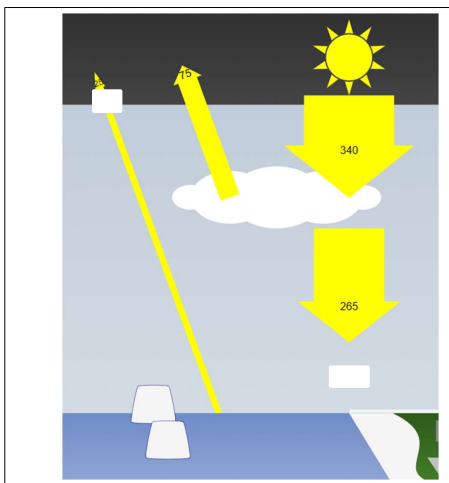


Figure 27 Flux solaire

### Exercice 6

- Dans la Figure 28, compléter les noms manquants.

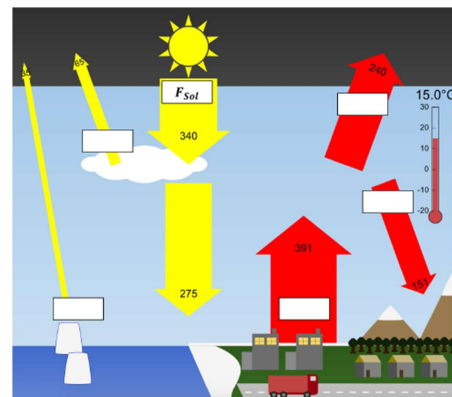


Figure 28: différents flux terrestres

- Déterminez le rayonnement entrant dans le système « **Terre** ».  
Flux entrant =
- Déterminez le flux sortant dans le système « Terre ».  
Flux sortant =
- Le système est-il en équilibre thermique ?
- Refaire le même exercice, mais prendre le système « **Terre-atmosphère** ».

Flux entrant =

Flux sortant =

## Exercice 7

A partir de la situation ci-dessous, établir le bilan énergétique pour déterminer si la planète se trouve à l'équilibre thermique ou non.

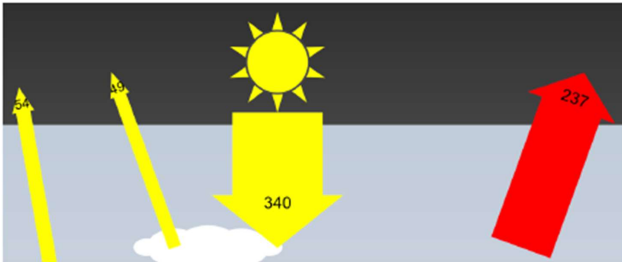


Figure 29: Equilibre thermique ?

## Exercice 8

a) A partir de la situation ci-dessous, établir le bilan énergétique pour déterminer si la température de la planète va augmenter ou diminuer.

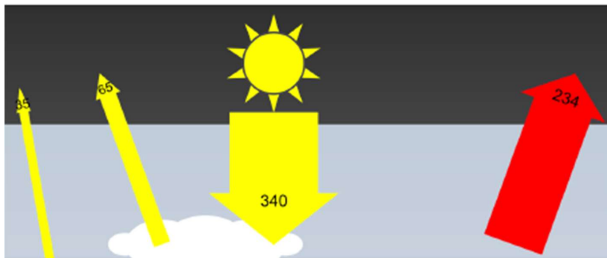


Figure 30: température en augmentation ou en diminution ?

b) Déterminer la valeur du flux IR qui doit s'échapper de l'atmosphère pour que la température se stabilise à nouveau.

c) Dans quel état se trouvera alors la planète ?

## Exercice 9

A partir des valeurs de flux actuelles publiées par le GIEC, établir le bilan énergétique pour confirmer que la température moyenne est en augmentation.

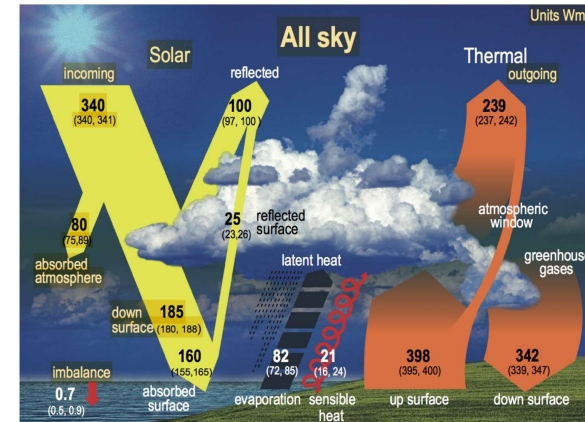


Figure 31: flux actuels publiés par le GIEC

## Exercice 10

Ouvrir la simulation [Graasp Player](#) (bilan énergétique).

Cette simulation permet d'effectuer un bilan énergétique de la Terre.

- Cliquer sur **flux [W/m²]** ainsi que sur **Celsius**.
- Vérifier que vous êtes bien en 1850.
- Cliquer sur **Play** pour observer le bilan énergétique. Vérifiez que l'on est bien en équilibre thermique. Quelle température d'équilibre a-t-on ?

T<sub>équilibre</sub> (1850) =

- Modifier l'année et mettre 2020.
- Les cases rouges se mettent à clignoter, car il n'y a plus d'équilibre thermique. La différence entre le flux entrant et le flux sortant est de  $1 \text{ W/m}^2$  (on parle de **forçage radiatif**). La Terre va se réchauffer.
- Cliquer sur **Play**. Le rayonnement IR de la Terre va augmenter afin d'avoir à nouveau un équilibre thermique. Comme le rayonnement IR augmente, la température de la Terre également. On obtient un nouvel équilibre thermique. Que vaut-il ?

$T_{\text{équilibre}} (2020) =$

- Quelle température d'équilibre obtient-on sur Terre si l'on suppose que la concentration de  $\text{CO}_2$  vaut 500 ppm (contre 442 ppm en 2020) (projection pour 2050) et que la concentration de méthane vaut 2 ppm, contre 1.9 ppm en 2020). On néglige les effets rétroactifs.

$T_{\text{équilibre}} (2050) =$

- Quelle température d'équilibre a-t-on sur Vénus, où la concentration de  $\text{CO}_2$  vaut 945'000 ppm ?

$T_{\text{équilibre}} (\text{Vénus}) =$

## Exercice 11

- Revenez sur Terre et simuler la température en 2050 (500 ppm de  $\text{CO}_2$  et 2 ppm de méthane).
- **Cliquer** sur le bouton « vapeur d'eau ». Que vaut la nouvelle température d'équilibre en 2050 en tenant compte de cet effet :

$T_{\text{équilibre}} (2050, \text{vapeur d'eau}) =$

**Remarque :** Si le déséquilibre radiatif est trop important avant d'activer une rétroaction, il est possible que la température ne converge plus vers un équilibre. Dans le cas de l'effet de serre, on parle d'"emballement de l'effet de serre".

Une autre rétroaction concerne la diminution de l'albédo, due à la diminution des surfaces des calottes glaciaires, des glaciers, ainsi que des surfaces recouvertes de neige. Il s'agit d'une rétroaction positive.

Remarque : il existe des rétroactions négatives (qui tendent à diminuer la température) comme la formation de nuage. En effet l'augmentation de nuage réfléchit davantage de rayonnement solaire.

## Exercice 12

- Simuler à nouveau une atmosphère de 2050 (500 ppm de  $\text{CO}_2$  et 2 ppm de méthane).
- **Cliquer** sur le bouton « vapeur d'eau » afin de supprimer cet effet.
- **Cliquer** sur le bouton « Glace et neige ». Que vaut la nouvelle température d'équilibre en 2050 en tenant compte de cet effet :

T<sub>équilibre</sub> (2050, glace et neige) =

- Réinitialiser la simulation, puis recréer une atmosphère en 2050.
- **Placer** le curseur « **nuage** » à 50 %. Que vaut la nouvelle température d'équilibre en 2050 en tenant compte de cet effet :

T<sub>équilibre</sub> (2050, nuage 50%) =

### Exercice 13

Pour quelle(s) raison(s) la température moyenne durant l'âge de glace n'était-elle que de 9°C ?

## 3.5 Corrigés des exercices du chapitre 3

### Exercice 1

- a)  $\lambda_A = 700 \text{ nm}$ ,  $\lambda_B = 200 \text{ nm}$ ,  $\lambda_C = 500 \text{ nm}$ ,  $\lambda_D = 900 \text{ nm}$   
b) A = VIS, B = UV, C = VIS, D = IR

### Exercice 2

- b)  $\lambda_{\max}(A) = 600 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\max}(B) = 500 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\max}(C) < 500 \text{ nm}$ ,  
 $\lambda_{\max}(D) = 1'000 \text{ nm}$

- c)  $\lambda_{\max} = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{T}$ , d'où  $T = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{\lambda_{\max}}$ . On trouve T(A) = 4817 K, T(B) = 5780 K ;  
T(C) > 5780 K, T(D) = 2890 K.

- d)  $F = \sigma \cdot T^4$ , où  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)/\text{K}^{-4}$ , d'où F(A) = 30 MJ/(s · m<sup>2</sup>), F(B) = 63 MJ/(s · m<sup>2</sup>)  
F(C) > 63 MJ/(s · m<sup>2</sup>), F(D) = 3.9 MJ/(s · m<sup>2</sup>)

### Exercice 3

- a)  $\lambda_{\max}(\text{Soleil}) = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{5'800} = 4.98 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0.498 \mu\text{m}$ .

- b)  $\lambda_{\max}(\text{Terre}) = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{288} = 1.00 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 10 \mu\text{m}$ .

### Exercice 4

Flux réfléchi : 30% de 340 = 102 J/(s · m<sup>2</sup>) (100 J/(s · m<sup>2</sup>) indiqué)

Flux absorbé par l'atmosphère : 19% de 340 = 65 J/(s · m<sup>2</sup>) (80 J/(s · m<sup>2</sup>) indiqué)

Flux absorbé par la surface de la Terre : 51% de 340 = 173 J/(s · m<sup>2</sup>) (160 J/(s · m<sup>2</sup>) indiqué)

### Exercice 5

340 – 75 = 265 J/(s · m<sup>2</sup>) pour le flux absorbé par la surface de la Terre.

29,4 % de 340 = 100 J/(s · m<sup>2</sup>) donc le flux réfléchi par la surface de la Terre vaut 100 – 75 = 25 J/(s · m<sup>2</sup>).

#### Exercice 6

##### Système Terre :

Flux entrant = 275 + 151 = 426 J/(s · m<sup>2</sup>).

Flux sortant = 35 + 391 = 426 J/(s · m<sup>2</sup>).

On est en équilibre thermique.

##### Système atmosphère :

Flux entrant = 340 J/(s · m<sup>2</sup>).

Flux sortant = 35 + 65 + 240 = 340 J/(s · m<sup>2</sup>).

On est en équilibre thermique.

#### Exercice 7

Système atmosphère :

Flux entrant = 340 J/(s · m<sup>2</sup>).

Flux sortant = 54 + 49 + 237 = 340 J/(s · m<sup>2</sup>).

On est en équilibre thermique.

#### Exercice 8

a) Système atmosphère :

Flux entrant = 340 J/(s · m<sup>2</sup>).

Flux sortant = 35 + 65 + 234 = 334 J/(s · m<sup>2</sup>).

On n'est pas en équilibre thermique. La Température de la Terre va augmenter afin que le flux sortant soit identique au flux entrant.

b) Le flux IR doit augmenter de 6 J/(s · m<sup>2</sup>). La Température de la Terre va augmenter sa température afin d'avoir un flux IR plus important (voir rayonnement d'un corps noir).

c) En équilibre.

#### Exercice 9

Système atmosphère :

Flux entrant = 340 J/(s · m<sup>2</sup>)

Flux sortant = 100 + 239 = 339 J/(s · m<sup>2</sup>)

On n'est pas en équilibre thermique. La Température de la Terre va augmenter afin que le flux sortant soit identique au flux entrant.

#### Exercice 10

T<sub>équilibre</sub>(1850) = 13.8°C

T<sub>équilibre</sub>(2020) = 15.2°C

T<sub>équilibre</sub>(2050) = 15.7°C

T<sub>équilibre</sub>(Vénus) = 465°C

#### Exercice 11

T<sub>équilibre</sub> (2050, vapeur d'eau) = 16.6°C

#### Exercice 12

T<sub>équilibre</sub> (2050, glace et neige) = 16.1°C

T<sub>équilibre</sub> (2050, nuage 50%) = 13.6°C

#### Exercice 13

La concentration de CO<sub>2</sub> n'était que de 200 ppm, celle de méthane de 0.4 ppm.

## 4 - Calcul de la température de la Terre

### 4.1 Introduction

Pour calculer la température (moyenne) de la Terre, il faut faire son bilan d'énergie.

La Terre reçoit son énergie du Soleil, sous forme de rayonnement EM (principalement dans le visible, mais également dans les UV et les IR). La Terre reçoit du Soleil 1367 joules par seconde et par  $m^2$ . Mais comme la Terre n'est pas plate, cette énergie se répartit sur une sphère.

On peut montrer (cf Exercice 1) que la Terre reçoit 342 joules par seconde sur chaque  $m^2$  de sa surface. Cependant, nous avons vu précédemment qu'environ 30% du rayonnement est directement renvoyé dans l'espace (par effet albedo). Il reste donc  $342 \cdot 70\% = 240$  Joules que la Terre reçoit chaque seconde sur chaque  $m^2$  de sa surface (voir schéma ci-dessous). Cela équivaut donc à un flux reçu de  $240 \text{ J/(s} \cdot m^2)$ . Cette énergie reçue du Soleil est absorbée par la Terre et c'est ainsi qu'elle se réchauffe.



Figure 32: La Terre reçoit  $342 \text{ J/(s} \cdot m^2)$  du Soleil, dont  $102 \text{ J/(s} \cdot m^2)$  est directement renvoyé dans l'espace. Il reste donc  $240 \text{ J/(s} \cdot m^2)$  qui sont absorbés par la Terre.

S'il l'histoire s'arrêtait là, la Terre accumulerait de l'énergie et se réchaufferait indéfiniment. Néanmoins, nous avons vu que lorsqu'un corps est au-dessus du zéro absolu, ce dernier émet lui aussi du rayonnement : le rayonnement corps noir. Ainsi, lorsque la Terre se

réchauffe grâce à l'énergie reçue par le Soleil, elle va à son tour rayonner de l'énergie, qui va être renvoyée dans l'espace. Il s'agit donc de faire le bilan entre l'énergie que la Terre reçoit du Soleil (en jaune sur la figure ci-dessous) et l'énergie que la Terre renvoie dans l'espace (en rouge dans la figure ci-dessous). Pour cela, imaginons que nous nous plaçons dans un satellite en dehors de l'atmosphère et que nous tentons de mesurer le rayonnement que la Terre évacue dans l'espace (en rouge sur la figure ci-dessous).

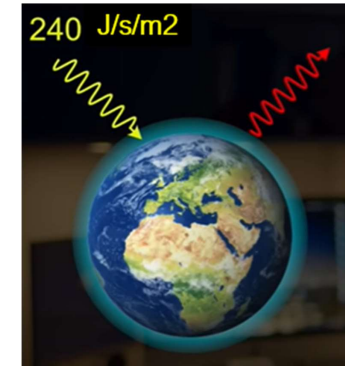


Figure 33 : La Terre absorbe  $240 \text{ J/(s} \cdot m^2)$  venant du Soleil (flux entrant en jaune) et rayonne à son tour. Ce qui importe pour le bilan d'énergie est le flux qui quitte la Terre et va dans l'espace (flux sortant, en rouge). Figure adaptée de David Louapre (2023)

### 4.2 Calcul de la température de la Terre sans effet de serre

Afin de simplifier les choses, commençons par étudier le mécanisme de réchauffement de la Terre sans effet de serre. Supposons donc, dans un premier temps, qu'il n'y a pas de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Dans ce cas, le rayonnement émis dans l'espace par la Terre est exactement le même que celui émis depuis la surface de la Terre, comme illustré dans la figure ci-dessous.



Figure 34 : s'il n'y a pas de GES dans l'atmosphère, le flux sortant (vu depuis l'espace) est le même que le flux émis depuis la surface de la Terre. Figure adaptée de David Louapre (2023)

Afin que la Terre soit à l'équilibre thermique, il faut qu'elle rayonne exactement la même quantité d'énergie que celle reçue du soleil. En effet, si la Terre rayonne plus d'énergie qu'elle n'en reçoit, elle se refroidit. Au contraire, si elle rayonne moins d'énergie qu'elle n'en reçoit, elle se réchauffe.

Or nous avons vu que le flux d'énergie rayonné est proportionnel à  $T^4$ . Autrement dit on a les deux cas possibles suivants :

- Si la Terre évacue plus d'énergie qu'elle n'en reçoit, sa température baisse. Donc elle va rayonner de moins en moins jusqu'à atteindre la température d'équilibre où l'énergie reçue est égale à l'énergie évacuée.
- Si la Terre évacue moins d'énergie qu'elle n'en reçoit, sa température monte. Donc elle va rayonner de plus en plus jusqu'à atteindre la température d'équilibre où l'énergie reçue est égale à l'énergie évacuée.

On voit donc que dans tous les cas, le système tend vers cette température d'équilibre.

En réalité, la Terre ne rayonne pas à une seule longueur d'onde  $\lambda_{max}$ , mais dans un spectre de longueurs d'ondes autour de cette valeur (voir graphique de droite dans la Figure 35 ci-dessous).

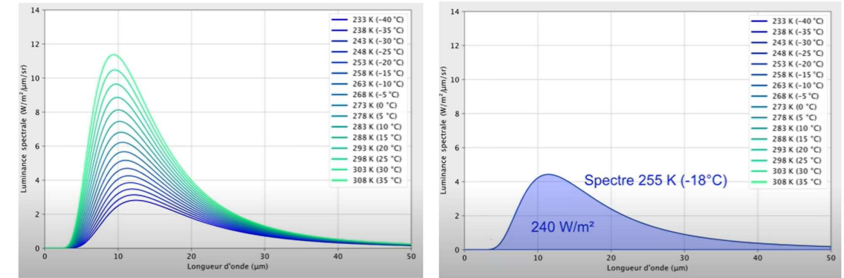


Figure 35 : A gauche le spectre d'émission pour différentes températures allant de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $35^{\circ}\text{C}$ . A droite, le spectre d'émission correspondant à une température de  $-18^{\circ}\text{C}$ , c'est-à-dire celui de la Terre sans GES. Figure adaptée de David Louapre (2023).

On peut noter dans les figures ci-dessus que la quantité totale d'énergie rayonnée par seconde et par  $\text{m}^2$  est donnée par l'aire sous la courbe (coloriée en bleu clair dans la figure de droite). On voit donc sur la figure de gauche que plus la température est élevée, plus l'aire sous la courbe est grande. On retrouve donc la loi vue précédemment, qui nous dit que la quantité totale d'énergie rayonnée par seconde et par  $\text{m}^2$  (càd le flux) est proportionnelle à  $T^4$ .

### 4.3 Calcul de la température de la Terre avec effet de serre

Nous allons voir que l'effet de serre provoque une diminution de la capacité de la Terre à évacuer son énergie. Or si la Terre se débarrasse moins bien de son énergie, elle va monter en température jusqu'à une nouvelle température d'équilibre, plus élevée : c'est ce qu'on appelle le forçage radiatif.

Lorsque l'on prend en compte l'effet de serre, il faut bien distinguer le rayonnement émis à la surface de la Terre (en orange sur le schéma ci-dessous) du rayonnement envoyé dans l'espace, au sommet de l'atmosphère (en rouge sur le schéma). En effet, c'est bien le rayonnement envoyé dans l'espace qui nous indique la quantité d'énergie qui quitte la Terre.

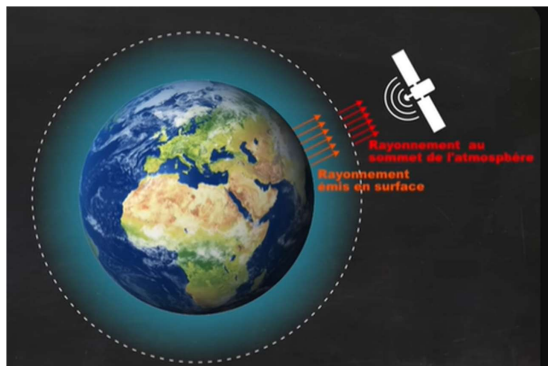


Figure 36 : Le rayonnement émis à la surface de la Terre (en orange) interagit avec les GES. Ainsi le rayonnement qui quitte la Terre et va dans l'espace (en rouge) est différent de celui émis depuis la surface de la Terre. Figure adaptée de David Louapre (2023)

Partons du rayonnement émis à la surface de la Terre à la température d'équilibre de  $-18^{\circ}\text{C}$  : comme précédemment, la Terre reçoit  $240 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  du Soleil et émet  $240 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  depuis la surface. Le système est initialement à l'équilibre.

Nous avons vu précédemment que les GES absorbent une partie du rayonnement émis à la surface de la Terre dans le domaine des IR. Comme illustré sur le graphique ci-dessous, cela va donc former un « trou » dans le spectre émis au sommet de l'atmosphère. L'aire sous la courbe est donc diminuée : la Terre reçoit  $240 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ , émet  $240 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  depuis sa surface mais elle rejette moins de  $240 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  dans l'espace.

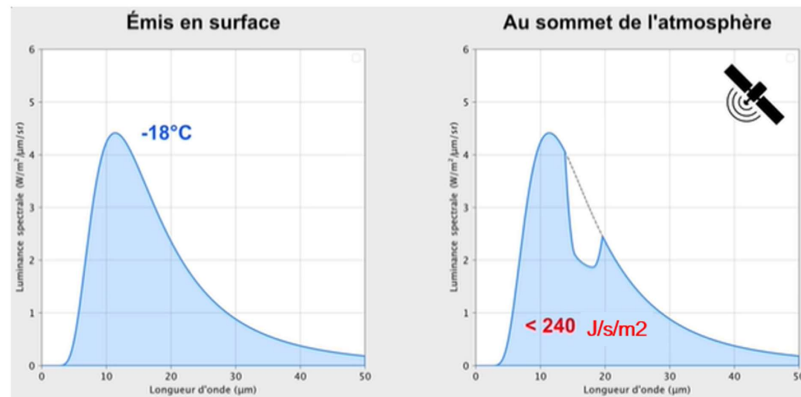


Figure 37 : spectre émis à la surface de la Terre à une température de  $-18^{\circ}\text{C}$  (gauche). Spectre envoyé dans l'espace quittant la Terre (droite). Figure adaptée de David Louapre (2023).

La Terre emmagasine donc de l'énergie, ce qui fait monter sa température. Le spectre émis à la surface va enfler (courbe orange ci-dessous) jusqu'à ce que le total d'énergie qui quitte la Terre au sommet de l'atmosphère atteigne de nouveau les  $240 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  nécessaires pour rétablir l'équilibre du bilan énergétique.

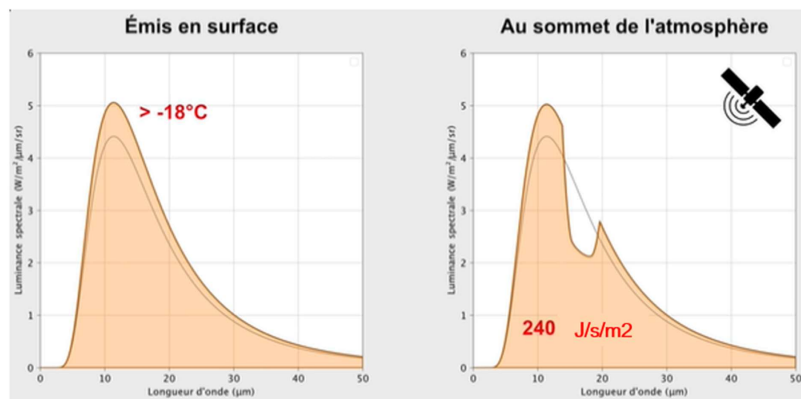


Figure 38 : spectre émis depuis la surface de la Terre (gauche) une fois qu'elle s'est réchauffée à  $T > -18^{\circ}\text{C}$ . A droite, le spectre qui est renvoyé dans l'espace. Figure adaptée de David Louapre (2023).

## 4.4 Exercices du chapitre 4

### Exercice 1

a) Expliquer avec une phrase ou un schéma pourquoi l'énergie totale reçue par la Terre chaque seconde est égale aux 1367 joules par seconde et par  $\text{m}^2$  multipliés par la surface d'un disque du rayon de la Terre.

b) Montrer que la surface d'un disque de rayon  $r$  est 4 fois plus petite que la surface d'une sphère de rayon  $r$ .

c) A partir des réponses aux questions précédentes, montrer que l'énergie moyenne reçue chaque seconde sur chaque  $\text{m}^2$  de la surface de la Terre est égale à 342 joules par seconde.

### Exercice 2 :

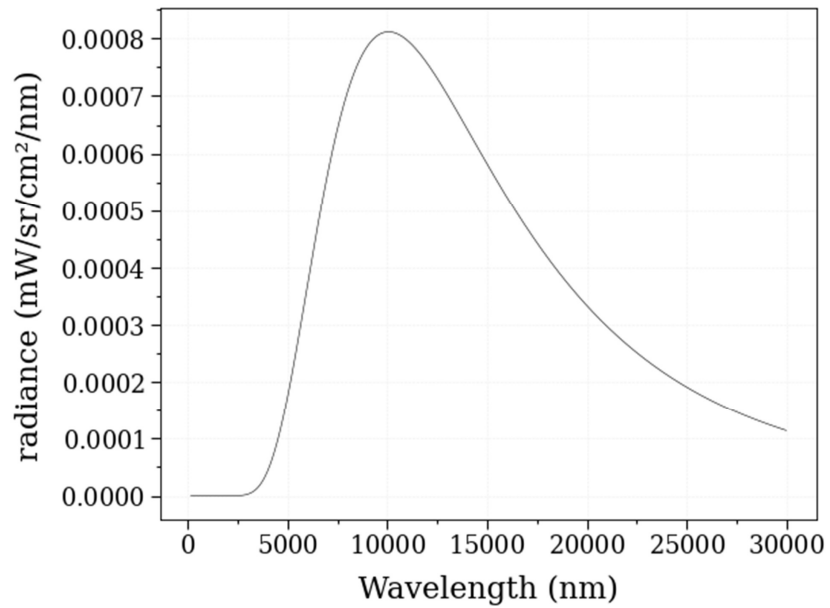
a) La Terre reçoit  $240 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  du Soleil. Montrez que la température de la Terre pour qu'elle rayonne  $240 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ , afin que l'énergie entrante soit égale à l'énergie sortante, est de  $-18^\circ\text{C}$  (en supposant qu'il n'y a pas de GES dans l'atmosphère).

b) Calculer la longueur d'onde  $\lambda_{\text{max}}$  où le rayonnement est maximal pour une température de  $-18^\circ\text{C}$ .

c) En déduire la gamme de longueur d'onde (IR, visible ou UV) dans laquelle le rayonnement émis par la Terre est maximal.

### Exercice 3 :

Voici la représentation graphique du spectre émis à la surface de la Terre (en prenant en compte les GES) à la température d'équilibre. La courbe représente l'intensité du rayonnement en fonction de la longueur d'onde. Estimer graphiquement la valeur de  $\lambda_{\text{max}}$  dans le graphique ci-dessous. En déduire la température d'équilibre de la surface de la Terre lorsque l'effet de serre est pris en compte.



## 4.5 Corrigés des exercices du chapitre 4

### Exercice 1

a) La surface apparente de la Terre est un disque du rayon de la Terre. La puissance totale reçue par la Terre est donc égale au flux solaire multiplié par ce disque.

b) Aire du disque =  $\pi r^2$ , aire de la sphère =  $4\pi r^2$ .

c) Puisque la Terre reçoit une puissance totale qui est égale au flux solaire multiplié par l'aire du disque, mais que cette énergie se répartit sur l'ensemble de la surface de la sphère, la Terre reçoit sur chaque  $m^2$  de sa surface le flux solaire divisé par 4 =  $1367/4 = 342 \text{ J/s/m}^2$ .

### Exercice 2

a)

$$F = \sigma T^4$$

$$T^4 = \frac{F}{\sigma}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{F}{\sigma}}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{240}{5,67 \cdot 10^{-8}}}$$

$$T \cong 255 \text{ K} \cong -18^\circ\text{C}$$

b)

$$\begin{aligned} \lambda_{max} &= \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{T} \\ &= \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{255} \end{aligned}$$

$$\lambda_{max} \cong 11 \mu\text{m}$$

c) Infrarouges.

### Exercice 3

$$\begin{aligned} \lambda_{max} &\cong 10 \mu\text{m} \\ T &= \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} \end{aligned}$$

$$T = 289\text{ K} = 16^\circ\text{C}$$

## 5 - Les pompes à chaleur

### 5.1 Processus irréversibles

La **loi de la conservation de l'énergie** stipule que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais qu'elle peut être transformée d'une forme à une autre ou transférée d'un endroit à un autre. Ce transfert peut être fait sous la forme d'un travail (par exemple en poussant un objet) ou sous la forme de chaleur (par exemple, lorsque l'on tient une tasse de chocolat chaud, de l'énergie est transférée de la tasse à la main). Toutefois, seulement certains types de transformations d'énergie et de transferts d'énergie prennent place dans la nature.

Les exemples suivants illustrent des processus qui ne violent pas la loi de la conservation de l'énergie lorsqu'ils se passent dans l'un ou l'autre sens, mais qui ne sont observés en réalité que dans un sens :

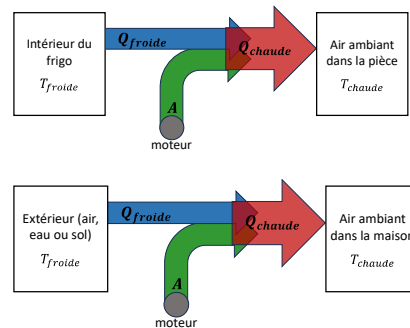
- Quand deux objets de températures différentes sont placés en contact l'un avec l'autre, le transfert d'énergie sous forme de chaleur se passe **toujours de l'objet le plus chaud vers l'objet le plus froid**, jamais du plus froid vers le plus chaud.
- Une balle rebondissante que l'on lâche rebondit plusieurs fois sur le sol avant de s'arrêter, mais une balle à l'arrêt sur le sol ne gagne jamais assez d'énergie du sol pour commencer à rebondir par elle-même.
- Un pendule qui oscille finit toujours par s'arrêter à cause des collisions avec les molécules d'air et du frottement au point de suspension. L'énergie mécanique du système est convertie en énergie thermique dans l'air, le pendule et le crochet. La conversion inverse, d'énergie thermique en énergie mécanique, ne se produit jamais.

Tous ces processus sont **irréversibles**; cela veut dire qu'ils ne se produisent naturellement que dans un sens. Aucun processus irréversible n'a été observé dans le sens contraire.

## 5.2 Fonctionnement d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur

Le rôle d'un réfrigérateur (frigo) ou d'une pompe à chaleur (PAC) est de transférer de l'énergie d'une source froide vers une source chaude, ce qui est contraire au sens naturel. Ainsi, on doit apporter de l'énergie à l'appareil pour pouvoir le faire. Les appareils qui font cela sont appelés **appareils frigorifiques** si le but recherché est de refroidir ou de maintenir froide une source froide, ou **pompes à chaleur** si le but recherché est de réchauffer ou de maintenir chaude une source chaude.

Dans un réfrigérateur ou une pompe à chaleur, le moteur prend de l'énergie  $Q_{froide}$  d'une source froide et rejette de l'énergie  $Q_{chaud}$  dans une source chaude, ce qui ne peut être accompli que si un travail est exercé sur le moteur. De la loi de la conservation de l'énergie, on sait que l'énergie fournie à la source chaude doit être égale à la somme du travail fourni et de l'énergie prise à la source froide. Ainsi, un réfrigérateur (figure ci-contre, en haut) peut prendre de l'énergie à un corps plus froid (contenu du frigo) pour la transférer à un corps plus chaud (l'air dans la cuisine). Une pompe à chaleur (figure ci-contre, en bas) prend de l'énergie à l'extérieur de la maison pour la transférer à l'intérieur de la maison.

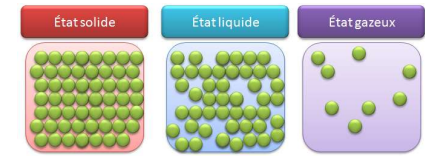


En pratique, il est souhaitable d'effectuer ce processus en fournissant un travail minimal. Si le processus pouvait être effectué sans avoir à exercer un travail, le réfrigérateur ou la pompe à chaleur seraient "parfaits". Toutefois, comme le transfert de chaleur d'un objet chaud à un objet froid est un processus irréversible, on a l'énoncé suivant, connu sous le nom d'*interdit de Clausius* :

Il est impossible de construire un appareil dont le seul effet est de transférer de manière continue de la chaleur d'un objet à un autre de température plus élevée sans devoir apporter de l'énergie sous la forme d'un travail.

En d'autres termes, l'énergie ne se transfère pas spontanément sous forme de chaleur d'un objet froid à un objet chaud. Il faut un travail pour faire tourner un frigo ou une PAC.

Le fonctionnement d'une pompe à chaleur, tout comme celui d'un frigo, se base sur l'utilisation d'un fluide (liquide ou gaz) qui subit des changements



d'état de manière cyclique. Nous avons vu dans le chapitre sur la température que la matière peut se trouver sous trois états : solide, liquide ou gazeux. A l'état liquide, les molécules sont peu liées ; elles sont mobiles mais restent en contact, ce qui fait qu'on ne peut pas comprimer un liquide (figure ci-dessus, centre). L'état gazeux est dispersé et désordonné, les molécules ne sont plus du tout liées (figure ci-contre, droite). Pour faire passer un fluide de l'état liquide à l'état gazeux (= **vaporisation**), il faut apporter de la chaleur afin de casser les liaisons entre les molécules. A l'inverse, lors du changement d'état inverse, de l'état gazeux à l'état liquide (= **condensation**), de la chaleur est libérée dans l'environnement.

Il est courant de dire que les trois états de la matière dépendent de la température. Prenons l'exemple connu de l'eau. On a l'habitude de dire qu'elle est à l'état solide en dessous de 0°C. De 0 à 99°C, elle est à l'état liquide et à partir de 100°C elle passe à l'état gazeux. Mais cela est seulement vrai dans les conditions de pression atmosphérique normales à savoir 1 atm, soit environ 1 bar ou 100 000 Pa.

Si les conditions de pression changent, les températures de changement d'état vont également varier. Ainsi, à une pression plus basse, une matière à l'état liquide nécessitera une température moins importante pour passer à l'état gazeux. A l'inverse, si on augmente la pression dans une matière à l'état gazeux, son passage à l'état liquide se fera à une température plus élevée.

C'est précisément ce principe qui est utilisé avec le fluide réfrigérant (ou fluide caloporteur = "qui transporte l'énergie") d'une pompe à chaleur ou d'un frigo. Le fluide liquide est amené à une pression basse où sa température d'ébullition est réduite. La chaleur nécessaire à son

passage à l'état gazeux est captée dans le milieu. Le fluide est ensuite comprimé et amené à haute pression où sa température de condensation (soit son passage de l'état gazeux à liquide) sera bien plus élevée. La chaleur dont le fluide doit se débarrasser pour changer d'état est relâchée et le fluide redevient liquide. Il est ensuite détendu à basse pression et le cycle peut recommencer.

### Exercice 1

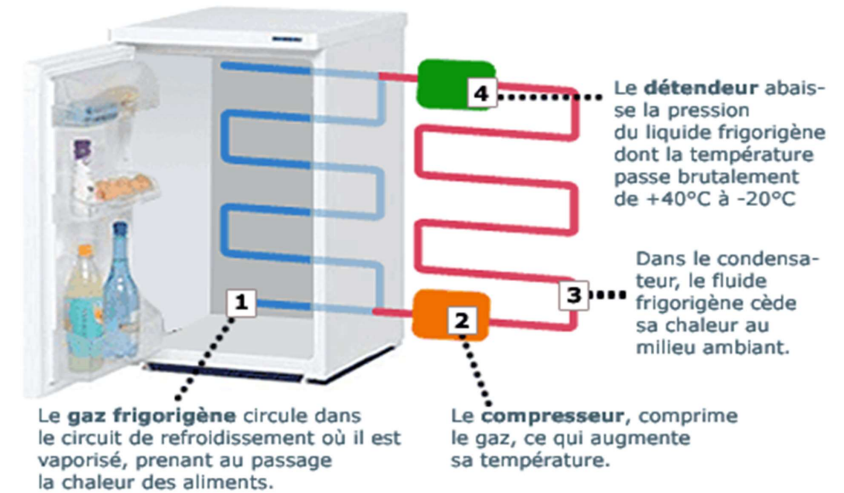
Regarde cette vidéo qui explique le fonctionnement d'un réfrigérateur, puis réponds aux questions :

<https://mediacast.eduvs.ch/m/2843>

#### Questions :

- Pendant un cycle d'un réfrigérateur, quel est le changement d'état qui a lieu à l'extérieur du frigo ?
- Quel est le changement d'état qui a lieu à l'intérieur du frigo ?
- Explique en quoi le changement d'état du point b) permet de refroidir les aliments.
- Pourquoi fait-on passer le fluide réfrigérant dans des serpentins, et non simplement dans un tube droit beaucoup plus court ?
- D'après toi, quelles sont les caractéristiques d'un bon fluide réfrigérant ?

### Comment le frigo produit-il du froid?



Pour examiner le fonctionnement du circuit de refroidissement, partons du compresseur (2) : c'est un moteur électrique qui comprime le fluide réfrigérant, initialement gazeux et froid, qui sort de l'intérieur du réfrigérateur, ce qui élève sa température et sa pression. A la sortie du compresseur, le fluide est donc un gaz chaud (vers  $40^{\circ}\text{C}$ ), et à haute pression.

Ce gaz passe alors par un condenseur (3), tuyau serpentín fixé sur une grille métallique qui augmente la surface de refroidissement par l'air. Cette grille est en général située à l'extérieur et à l'arrière du réfrigérateur. Le gaz se refroidit et change d'état, devenant liquide. A la sortie du condenseur, le fluide est donc un liquide à température voisine de l'ambiante et à haute pression.

Ce liquide traverse un détendeur (4) qui lui offre un volume plus grand. La pression chute brutalement et le liquide se vaporise partiellement en engendrant une forte diminution de température, d'au moins  $15^{\circ}\text{C}$ , mais qui peut atteindre  $50^{\circ}\text{C}$  dans un congélateur. A la sortie du détendeur,

le fluide est donc un mélange vapeur-gouttelettes de liquide à température très basse et à basse pression.

Ce mélange va passer alors dans un évaporateur (1), tuyau serpentin logé dans la paroi de la chambre froide, souvent au contact d'une plaque métallique qui augmente le contact avec l'air de l'intérieur du frigo. Le fluide qui circule dans cet évaporateur continue à s'évaporer en absorbant la chaleur cédée par les aliments placés à l'intérieur du réfrigérateur. A la sortie de l'évaporateur, le fluide est, à l'état gazeux, très froid et à basse pression. Il repart vers le compresseur pour un nouveau cycle thermique.

Ce cycle est le même pour toutes les enceintes à refroidir.

Une pompe à chaleur fonctionne de la même manière, à ceci près qu'elle pompe de la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur, et que, bien évidemment, les pompes à chaleur diffèrent des réfrigérateurs au niveau des puissances mises en jeu, du diamètre des tuyaux, etc.

## Exercice 2

Définir le changement d'état du fluide pour chaque principe physique mis en œuvre :

- a) Vaporisation : passage de l'état \_\_\_\_\_ à l'état \_\_\_\_\_
- b) Condensation : passage de l'état \_\_\_\_\_ à l'état \_\_\_\_\_
- c) Compression d'un gaz : augmentation de \_\_\_\_\_ et de \_\_\_\_\_
- d) Détente d'un liquide : diminution de \_\_\_\_\_ et de \_\_\_\_\_

## 5.3 Sources d'énergie utilisées par une pompe à chaleur

Pour fournir 100 joules d'énergie thermique (pour le chauffage du bâtiment ou l'eau chaude), une PAC extrait environ 75 joules provenant d'une source naturelle. Les 25 joules restants proviennent d'une source artificielle (principalement de l'électricité, accessoirement du gaz ou d'autres combustibles). On trouve des sources de chaleur naturelles et

vertes pour ainsi dire partout ou presque : l'air, la terre et l'eau renferment des quantités importantes d'énergie, sans cesse naturellement renouvelées, provenant du rayonnement solaire, des précipitations ou du flux de chaleur du sous-sol.

### 5.3.1 L'air comme source de chaleur

L'air ambiant est naturellement présent partout, disponible en très grande quantité et peut être utilisé facilement comme source de chaleur. Les pompes à chaleur air-eau transmettent la chaleur prise dans l'air ambiant à un système de distribution conventionnel (chauffage au sol, radiateurs) et/ou à un chauffe-eau. Bien moins fréquentes, les pompes à chaleur air-air transmettent cette même chaleur à un système de ventilation.

L'air ambiant est acheminé depuis la prise d'air par un canal de ventilation jusqu'à la pompe à chaleur. Une fois utilisé, cet air, plus froid de quelques degrés, est évacué par un second canal. Le captage d'énergie dans l'air ambiant se base donc sur un échange thermique entre l'air extérieur et le fluide frigorigène de la PAC, dans l'évaporateur de cette dernière.

### 5.3.2 Le sol comme source de chaleur (géothermie)

L'énergie accumulée de façon naturelle et sans cesse renouvelée dans le sous-sol est relativement facile à utiliser par le biais de sondes géothermiques verticales pouvant aller jusqu'à 300 mètres de profondeur. Il n'y a pas d'échange physique de matière qui s'effectue dans le sol, uniquement de la chaleur. C'est par le biais d'un fluide caloporteur circulant généralement dans deux tubes en U que l'énergie du sous-sol est puisée. Ce type de PAC est nommé "sol-eau" ou également "saumure-eau", étant donné que c'est généralement une saumure à base d'eau et d'antigel qui est utilisée comme fluide caloporteur.

### 5.3.3 L'eau comme source de chaleur

Les eaux souterraines ont une température quasi constante tout au long de l'année, ce qui en fait une source d'énergie idéale pour une pompe

à chaleur. Les eaux de surface (lacs, fleuves, rivières et ruisseaux) peuvent également être utilisées comme source de chaleur.

Le captage de la source d'énergie – de l'eau souterraine dans ce cas – se fait par la réalisation d'un puits atteignant la nappe phréatique. Une canalisation transporte l'eau pompée dans la nappe jusqu'à la pompe à chaleur. Une fois refroidie, l'eau est remise en circulation dans son système d'origine par un forage de réinjection, en aval hydraulique du forage de captage. Ce système de pompe à chaleur est dit « à système ouvert ».

### Exercice 3

Pour les échanges suivants, indique si l'énergie thermique est cédée selon le sens naturel (chaud → froid) ou inversé :

1. Air/fluide caloporteur dans l'évaporateur
2. Fluide caloporteur/eau de chauffage dans le condenseur
3. Air extérieur/eau de chauffage dans une PAC

#### 5.3.4 Coefficient de performance (COP)

L'efficacité d'un frigo ou d'une pompe à chaleur est décrite à l'aide d'un nombre appelé le **coefficient de performance** (COP pour *coefficient of performance*). Le COP est similaire à un rendement en ce qu'il s'agit d'un rapport entre ce que l'on gagne (de l'énergie transférée de ou à une source) et ce que l'on donne (le travail fourni). Toutefois il ne s'agit pas exactement d'un calcul de rendement car on ne prend en compte que l'énergie que l'on doit fournir mécaniquement à la pompe sous forme de travail et non celle qui est évacuée.

Pour une pompe à chaleur opérant dans le mode "refroidissement" (frigo, climatiseur, pompe à chaleur refroidissante), "ce que l'on gagne" est l'énergie enlevée à la source froide. Le réfrigérateur ou le climatiseur le plus efficace est celui qui enlève la plus grande quantité d'énergie de la source froide pour la plus petite quantité de travail. Ainsi, on définit pour ces appareils le COP en termes de  $Q_{froide}$ :

$$COP(\text{refroidissement}) = \frac{\text{énergie transférée à basse température}}{\text{travail effectué sur la pompe à chaleur}} = \frac{Q_{froide}}{A}$$

Un bon réfrigérateur devrait avoir un COP élevé, typiquement 5 ou 6. Un réfrigérateur fonctionnant avec un  $COP_{\text{refroidissement}}$  de 5 extrait 5 unités de chaleur pour chaque unité d'énergie consommée (exemple : un climatiseur consommant 1 kW retire 5 kW de chaleur à un bâtiment).

Dans le mode "chauffage", le COP est défini comme le rapport entre l'énergie transférée à la source chaude et le travail nécessaire à ce transfert d'énergie :

$$COP(\text{chauffage}) = \frac{\text{énergie transférée à haute température}}{\text{travail effectué sur la pompe à chaleur}} = \frac{Q_{chaude}}{A}$$

Si la température extérieure est de -4°C ou plus, une valeur typique du COP d'une pompe à chaleur air/air ou air/eau (qui extrait l'énergie de l'air) est d'environ 4. Cela signifie que la quantité d'énergie transférée à la maison est à peu près quatre fois plus grande que le travail effectué par le moteur de la pompe à chaleur. Quand la température extérieure diminue, cependant, il devient de plus en plus difficile à la pompe à chaleur d'extraire suffisamment d'énergie de l'air extérieur et le COP diminue. C'est pourquoi, dans les pays où les températures hivernales sont extrêmement froides, l'utilisation d'une pompe à chaleur qui extrait l'énergie de l'air n'est pas recommandée. Dans ce cas, il est préférable d'extraire l'énergie du sol, qui est en principe plus chaud que l'air en hiver (pompe à chaleur géothermique).

### Exemple

Un réfrigérateur a un COP de 5. Il soutire 120 J d'énergie à une source froide à chaque cycle. Calculer :

- a) le travail requis à chaque cycle
- b) l'énergie rejetée à la source chaude

a) Connues:  $COP_{\text{refroidissement}} = 5$

$$Q_{froide} = 120 \text{ J}$$

On cherche:  $A = ?$

$$\text{Loi: } COP_{\text{refroidissement}} = \frac{Q_{froide}}{A}$$

$$\text{Calculs: } A = \frac{Q_{froide}}{COP} = 24 \text{ J}$$

- b) Par la loi de la conservation de l'énergie, on a:  $Q_{chaude} = Q_{froide} + A = 144 \text{ J}$

#### Exercice 4

Durant chaque cycle, un réfrigérateur rejette 625 kJ d'énergie à la source chaude et soustrait 550 kJ de la source froide. Déterminer :

- le travail exercé sur le fluide réfrigérant pendant chaque cycle
- le coefficient de performance du réfrigérateur

#### Exercice 5

Une pompe à chaleur a un coefficient de performance de 3,8 et opère avec une consommation de 7030 W.

- Combien d'énergie fournit-elle à une maison durant 8 heures d'opération continue ?
- Combien d'énergie extrait-elle de l'air ?

### Corrigés des exercices

#### Exercice 1

- Gaz → Liquide
- Liquide → Gaz
- Pour s'évaporer, le fluide prend de la chaleur aux aliments qui se trouvent à l'intérieur du frigo.
- Pour augmenter la surface d'échange avec l'air.
- Le fluide doit avoir une grande propriété d'absorption de chaleur, des températures caractéristiques de changement d'état (liquide à gaz) en fonction de la pression, et ces pressions doivent permettre une utilisation dans des tuyaux d'épaisseur raisonnable. Enfin, il ne doit pas être nocif, ni pour l'homme ni pour l'environnement.

#### Exercice 2

- Vaporisation : passage de l'état **liquide** à l'état **gazeux**
- Condensation : passage de l'état **gazeux** à l'état **liquide**
- Compression d'un gaz : augmentation de **température** et de **pression**
- Détente d'un liquide : diminution de **température** et de **pression**

#### Exercice 3

- Air/fluide caloporteur dans l'évaporateur : naturel
- Fluide caloporteur/eau de chauffage dans le condenseur : naturel
- Air extérieur/eau de chauffage dans une PAC : inversé

#### Exercice 4

- Le travail effectué sur le fluide réfrigérant pendant un cycle vaut:

$$A = Q_{chaud} - Q_{froide} = 625 - 550 = \mathbf{75 \text{ J}}$$

- Le coefficient de performance du réfrigérateur est:

$$\text{COP} = \frac{Q_{froide}}{A} = \frac{Q_{froide}}{Q_{chaud} - Q_{froide}} = \frac{550}{625 - 550} = \mathbf{7,33}$$

### Exercice 5

- a) Le coefficient de performance d'une pompe à chaleur est  $COP = \frac{Q_{chaud}}{A}$ , où  $Q_{chaud}$  est l'énergie thermique délivrée à la source chaude et  $A$  est le travail requis pour faire fonctionner la pompe.

Ainsi:  $Q_{chaud} = A \cdot COP = P \cdot \Delta t \cdot COP = 7030 \cdot 8 \cdot 3600 \cdot 3,80 = \mathbf{7,69 \cdot 10^8 J}$

- b) L'énergie extraite de la source froide (l'air extérieur) est:

$$Q_{froide} = Q_{chaud} - A = Q_{chaud} - \frac{Q_{chaud}}{COP} = Q_{chaud} \left(1 - \frac{1}{COP}\right) = 7,69 \cdot 10^8 \left(1 - \frac{1}{3,80}\right) = \mathbf{5,67 \cdot 10^8 J}$$