

Énergie, choix de développement et futur climatique

Cours

Sommaire

I La diversité des ressources d'énergie

- A Les différentes énergies primaires
- B Les différentes unités d'énergie
- C Les besoins en énergie

II La combustion des carburants fossiles et de la biomasse

- A Les réactions de combustion
- B Les conséquences sur la santé

III L'empreinte carbone

- A L'analyse de l'empreinte carbone
- B Les solutions pour réduire l'empreinte carbone

IV Les scénarios de transition écologique

- A Les prévisions d'évolution des GES et leurs conséquences
- B L'évaluation des risques à l'échelle mondiale
- C Les mesures d'adaptation et d'atténuation

RÉSUMÉ

Parmi la diversité des ressources d'énergie, les combustibles fossiles sont les plus exploités à l'échelle mondiale. La combustion des carburants fossiles et de la biomasse libère de l'énergie mais produit aussi du dioxyde de carbone et certaines espèces nocives pour la santé. La quantité d'émissions de ce gaz par toute activité est mesurée par l'empreinte carbone. Son augmentation a un impact important sur le climat terrestre. Les scénarios de transition écologique permettent de prévoir les conséquences du réchauffement climatique, d'orienter les décisions politiques et économiques afin de le limiter et de s'y adapter.

I La diversité des ressources d'énergie

Les différentes énergies primaires utilisées dans le monde proviennent d'une diversité de ressources parmi lesquelles les combustibles fossiles dominent. Il existe différentes unités pour exprimer la consommation ou la production d'énergie. Les besoins en énergie sont croissants sur l'ensemble de la planète.

A Les différentes énergies primaires

Les énergies primaires sont celles disponibles dans l'environnement et directement exploitables sans transformation. Elles existent sous forme de stocks ou de flux.

DÉFINITION

Énergie primaire

Une **énergie primaire** est une matière première ou un phénomène présent dans la nature directement exploitable sans transformation.



REMARQUE

L'énergie secondaire est issue de la conversion d'énergie primaire, par exemple en électricité.

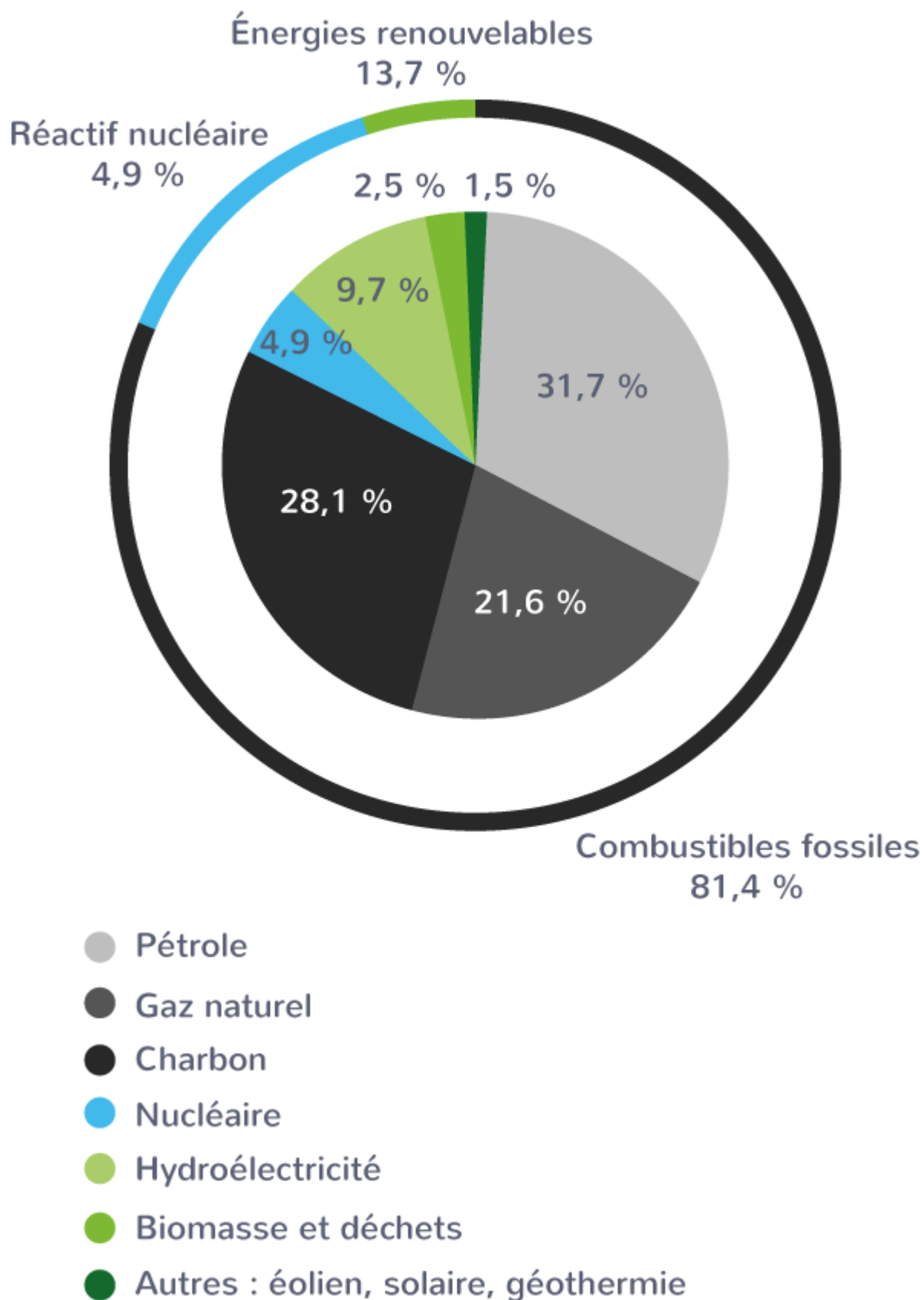
PROPRIÉTÉ

Parmi les énergies primaires, on distingue celles qui se présentent sous forme de stocks, et qui sont le plus souvent épuisables, et celles qui existent sous forme de flux et qui sont renouvelables.

Type d'énergie primaire	Stock	Flux
Renouvelable	Biomasse Déchets	Rayonnement solaire Vent Eau en mouvement Géothermie
Épuisable	Combustibles fossiles : charbon, gaz naturel, pétrole Uranium	

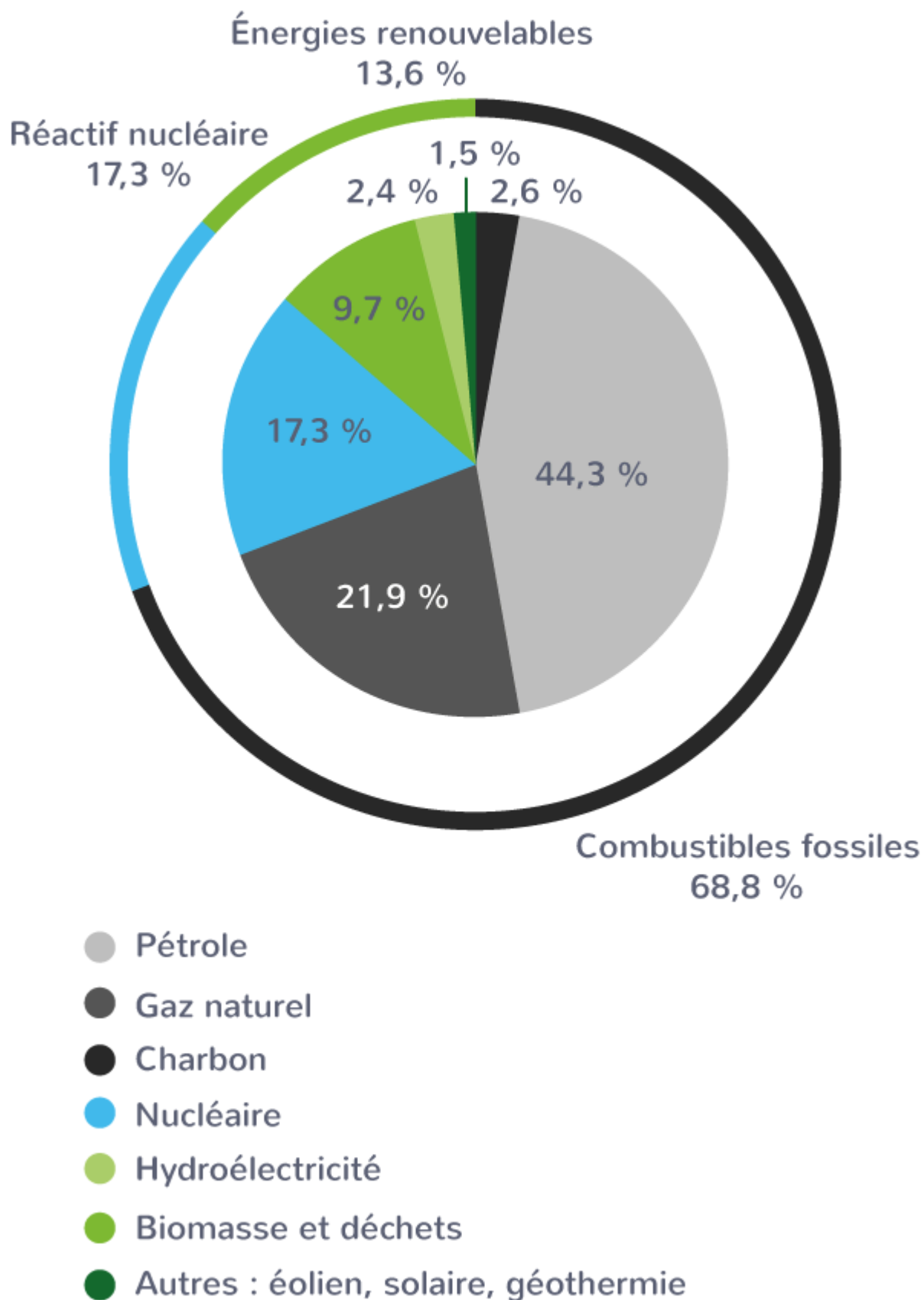
À l'échelle mondiale, les combustibles fossiles dominent la production d'énergie primaire.

Répartition des exploitations des trois énergies primaires à l'échelle mondiale



La France a la particularité d'exploiter l'énergie nucléaire pour produire la majorité de son énergie électrique. Sa consommation de combustibles fossiles est donc plus faible que la moyenne mondiale.

Répartition des exploitations des trois énergies primaires à l'échelle de la France



B Les différentes unités d'énergie

L'unité d'énergie dans le système international est le joule (J), mais pour exprimer des consommations énergétiques à plus grande échelle, on utilise différentes unités, plus adaptées.

Pour exprimer des énergies importantes, on utilise les unités suivantes :

Unité d'énergie	Règle de conversion
Le kilowattheure (kWh)	$1 \text{ kWh} = 3,600.106 \text{ J}$
La tonne équivalent pétrole (tep)	$1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ}$

EXEMPLE

La consommation moyenne d'énergie électrique d'un ménage français est de $1,650.10^{10} \text{ J}$, soit

$$4\,590 \text{ kWh} = \frac{1,650.10^{10}}{3,600.10^6} .$$

On peut aussi convertir cette énergie en tonne équivalent pétrole :

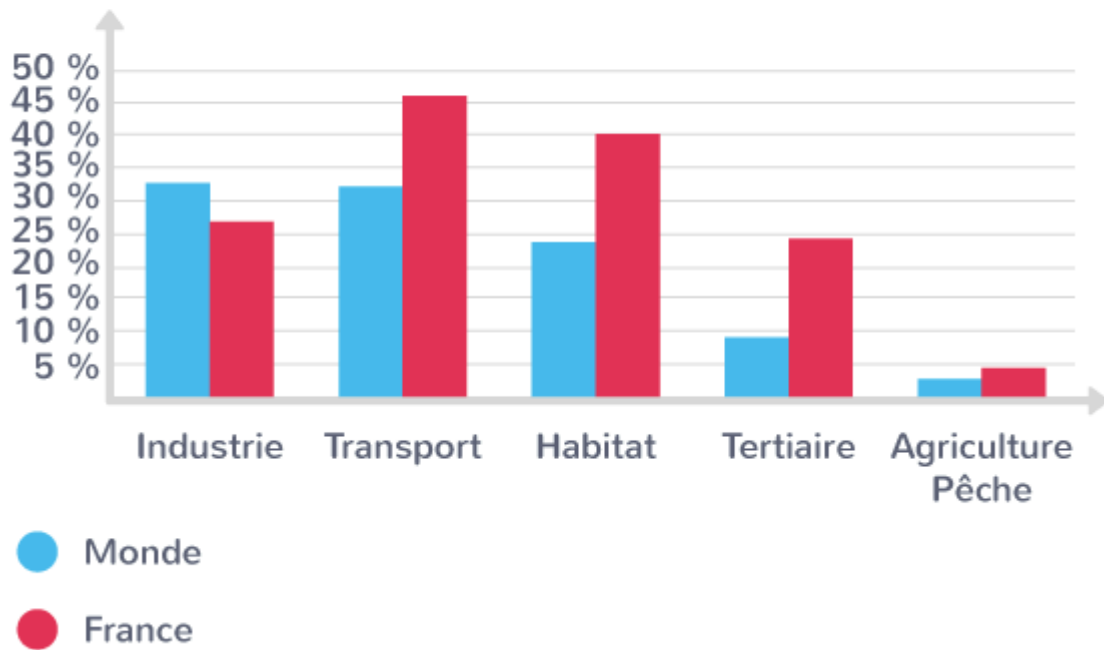
$$1,650.10^{10} \text{ J} = \frac{1,65.10^{10}}{41,868.10^9} = 0,394 \text{ tep}$$

Les besoins en énergie

En moyenne mondiale, l'énergie est utilisée à parts comparables par le secteur industriel, les transports, l'habitat et, dans une moindre mesure, l'agriculture. Le modèle industriel de production et de consommation des sociétés entraîne un accroissement rapide de la consommation globale.

À l'échelle mondiale et de la France, les trois secteurs qui consomment le plus d'énergie sont l'industrie, les transports et l'habitat.

Consommation d'énergie des différents secteurs dans le monde et en France

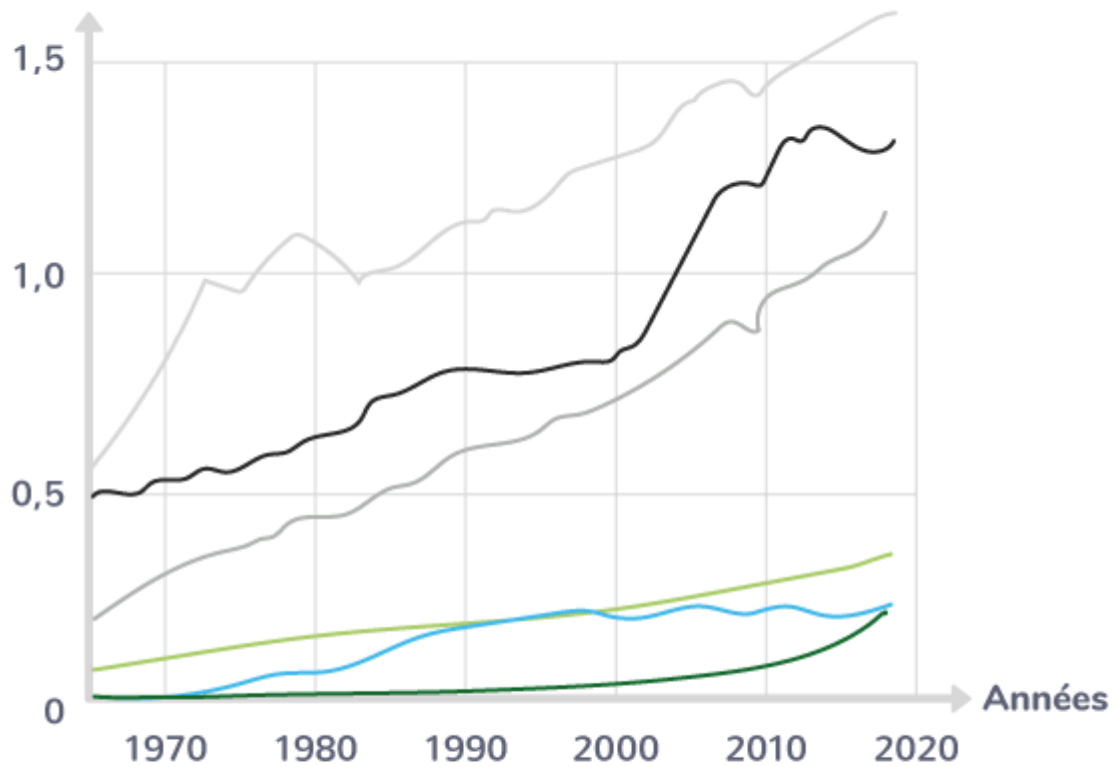


L'accroissement rapide de la consommation mondiale d'énergie est lié :

- à l'essor démographique ;
- à la croissance économique des pays en voie de développement ;
- au maintien des besoins dans les pays développés.

Augmentation de la consommation mondiale des différentes énergies de 1970 à 2018

Consommation d'énergie (Gtep)



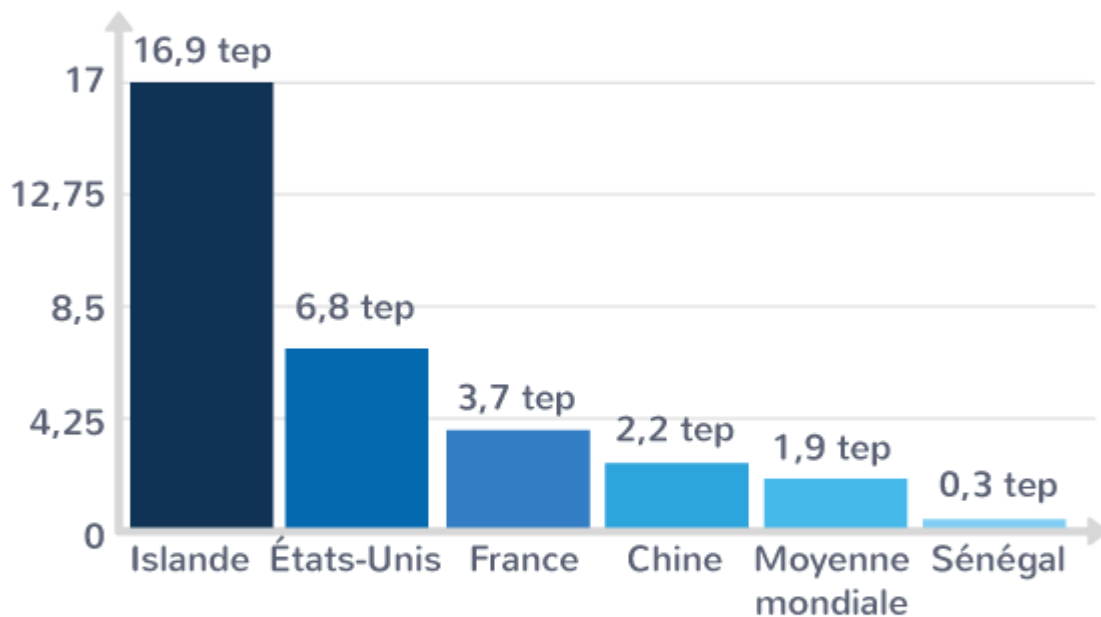
- Pétrole
- Charbon
- Gaz naturel
- Hydroélectricité
- Nucléaire
- Renouvelable



La consommation d'énergie est très différente selon la richesse des pays et des individus.

Consommation d'énergie par habitant en 2015

Consommation d'énergie (tep)



La position de l'Islande parmi les premiers consommateurs d'énergie par habitant dans le monde est à pondérer par l'effectif de sa population (360 000 habitants), notamment face à la Chine. La consommation d'énergie par habitant en Chine est en effet proche de la moyenne mondiale mais elle compte 1,4 milliard d'habitants, ce qui la place au 1^{er} rang de la consommation énergétique mondiale.

II La combustion des carburants fossiles et de la biomasse

La combustion des carburants fossiles et de la biomasse libère de l'énergie sous forme de chaleur. La combustion produit du dioxyde de carbone et d'autres substances qui peuvent affecter la qualité de l'air respiré et entraîner des conséquences sur la santé.

A Les réactions de combustion

Les réactions de combustion font intervenir des substances organiques comme combustible et le dioxygène comme comburant. Les produits sont essentiellement le dioxyde de carbone et d'autres substances qui dépendent de la composition du combustible. L'énergie dégagée et la masse de dioxyde de carbone produite peuvent être déterminées à partir de la masse de combustible.

DÉFINITION

Combustion

Une **combustion** est une réaction chimique exothermique entre :

- un combustible : espèce chimique susceptible de brûler ;
- un comburant, généralement le dioxygène : espèce chimique entretenant la combustion.

Une source d'énergie (chaleur, étincelle, etc.) est nécessaire pour que la combustion démarre.

EXEMPLE

Un moteur thermique est le siège d'une combustion. Le combustible est le carburant (essence ou gazole) et le comburant est le dioxygène présent dans l'air.

PROPRIÉTÉ

En présence de suffisamment de dioxygène, la combustion est dite complète et, dans le cas très fréquent où le combustible est un hydrocarbure (molécule composée uniquement d'atomes d'hydrogène et de carbone), son bilan est toujours le même :

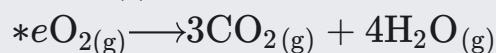


REMARQUE

Comme pour toute transformation chimique, les coefficients stœchiométriques des espèces chimiques impliquées dans cette réaction doivent être ajustés afin de respecter les lois de conservation.

EXEMPLE

L'équation de la réaction de combustion du butane (présent dans le gaz naturel) C_4H_{10} est :



L'énergie libérée par la combustion d'une espèce chimique peut être calculée à partir de sa masse.

DÉFINITION

Énergie massique Em

L'énergie massique Em (appelée aussi pouvoir calorifique, PC) d'un combustible est l'énergie libérée par la combustion d'un kilogramme de ce combustible. Elle s'exprime donc en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

EXEMPLE

L'énergie massique de l'essence est de $47,3 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

FORMULE

Calcul de l'énergie libérée lors d'une combustion

L'énergie libérée par une combustion peut être calculée à partir de la masse m du combustible et de l'énergie massique Em de la combustion :

$$E_{(J)} = m_{(kg)} \times Em_{m(J \cdot kg^{-1})}$$

EXEMPLE

L'énergie libérée par la combustion de 10 kg d'essence est :

$$E = m \times Em$$

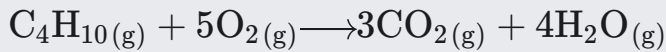
$$E = 10 \times 47,3.10^6$$

$$E = 4,7 \times 10^8 \text{ J}$$

La masse de dioxyde de carbone produite peut être déterminée à partir de la quantité initiale du combustible et de l'équation de la combustion.

EXEMPLE

On réalise la combustion de 10 g de butane, selon l'équation de réaction suivante :



D'après les coefficients stœchiométriques de cette réaction, les quantités de matière initiale en butane et formée en dioxyde de carbone sont liées par la relation suivante :

$$\frac{n_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^i}{1} = \frac{n_{\text{CO}_2}^f}{3}$$

Ainsi, la quantité de matière de dioxyde de carbone formée est quatre fois plus importante que la quantité initiale de butane :

$$n_{\text{CO}_2}^f = 3 \times n_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^i$$

Or, la quantité initiale de butane est égale au quotient de la masse de butane et de sa masse molaire :

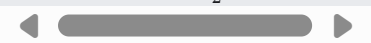
$$n_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^i = \frac{m_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}{M_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}$$

D'où :

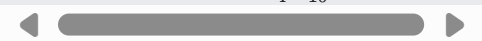
$$n_{\text{CO}_2}^f = 3 \times \frac{m_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}{M_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}$$

La masse de dioxyde de carbone formée est égale au produit de la quantité de matière de dioxyde de carbone formée et de sa masse molaire :

$$m_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2}^f \times M_{\text{CO}_2}$$



$$m_{\text{CO}_2} = 3 \times \frac{m_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}{M_{\text{C}_4\text{H}_{10}}} \times M_{\text{CO}_2}$$



La masse molaire du butane étant $M_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 58,0 \text{ g.mol}^{-1}$ et celle du dioxyde de carbone

$M_{\text{CO}_2} = 44,0 \text{ g.mol}^{-1}$, d'où :

$$m_{\text{CO}_2} = 3 \times \frac{10}{58} \times 44,0$$

$$m_{\text{CO}_2} = 22,8 \text{ g}$$

Pour évaluer les rejets en dioxyde de carbone de deux combustibles, on calcule et compare la masse de dioxyde de carbone produite par unité d'énergie dégagée.

EXEMPLE

La combustion de 10,0 g de butane libère une énergie de $4,83 \times 10^5 \text{ J}$ et rejette 30,3 g de dioxyde de carbone. Le quotient de la masse de dioxyde de carbone produite et de l'unité d'énergie dégagée est donc :

$$\frac{30,3}{4,83 \times 10^5} = 6,27 \times 10^{-5} \text{ g.J}^{-1}$$

La combustion de 10,0 kg d'essence libère une énergie de $4,7 \times 10^8 \text{ J}$ et rejette 30,9 kg de dioxyde de carbone. Le quotient de la masse de dioxyde de carbone produite et de l'unité d'énergie dégagée est donc :

$$\frac{30,9 \times 10^3}{4,7 \times 10^8} = 6,57 \times 10^{-5} \text{ g.J}^{-1}$$

Ainsi, pour une même énergie dégagée, l'essence émet davantage de dioxyde de carbone.

B Les conséquences sur la santé

Certaines substances libérées par les combustions de carburants fossiles et de biomasse affectent la qualité de l'air. C'est le cas des particules fines. La pollution atmosphérique entraîne notamment une augmentation des maladies respiratoires et cardiovasculaires.

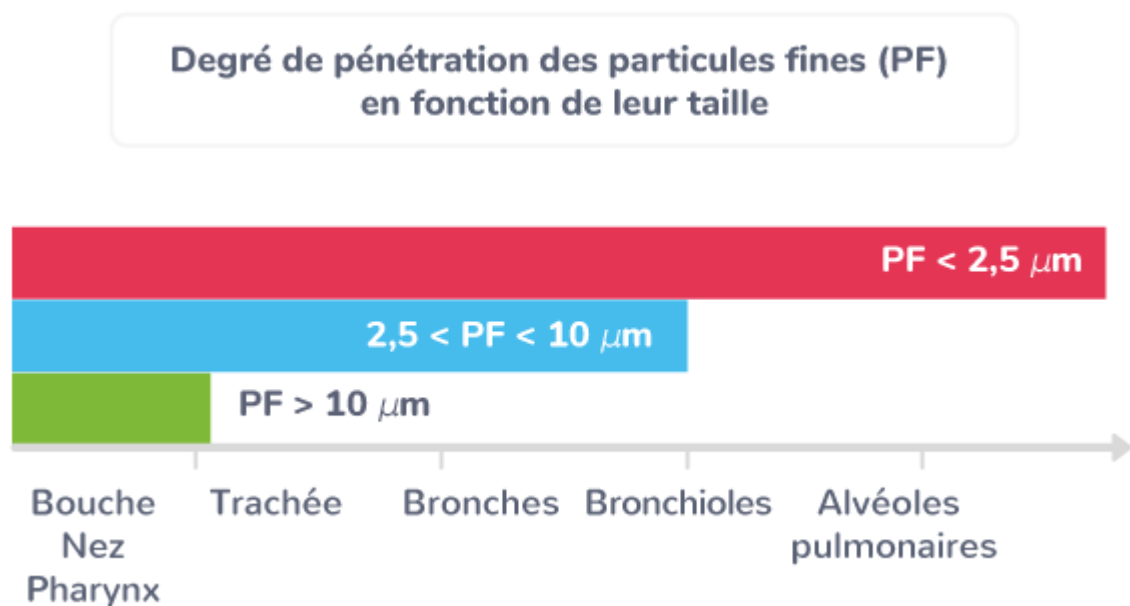
Les gaz et particules libérés lors de la combustion de carburants fossiles et de biomasse sont le dioxyde de carbone (CO_2), le dioxyde d'azote (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2), l'ozone (O_3), des aérosols et des suies. Ces produits détériorent la qualité de l'air.

DÉFINITION

Aérosols

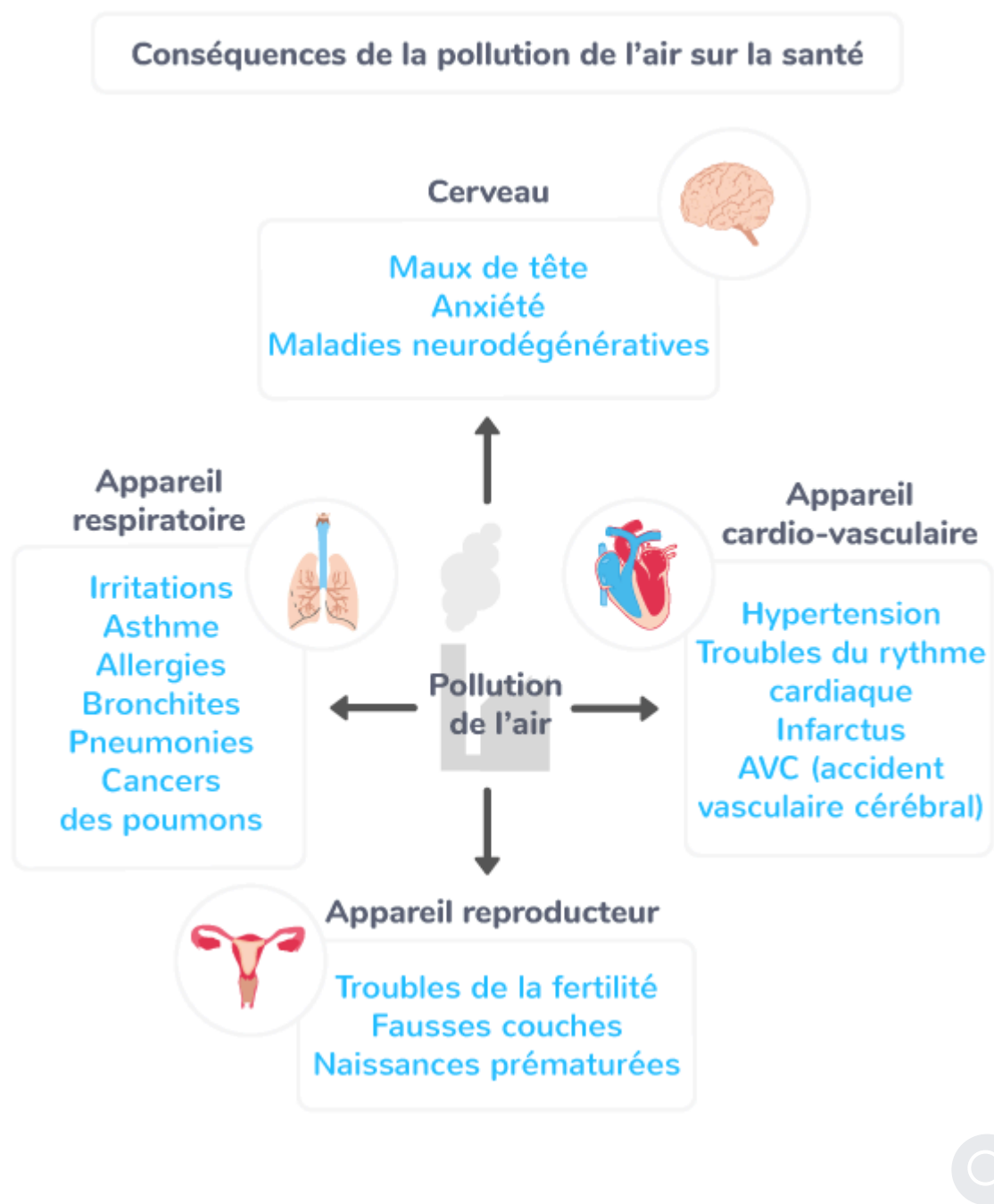
Les aérosols sont des particules fines en suspension dans l'air.

Plus les particules polluantes sont fines, plus elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire. Les plus fines atteignent les alvéoles pulmonaires et peuvent ainsi passer dans la circulation sanguine avant d'atteindre d'autres organes.



La durée d'exposition est un facteur important qui détermine les effets sur la santé. Une exposition durant plusieurs années à un taux moyen de pollution est plus dangereuse qu'une exposition brève lors d'un pic de pollution.

LOMS (Organisation mondiale de la santé) estime que 6,5 millions de personnes meurent prématurément chaque année à cause de la pollution de l'air, 58 % de maladies cardiovasculaires et 42 % de maladies respiratoires (dont 6 % de cancers). Mais d'autres organes sont aussi touchés, comme le cerveau ou l'appareil reproducteur.



Les effets sur la santé varient en fonction de l'âge, de l'état de santé, de la durée d'exposition aux polluants, de la nature des polluants ou encore de la dose de polluants inhalée.

EXEMPLE

Polluants	Effets sur la santé
NO ₂	Asthme, bronchites

SO ₂ ◀ ▶	Irritations oculaires, infarctus
Particules fines	Affections respiratoires et cardiovasculaires, irritations oculaires, effet cancérigène

III L'empreinte carbone

L'empreinte carbone est un indicateur de la masse de dioxyde de carbone produite par une activité ou une personne. L'analyse de l'empreinte carbone permet de déterminer l'impact de toute activité humaine. Les solutions pour réduire l'empreinte carbone reposent sur des actions collectives et individuelles.

A L'analyse de l'empreinte carbone

L'analyse de l'empreinte carbone d'une activité prend en compte la production directe et indirecte de dioxyde de carbone sur l'ensemble de son cycle de vie.

DÉFINITION

Empreinte carbone

L'**empreinte carbone** d'une activité correspond à la masse de CO₂ ayant le même effet sur le climat terrestre. Elle se mesure en unité de masse équivalent carbone.

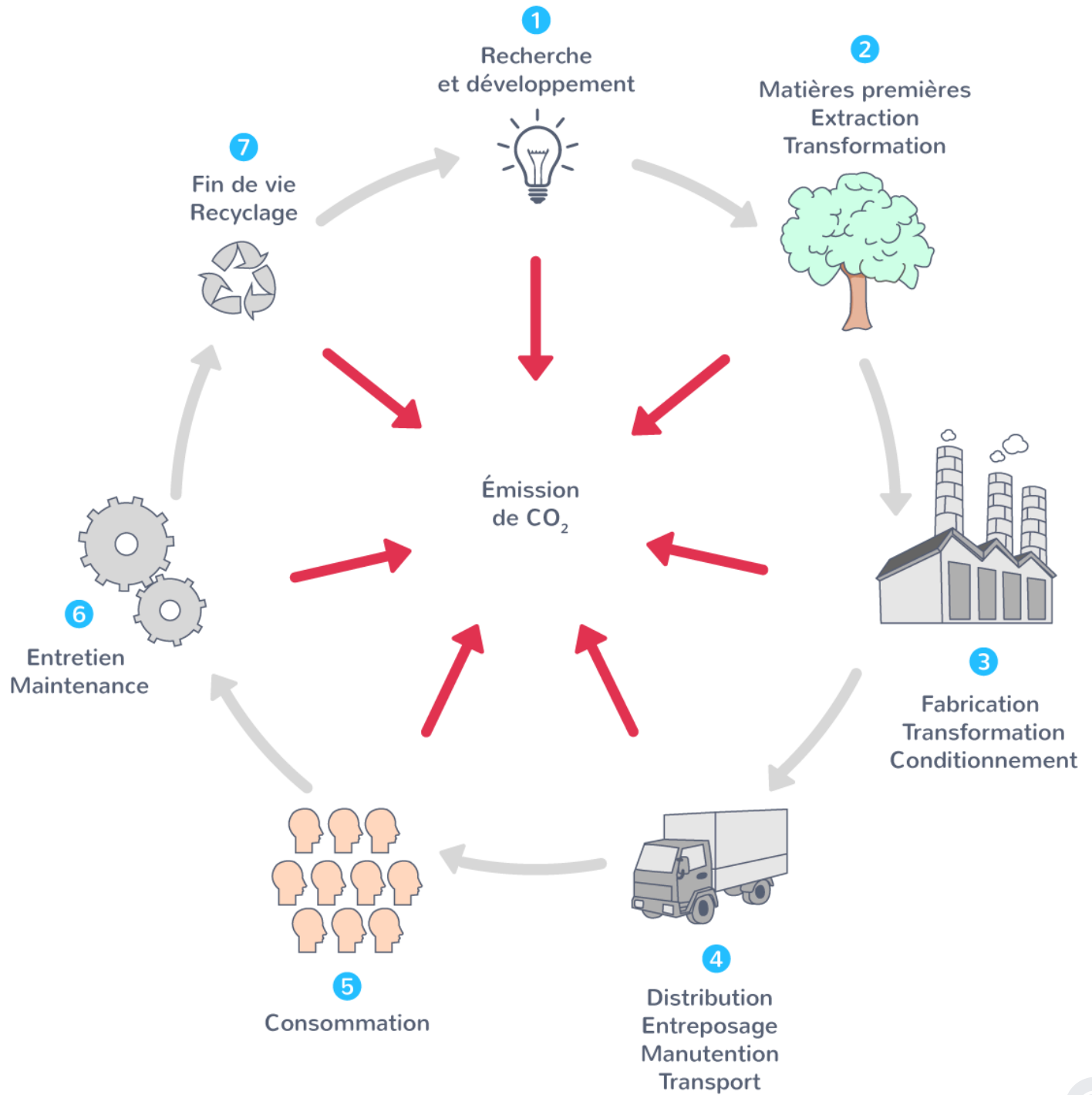
EXEMPLE

Lorsqu'on envoie un e-mail, la production de dioxyde de carbone est indirecte : l'utilisateur ne perçoit pas la libération de ce gaz car elle a lieu lors de l'approvisionnement en énergie électrique des serveurs informatiques.

L'empreinte carbone d'un e-mail de taille 1 Mo est de 20 g éq. CO₂.

L'analyse de l'empreinte carbone d'une activité ou de l'utilisation d'un objet nécessite de prendre en compte l'ensemble de son cycle de vie, de l'acquisition des ressources nécessaires à sa fabrication jusqu'à sa gestion en fin de vie.

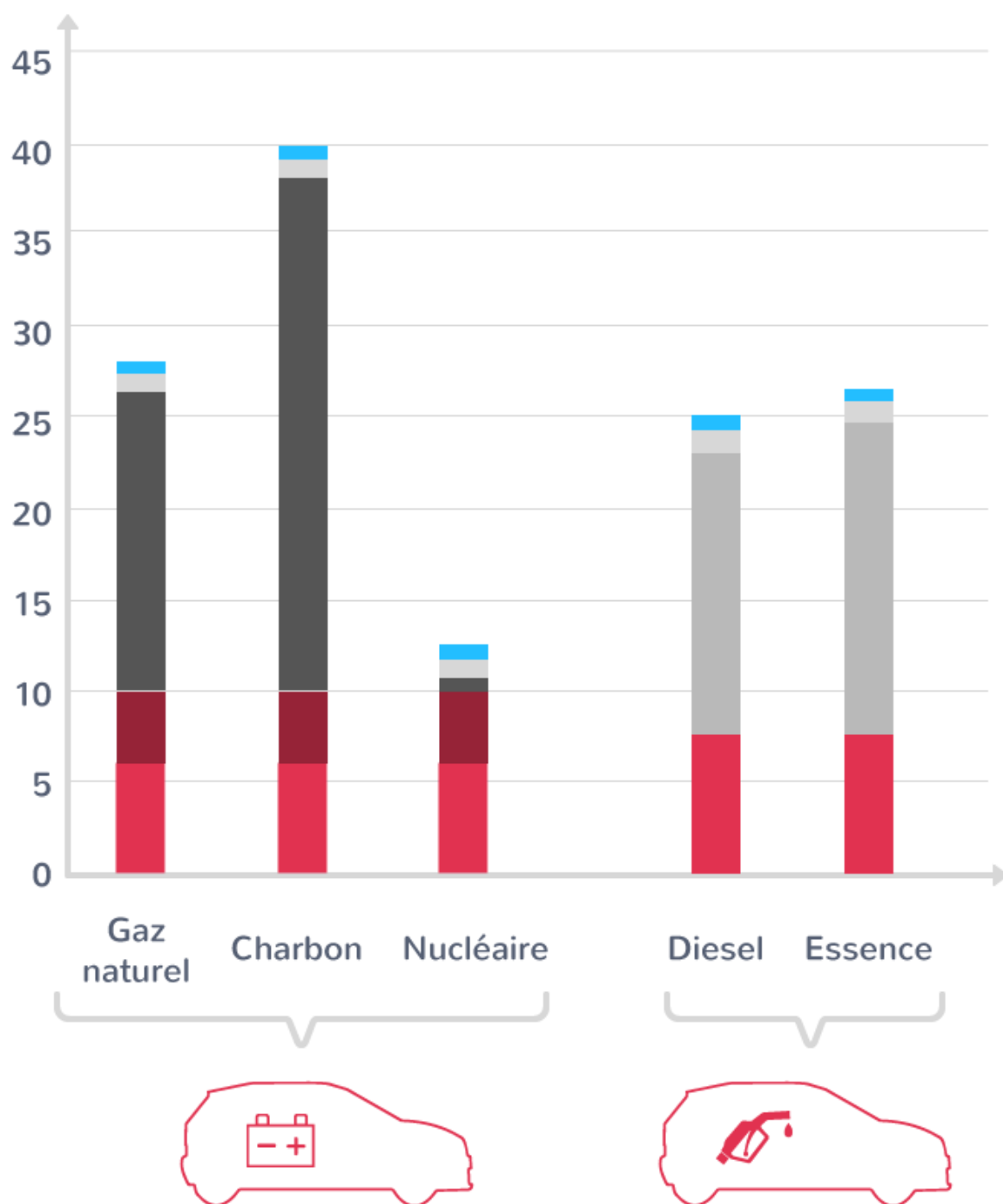
Cycle de vie de l'utilisation d'un objet



EXEMPLE

Empreinte carbone comparée des véhicules à moteur électrique et à moteur thermique sur leur cycle de vie

Empreinte carbone
(tonnes éq. CO₂)



- Traitement de fin de vie
- Entretien
- Combustion de carburant
- Consommation de combustible
- Fabrication des batteries
- Fabrication du véhicule



La production d'une voiture électrique a une empreinte carbone supérieure à celle de son équivalent thermique.

En revanche, pour son utilisation, tout dépend du mode de production d'électricité. En France, où l'électricité est essentiellement produite par énergie nucléaire, l'empreinte carbone de l'utilisation d'une voiture électrique est inférieure à celle d'une voiture thermique. L'empreinte carbone globale sur l'ensemble du cycle de vie est ainsi très favorable à la solution électrique. Ce n'est en revanche pas le cas en Allemagne par exemple, où l'électricité est issue majoritairement des centrales à charbon.

La part du traitement de fin de vie demeure difficile à chiffrer pour les véhicules électriques. Les technologies de recyclage de leurs batteries à base de métaux tels que le lithium ou le cobalt ne sont pas encore efficaces.

B Les solutions pour réduire l'empreinte carbone

Les solutions pour réduire l'empreinte carbone reposent avant tout sur les choix de société. Des solutions existent également à l'échelle individuelle.

Des choix de société privilégiant les exploitations d'énergie qui ne produisent pas de dioxyde de carbone peuvent permettre de réduire l'empreinte carbone à grande échelle.

EXEMPLE

L'empreinte carbone de 1 kWh produit par une centrale nucléaire est de 6 g éq. CO_2 , soit 150 fois inférieure à sa production par une centrale thermique à charbon.

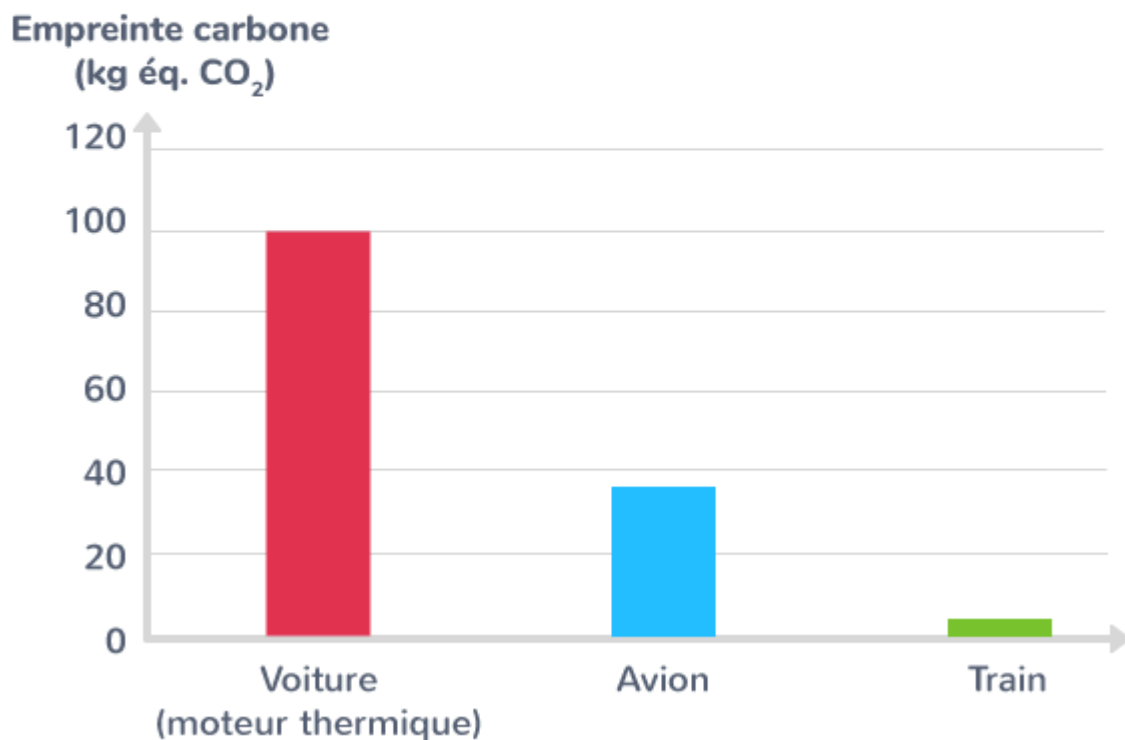
À l'échelle individuelle, il est aussi possible de réduire son empreinte carbone en modifiant son mode de vie.

Le transport est le secteur qui consomme le plus d'énergie et émet le plus de CO_2 . Un choix raisonné permet de diminuer son empreinte carbone.

EXEMPLE

Le train est le moyen de transport qui émet le moins de CO_2 . Il fonctionne avec de l'énergie électrique produite principalement à partir de l'énergie nucléaire dans le cas de la France.

Empreinte carbone d'un trajet de 500 km



Pour les trajets courts, utiliser le vélo au lieu de la voiture permet aussi de diminuer facilement son empreinte carbone.

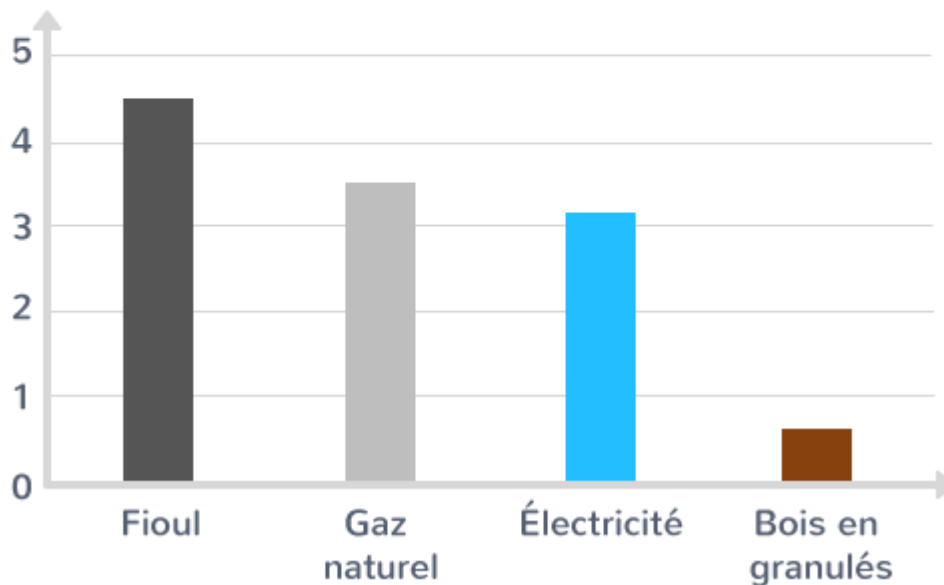
L'habitat est aussi un secteur dans lequel il est possible d'économiser de l'énergie et de diminuer son empreinte carbone.

EXEMPLE

L'empreinte carbone du chauffage d'un logement dépend du type de combustible utilisé.

Empreinte carbone d'un chauffage pour une consommation d'énergie de 15 000 kWh/an

Empreinte carbone
(kg éq. CO₂)



Isoler correctement son logement permet aussi de diminuer de 50 % l'empreinte carbone due à son chauffage.

IV Les scénarios de transition écologique

Les scénarios de transition écologique sont des hypothèses sur l'évolution des rejets de GES (gaz à effet de serre) et leurs conséquences. L'évaluation des risques à l'échelle mondiale permet d'établir des cartes de zones à risques aidant les décideurs à prendre des mesures d'adaptation et d'atténuation. L'objectif est de limiter les changements et les impacts du réchauffement climatique en mettant en place un nouveau modèle économique.

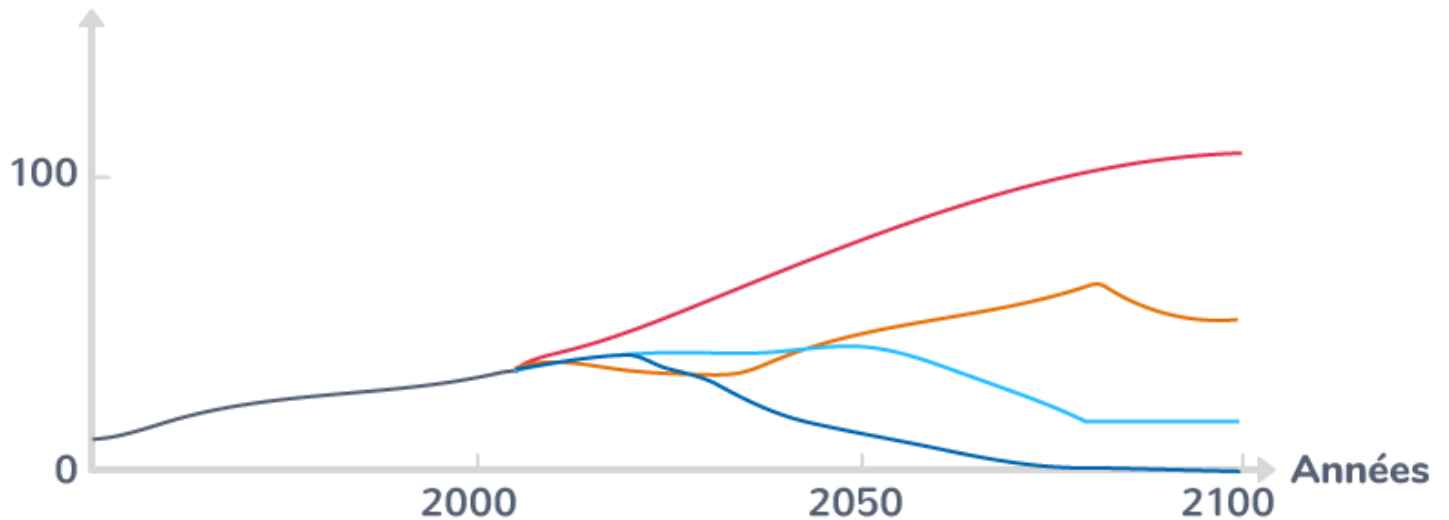
A Les prévisions d'évolution des GES et leurs conséquences

L'augmentation globale de la température sur Terre est liée aux émissions humaines de GES. Les prévisions proposent différents scénarios des plus optimistes (arrêt total des émissions) aux plus pessimistes (augmentation très importante des émissions). Les conséquences touchent l'ensemble des écosystèmes ainsi que les conditions de vie des êtres humains.

Les experts proposent différents scénarios concernant l'évolution de la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère. Ces scénarios vont du plus optimiste (arrêt total des émissions de CO₂) au plus pessimiste (augmentation des émissions de CO₂ par rapport au taux actuel).

Les différents scénarios d'évolution de la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère

Émissions anthropiques annuelles de CO₂ (Gt/an)



Scénarios de l'évolution des concentrations en CO₂

- Émissions de CO₂ très élevées
- Émissions de CO₂ élevées
- Émissions de CO₂ modérées
- Arrêt des émissions de CO₂

Si les émissions de GES continuent à progresser au rythme actuel, ce scénario serait situé entre les courbes rouge et orange.

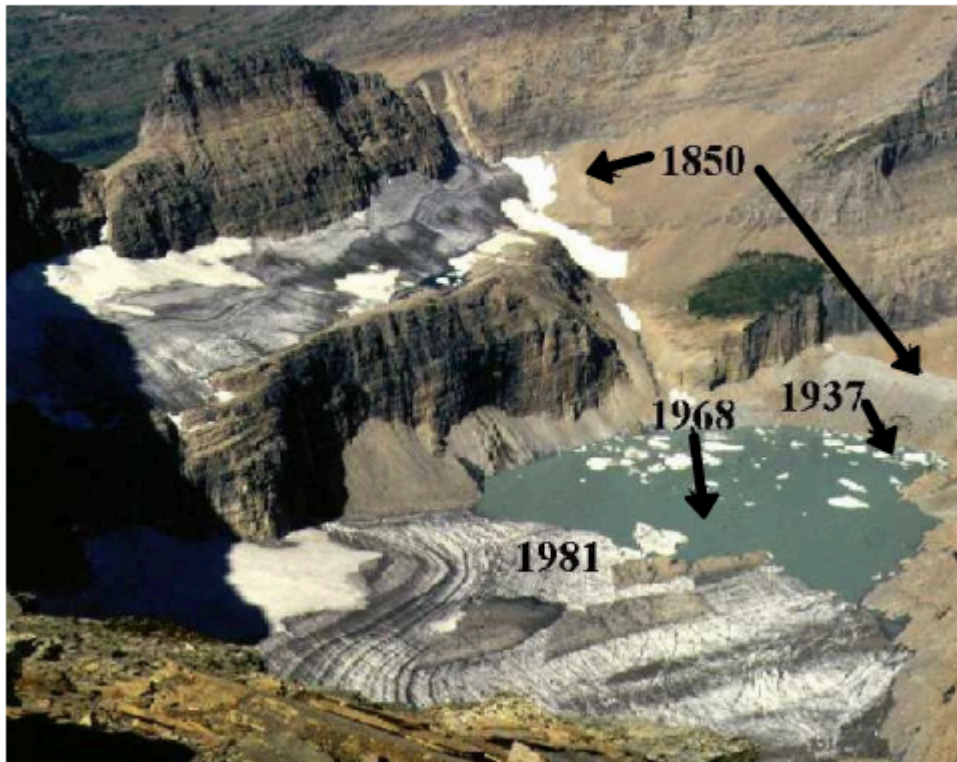
Les conséquences vont dépendre de l'évolution des émissions de GES. Cependant, toutes prévoient à court terme une augmentation de la température globale de la planète. Cette augmentation de température entraîne toute une série de modifications des écosystèmes et des conditions de vie des êtres humains.

Les modifications du biotope concernent :

- la fonte des neiges, des glaces ;
- les crues ou la sécheresse des cours d'eau et lacs ;
- l'érosion des côtes, l'élévation du niveau de la mer.

EXEMPLE

Recul du glacier Grinnell

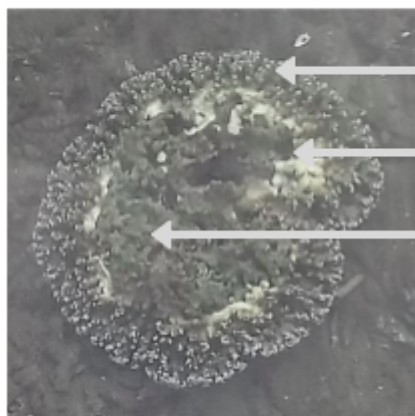


© Wikimedia Commons

Les conséquences d'une augmentation d'émission des GES sur la biocénose sont une modification du peuplement des écosystèmes marins et terrestres, une extinction d'espèces, des feux de forêts incontrôlés.

EXEMPLE

La mort des coraux (blanchiment) induite par le réchauffement de l'océan



Corail vivant

Couronne blanche :
corail en train de mourir

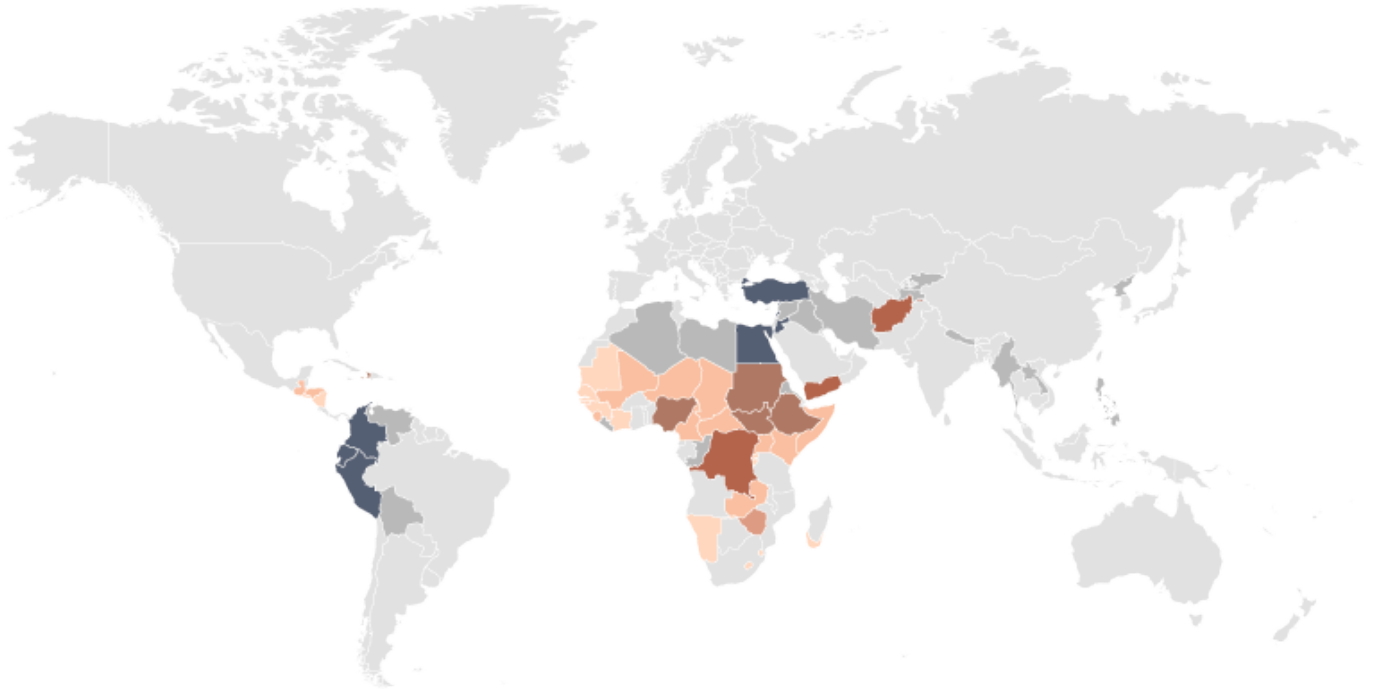
Corail mort

Les conséquences de l'augmentation de la température globale du globe terrestre sur les conditions de vie des êtres humains sont :

- des difficultés d'accès ou de production des ressources alimentaires ;
- des problèmes de santé et/ou économiques ;

- des destructions de constructions liées aux phénomènes climatiques de plus en plus nombreux et violents.

Estimation du nombre de personnes souffrant d'insécurité alimentaire aiguë et nécessitant une action urgente en 2020



- < 1 million
- 1 - 2,99 millions
- 3 - 4,99 millions
- 5 - 9,99 millions
- > 10 millions
- Données insuffisantes
- Populations migrantes/réfugiées

© FSIN (Food Security Information Network)



B L'évaluation des risques à l'échelle mondiale

Les modifications engendrées par le réchauffement climatique ne sont pas les mêmes selon le niveau de développement du pays ou de sa zone géographique. Une carte des risques est établie en prenant en compte les aléas et la vulnérabilité des enjeux.

Un risque est défini par la combinaison d'un aléa et d'un enjeu : $ALÉA \times ENJEU = RISQUE$.

En effet, si l'aléa est important, mais l'enjeu est nul, alors le risque est nul.

Un ouragan force 4 est annoncé au milieu de l'Atlantique.

L'aléa est important (ouragan), mais l'enjeu est nul (pas de constructions), donc le risque est nul.

DÉFINITION

Aléa

Un aléa est un événement d'origine naturelle ou humaine, plus ou moins prévisible.

DÉFINITION

Enjeu

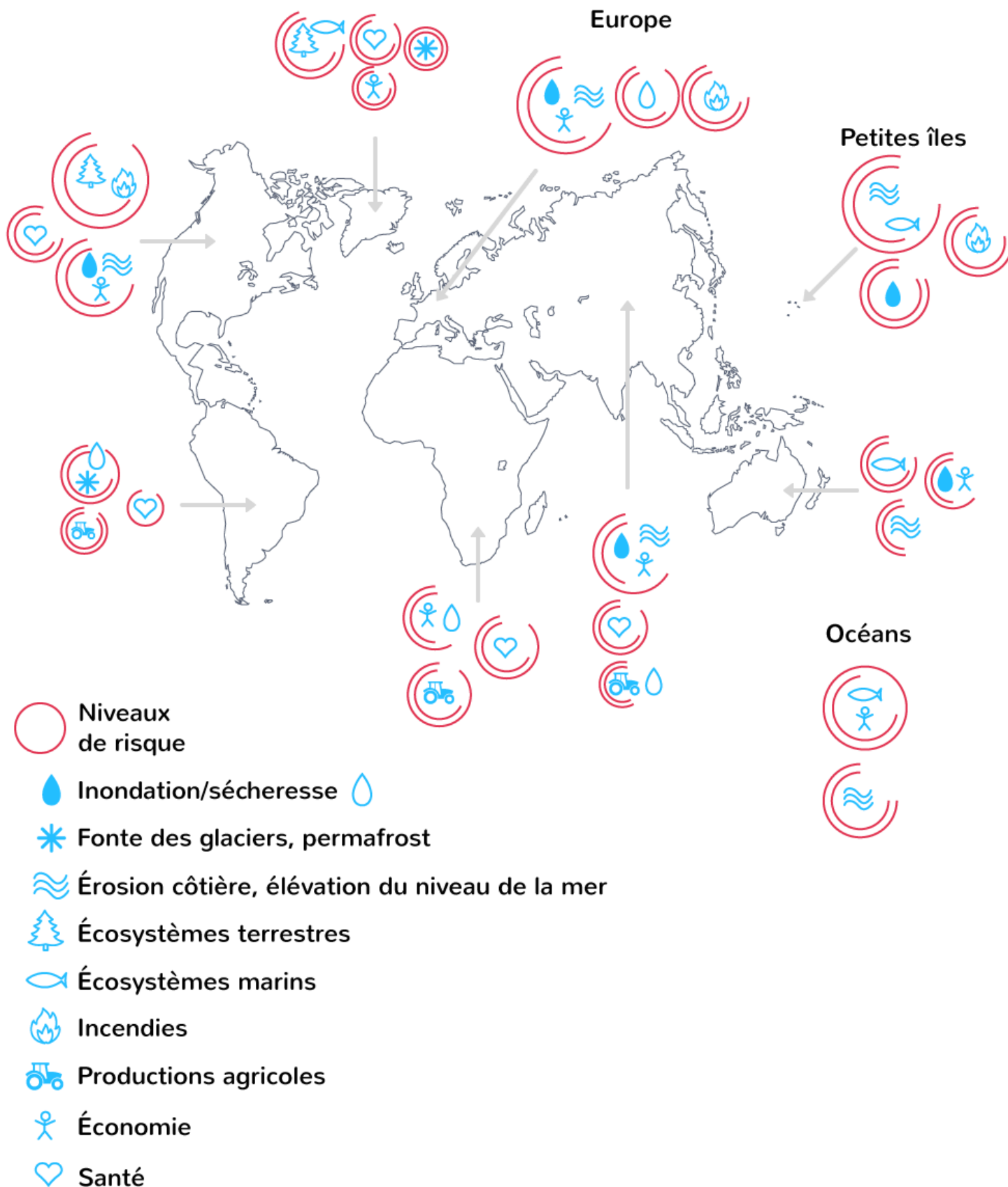
Un enjeu représente les humains, les biens ou les infrastructures susceptibles d'être affectés par un aléa.

Les scénarios de réchauffement climatique prévoient des risques sur différents systèmes :

- les systèmes physiques (glaciers, précipitations, niveau des mers) ;
- les systèmes biologiques (écosystèmes terrestres et marins) ;
- les systèmes humains (agriculture, santé, économie).

Les risques sont établis par région car ils dépendent des enjeux.

Carte des principaux risques dans le monde



C Les mesures d'adaptation et d'atténuation

L'atténuation et l'adaptation sont deux stratégies complémentaires qui permettent de réduire les risques liés au changement climatique et d'y faire face. Ces mesures nécessitent une coopération internationale, des changements de comportements et une accélération de l'innovation technologique.

L'atténuation consiste à réduire les effets du réchauffement climatique.

EXEMPLE

Faire le choix des énergies renouvelables en remplacement des énergies fossiles.

Le choix des énergies renouvelables doit se faire en fonction des conditions climatiques de la région. En effet, installer des panneaux photovoltaïques dans une région où l'ensoleillement est moyen n'est pas un choix pertinent.

EXEMPLE

Centrale photovoltaïque installée dans le désert



© Wikimedia Commons



L'adaptation consiste à prendre les mesures nécessaires pour limiter les dégâts provoqués par un aléa.

EXEMPLE

Construire des digues pour limiter les inondations liées à l'élévation du niveau de la mer.

Construction d'une digue aux Pays-Bas afin d'éviter les inondations par la mer



© Wikimedia Commons

Des accords internationaux sont signés afin de limiter les émissions de GES et le réchauffement climatique. L'évolution vers un nouveau modèle économique et social permettant de répondre aux enjeux environnementaux et sociaux du réchauffement climatique se nomme la transition écologique.

Ce nouveau modèle de développement durable exige :

- plus d'investissements dans l'adaptation et l'atténuation ;
- des changements de comportements, notamment de consommation ou de transport ;
- l'accélération de l'innovation technologique.