

1 Science, climat et société

1.1 L'atmosphère terrestre et la vie

1.2 La complexité du système climatique

1.3 Le climat du futur

1.4 Énergie, choix de développement et futur climatique

1.4.1 Énergie primaire et énergie secondaire

Une source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Si elle n'est pas utilisable directement, elle doit être transformée en une source d'énergie secondaire pour être mise en œuvre.

Ainsi l'énergie liée au vent, transformée en électricité peut être utilisée pour l'éclairage, le chauffage,

1.4.2 Les différents types d'énergie primaire

Le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont issus d'organismes (animaux ou végétaux) qui vivaient il y a des millions d'années et qui se sont fossilisés. C'est pour cela qu'on les nomme les « énergies fossiles ». Ces énergies fossiles forment des stocks d'énergie chimique que l'on peut libérer en les brûlant.

L'uranium est un métal faisant partie de la centaine d'éléments qui constituent la Terre. Présent depuis la formation de la Terre, l'uranium forme un stock d'énergie nucléaire que l'on peut libérer en cassant le noyau de ses atomes (réaction de fission nucléaire).

Outre les stocks d'énergie ci-dessus, les énergies primaires sont aussi présentes sous forme de flux (ou d'écoulements) : le rayonnement du Soleil, la chaleur fournie par l'intérieur de la Terre, les effets de marée du Soleil et de la Lune.

1.4.3 Les unités de l'énergie

En physique, la quantité d'énergie doit s'exprimer en Joule (symbole J) mais de nombreuses autres unités sont utilisées :

- en électricité, on utilise le Wh (le watt-heure représente 3 600 J) et ses multiples comme le kWh (1,0 kilowatt-heure = 1 000 Wh = $3,6 \cdot 10^6$ J)
- pour comparer différentes formes d'énergie entre elles, on utilise la TEP (la tonne d'équivalent pétrole = 42 GJ = $42 \cdot 10^{12}$ J)

1.4.4 La puissance

L'énergie représente plutôt le résultat d'une action (on a monté une valise au 1^{er} étage) mais la puissance y ajoute la notion de temps (on a monté la valise plus ou moins vite au 1^{er} étage). Plus l'action se fait rapidement, plus la puissance est grande.

Puissance et énergie sont liées : $E = P * t$

En physique, l'unité de la puissance est le watt (symbole W = $J \cdot s^{-1}$).

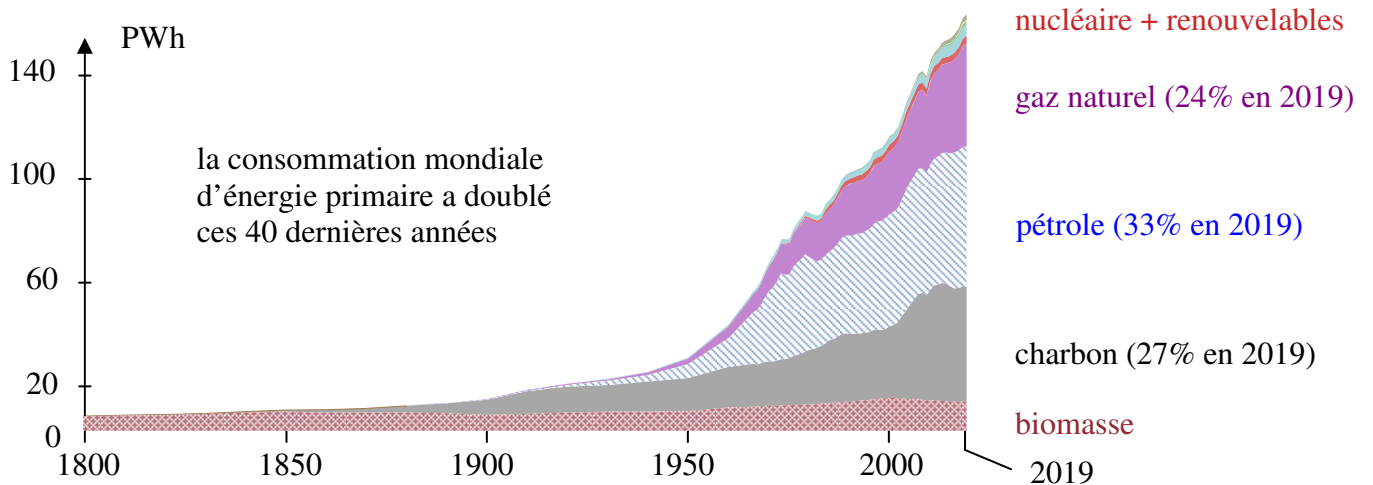
1.4.5 Quelques ordres de grandeur de puissance

Rappel l'ordre de grandeur est la mesure approximative d'une grandeur physique.
En pratique, l'ordre de grandeur est la puissance de 10 la plus proche de la mesure exacte.

	corps humain au repos	rayonnement du Soleil sur 1 m ² de surface terrestre	fer à repasser électrique	centrale électrique nucléaire
ordre de grandeur de puissance (en W)	10 ²	10 ²	10 ³	10 ⁹

1.4.6 La consommation d'énergie dans le monde

Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire (en PWh = 10^{15} Wh)



La croissance de la consommation mondiale d'énergie a été rendue possible par l'accès au stock des énergies fossiles (à partir de 1850 pour le charbon).

L'accès aux énergies fossiles a suscité des innovations technologiques qui, à leur tour, ont fait émerger de nouvelles sources d'énergie et ont stimulé leur consommation.

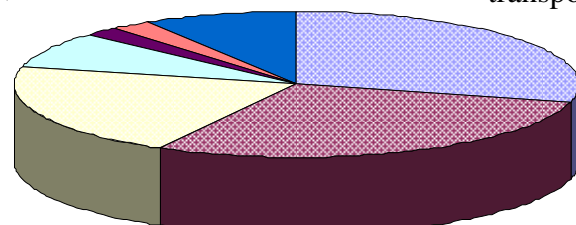
Cette rétroaction (action en retour d'un effet sur sa propre origine) explique la croissance exponentielle de la consommation mondiale d'énergie à partir de 1850.

Consommation mondiale d'énergie par secteur (en %)

autres usages (comme l'agriculture, la pêche, la pétrochimie, ... 21%

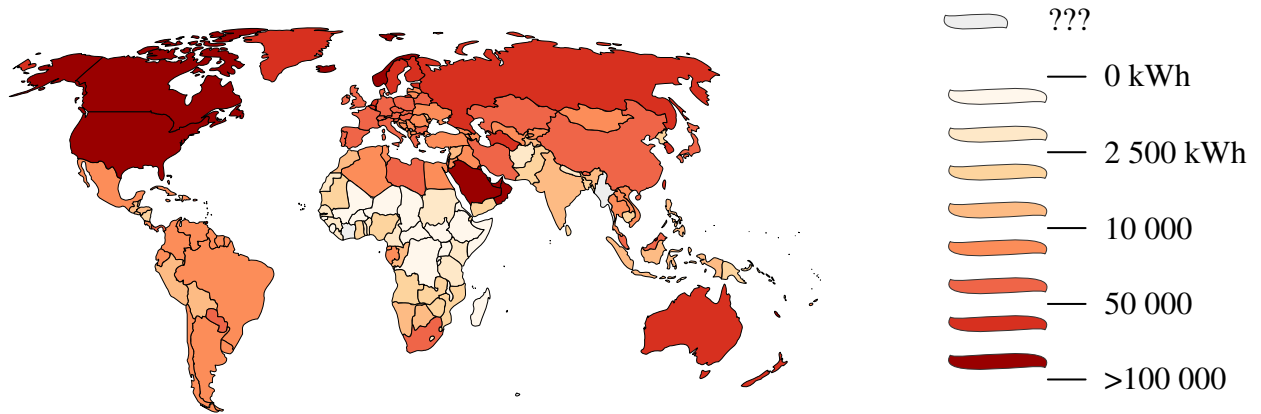
transport 29%

habitat 21%



industrie 29%

La consommation mondiale d'énergie se répartie à parts comparables entre l'industrie, les transports, l'habitat et les autres usages.



Le niveau de développement d'un pays a une forte influence sur sa consommation. Un nord-américain consomme environ 15 fois plus d'énergie qu'un africain.

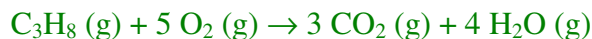
1.4.7 Réactions de combustion

Un combustible libère son énergie chimique lors d'une combustion avec le dioxygène O₂ de l'air. Les combustibles les plus utilisés sont les combustibles fossiles et la biomasse.

Les réactions de combustion libèrent du dioxyde de carbone CO₂, des aérosols (fines particules solides ou liquides) et d'autres gaz (protoxyde d'azote N₂O, ozone O₃, dioxyde de soufre SO₂, ...) qui affectent la qualité de l'air respiré et nuit à la santé.

Exemple

Equation de réaction de la combustion complète* du propane avec le dioxygène de l'air:



* lors d'une combustion incomplète, il n'y a pas assez de dioxygène et l'équation de réaction est différente. Le monoxyde de carbone CO ou le carbone C font alors partie des produits.

Données énergie massique du propane : $E_{\text{massique}} (\text{C}_3\text{H}_8) = 50 \text{ MJ.kg}^{-1}$
 masses molaires : $M (\text{C}_3\text{H}_8) = 44,1 \text{ g.mol}^{-1}$ $M (\text{CO}_2) = 44,0 \text{ g.mol}^{-1}$

1) quantité de CO₂ (= nombre de moles) formée lors de la combustion d'une mole de propane ?

$$\frac{n_f(\text{CO}_2)}{3} = \frac{n_i(\text{C}_3\text{H}_8)}{1} \quad \rightarrow \quad n_f(\text{CO}_2) = 3 * n_i(\text{C}_3\text{H}_8) = 3,0 \text{ moles}$$

2) passage aux masses (formule de 2nd : $m = n * M$)

$$m_i(\text{C}_3\text{H}_8) = 1,0 * M (\text{C}_3\text{H}_8) = 1,0 * 44,1 = 44,1 \text{ g}$$

$$m_f(\text{CO}_2) = n_f(\text{CO}_2) * M (\text{CO}_2) = 3,0 * 44,0 = 132 \text{ g}$$

3) masse de CO₂ formée lors de la combustion d'un kg de propane ?

$$0,0441 \text{ kg C}_3\text{H}_8 \rightarrow 0,132 \text{ kg CO}_2$$

$$1,0 \text{ kg C}_3\text{H}_8 \rightarrow m_{\text{kg combustible}}(\text{CO}_2)$$

$$m_{\text{kg combustible}}(\text{CO}_2) = 1,0 * 0,132 / 0,0441 = 3,0 \text{ kg}$$

4) masse de CO₂ formée par unité d'énergie (ici le MJ) dégagée par la combustion du combustible ?

$$3,0 \text{ kg CO}_2 \rightarrow 50 \text{ MJ}$$

$$m_{\text{unité d'énergie}}(\text{CO}_2) \rightarrow 1,0 \text{ MJ}$$

$$m_{\text{unité d'énergie}}(\text{CO}_2) = 1,0 * 3,0 / 50 = 0,060 \text{ kg}$$

1.4.8 L'empreinte carbone

L'empreinte carbone d'un objet ou d'une personne est la masse de CO₂ produite par sa consommation d'énergie et de matière première.

Exemple empreinte carbone d'une voiture à moteur thermique tout au long de son cycle de vie

extraction et traitement des matières premières \Rightarrow émissions de 14 tonnes de CO₂



transport des matières premières jusqu'aux usines, fabrication des pièces, transport des pièces, assemblage du véhicule, transport du véhicule jusqu'au point de vente \Rightarrow émissions de 2,1 tonnes de CO₂



utilisation du véhicule et maintenance \Rightarrow émissions de 41 tonnes de CO₂



démantèlement du véhicule \Rightarrow émissions de 0,6 tonnes de CO₂

La « compensation carbone » d'une activité consiste à financer des opérations de réduction d'émission ou de séquestration de CO₂, quelque part ailleurs dans le monde, pour contrebalancer les émissions de CO₂ de cette activité.

On équilibre ainsi entrée et sortie de CO₂ dans l'atmosphère pour obtenir un bilan nul (neutralité carbone).

Exemple

La ville de Paris prévoit la neutralité carbone en 2050. Pour satisfaire cet objectif plusieurs mesures sont nécessaires :

- réduire les émissions de CO₂ de 80% en alimentant la ville en énergies renouvelables et en imposant des véhicules zéro émission d'ici 2030
- compenser les émissions de CO₂ qui ne pourront disparaître (transport aérien et alimentation qui représentent 20% des émissions) par la compensation carbone (cuiseurs améliorés, fabrication de biogaz, pompes à eau solaires , ... dans les pays en développement ; replantation de forêts ; changement de certaines pratiques agricoles pour favoriser le stockage du carbone dans le sol)

1.4.9 Scenarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre

Les rapports du Giec (Groupes d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) synthétisent l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique.

Les rapports du Giec s'appuient sur des modélisations du climat (des planètes virtuelles). Les systèmes climatiques informatiques sont initialement alimentés avec des mesures réalisées sur Terre puis on fait augmenter la concentrations des gaz à effet de serre (chaque concentration correspond à un scénario possible du futur).

Les résultats des simulations permettent d'évaluer les changements prévisibles du climat affectant les écosystèmes et les êtres humains et ainsi orienter les décisions politiques et anticiper les mesures d'adaptation.

2 Le futur des énergies

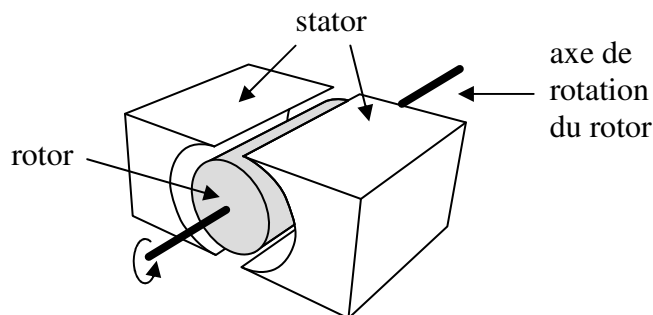
1.1 Deux siècles d'énergie électrique

2.1.1 L'alternateur électrique

L'alternateur électrique exploite le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday puis théorisé par Maxwell au 19ème siècle.

Principe

L'alternateur électrique permet la conversion de travail mécanique en travail électrique



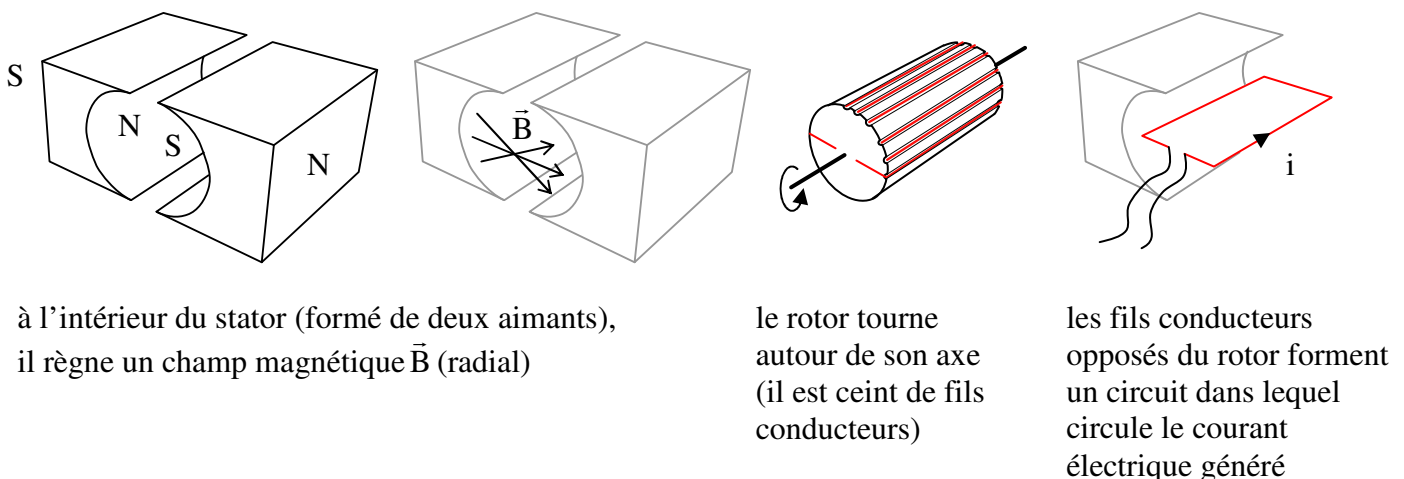
Constitution

Un stator (formé de deux aimants) et un rotor (voir schéma)

Fonctionnement

Pour déplacer le rotor, il faut fournir du travail mécanique (par exemple : les pales d'une éolienne qui tournent).

Il apparaît un courant électrique dans un fil conducteur du rotor en mouvement dans le champ magnétique du stator (phénomène d'induction électromagnétique).



Rendement

Le rendement de l'alternateur électrique est donné par la relation :

$$\eta = \frac{W_e}{W_m}$$

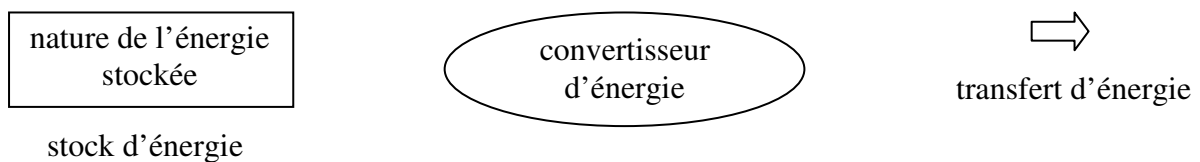
η : rendement de l'alternateur ; sans unité

W_e : travail électrique fourni par l'alternateur ; en J

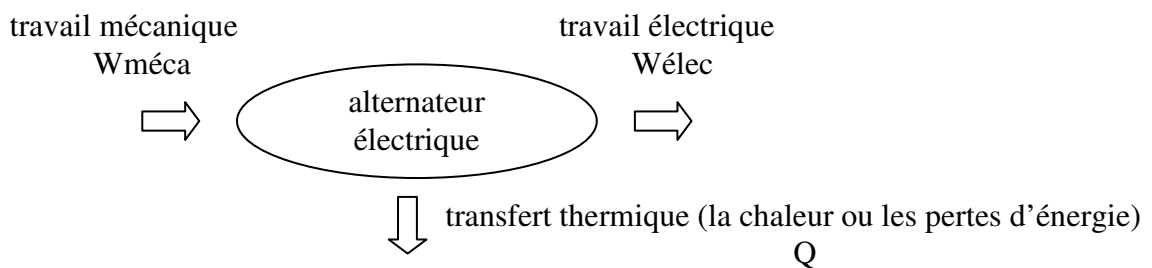
W_m : travail mécanique reçu par l'alternateur ; en J

Phénomènes susceptibles d'influencer le rendement

Pour dessiner une chaîne énergétique on utilise 3 symboles :



Lors de la transformation d'une forme d'énergie en une autre, une partie de l'énergie est nécessairement dégradée sous forme de transfert thermique (appelée la chaleur).



Quand les pertes d'énergie augmentent ($Q \nearrow$), le rendement baisse ($\eta \searrow$).

Les pertes d'énergie dans un alternateur électrique sont dues : à l'effet joule dans les conducteurs électriques, aux courants de Foucault dans les matériaux ferromagnétiques, aux frottements mécaniques.

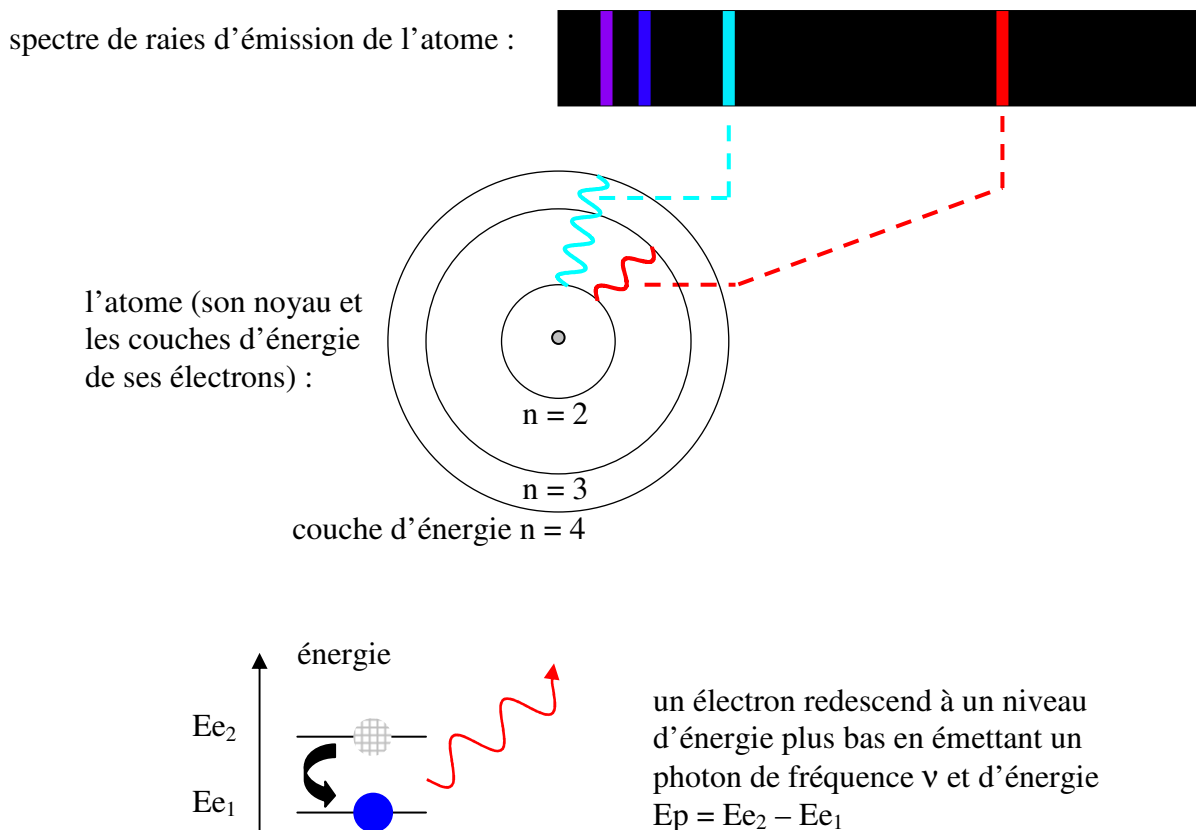
Le rendement des alternateurs électriques de haute qualité peut être proche de 1, ce qui signifie que le travail mécanique reçu par l'alternateur est presque totalement converti en travail électrique.

2.1.2 Spectre d'émission atomique

En 1913, le physicien danois Niels Bohr établit un lien les raies d'un spectre d'émission d'un atome et les couches d'énergie de ses électrons :

Si on lui fournit de l'énergie, un électron peut changer de couche et passer à un niveau d'énergie supérieure. L'électron se trouve alors dans un état excité.

L'électron excité est instable. Il évolue, plus ou moins rapidement, vers un état plus stable. C'est à dire un état de plus faible énergie. Il restitue sous forme d'un photon cette différence d'énergie.

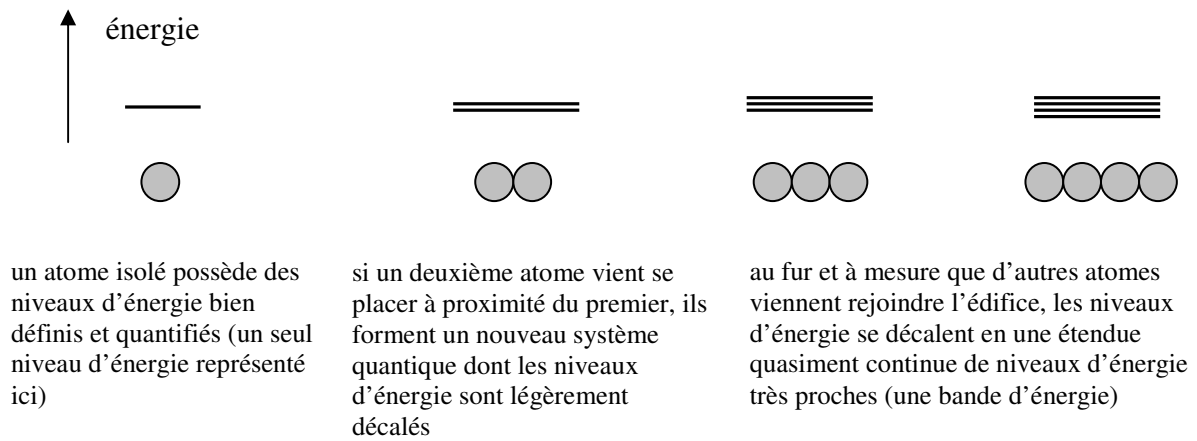


2.1.3 Effet photoélectrique dans les semi-conducteurs

Dans un matériau solide, les électrons sont répartis en bandes d'énergie.

Explication

la formation des bandes d'énergie dans un matériau solide est un comportement quantique de la matière :

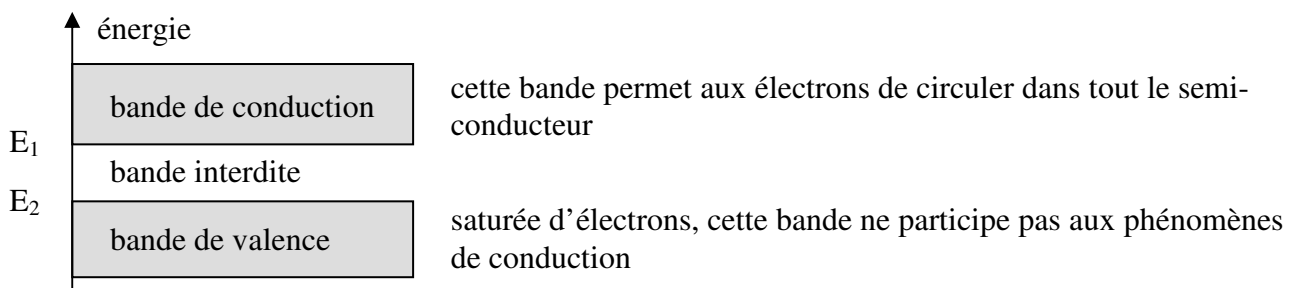


Le gap dans un semi-conducteur

La dernière bande d'énergie saturée d'électrons est nommée bande de valence.

La bande de conduction suit la bande de valence ; elle peut être vide ou partiellement remplie d'électrons.

L'énergie qui sépare la bande de valence de la bande de conduction est appelée le « gap ».



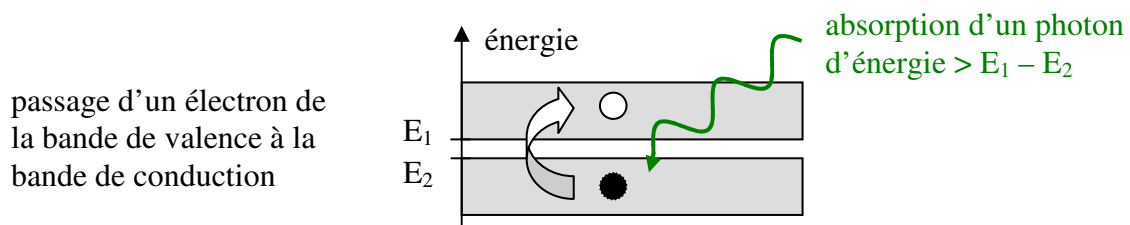
Pour un semi-conducteur le $GAP \approx 1 \text{ eV}$ ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Pour un conducteur électrique, il n'y a pas de « gap » (les bandes de valence et de conduction se chevauchent)

Pour un isolant électrique, la valeur du « gap » est très importante.

Exemple

Un électron d'un matériau semi-conducteur peut passer de la bande de valence à la bande de conduction si on lui fournit de l'énergie (par exemple sous forme de lumière).



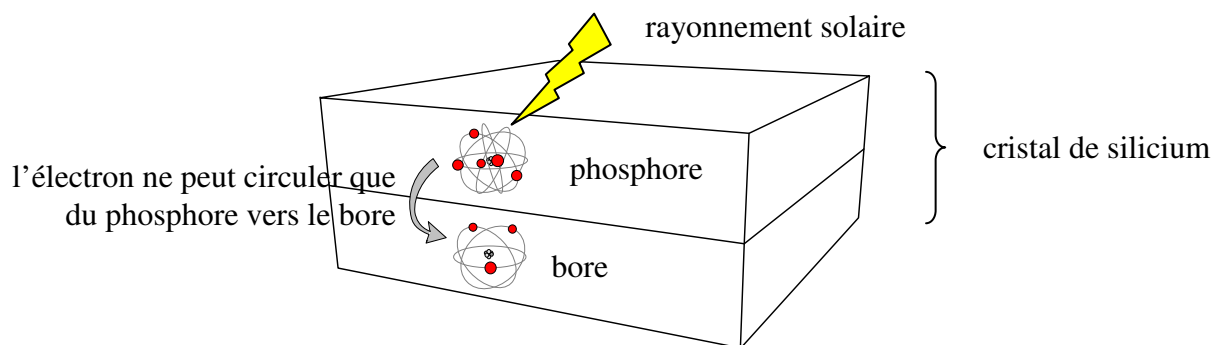
2.1.4 Les capteurs photovoltaïques

Principe

Les matériaux semi-conducteurs (en particulier le silicium) peuvent absorber le rayonnement solaire et le convertir en travail électrique.

Fonctionnement

La jonction entre deux parties d'un cristal de silicium contenant des impuretés (phosphore d'un côté et bore de l'autre) va obliger les électrons (mis en mouvement par la lumière dans la bande de conduction) à ne circuler que dans un seul sens (ce qui est, par définition, un courant électrique). Ce courant électrique est utilisé pour fournir de l'électricité.

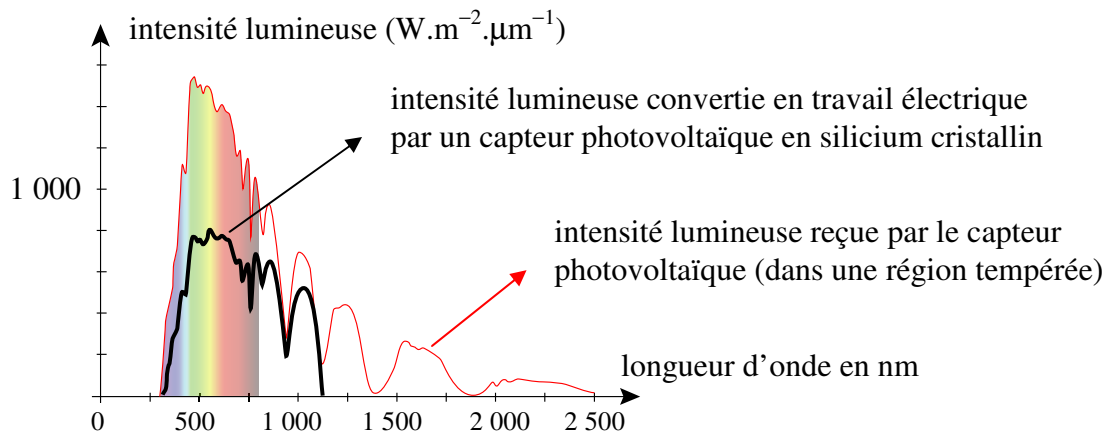


Rendement

Un capteur photovoltaïque au silicium cristallin ne convertira qu'une partie du spectre des ondes électromagnétiques (comme représenté sur la figure ci-dessous). Le rendement de cette conversion est donnée par la relation :

$$\eta = \frac{W_e}{Q_{\text{ray}}}$$

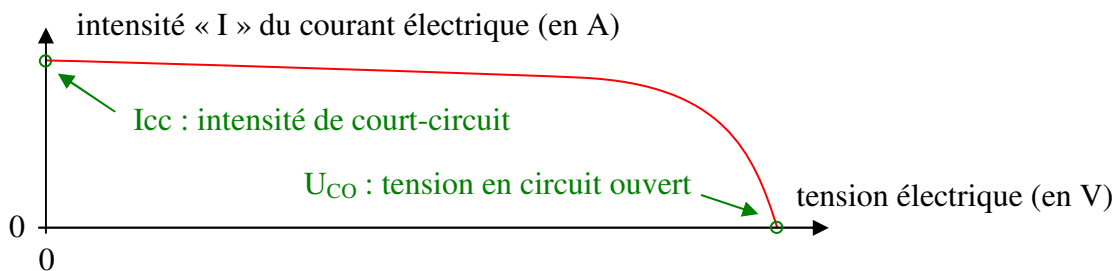
- η : rendement du capteur photovoltaïque ; sans unité
- W_e : travail électrique fourni par le capteur photovoltaïque ; en J
- W_m : transfert thermique par rayonnement reçu par le capteur photovoltaïque ; en J



Caractéristique courant-tension

L'intensité « I » du courant électrique généré par le capteur photovoltaïque et la tension électrique « U » à ses bornes, dépendent à la fois du capteur lui-même (sa technologie de construction par exemple) mais aussi de ce qui est connecté à ses bornes (un appareil électrique par exemple que l'on appelle « une charge »).

Comme un résistor ou un générateur de tension (vus en 2nd), un capteur photovoltaïque dispose de sa propre caractéristique courant-tension :



Puissance électrique maximale délivrée

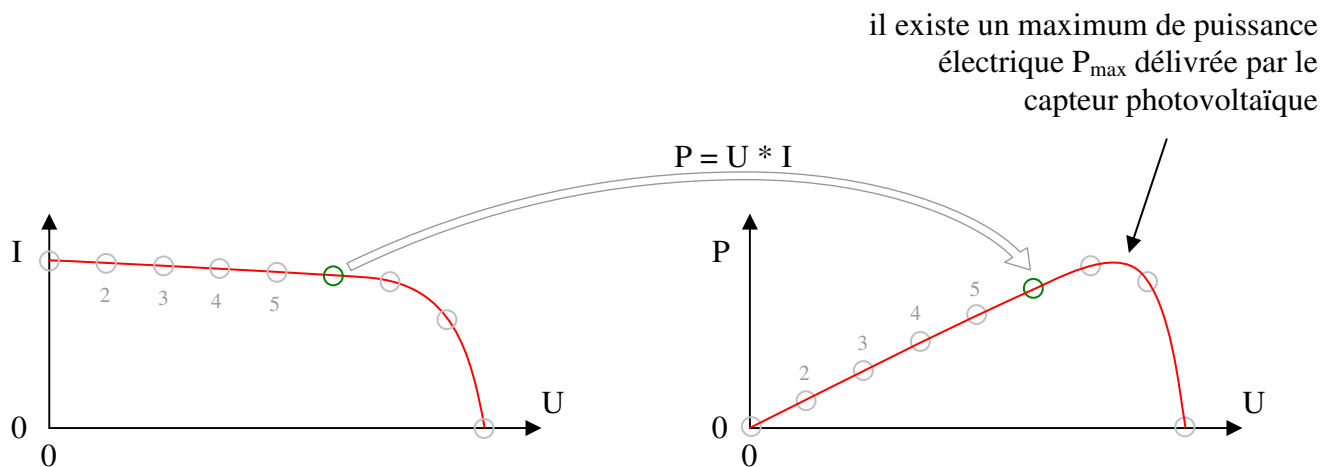
Pour chaque point (I, U) de la caractéristique courant-tension, on peut calculer la puissance électrique P délivrée par le capteur photovoltaïque :

$$P = U * I$$

P : puissance électrique délivrée par le capteur photovoltaïque ; en W

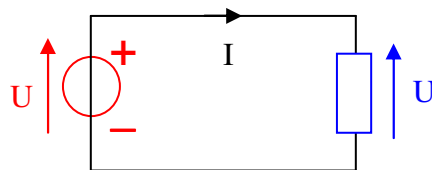
U : tension électrique aux bornes du capteur photovoltaïque ; en V

I : intensité du courant électrique généré par le capteur photovoltaïque ; en A



Résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée

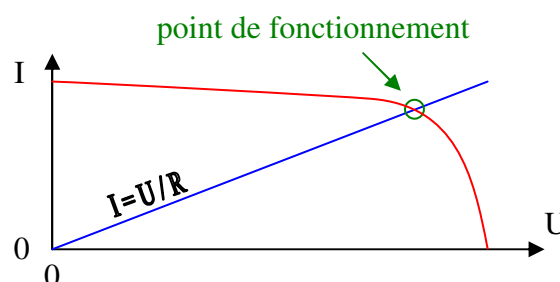
On associe le capteur photovoltaïque (un générateur) avec un résistor (un récepteur) :



On trace (comme vu en 2nd) sur le même graphique, les caractéristiques courant-tension de chaque dipôle (le capteur photovoltaïque et le résistor).

L'intersection des deux courbes est appelée le point de fonctionnement.

L'abscisse et l'ordonnée du point de fonctionnement définissent les valeurs de U et I quand ces deux dipôles sont associés.



Si le point de fonctionnement correspond à la puissance électrique maximale délivrée par le capteur photovoltaïque, on peut en déduire la valeur de la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée :

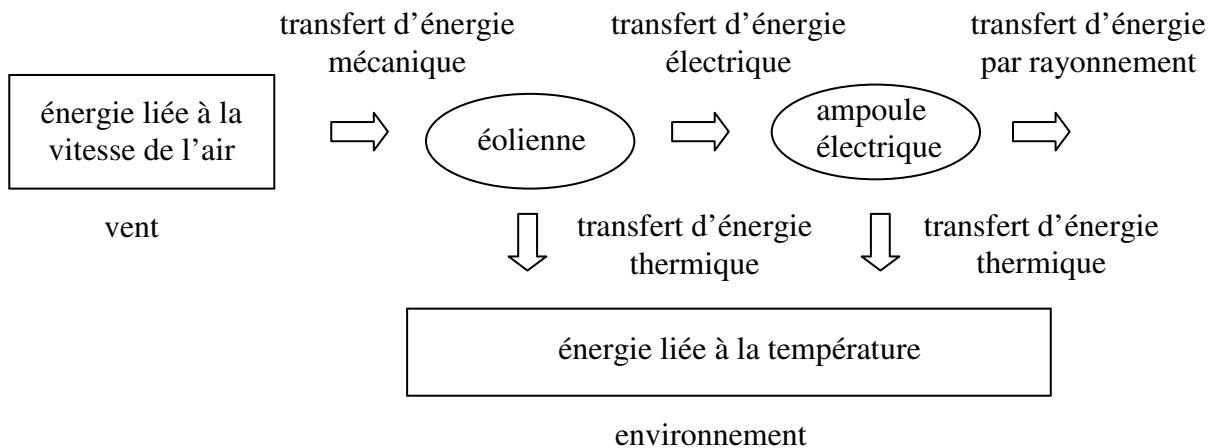
$$R = \frac{U_{\max}}{I_{\max}}$$

- R :** résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée par le capteur photovoltaïque ; en Ω
- U_{\max} :** tension électrique aux bornes du capteur photovoltaïque quand la puissance électrique délivrée par le capteur photovoltaïque est maximale ; en V
- I_{\max} :** intensité du courant électrique généré par le capteur photovoltaïque quand la puissance électrique délivrée par le capteur photovoltaïque est maximale ; en A

1.2 Les atouts de l'électricité

2.2.1 Chaînes de transformations énergétiques

L'énergie liée au vent, transformée en électricité peut être utilisée pour l'éclairage, le chauffage, Cette série de transferts / conversions forme une chaîne de transformations énergétiques :



Rendement d'une chaîne de transformations énergétiques

Lors de la transformation, par un convertisseur, d'une forme d'énergie en une autre, une partie de l'énergie est nécessairement dégradée sous forme de transfert thermique (appelée chaleur).

Le rendement d'un convertisseur est donné par la relation :

$$\eta = \frac{W_{\text{utile}}}{W_{\text{entrant}}}$$

η : rendement d'un convertisseur de la chaîne de transformations énergétiques ; sans unité

W_{utile} : travail utilisable en sortie du convertisseur ; en J

W_{entrant} : travail reçu par le convertisseur ; en J

Le rendement global d'une chaîne de transformations énergétiques est le produit des rendements de chaque convertisseur :

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_1 * \eta_2 * \dots$$

2.2.2 Les alternatives aux énergies fossiles

Il est possible d'obtenir de l'énergie électrique sans combustion d'énergie fossile :

- la conversion d'énergie mécanique, soit directe (centrales éolienne, hydrolienne, hydraulique), soit indirecte à partir d'énergie thermique (centrales nucléaire, solaire thermique, géothermique)
- la conversion de l'énergie radiative reçue du Soleil (centrales photovoltaïques)

2.2.3 Le stockage de l'énergie

Le tableau suivant montre les techniques actuelles pour stocker l'énergie équivalente à un 1,0 kg de pétrole :

batteries au plomb	hydrogène comprimé	eau en altitude	chaleur
+ de 300 kg de batteries	de 15 à 30 kg de réservoir, occupant un peu moins de 30 litres	43 tonnes d'eau pouvant effectuer 100 m de chute	10°C d'élévation de la température d'1 tonne d'eau

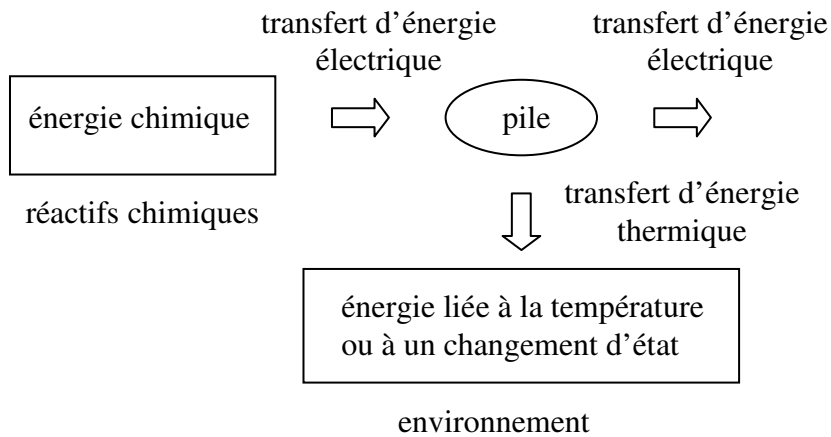
Les énergies fossiles sont faciles à stocker mais leur combustion perturbe le climat et les réserves s'épuisent.

Les piles et les accumulateurs auront probablement un rôle important pour résoudre le défi du stockage de l'énergie car les centrales éolienne et solaires ne permettent d'obtenir de l'énergie électrique que de manière intermittente (pas disponible en permanence).

2.2.4 Piles et accumulateurs

Les piles, les piles à combustible et les accumulateurs sont des convertisseurs électrochimiques d'énergie. Ils mettent en jeu des transformations chimiques spontanées.

Chaîne de transformations énergétiques associée à une pile



Différences entre les différents convertisseurs électrochimiques

Les piles ont une durée de vie limitée par la quantité de réactifs qu'elles contiennent. Les piles à combustible n'ont pas cette limitation puisque les réactifs sont apportés en continu de l'extérieur.

Les accumulateurs fonctionnent sur le même principe que les piles mais ils sont réversibles : l'apport d'électricité lors de la charge force la transformation chimique inverse à celle qui se produit spontanément lors de la décharge.

2.2.5 Impacts de la production et du stockage d'énergie électrique sans combustion

Les méthodes de production et de stockage d'énergie électrique sans combustion ont un impact sur l'environnement et la biodiversité.

Exemple

Un barrage hydroélectrique avec une retenue d'eau artificielle induit très souvent des déplacements de population et la disparition de zones agricoles au moment de sa construction.

L'eau de la retenue peut être sous-oxygénée (par manque de brassage) et provoquer l'asphyxie des animaux aquatiques.

Le barrage freine ou bloque la circulation des sédiments, ce qui provoque des envasements en amont, le creusement du lit du cours d'eau et l'érosion des rives en aval.

1.3 Optimisation du transport de l'électricité

2.3.1 Rappel de formules d'électricité

Puissance et énergie sont liées : $P = E * t$

P : puissance ; en W (watt ou $J.s^{-1}$)

E : énergie ; en J

t : durée du phénomène ; en s

Puissance électrique : $P = U * I$

P : puissance ; en W

U : tension électrique ; en V

I : intensité du courant électrique ; en A

Loi d'Ohm $U = R * I$

(attention ! cette loi n'est utilisable qu'aux bornes d'un résistor)

R : résistance du conducteur ohmique (ou résistor) ; en Ω (ohm)

U : tension électrique aux bornes du résistor ; en V

I : intensité du courant électrique qui circule dans le résistor ; en A

2.3.2 L'effet joule

Le passage du courant électrique dans un câble conducteur génère une perte d'énergie sous forme de chaleur. On appelle ce phénomène : l'effet joule.

La perte d'énergie, par effet joule, dépend de l'intensité « I » du courant électrique qui circule dans le conducteur ohmique :

$$P_{\text{joule}} = R * I^2$$

R : résistance électrique du conducteur ohmique ; en Ω

P_{joule} : puissance dissipée par effet joule dans le conducteur ohmique ; en W

I : intensité du courant électrique qui circule dans le conducteur ohmique ; en A

La perte d'énergie, par effet joule, dépend aussi de la résistance « R » du conducteur électrique . La résistance d'un câble dépend de sa longueur et donc le chemin le plus court entre la centrale électrique et le consommateur final permet de réduire cette perte d'énergie.

2.3.3 Limiter les pertes par effet Joule

Pour une même puissance transportée par les lignes du réseau électrique, il est plus intéressant d'utiliser une haute tension :

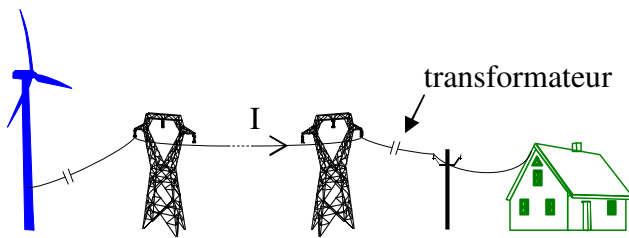
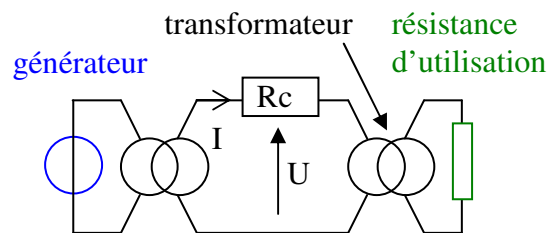


schéma électrique unifilaire (tous les conducteurs électriques d'une section sont représentés par un seul trait). Les câbles électriques ont une résistance électrique totale « Rc »



dans ce schéma, la résistance électrique totale des câbles haute tension est représentée par Rc (on suppose que les fils n'ont pas de résistance)

La puissance dissipée par les câbles par effet joule est :

$$P_{\text{joule}} = R_c * I^2$$

Pour minimiser cette perte, on doit diminuer (le plus possible) l'intensité I du courant électrique. La puissance électrique $P = U * I$ délivrée par le générateur étant constante, il faut augmenter la tension électrique U :

$$P \rightarrow ; U \nearrow ; I \searrow$$

1.4 Choix énergétiques et impacts sur les sociétés

2.4.1 Le choix de l'énergie nucléaire en France

A la suite du 1er choc pétrolier de 1973, la France a construit 18 centrales nucléaires. Ces centrales nucléaires assurent, en 2021, 77% de la production totale d'électricité.

Depuis la fin du 20ème siècle, dans le monde, s'opère une transition vers les énergies renouvelables pour la production d'électricité.

Cette transition énergétique est motivée par l'impact sur le climat de la combustion des énergies fossiles ainsi qu'aux accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima.

La France n'adhère que peu à cette transition énergétique et préfère continuer à produire son électricité à partir de ses centrales nucléaires.

L'industrie nucléaire produit des déchets dangereux mais les énergies renouvelables utilisent massivement des minéraux et des métaux rares extraits des mines et cette extraction minière est très polluante.

2.4.2 Le choix de l'abandon du nucléaire en Allemagne

Après la catastrophe de Fukushima au Japon en 2011, l'Allemagne a décidé d'abandonner définitivement la production d'électricité à partir de centrales nucléaires.

Historiquement, l'Allemagne a toujours utilisé beaucoup de charbon pour produire son électricité (+ 60% en 1990), mais la part du charbon dans son « mix énergétique » diminue régulièrement.

L'utilisation de l'énergie nucléaire et du charbon étant amenée à disparaître, l'Allemagne a décidé d'utiliser massivement les énergies renouvelables pour produire son électricité.

Les énergies renouvelables sont intermittentes et quand il n'y a pas de vent ni de Soleil, l'Allemagne importe massivement du gaz naturel russe pour produire son électricité.

La combustion du gaz naturel émet du dioxyde de carbone (c'est un combustible fossile) qui va gêner l'Allemagne pour atteindre ses objectifs de réduction d'émission de gaz à effet de serre.