

Un peu de Science pour comprendre le monde moderne

L'énergie dans tous ses états

[Bernard Remaud](#)

bernard.remaud@univ-nantes.fr
<https://www.un-peu-de-physique.fr>



La chaîne YouTube



Le blog

L'énergie dans tous ses états

Les formes d'énergie à notre échelle et leurs transformations

2026

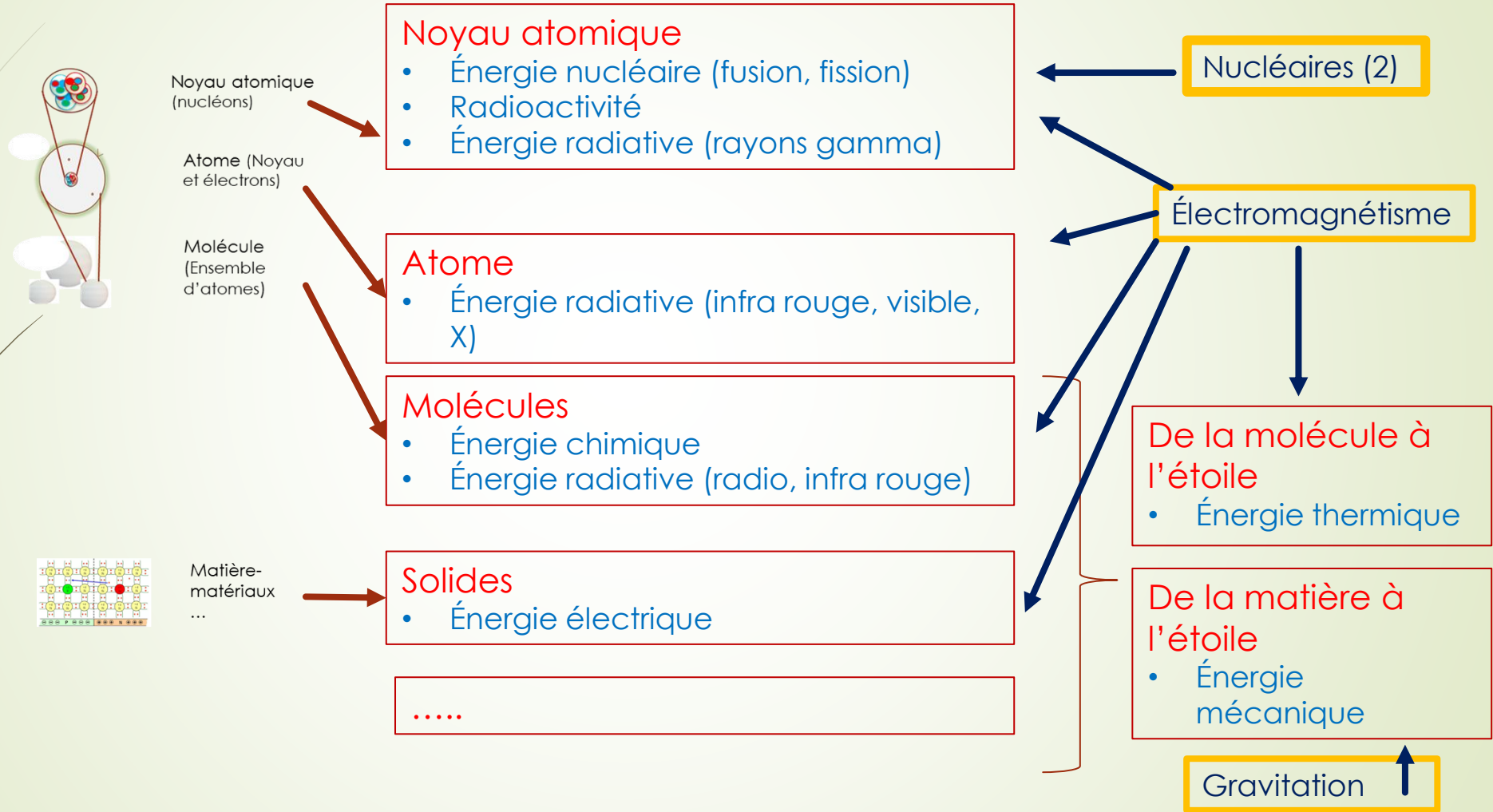
1

Cette œuvre est sous licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 4.0 International.

Les différentes formes d'énergie à notre échelle

Rappel - origines des énergies macroscopiques

3



De quoi l'énergie est-elle le nom ?

Les sources de l'énergie dans l'infiniment petit (quantique)



Processus physiques microscopiques

De quoi parle-t-on ?

Énergies à l'échelle macroscopique

Les formes de l'énergie – à notre échelle – (« produites » ?)



Connaissance des énergies

Énergies finales

Les énergies disponibles pour l'utilisateur

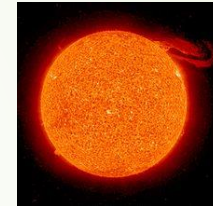
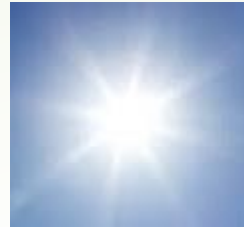


Énergies utiles

L'énergie utilisée par l'utilisateur



Les différentes formes d'énergie



Ces objets
ont une
propriété en
commun



Les différentes formes d'énergie (à notre échelle)

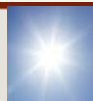
Chimique

Pétrole, bois, poudre,
Accus, piles,
Aliments



Radiative (rayonnement)

Lumière
Infrarouge
Rayons X
Ondes radio...



Nucléaire

Fusion (étoiles, bombe H)
Fission (centrales, bombe A)



6 formes
d'énergie

Electrique

Courants électriques



Mécanique

Cinétique (corps en
mouvement)
Potentielle (pesanteur,
ressort,...)



Thermique

Chaleur



Ces « formes » d'énergie sont des visions à notre échelle (macroscopique)



Ces « formes » d'énergie sont des visions à notre échelle (macroscopique)

Réactions chimiques
(chgt état électrons
dans atomes)



Chimique

Pétrole, bois, poudre,
Accus, piles,
Aliments

Radiative

Lumière
Infrarouge
Rayons X
Ondes radio...

Énergie par photon

$$E=h\nu$$

h : constante de Planck

ν : fréquence

6 formes
d'énergie

Nucléaire

Fusion (étoiles, bombe H)
Fission (centrales, bombe A)

Réactions nucléaires
(chgt état nucléons
dans les noyaux)



Electrique

Courants électriques

$P=U I$; $E=P t(\text{emps})$
U différence de potentiel
I intensité
 $P=R I^2$

Thermique

Chaleur

Mécanique

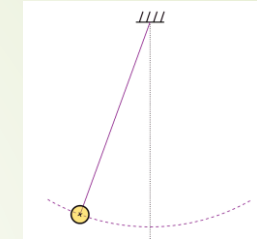
Cinétique (corps en
mouvement)
Potentielle (pesanteur,
ressort,...)

$\Delta E=C*m*\Delta T$
C capacité thermique
(par degré, par kilo)
m masse
 ΔT écart de température

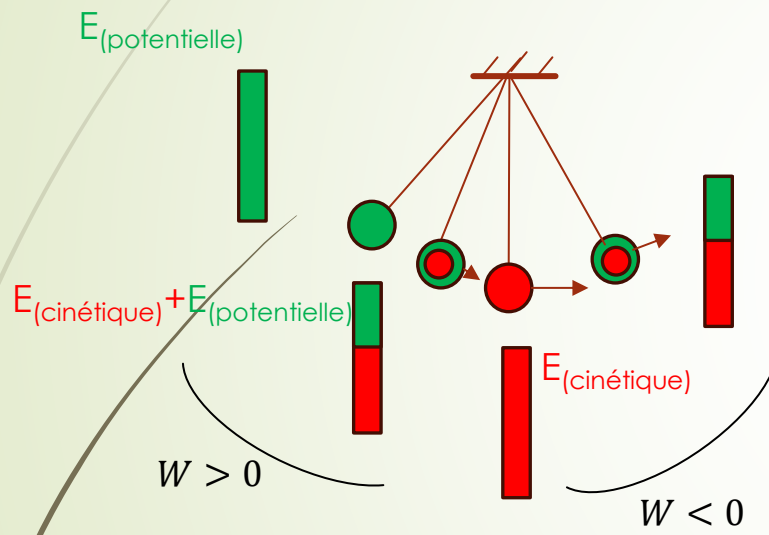
Voir diapo
suivante

L'énergie mécanique totale :

$$E_{(mécanique)} = E_{(cinétique)} + E_{(potentielle)}$$



Par Stündle
Wikipédia



Conversion $E_{(cinétique)} \leftarrow \rightarrow E_{(potentielle)}$

Travail W d'une force \vec{F}

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} = F d \cos(\alpha)$$

$W > 0 ; E_P \rightarrow E_C$

$W = 0 ;$
 $E_P = c^{te} ; E_C = C^{te}$

$W < 0 ; E_P \leftarrow E_C$

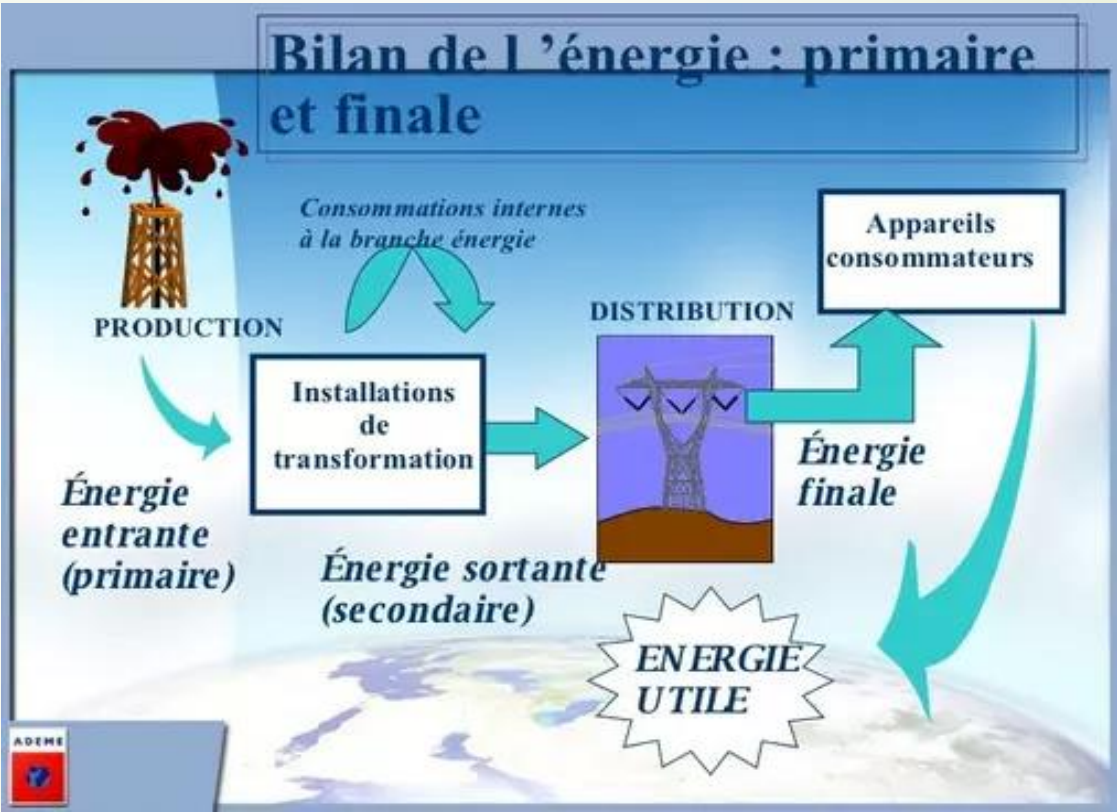
Travail d'une force avec frottement \rightarrow production de chaleur (énergie cinétique désordonnée)

$$E_{(totale)} = E_{(cinétique)} + E_{(potentielle)} + \text{Chaleur}$$

L'essentiel – les formes d'énergie à notre échelle

10

- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle



Source Slideshare

Sources d'énergies primaires

Énergies disponibles à partir des ressources de la nature (avant stockage ou transformation) :

- Les ressources en stock :
 - Charbon (et ses variantes tourbe, lignite et houille)
 - Pétrole
 - Gaz
 - Minerai brut d'Uranium

} Chimique
} Nucléaire
- Les ressources en flux (dites renouvelables)
 - Rayonnement solaire Radiative
 - Bois et biomasse Chimique
 - Cycle de l'eau Mécanique
 - Géothermie Calorifique

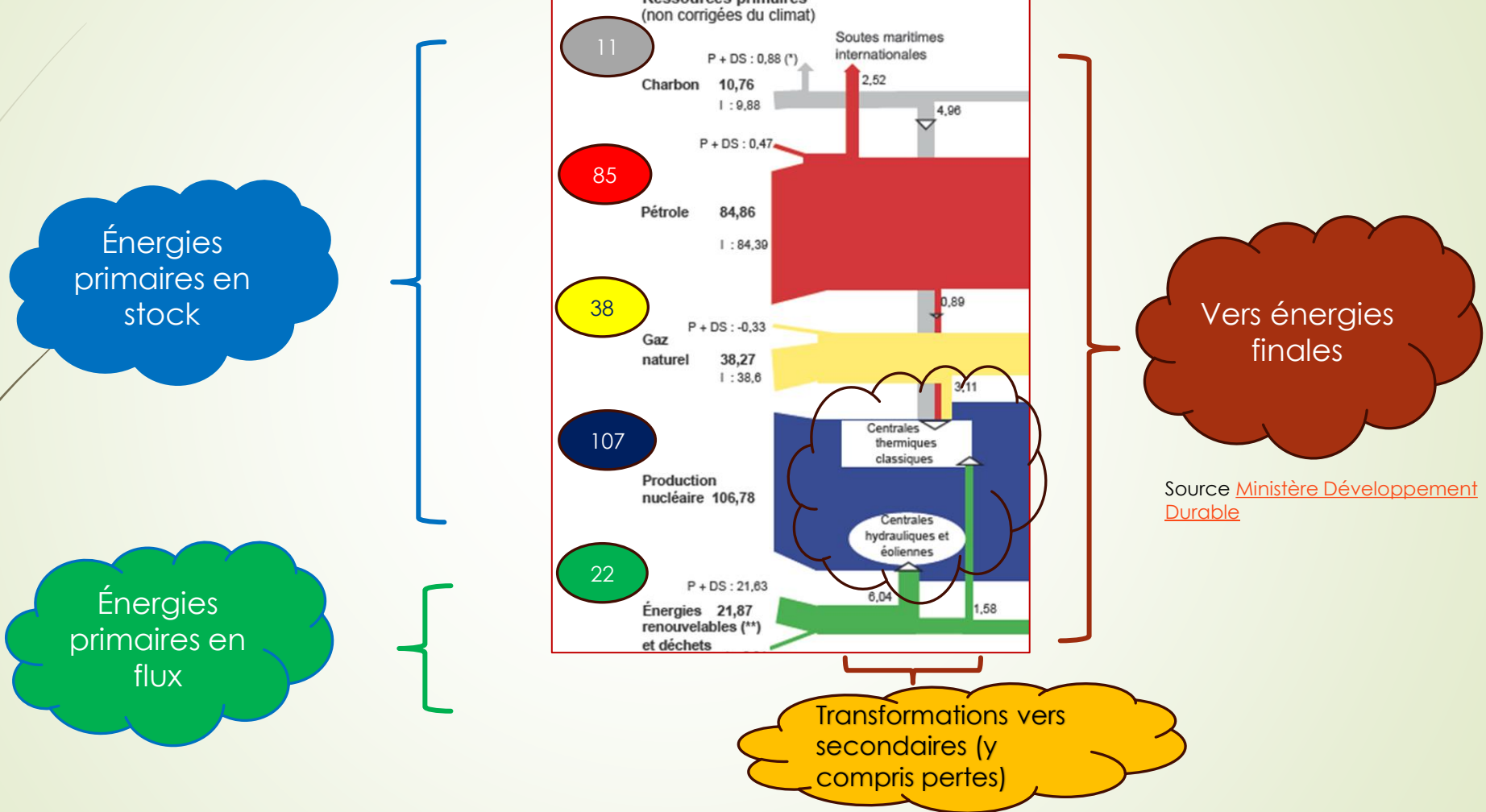
Sources d'énergies secondaires

Énergies primaires après transformation :

- Électricité Électrique
- Hydrogène (peut-être primaire un jour) Chimique
- ...



Diagramme de Sankey



Source [Ministère Développement Durable](#)

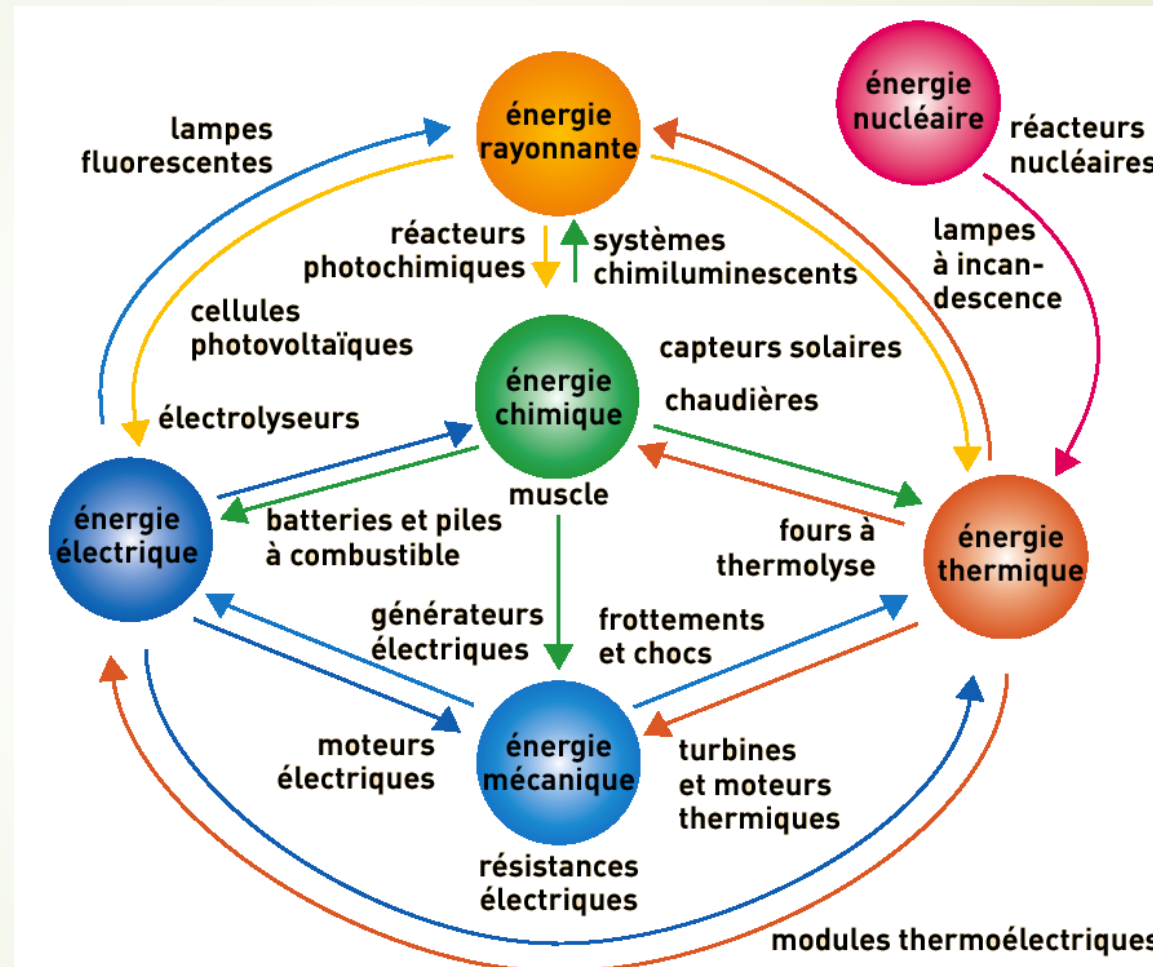
L'essentiel – les formes d'énergie à notre échelle

14

- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)

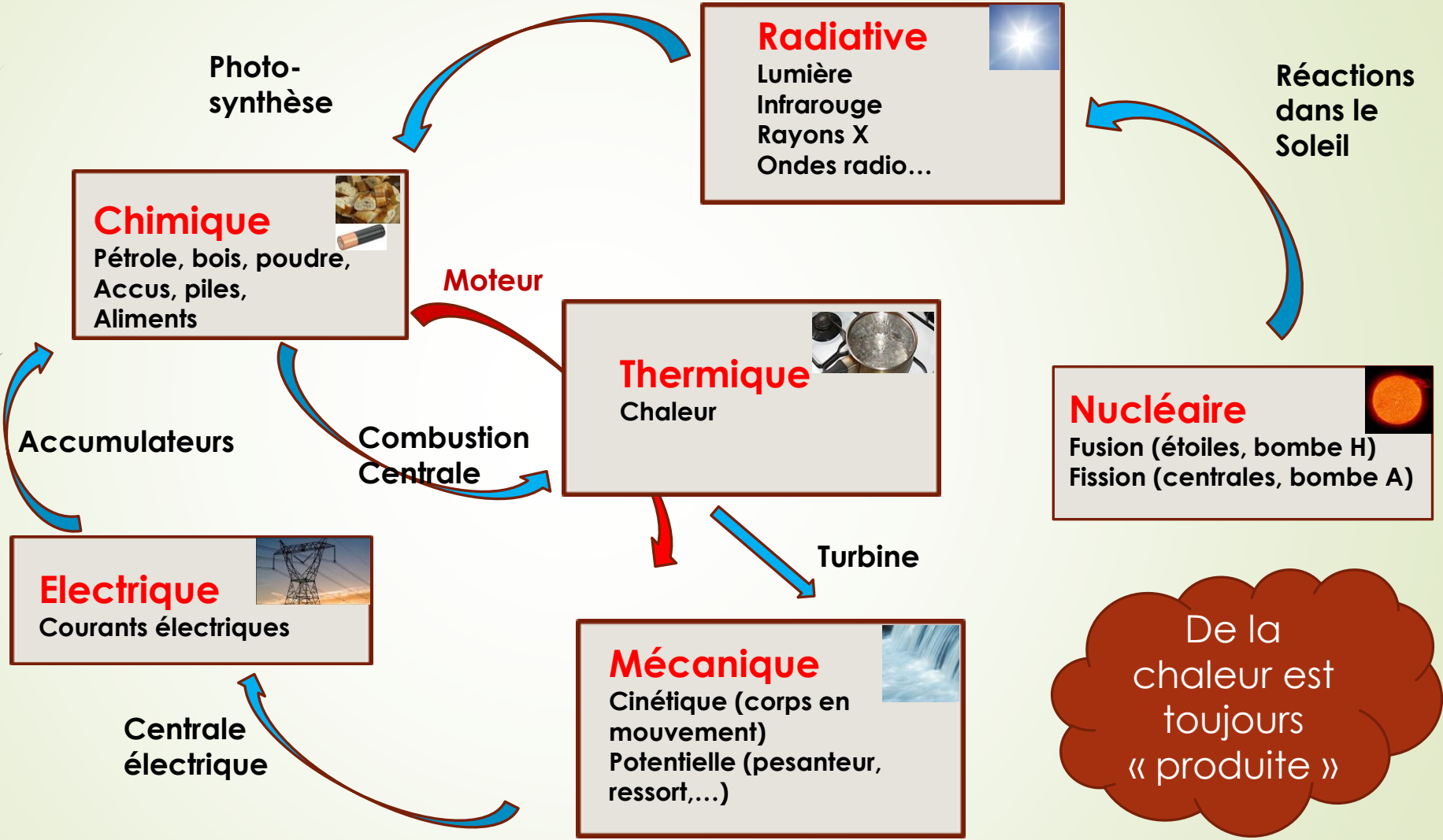
Elles peuvent se transformer les unes dans les autres,

mais l'énergie totale est conservée.



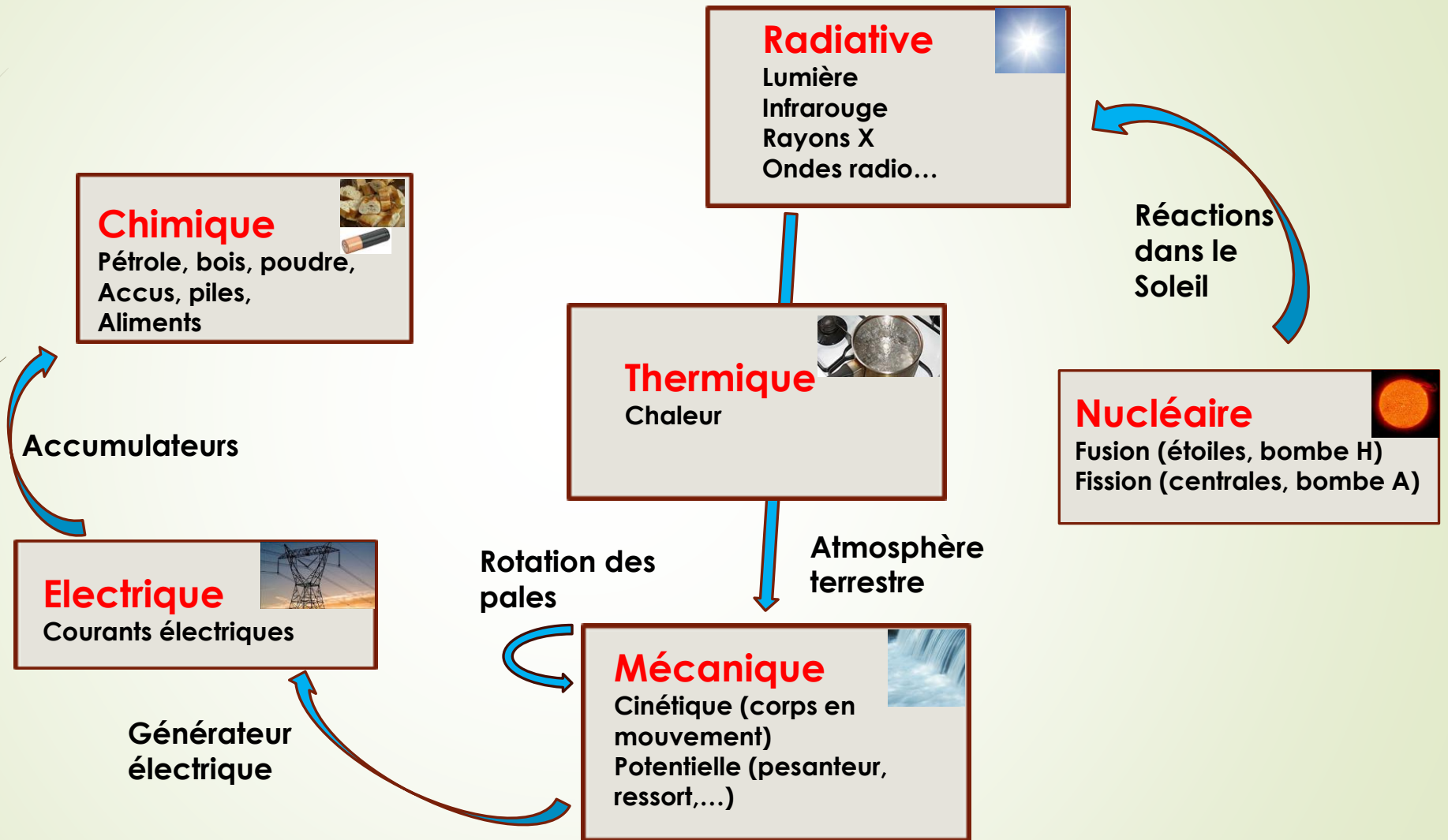
Source
<http://www.cea.fr/content/download/3083/14599/file/encadrea.pdf>

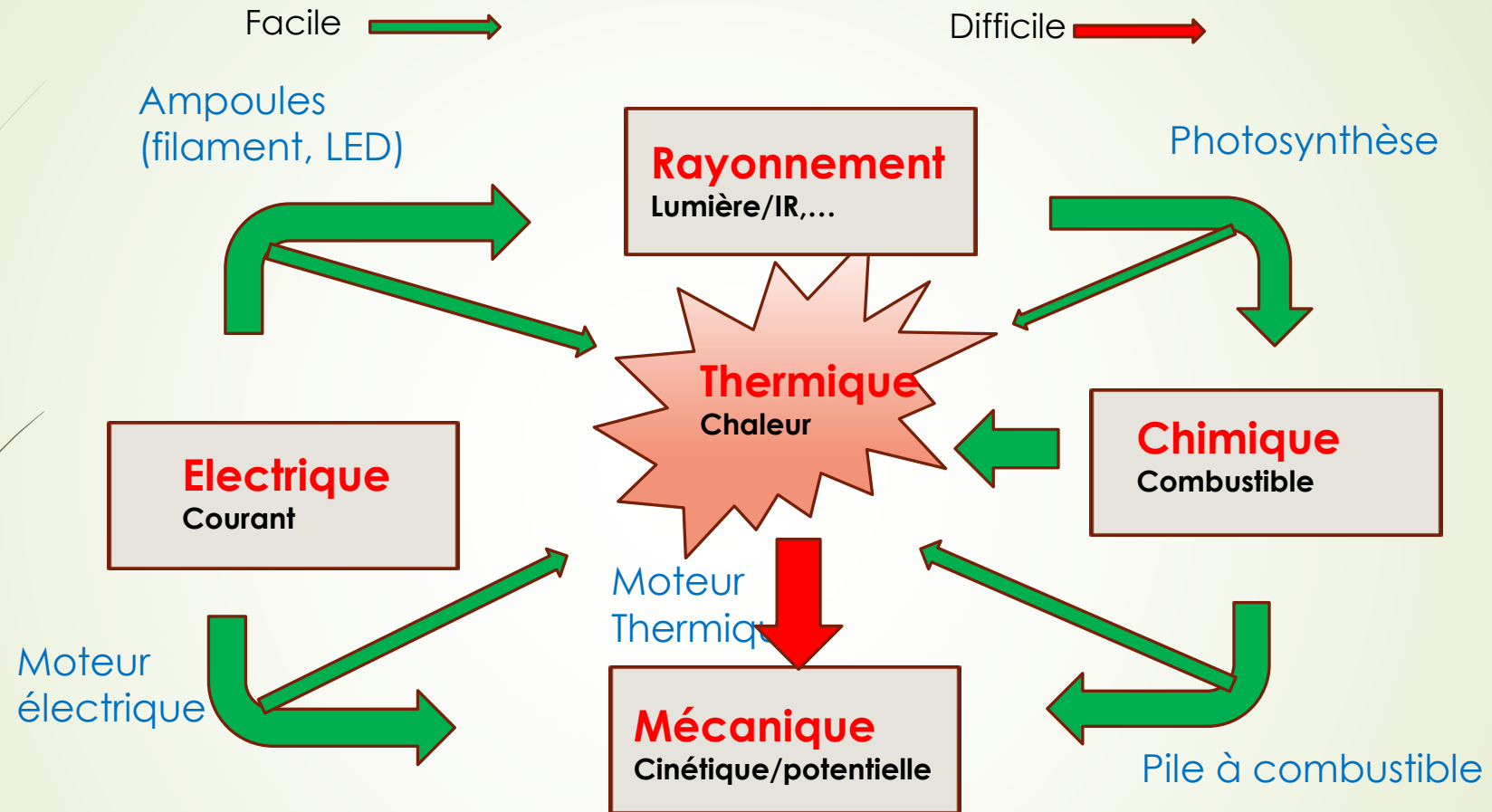
Transformations de l'énergie – la voiture électrique (en Pologne)



Transformations de l'énergie – éolienne (avec stockage)

17





Les transformations d'énergie se produisent avec production (non souhaitable) de chaleur.

L'essentiel – les formes d'énergie à notre échelle

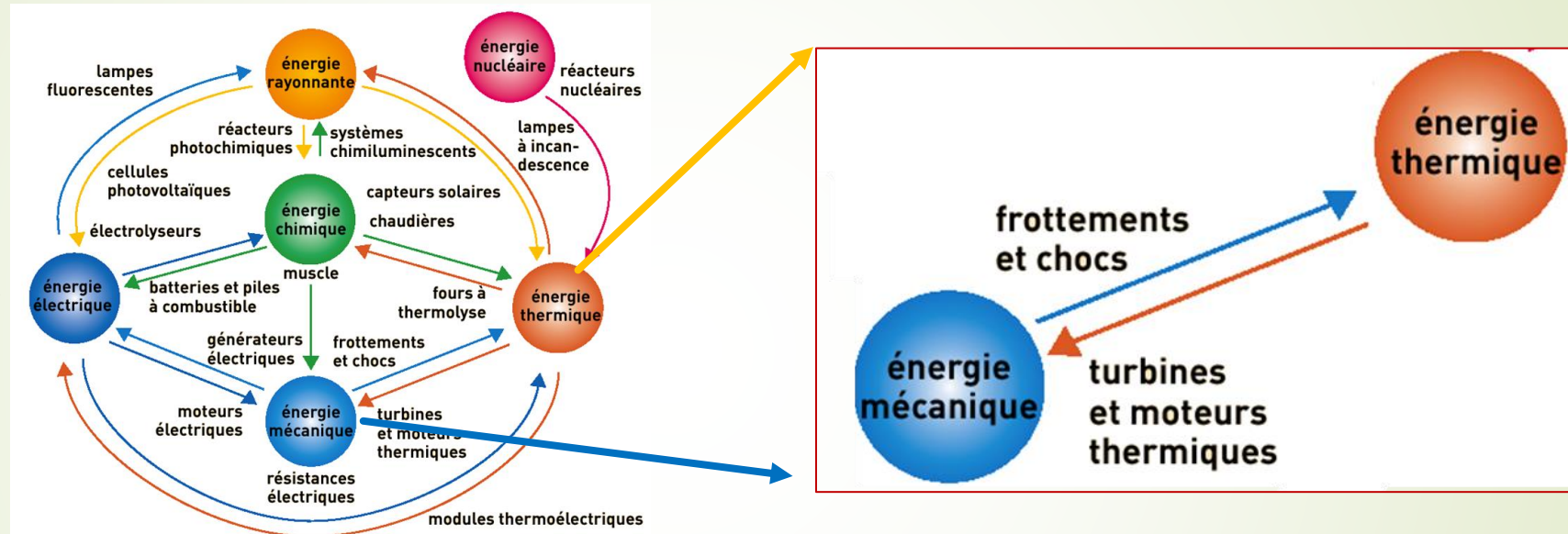
19

- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres

Exemples de processus de
transformation de l'énergie

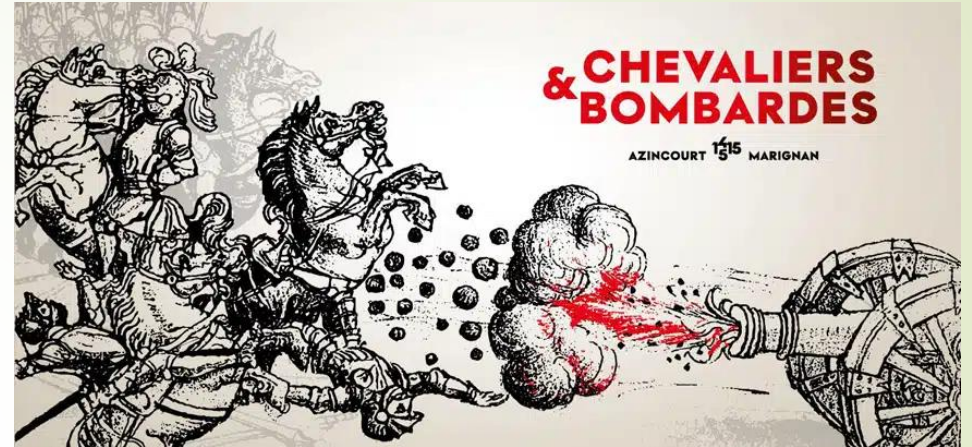
La transformation énergie mécanique \leftrightarrow énergie calorifique

21





Source anciennescivilisations.com Bataille de Langshan (919)



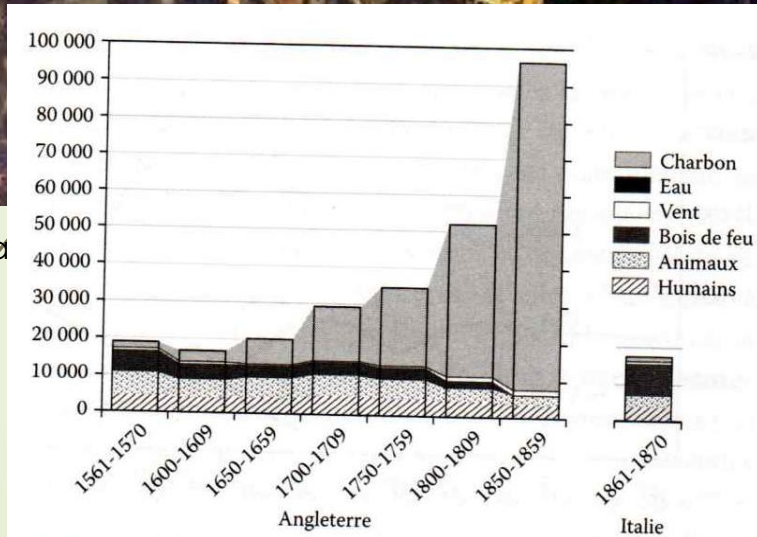
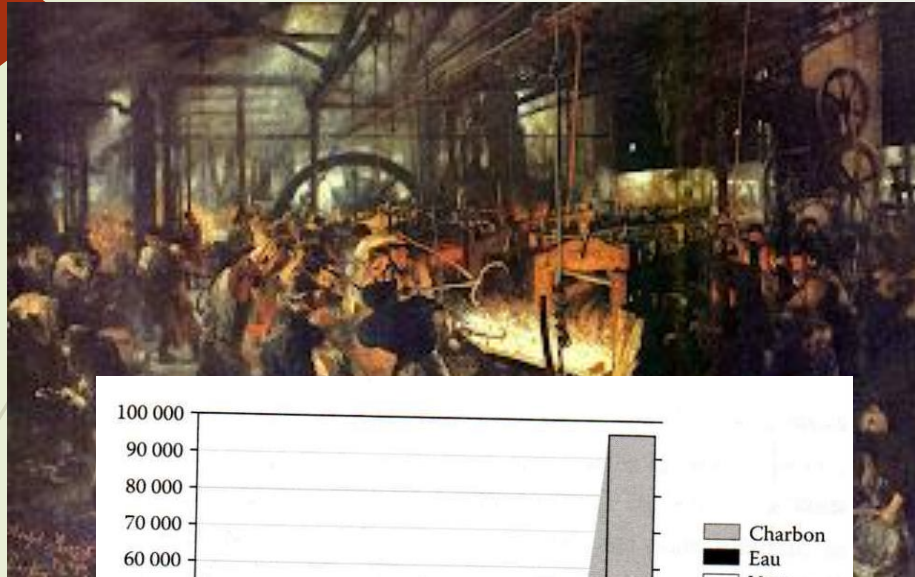
Source culturezvous.com



Machine à vapeur – Travail personnel

La révolution industrielle en Angleterre fin XVIIIème – début XIXème

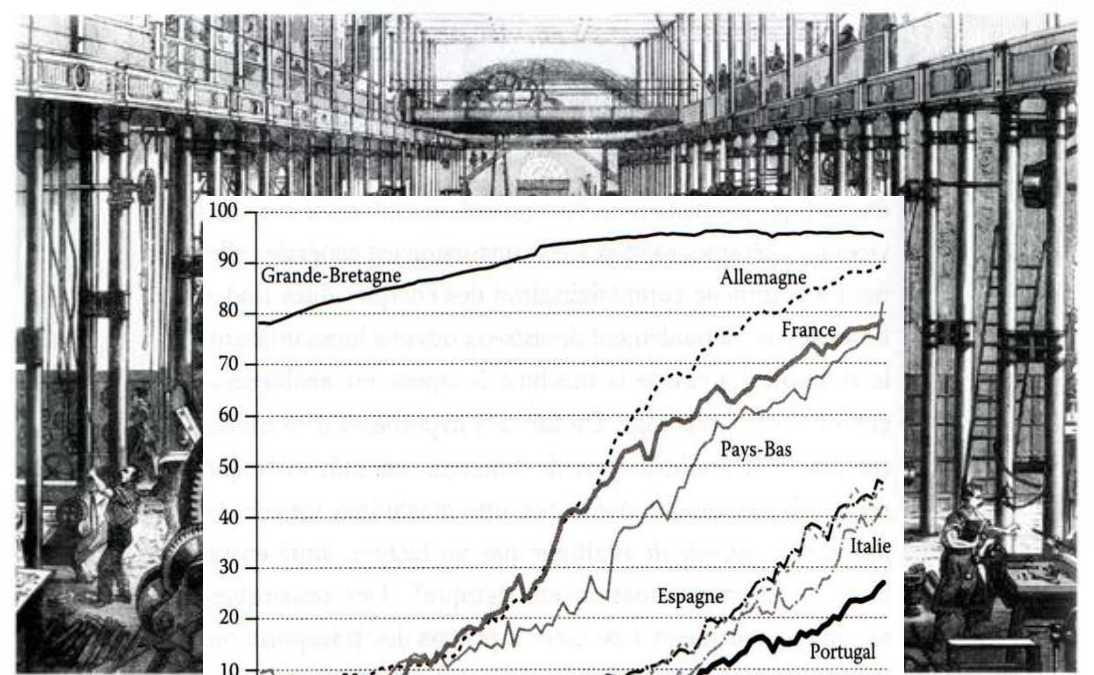
24



Consommation annuelle d'énergie par habitant en mégajoules.

(D'après Wrigley, *Energy and the Industrial Revolution*, Cambridge, Cambridge University Press, 2010, p. 95.)

Source : [sans transition - fressoz](#)



Part du charbon dans la consommation totale d'énergie. (D'après Kander, Malanima et Warde, *Power to the People, L. Energy in Europe over the Last Five Century*, Princeton, Princeton University Press, 2013, p. 137.) Ce graphique mesure l'énergie primaire (la quantité d'énergie contenue dans une tonne de charbon par exemple) et non l'énergie utile (le travail produit par une machine à vapeur brûlant une tonne de charbon). Ce faisant il exagère l'importance du charbon dans les économies du XIX^e siècle.

Source : [Sans transition - Fressoz](#)

Joule (1850): conversion travail en chaleur
 énergie mécanique en énergie calorifique



Expérience de Joule (1845) –
[Wikimédia](#) Domaine Public



Machine à vapeur – Tamorian – domaine public

Travail (énergie mécanique) \longrightarrow Chaleur

1 calorie = 4,18 Joules

1 masse de 1kg descend d'1 mètre (10 joules)

Même énergie que

1 verre d'eau (0,1l) chauffé de 0,42° (42 cal)

Travail (énergie mécanique) \longleftarrow Chaleur

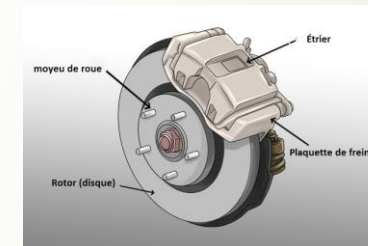
- 1800: 500 machines Watt fonctionnent dans les usines anglaises
- Introduit le cheval-vapeur: 745,7 joule/s (soulever une masse de 75kg de 1 mètre en 1 seconde)

Machines thermiques
Chaleur → Energie mécanique (Carnot,
XIX^{ème} siècle)
Rendement limité $\ll 100\%$

Processus inverse
Energie mécanique → Chaleur
Rendement possible 100%



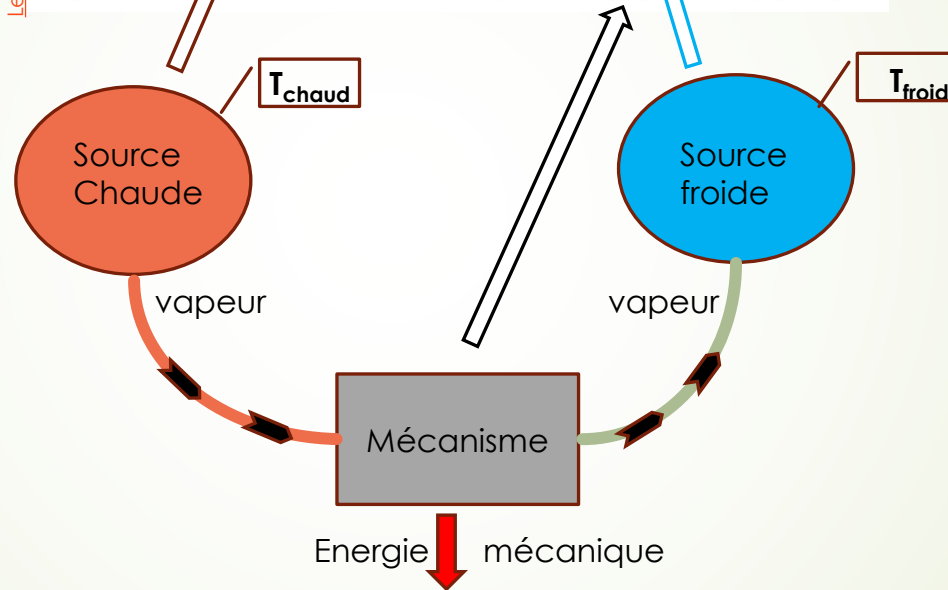
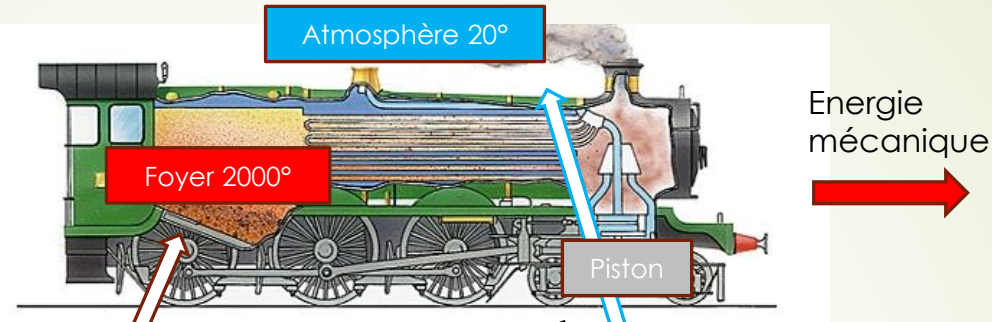
Machine à vapeur – Tamorian – domaine public



Point - S

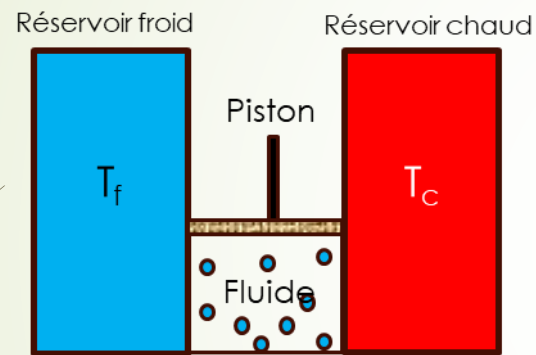
- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres
- Le moteur thermique est l'archétype de la transformation énergie thermique → mécanique, à la base de notre société industrielle

Les trains de marins sur WordPress

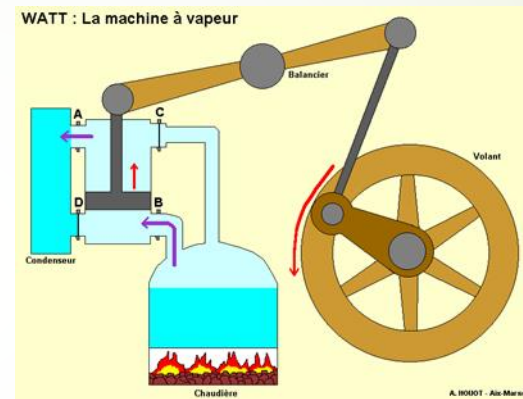


L'énergie calorifique (vapeur) va de la source **chaude** vers la source **froide** et **fournit** du travail (rendement proportionnel à $T_{chaud} - T_{froid}$)

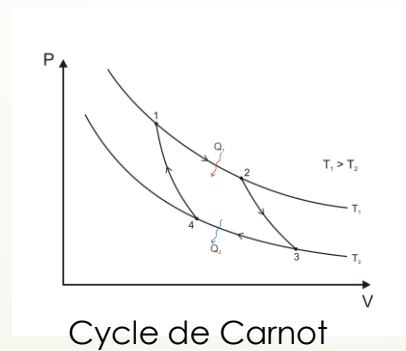
Impossibilité d'une machine avec un seul « réservoir »



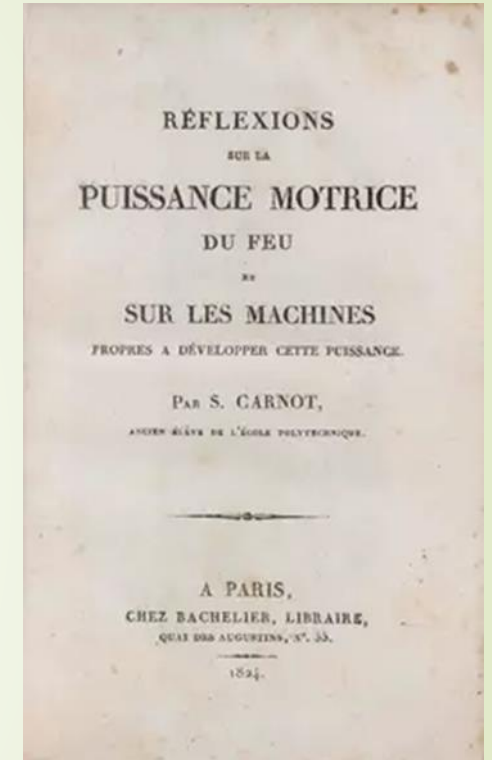
Principe de la machine thermique



Machine de Watt
sur lephysique.net



Cycle de Carnot

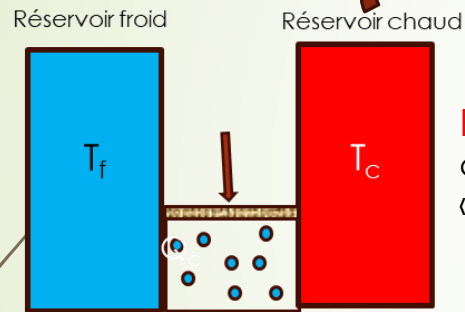
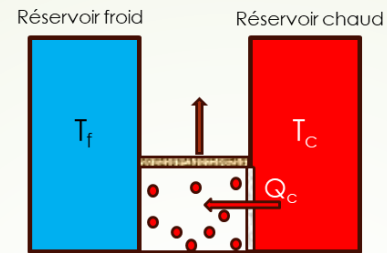


[Wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Réflexions_sur_la_puissance_motrice_du_feu) – domaine public

Phase 1 (isotherme)

Transfert de chaleur de la source chaude

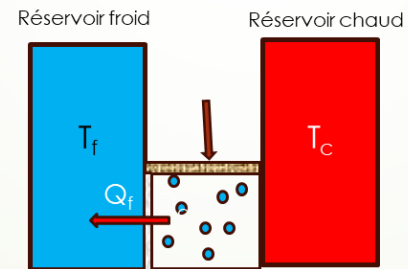
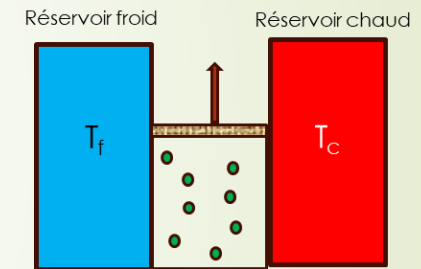
→ expansion du gaz → « travail » du piston

**Phase 4 (adiabatique)**

compression du gaz → « travail » du piston

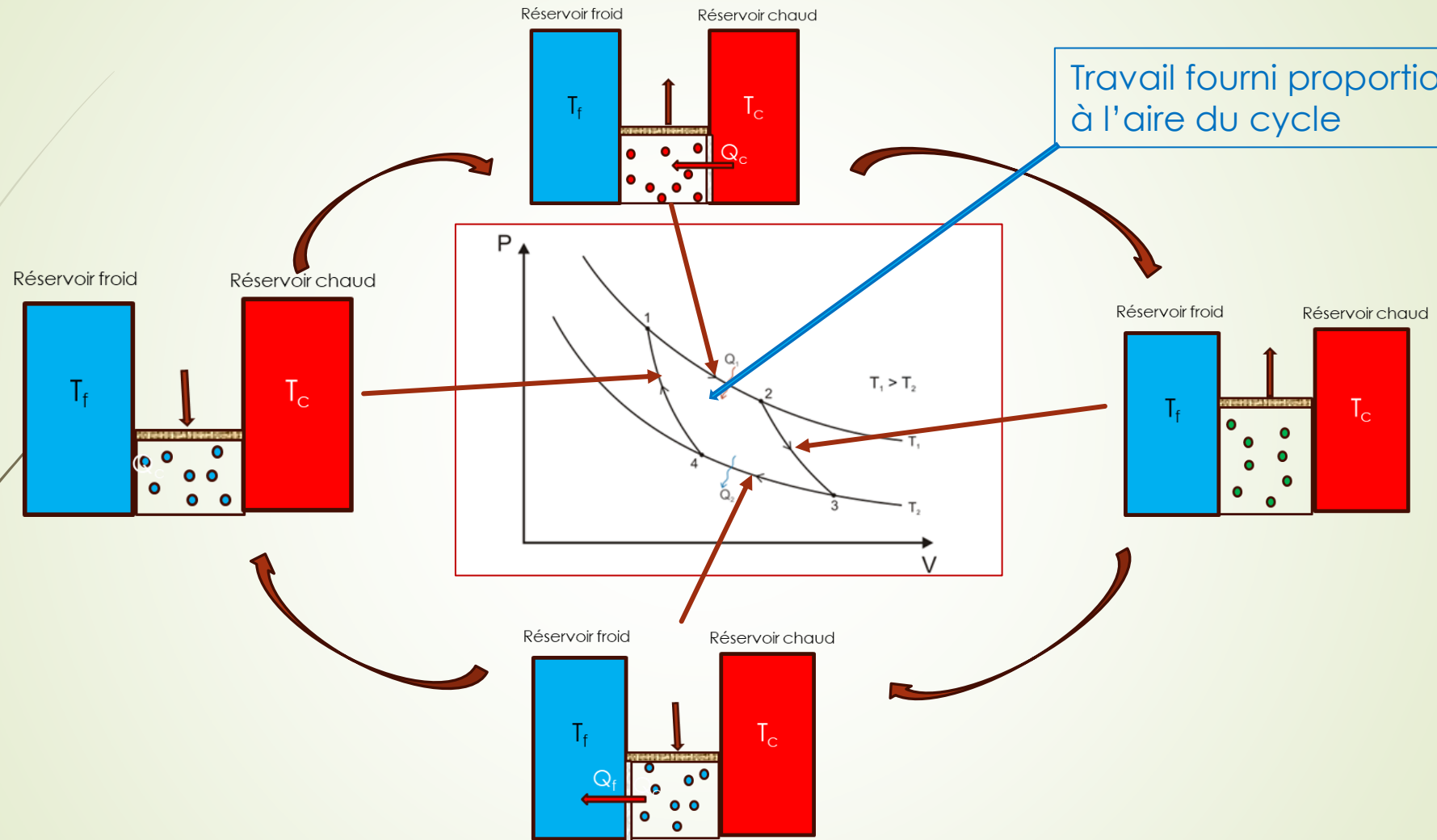
Phase 2 (adiabatique)

Expansion du gaz → refroidissement → « travail » du piston

**Phase 3 (isotherme)**

« travail » du piston → compression du gaz → Transfert vers la source froide

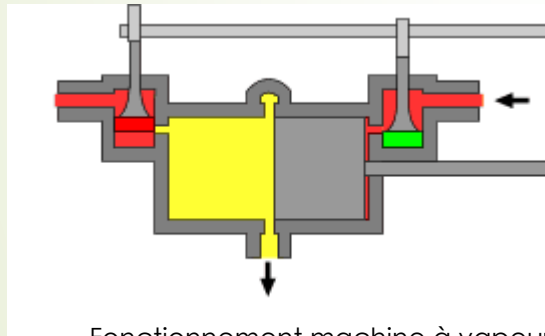




Conservation de l'énergie :

- Le travail fourni $W = Q_c - Q_f$
- Avec un rendement maximum $\eta = \frac{Q_c - Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$; T température en K(elvins)
- Rendement maximum, car mouvement extrêmement lent, proche de l'équilibre et sans frottement (entropie constante, voir plus loin)
- En fait :

$$\eta \ll 1 - \frac{T_f}{T_c}$$



Fonctionnement machine à vapeur
[Wikipédia](#) – Auteur inconnu - CC A-SA-3.0

$$T_f = 150^\circ\text{C} = 423\text{ K}$$
$$T_c = 20^\circ\text{C} = 293\text{ K}$$
$$\eta < 31\%$$

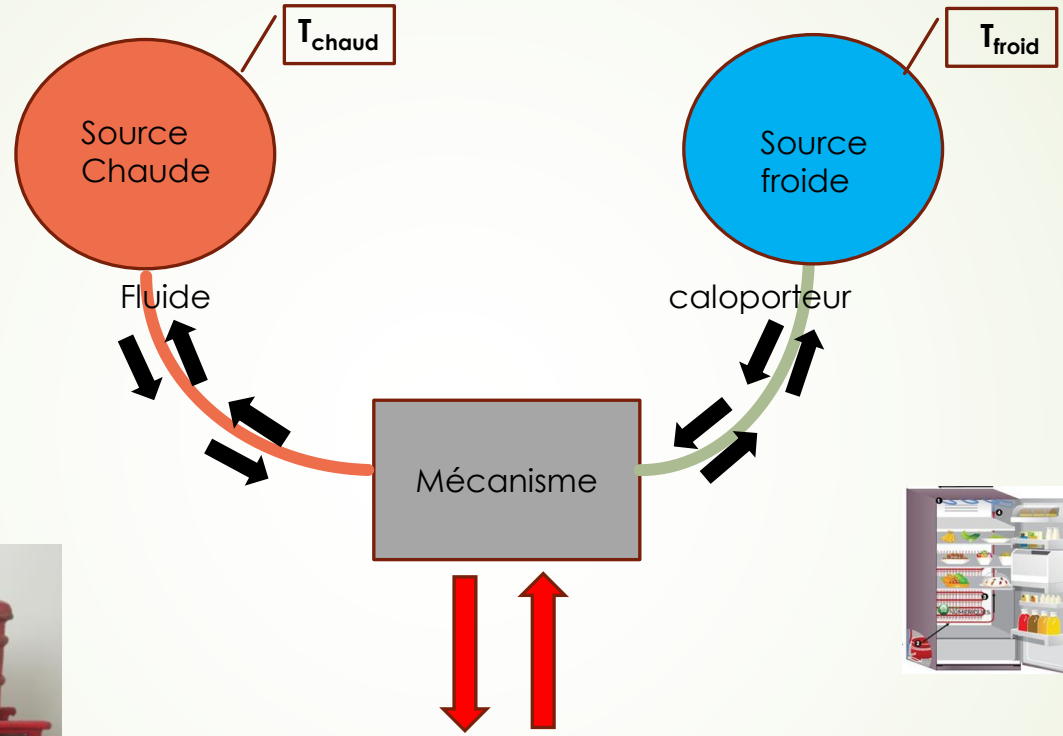


$$\eta \approx 45\%$$

Turbine à vapeur – [Wikipédia](#) par Siemens
Pressebild CC A-SA 3.0

- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres
- Le moteur thermique est l'archétype de la transformation énergie thermique → mécanique, à la base de notre société industrielle
- Le rendement des moteurs thermiques est limité (cycle de Carnot)

Moteur thermique
Transférer chaleur
vers source froide



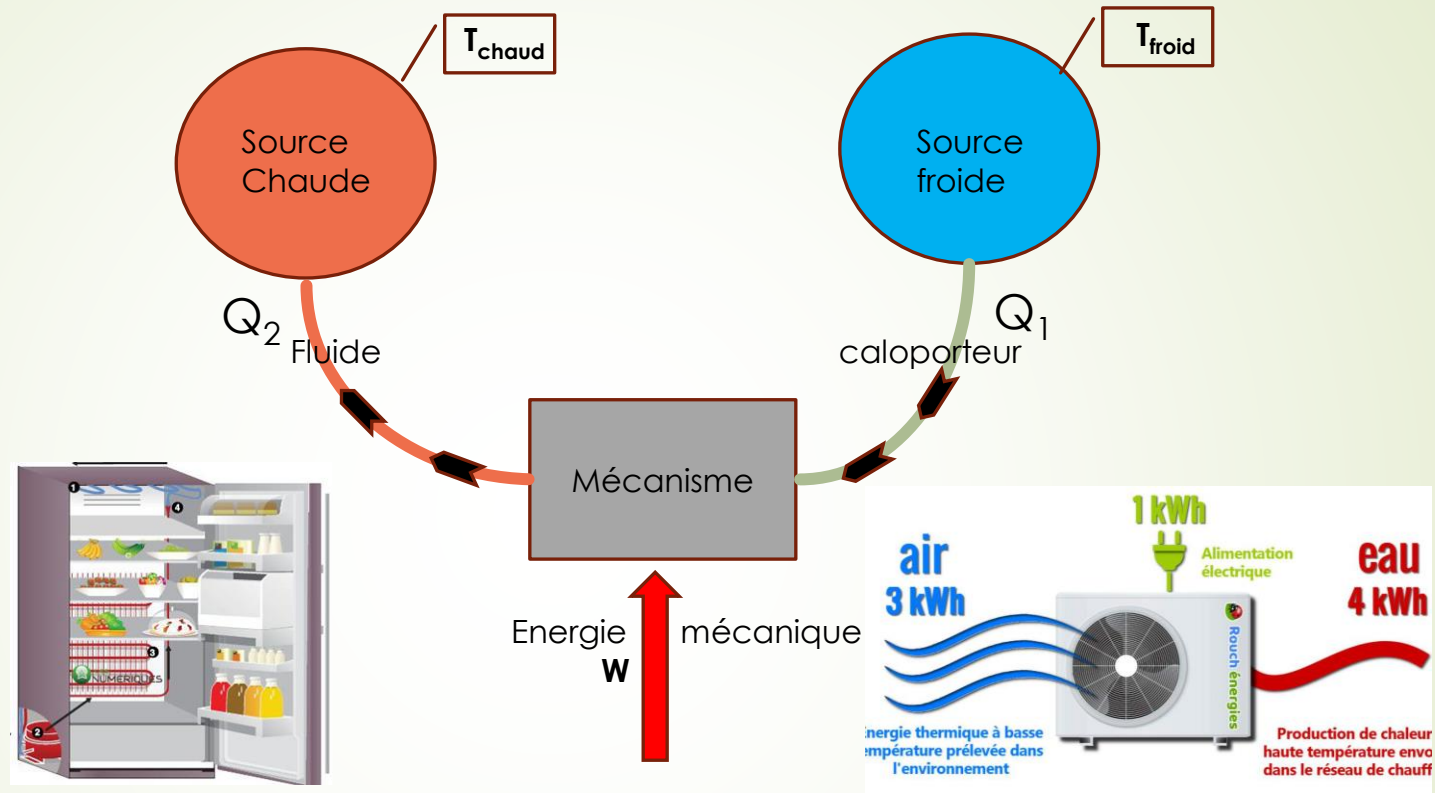
Pompe à chaleur
Chauffer la source
chaude
Réfrigérateur
Refroidir la source
froide



Action France Energie

Réfrigérateur/Pompe à chaleur

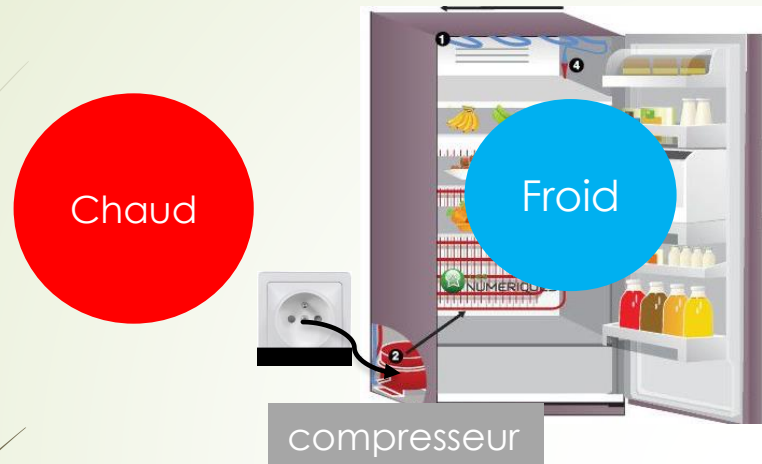
35



Réfrigérateur
Refroidir la source froide
Perkins - 1834

Pompe à chaleur
Réchauffer la source chaude
Von Ritter - 1855

Action France Energie



L'énergie (chaleur) va de la source **froide** vers la source **chaude** et **nécessite** du travail

Il faut **fournir de l'énergie** pour maintenir l'écart des températures

$$\eta < \frac{T_f}{T_c - T_f} ; \text{exemple } T_c = 300 \text{ K}, T_f = 280 \text{ K}$$

$$\eta < 14 \text{ (1 400\%)}$$

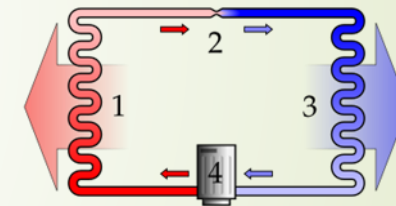
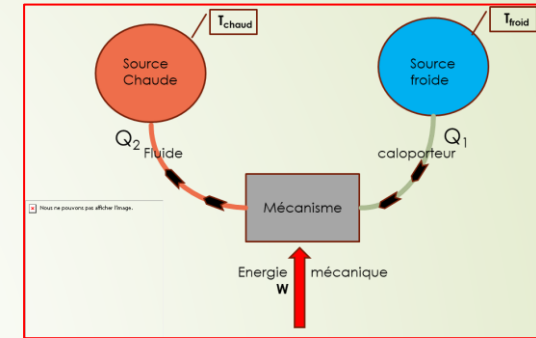
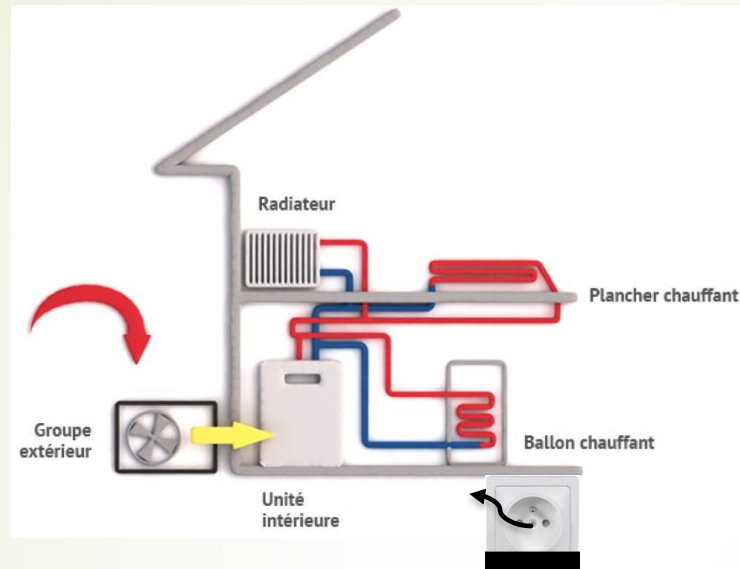
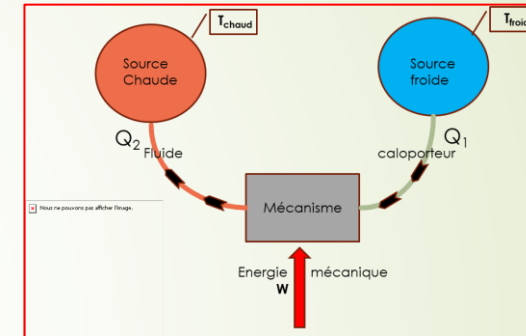


Schéma de principe d'une PAC à détente directe :

- 1 : condenseur ;
- 2 : détendeur ;
- 3 : évaporateur ;
- 4 : compresseur.



Pompe à chaleur air-air - Principe



L'énergie (chaleur) va de la source **froide** vers la source **chaude** et **nécessite** du travail

Rendement :

$$\eta < \frac{T_c}{T_c - T_f} ; \text{exemple } T_c = 300 \text{ K}, T_f = 270 \text{ K}$$

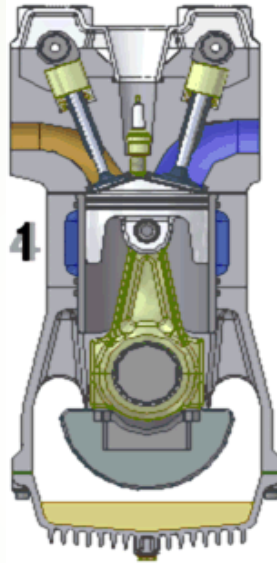
$$\eta < 10 \text{ (1 000\%)}$$

En fait les rendements réels des PAC aérothermiques (air-air ou air-eau) sont entre 3 et 5

La révolution des moteurs à combustion interne

Cycle à quatre temps à allumage commandé :

- 1 : admission,
- 2 : compression,
- 3 : combustion,
- 4 : échappement.

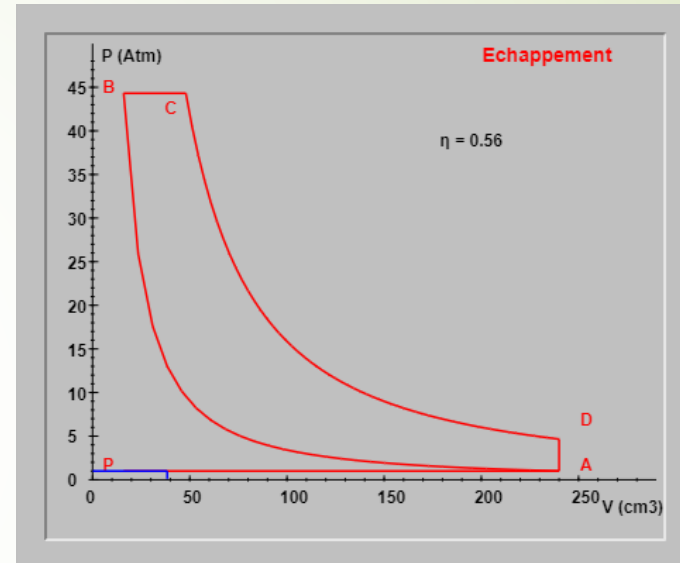


Moteur à explosion
[wikipédia](#) par UtzOnBike CC A-SA 3.0

Rendement :

Dans des conditions optimales:

- 36 % pour un moteur à essence à allumage commandé
- 42 % pour un moteur Diesel à rampe commune haute pression.



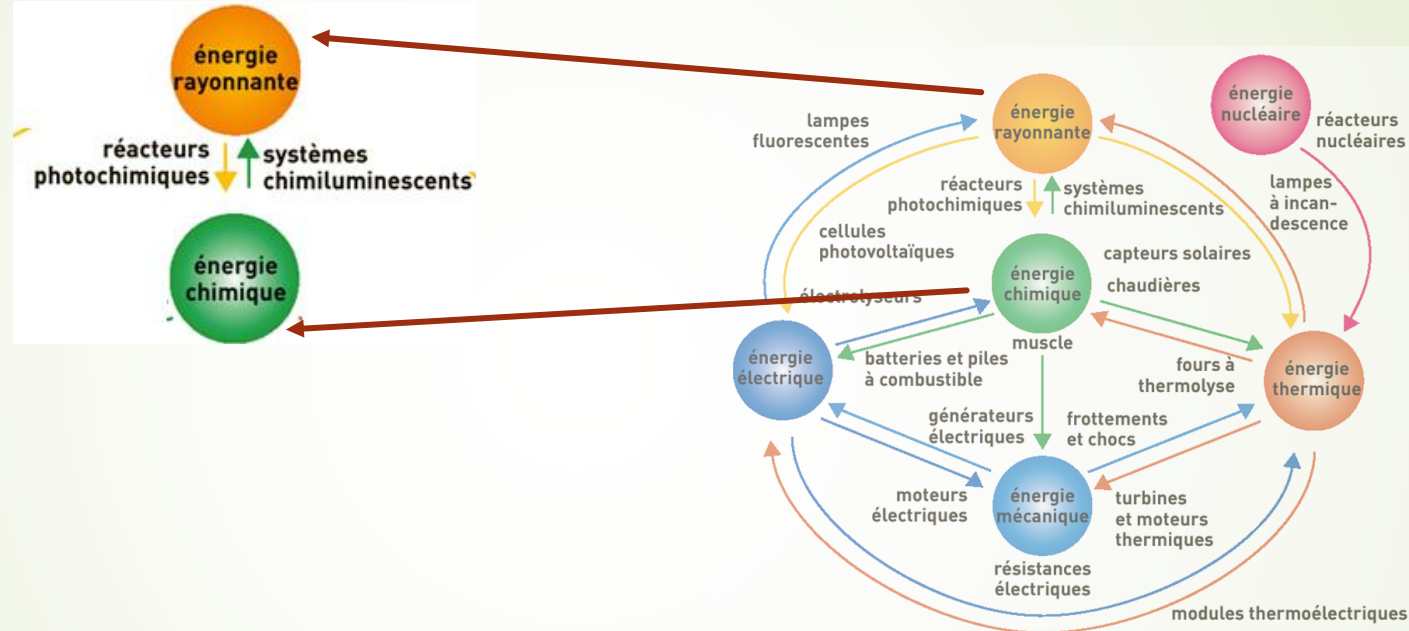
Cycle du diesel

P → A : admission
 A → B : compression
 B → C → D : combustion & détente
 D → A → P : échappement

- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres
- Le moteur thermique est l'archétype de la transformation énergie thermique \rightarrow mécanique, à la base de notre société industrielle
- Le rendement des moteurs thermiques est limité (cycle de Carnot)
- Les machines thermiques sont basées sur les transformations réciproques :
énergie thermique \leftrightarrow mécanique

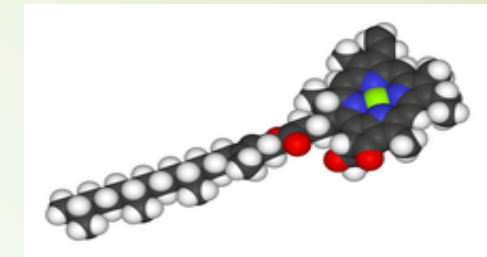
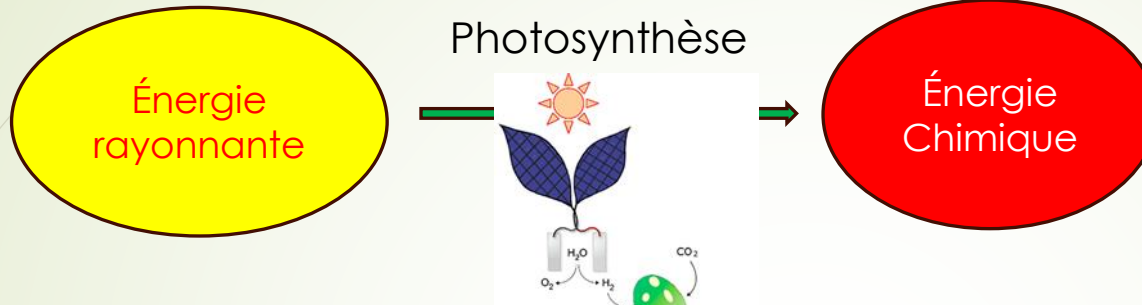
énergie radiative \leftrightarrow énergie chimique (photosynthèse)

40



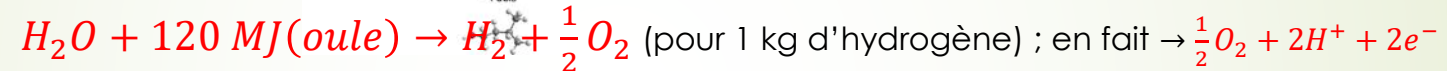
Transformations d'énergie spécifiques - Photosynthèse

41

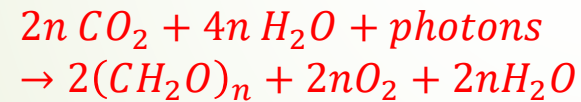


Molécule de chlorophylle a
[Wikimédia](#) – domaine public

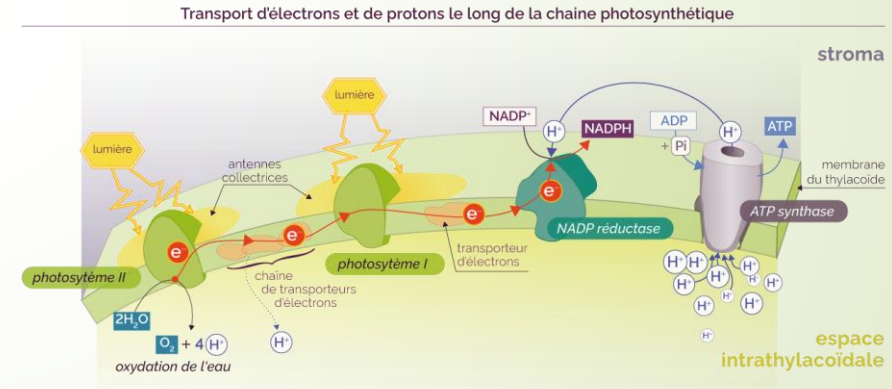
La dissociation de la molécule d'eau (hydrolyse) est une réaction très exothermique



Synthèse de molécules de "sucre" à partir de l'eau et du gaz carbonique (mode principal)



40% du spectre est utilisée + pertes diverses → rendement global 0,5% à 3%

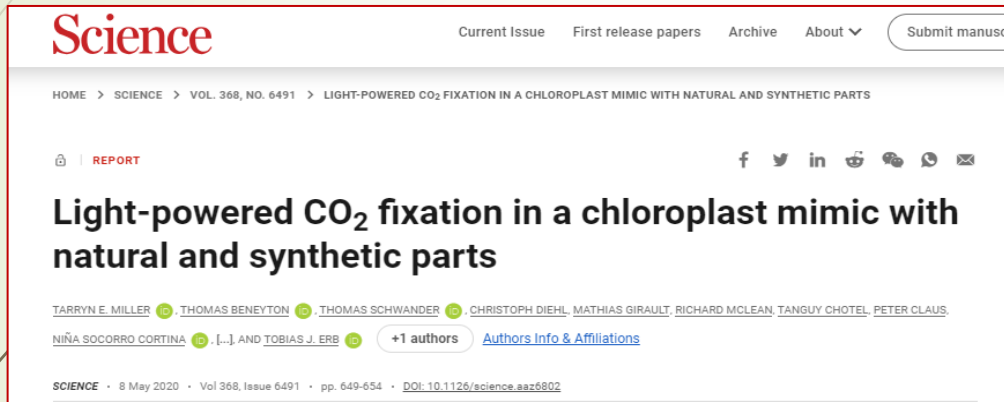


Étapes de la photosynthèse sur [MaxiCours](#)

Pour un flux solaire moyen de 200 W/m² → rendement maximal 6 W/m² ou 60 kW/hectare

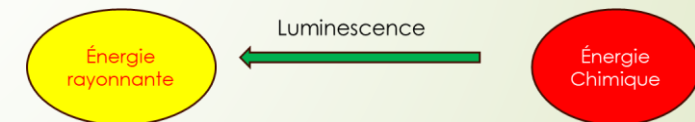
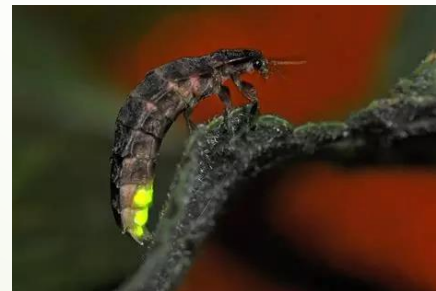
Photosynthèse artificielle

Objectif : multiplier l'efficacité de la photosynthèse naturelle (mieux que X10 en laboratoire)

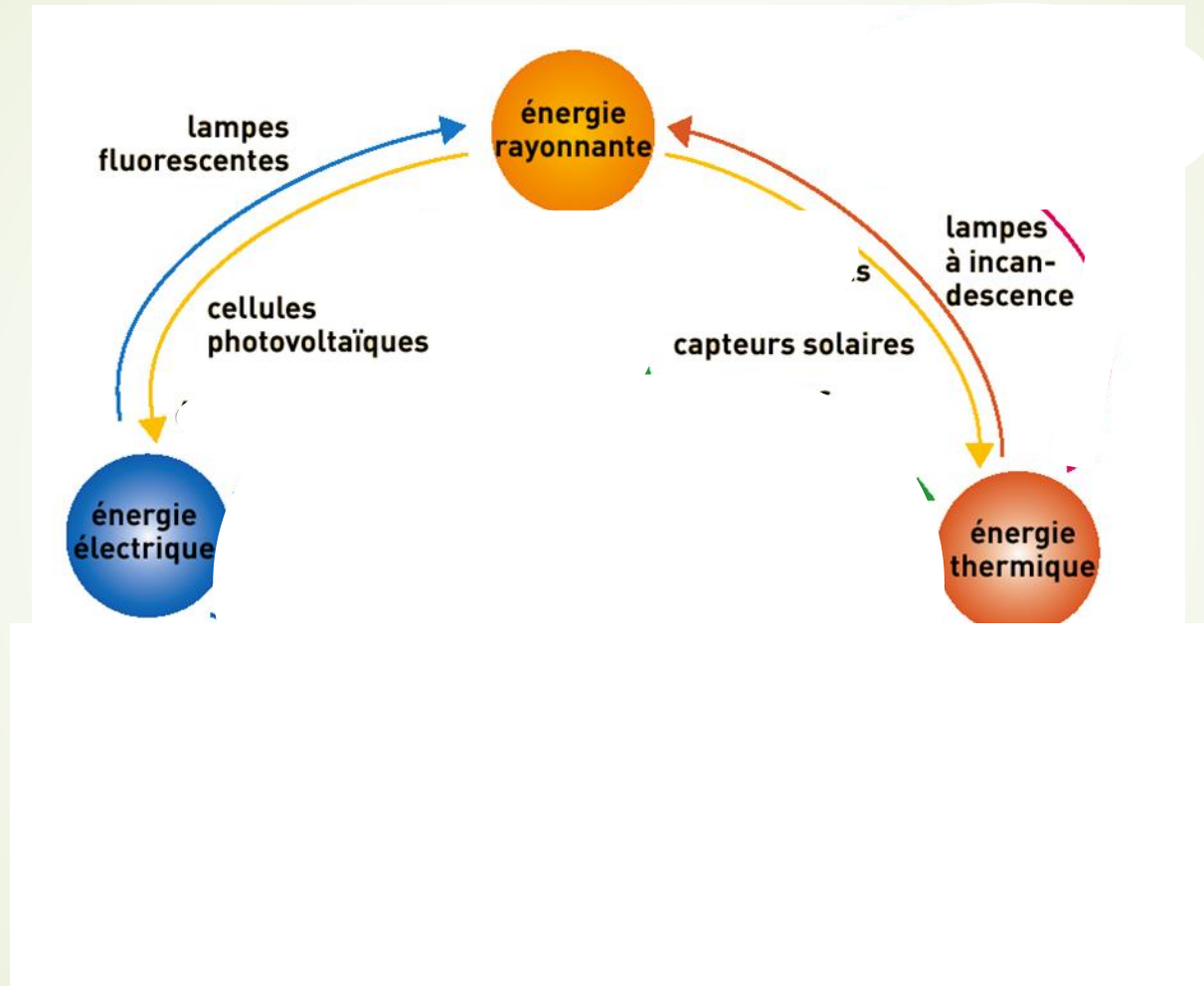


Futura-Sciences

Processus inverse :
anecdotique d'un point de vue énergétique
Vert luisant, luciole, détection de sang ou d'explosifs



- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres
- Le moteur thermique est l'archétype de la transformation énergie thermique \rightarrow mécanique, à la base de notre société industrielle
- Le rendement des moteurs thermiques est limité (cycle de Carnot)
- Les machines thermiques sont basées sur les transformations réciproques : énergie thermique \leftrightarrow mécanique
- La photosynthèse (énergie radiative \rightarrow chimique) est la source majeure d'énergie de la Vie sur Terre





Radiative
Thermique ↔ Photovoltaïque



Absorption de type « **corps noir** »
toutes fréquences

Rendement limité par réémission
infrarouge **80 à 90 %**

Soit à midi par temps clair **700 W/m²**

Effet **photoélectrique**
Fréquences spécifiques

Rendement limité par processus
photoélectrique et émission de chaleur
10 à 20 %

Soit à midi par temps clair **150 W/m²**

La bonne idée ?

Alimenter son ballon d'eau chaude avec le courant électrique de ses panneaux voltaïques

La bonne idée ?

Stocker l'électricité du jour sur batterie pour l'utiliser la nuit ?



Thermique \leftrightarrow électronique
Lumière (radiative)

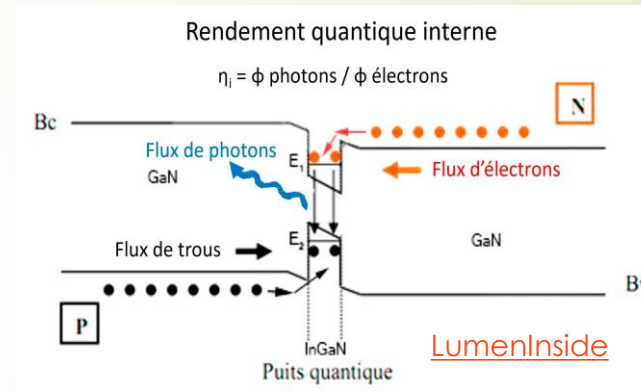


Émission de type « **corps noir** » spectre continu
(toutes fréquences)
Rendement limité par émission de l'énergie dans
l'**infra-rouge** et sous forme de **chaleur** \rightarrow 5 %
Soit **<10 lumens/Watt**

2 fois meilleur avec halogènes **20 lumens/Watt**

Incandescente	Éco-halogène	Fluocompacte	Led
40 W 415 lm 14,6 kWh/an	28 W 440 lm 10,22 kWh/an	9 W 405 lm 3,28 kWh/an	6 W 470 lm 2,19 kWh/an
60 W 720 lm 21,9 kWh/an	48 W 630 lm 17,52 kWh/an	13 W 720 lm 4,74 kWh/an	9 W 806 lm 2,92 kWh/an
75 W 840 lm 14,6 kWh/an	55 W 820 lm 20,07 kWh/an	15 W 850 lm 5,47 kWh/an	12 W 1 055 lm 3,65 kWh/an
100 W 1 200 lm 36,5 kWh/an	70 W 1 200 lm 25,55 kWh/an	20 W 1 350 lm 7,30 kWh/an	13 W 1 520 lm 4,38 kWh/an

SystemD



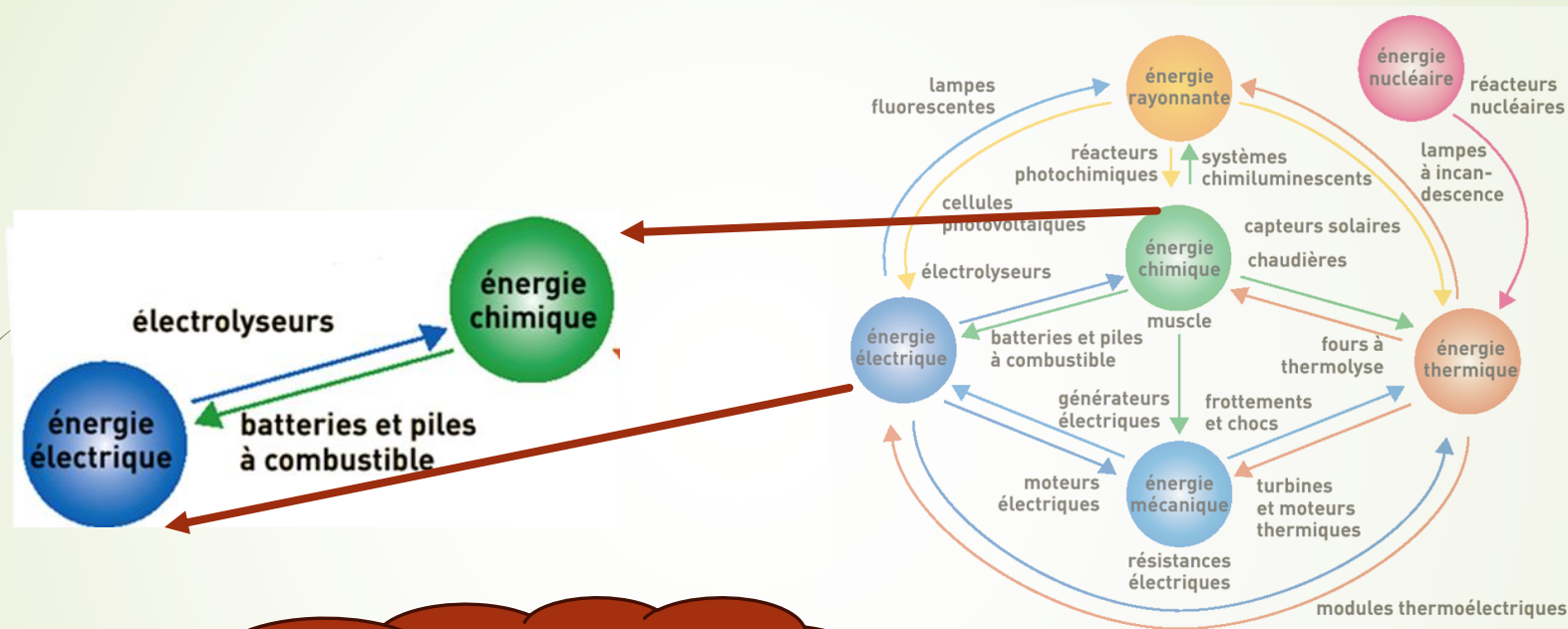
Transition des **électrons** dans les
semiconducteurs
Fréquences spécifiques

Rendement limité par **processus**
électronique et un peu de chaleur :
A++ mieux que **100 lumens/Watt**

- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres
- Le moteur thermique est l'archétype de la transformation énergie thermique \rightarrow mécanique, à la base de notre société industrielle
- Le rendement des moteurs thermiques est limité (cycle de Carnot)
- Les machines thermiques sont basées sur les transformations réciproques :
énergie thermique \leftrightarrow mécanique
- La photosynthèse (énergie radiative \rightarrow chimique) est la source majeure d'énergie de la Vie sur Terre
- Les transformations énergie radiative \leftrightarrow thermique & électrique sont des sources d'énergie pour la vie quotidienne

énergie chimique \leftrightarrow énergie électrique

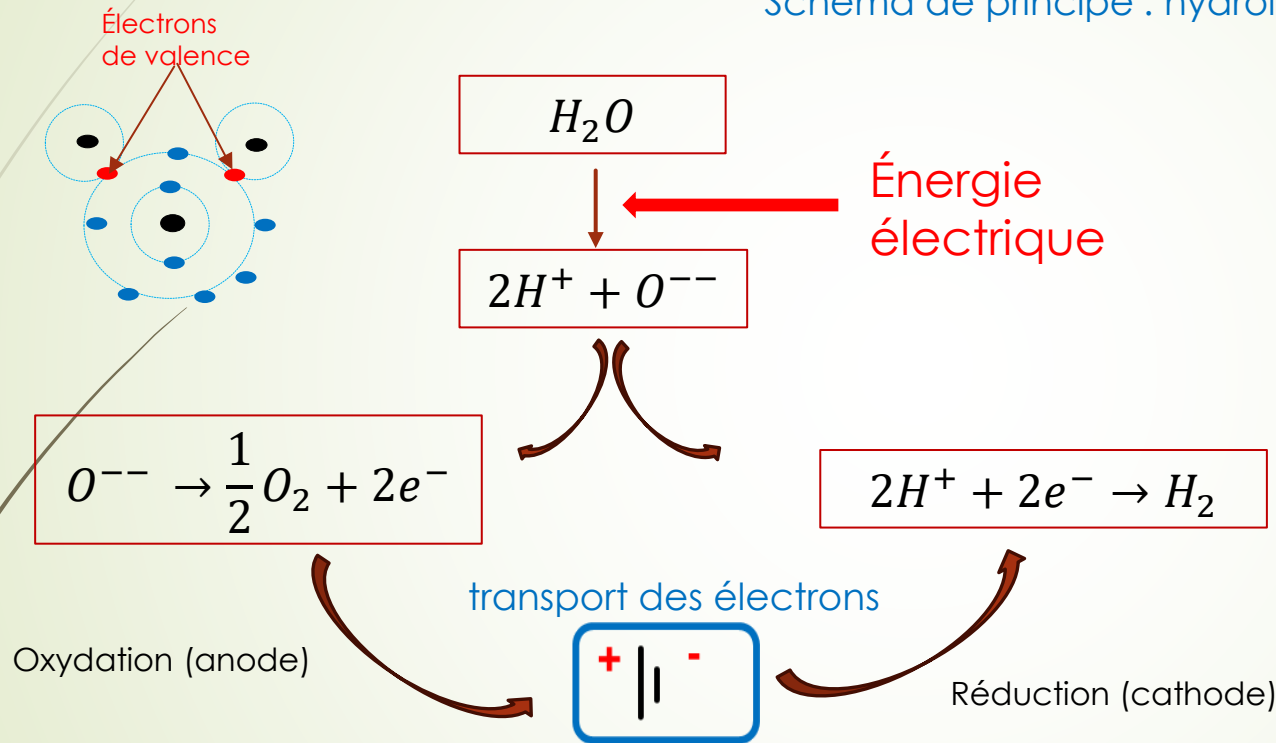
48



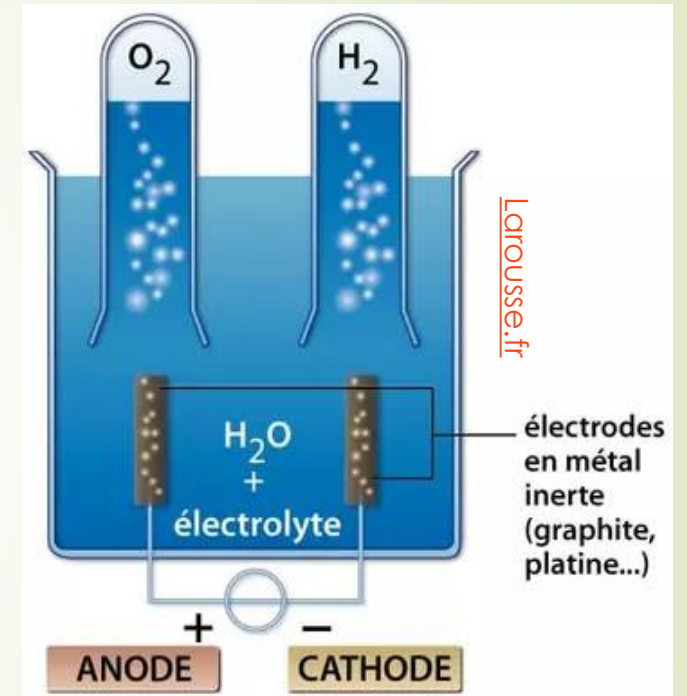
Utiliser les propriétés des électrons dans les atomes et les solides

Utiliser l'énergie électrique pour casser les liaisons des atomes dans les molécules

Schéma de principe : hydrolyse



Le rendement :
 ratio (énergie chimique de l'hydrogène)/(énergie électrique)
 → 60 à 75 %



Électrolyte : liquide conducteur pour le transport des ions (atomes chargés électriquement)

Processus inverse de l'électrolyse

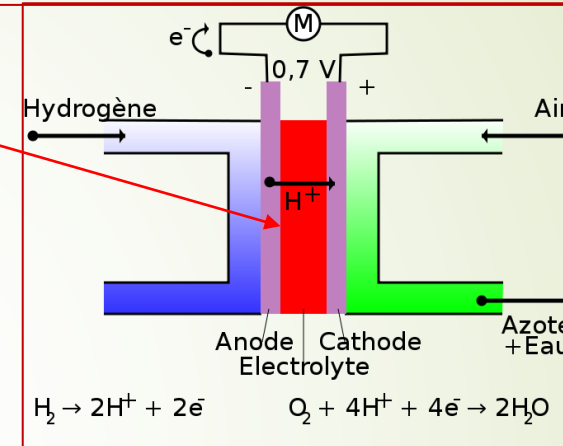
Membrane

échangeuse de protons (au lieu d'électrolyte liquide)

Électrodes en platine
Catalyse de la réaction

Réaction exothermique (température 60 à 90° C)

Rendement ≈ 80 %



Accueil > Pays de la Loire

Cityjoule, l'automobile citadine du futur ?

Cette petite voiture est la dernière invention des étudiants de Polytech'Nantes et des élèves du lycée de la Joliverie de Saint-Sébastien. Une championne !

Ouest-France
Valentine CINIÉR.

Publié le 20/03/2013 à 18h39

Abonnez-vous

LIRE PLUS TARD

PARTAGER

Newsletter La
Matinale

Chaque matin, l'actualité du
jour sélectionnée par



Jérôme Maillet est le pilote de Cityjoule, dernière voiture née de la collaboration Polytech-Joliverie. |

la Joliverie

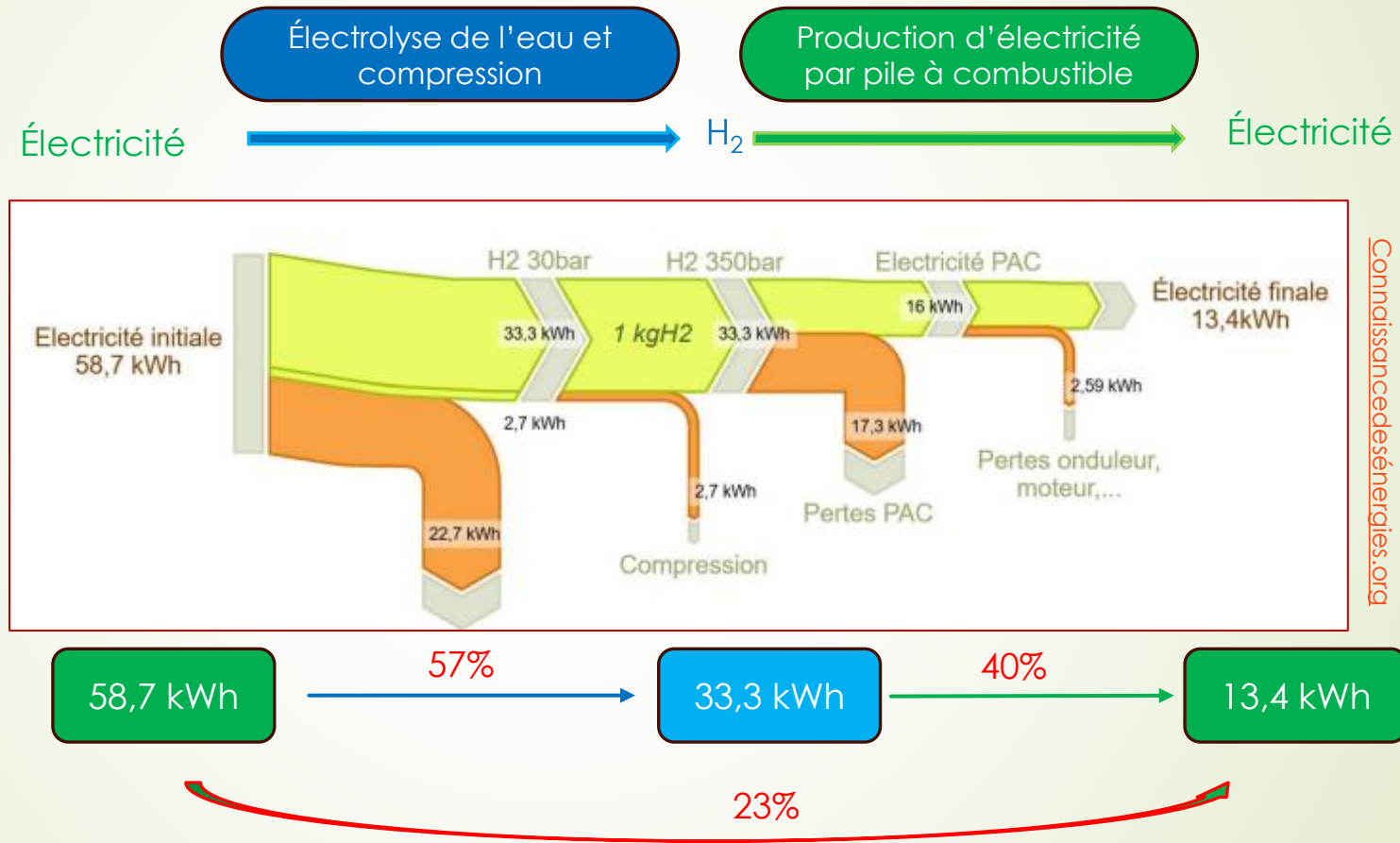


Avec 33,6 MJ/9,3 kWh
(équivalent 1 litre essence)
5 136 km en hydrogène,
10 017 en électricité.

Stockage de l'électricité – filière hydrogène

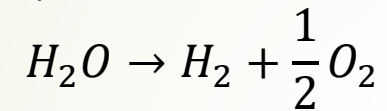
51

Stockage de l'électricité sous forme d'hydrogène



Longtemps, l'hydrogène a été perçu comme une **source secondaire** d'énergie (pour moteurs et piles), on a découvert des **sources primaires** d'hydrogène

Hydrogène « **blanc** » natif : produit en permanence dans la croûte terrestre par dissociation de la molécule d'eau (très endothermique)



Conditions de fortes pressions et températures et capture de l'oxygène par oxydation des roches

les sources d'hydrogène secondaire

- Hydrogène noir ou gris : charbon → gaz → hydrogène
Très polluant : 10 tonnes de CO₂ pour 1 tonne d'hydrogène produit.
- **Hydrogène bleu** : hydrogène gris + captage du CO₂
production énergivore et tout le CO₂ n'est pas capté
- **Hydrogène vert** : produit par électrolyse de l'eau avec électricité décarbonée
rendement énergétique faible en tenant compte de la production de l'électricité (**rose** si nucléaire)

Environnement : de l'hydrogène blanc découvert en Moselle

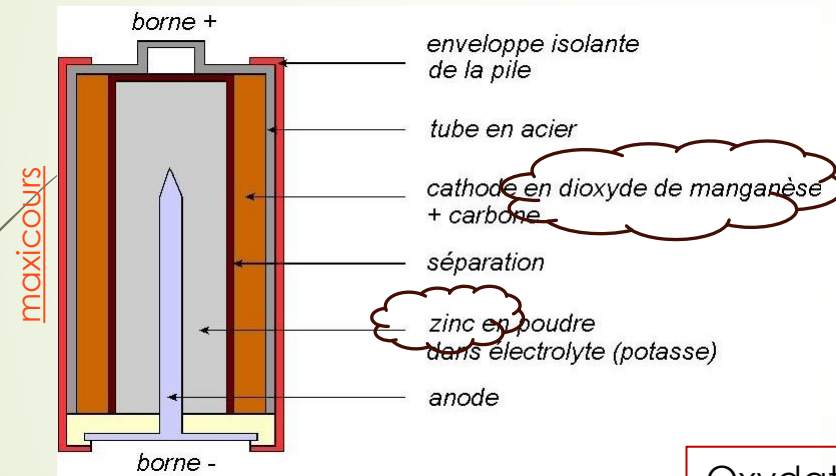
Publié le 12/06/2023 13:44

© Durée de la vidéo : 2 min



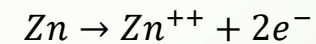
- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres
- Le moteur thermique est l'archétype de la transformation énergie thermique \rightarrow mécanique, à la base de notre société industrielle
- Le rendement des moteurs thermiques est limité (cycle de Carnot)
- Les machines thermiques sont basées sur les transformations réciproques : énergie thermique \leftrightarrow mécanique
- La photosynthèse (énergie radiative \rightarrow chimique) est la source majeure d'énergie de la Vie sur Terre
- Les transformations énergie radiative \leftrightarrow thermique & électrique sont des sources d'énergie pour la vie quotidienne
- L'électrolyse transforme l'énergie électrique en énergie chimique ; la pile à combustible est basée sur le processus inverse.

Pile : « processus - **irréversible** - basé sur la réaction chimique entre deux substances dont l'une peut facilement céder des électrons (matériau réducteur), et l'autre qui les absorbe (matériau oxydant) ». (Wikipédia)

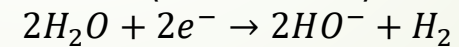


Pile alcaline moderne

Oxydation du zinc



Réduction (cuivre + sel)

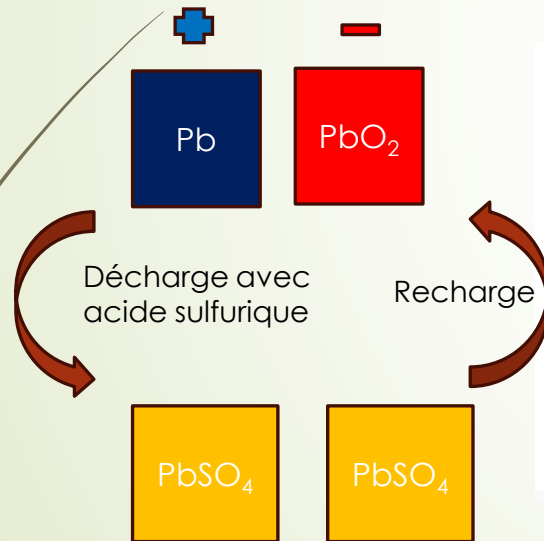


CCC A-SA 3.0 non par [GuidoB](#)

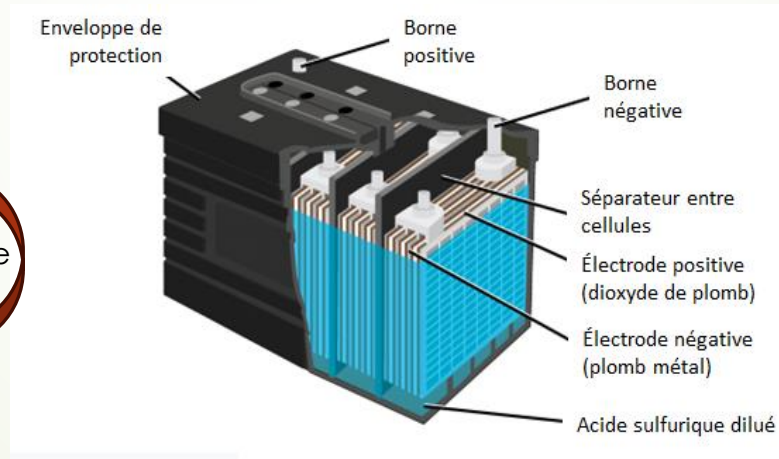
Pile de Volta (circa 1800) : zinc et cuivre séparés par feutre imbibé de saumure

~~Pile rechargeable~~ = batterie

Batterie : basé sur la réaction réversible entre deux atomes d'un même élément chimique, mais à deux états d'oxydation différents.

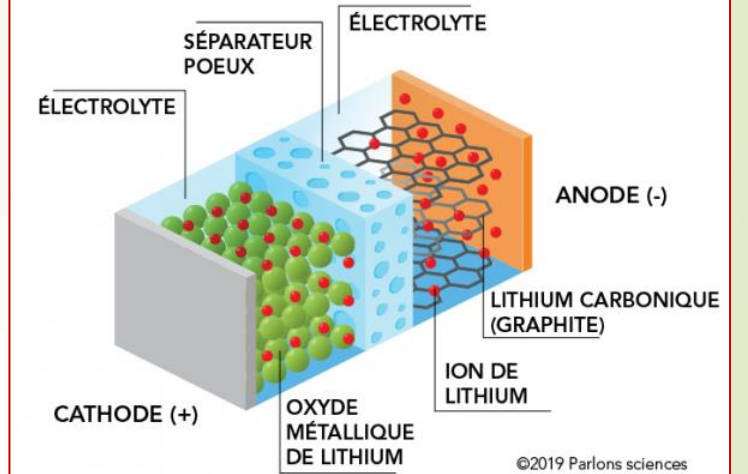


Batterie au Plomb

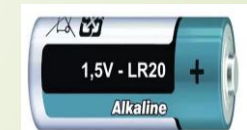


Révolution-énergétique

COMPOSANTS D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION



Parlons Science



Rendement des principales transformations d'énergie

56

Processus de conversion	Efficacité énergétique de conversion
Génération électrique	
Turbine à gaz	jusqu'à 40 %
Turbine à gaz plus Turbine à vapeur (cycle combiné)	jusqu'à 63,08 % ⁵
Turbine à vapeur	jusqu'à 45 %
Turbine hydraulique	jusqu'à 96 % ⁶ (atteint en pratique)
Éolienne	jusqu'à 59 % (limite théorique)
Cellule photovoltaïque	20 % le plus souvent ; 33,7 % pour une jonction p-n
Pile à combustible	jusqu'à 85 %
Production d'électricité mondiale 2008	Production brute 39 %, Production nette 33 % ⁷ .
Stockage Électrique, batteries	
Accumulateur lithium-ion	80-90 % ⁸
Accumulateur nickel-hydrure métallique	66 % ⁹ - 83 % ^{10,11}
Batterie au plomb	50-95 % ¹²
Machine/Moteur	
Moteur à combustion	10-50 % ¹³
Moteur électrique	30-60 % (petits < 10 W) ; 50-90 % (entre 10 et 200 W)
Turboréacteur	20-40 % ¹⁴

Processus naturel	
Photosynthèse	jusqu'à 6 % ¹⁵
Muscle	14 % - 27 %
Appareils domestiques	
Réfrigérateur domestique	bas de gamme ~ 20 % ; haut de gamme ~ 40 - 50 % [réf. nécessaire]
Lampe à incandescence	0,7 - 5,1 %, 5-10 %
Diode électroluminescente	4,2 - 14,9 %, jusqu'à 35 %
Tube fluorescent	8,0 - 15,6 %, 28 % ¹⁶
Lampe à vapeur de sodium	15,0 - 29,0 %, 40,5 % ¹⁶
Lampe à incandescence halogène	9,5 - 17,0 %, 24 % ¹⁶
Alimentation à découpage	Actuellement jusqu'à 95 % en pratique
Chauffe-eau électrique	90-95 %
Radiateur électrique	100 % (toute l'énergie est convertie en chaleur)
Pompe à chaleur	300 % à 500 % selon les températures réelles, le maximum théorique étant de l'ordre de 1500 %, le minimum théorique étant supérieur à 100 % ¹⁷
Autres	
Arme à feu	~30 %
Électrolyse de l'eau	50 % - 70 % (80 % - 94 % maximum théorique)

- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres
- Le moteur thermique est l'archétype de la transformation énergie thermique \rightarrow mécanique, à la base de notre société industrielle
- Le rendement des moteurs thermiques est limité (cycle de Carnot)
- Les machines thermiques sont basées sur les transformations réciproques : énergie thermique \leftrightarrow mécanique
- La photosynthèse (énergie radiative \rightarrow chimique) est la source majeure d'énergie de la Vie sur Terre
- Les transformations énergie radiative \leftrightarrow thermique & électrique sont des sources d'énergie pour la vie quotidienne
- L'électrolyse transforme l'énergie électrique en énergie chimique ; la pile à combustible est basée sur le processus inverse.
- Piles et accumulateurs utilisent des réactions chimiques soit irréversibles (pile) soit réversibles (accu) pour fournir de l'électricité

L'**énergie mécanique** d'un système est la somme

$$E_{\text{mécanique}} = E_{\text{cinétique}} + E_{\text{Potentielle}}$$

Exemple : un pendule simple : échange énergie cinétique \leftrightarrow énergie potentielle

L'énergie cinétique des corps en déplacement est

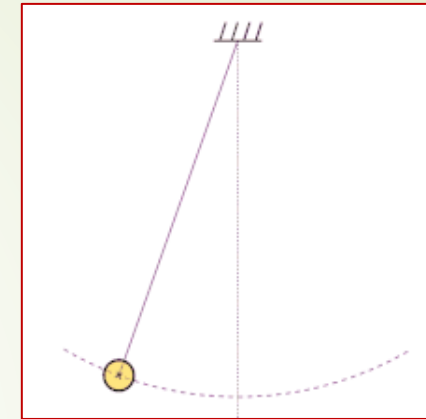
$$E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2}mv^2,$$

v est la vitesse linéaire (m/s)

Celle des corps en rotation est :

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2}I\omega^2$$

ω est la vitesse de rotation (radian/s) et I le moment d'inertie



Wikipédia – pendule simple

Stockage par l'énergie cinétique

Volant d'inertie (jusqu'à 2 MW)
Forte réactivité, durée courte

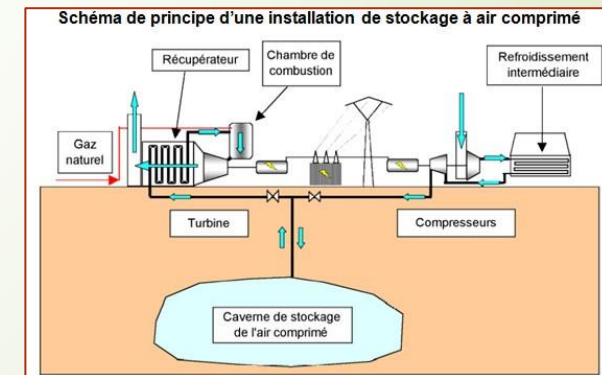


Études sur les divers modes de **stockage d'énergie**

Stockage par l'énergie potentielle

Air comprimé (CAES)

Perte de rendement par échauffement (50%)

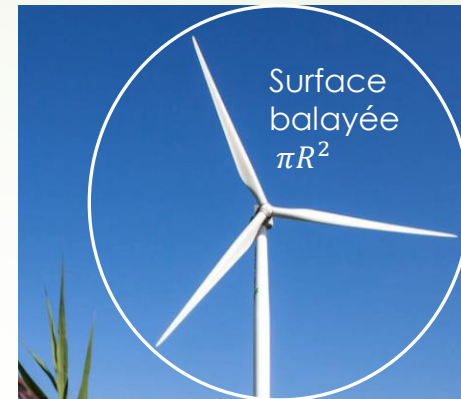


Énergie cinétique du vent

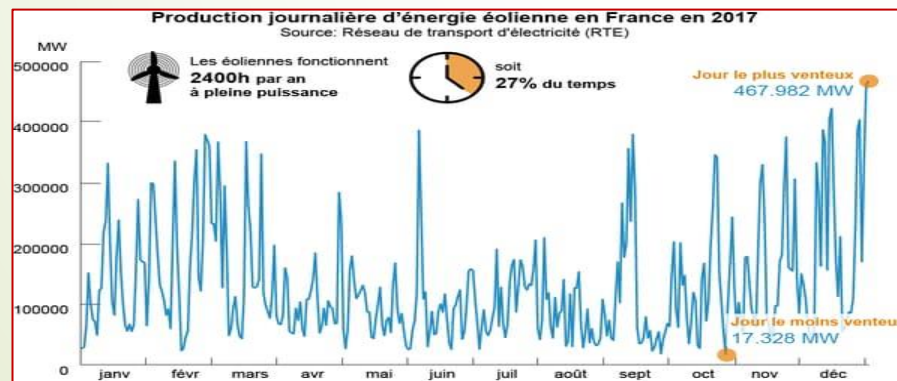
Vitesse du vent v (m/s)
Masse volumique de l'air ρ (1,3 kg/m³)
Masse d'air traversant l'éolienne par seconde : $\rho \pi R^2 v$

Énergie cinétique de l'air

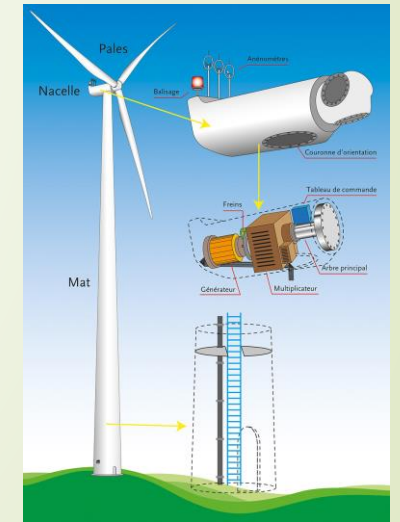
- Puissance à l'entrée $\rightarrow \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3$ (W) $\sim 2R^2 v^3$
- Puissance mécanique délivrée $1,15 R^2 v^3$ (wikipédia)



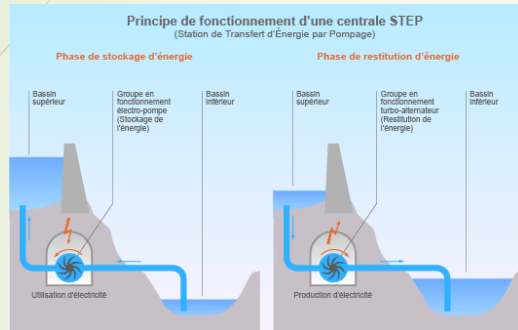
Exemple parc éolien de la Baule
 $R=75\text{ m}$; $V=20\text{ m/s}$ (72 km/h)
Puissance mécanique $P_{th} \approx 50\text{ MW}$
Pour 80 éoliennes : puissance électrique fournie 400 MW (480 MW affichés)
Facteur de charge 20% (lissage sur une année) \rightarrow énergie annuelle $E_{ann} \approx 700\text{ GWh}$



Moyenne journalière de production d'électricité éolienne



Stockage par l'énergie potentielle



Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)
Puissance de 500 MW à 1800 MW, rendement 70%
À venir : les STEP marines

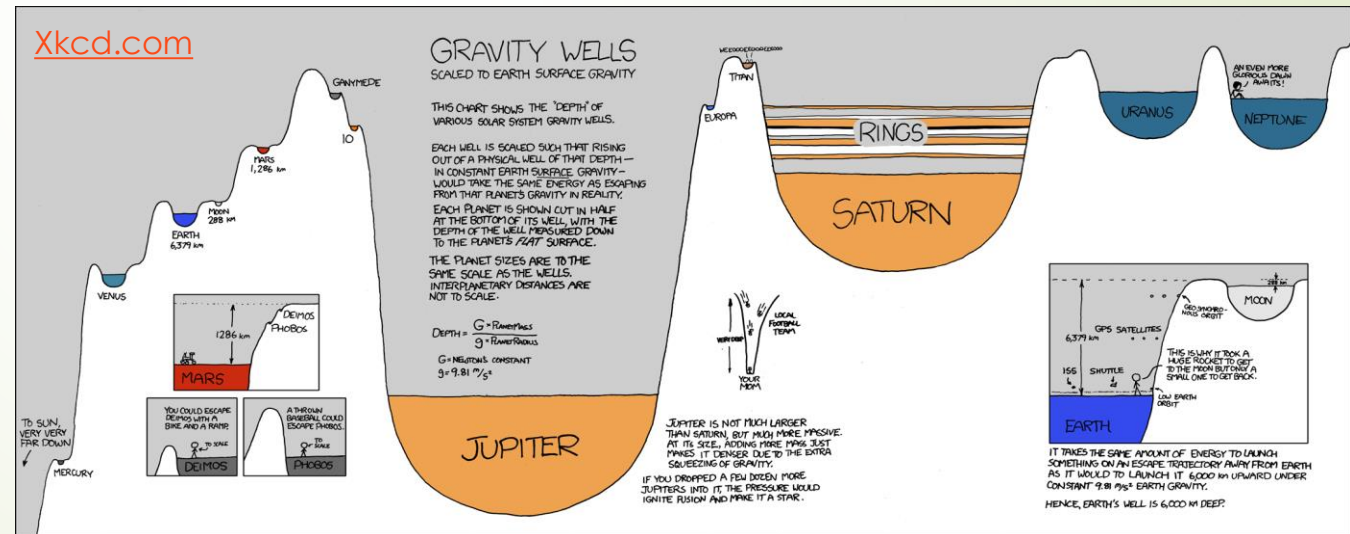
Pour info

Vitesse de libération à l'altitude h d'une planète de masse M et de rayon R

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R + h}}$$

- Terre → 11,186 m/s
- Lune → 2,38 m/s
- Jupiter → 60,20 m/s
- Soleil → 617 m/s
- Depuis la Terre sortir du système solaire → 42,1 m/s

Les puits de potentiel du système solaire (planètes sur un seul axe)





www.revolution-energetique.com

« À défaut de construire de nouvelles STEP (lire notre article à ce sujet), EDF veut augmenter les capacités de l'une de ses plus puissantes installations de stockage d'électricité. Il s'agit de la STEP de Montézic, dans l'Aveyron, qui déploie **920 MW de puissance et 38,8 GWh de capacité de stockage** depuis sa mise en service en 1982. Aussi puissante qu'un réacteur nucléaire de première génération, mais mobilisable en moins de 15 minutes, cette centrale est l'un des piliers du réseau électrique national ».

Le projet Montézic 2 en chiffres

⚡ Puissance de l'extension : 2 × 233 MW (466 MW au total)

⚡ Puissance totale de la STEP avec l'extension : 1 386 MW

💰 Coût estimé : 500 millions d'euros

🚧 Lancement des travaux : Début 2025

🔪 Percement de l'usine et des conduites : Début 2027

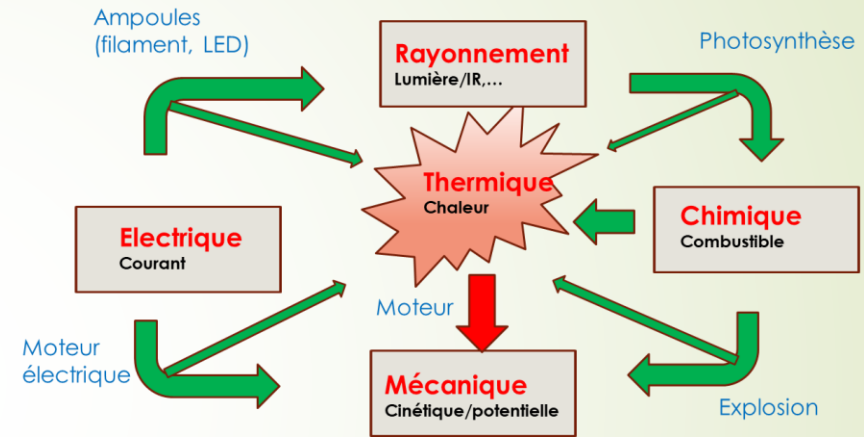
👷 Mise en service : Fin 2032

- On classe en 6 catégories les formes d'énergie à notre échelle
- On distingue les énergies primaires et les énergies secondaires (produites comme l'électricité)
- Toutes les formes d'énergie peuvent – plus ou moins facilement- se transformer les unes dans les autres
- Le moteur thermique est l'archétype de la transformation énergie thermique \rightarrow mécanique, à la base de notre société industrielle
- Le rendement des moteurs thermiques est limité (cycle de Carnot)
- Les machines thermiques sont basées sur les transformations réciproques : énergie thermique \leftrightarrow mécanique
- La photosynthèse (énergie radiative \rightarrow chimique) est la source majeure d'énergie de la Vie sur Terre
- Les transformations énergie radiative \leftrightarrow thermique & électrique sont des sources d'énergie pour la vie quotidienne
- L'électrolyse transforme l'énergie électrique en énergie chimique ; la pile à combustible est le processus inverse.
- Piles et accumulateurs utilisent des réactions chimiques soit irréversibles (pile) soit réversibles (accu) pour fournir de l'électricité
- L'énergie mécanique est un mode de production d'énergie et de stockage utilisé pour lisser les fluctuations des systèmes de production d'électricité.

« Rien ne se crée, rien ne se perd » tout se dégrade

63

Toute transformation
d'énergie se produit
avec des pertes
Un principe derrière ce
constat ?



Comment caractériser les différents types d'énergie en vue de leur utilisation ? → Chapitre suivant

Pour attribuer cette œuvre dans tout support dérivé en redistribution ou en adaptation ou modification dans le respect des conditions de licence libre et ouverte choisie par l'auteur :



«L'énergie dans tous ses états : énergies à notre échelle »
Dans: Un peu de science pour comprendre le monde moderne. »,
par Bernard Remaud, 2026 (mars), est sous licence CC BY-SA 4.0.

D'autres ressources sont disponibles sur le blog
<https://un-peu-de-physique.fr/>



Pour aller plus loin sur l'énergie?

Des vidéo conférences sur la chaîne YouTube : [la Science de Bernie](#)



Mon blog <https://un-peu-de-physique.fr/>
Des cours, des ressources...

Des podcasts sur Spotify : [La science de Bernie](#)



Des cours en ligne ou présentiels à l'Université
Permanente de Nantes : <https://up.univ-nantes.fr/>