

UE Energie – Climat - Société

Cours n°6 : Energie 2

Energies renouvelables :
Éolien, hydraulique, solaire

Arbitrer entre différentes énergies

Les paramètres « physiques »

L'**efficacité** de conversion d'une forme d'énergie vers une autre est un aspect important (une bonne efficacité permet, à usage égal, de réduire la quantité d'énergie nécessaire). Mais il y a évidemment d'autres paramètres à considérer très (voire plus) importants :

- La quantité d'énergie disponible dans la forme initiale, avant conversion : c'est le produit pour la ressource considérée de sa **densité d'énergie** et de son « **volume disponible** ».

densité d'énergie : quantité d'énergie récupérée par kg ou par m³ de matière transformée (bois, charbon, pétrole, gaz, uranium, eau, vent) ou par m² de surface exposée (soleil).

« **volume** » : masse ou volume de matière disponible (bois, ..., eau, vent) ou surface exposée (lumière)

- L'accessibilité physique et donc le coût *global* en ressources (matérielles, économiques, humaines et environnementales) pour rendre cette forme d'énergie disponible (de la fabrication au démantèlement du convertisseur). L'injection d'énergie et de matériaux amène à définir les notions d'**énergie grise**, de **taux de retour énergétique** et nécessite une **analyse en cycle de vie**. La prise en compte des impacts sur les milieux naturels et la biodiversité amène à définir une **empreinte environnementale**.

étapes du cycle de vie du convertisseur: 1) fabrication 2) fonctionnement 3) démantèlement - recyclage.

Arbitrer entre différents usages

Et les « autres » paramètres ...

- L'accessibilité géopolitique de la ressource ; l'acceptabilité sociétale (de cette forme d'énergie et des organisations sociotechniques qui en découlent) : les paramètres physiques précédents informent sans épuiser le débat.
- Par ailleurs, il convient de raisonner en besoins à satisfaire (et non en énergie à produire) : un même besoin peut être rempli de différentes façons, ce qui permet d'envisager une réduction des impacts par des changements d'usage.
- Une réflexion sur les besoins et les usages peut permettre de les hiérarchiser et *in fine* d'en abandonner certains (sobriété choisie). La notion de *besoin* est complexe car elle est en partie subjective et évolutive (au fil de normes socialement construites et d'évolutions sociotechniques).

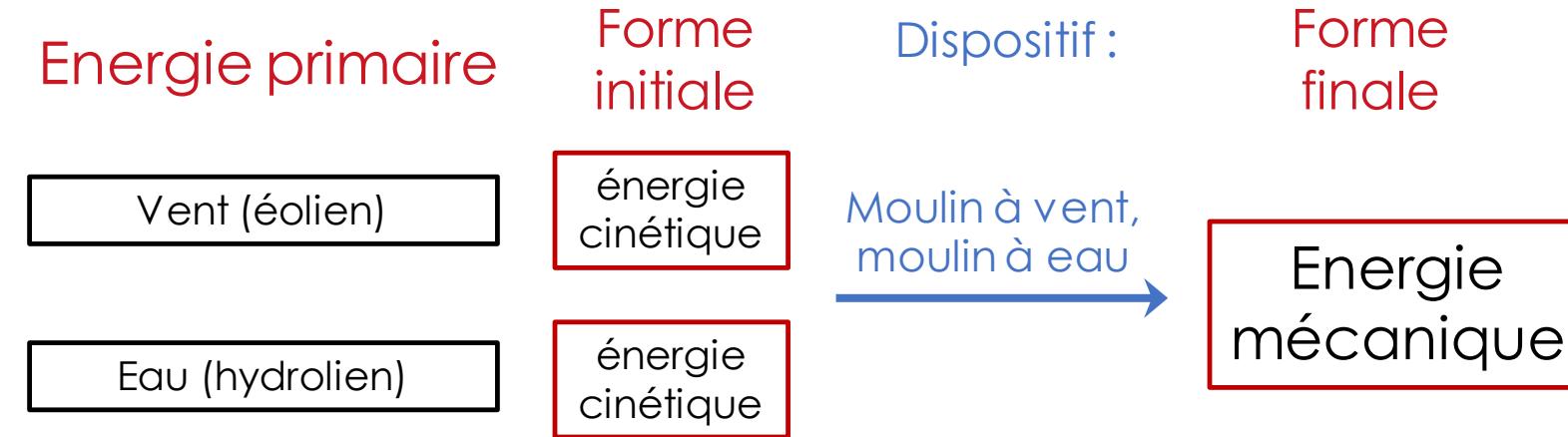
L'individu peut faire des choix mais ces choix sont en partie contraints par l'organisation sociotechnique dans laquelle il évolue (ex. : infrastructures dédiées à la voiture individuelle plutôt qu'au transport collectif). Par ailleurs, le choix d'usage d'une voiture est conditionné par d'autres éléments que la seule fonctionnalité de se déplacer de A en B (sensation de confort ou de sécurité, marqueur de classe sociale, etc). Des changements d'usage peuvent être impulsés ou encouragés par des politiques publiques mais ces choix doivent nécessairement être délibérés/arbitrés collectivement.

De quoi a-t-on besoin ?

- **de se nourrir** : service fourni en partie « gratuitement » par le Soleil (photosynthèse pour la production agricole) mais actuellement très boosté par les intrants (engrais. Ex. : énergie dans le procédé Haber-Bosch) et par les machines agricoles.
- **de chaleur** : chauffer/refroidir son logement, cuire les aliments, eau chaude sanitaire. Et pour réaliser certains processus industriels (ex. : fondre un métal).
- **de mobilité** : se déplacer ou déplacer des biens (nourriture, produits transformés).
- **de travail mécanique ou électrique pour certains usages ou services spécifiques** : produits transformés par des machines de l'industrie, logement ou infrastructures produits par des machines du bâtiment. éclairage, électroménager, informatique ...
- **et de beaucoup d'autres choses** (mais n'impliquant pas nécessairement beaucoup d'énergie ou de matière) : culture, musique, sport, amour, spiritualité, ...

Conversions entre formes d'énergie

Service énergétique = « moudre, pomper, râper »



Conversions entre formes d'énergie

Service énergétique = « moudre, pomper, râper »

Energie primaire

Vent (éolien)

Forme initiale

énergie cinétique

Eau (hydrolien)

énergie cinétique

Dispositif :

Moulin à vent,
moulin à eau

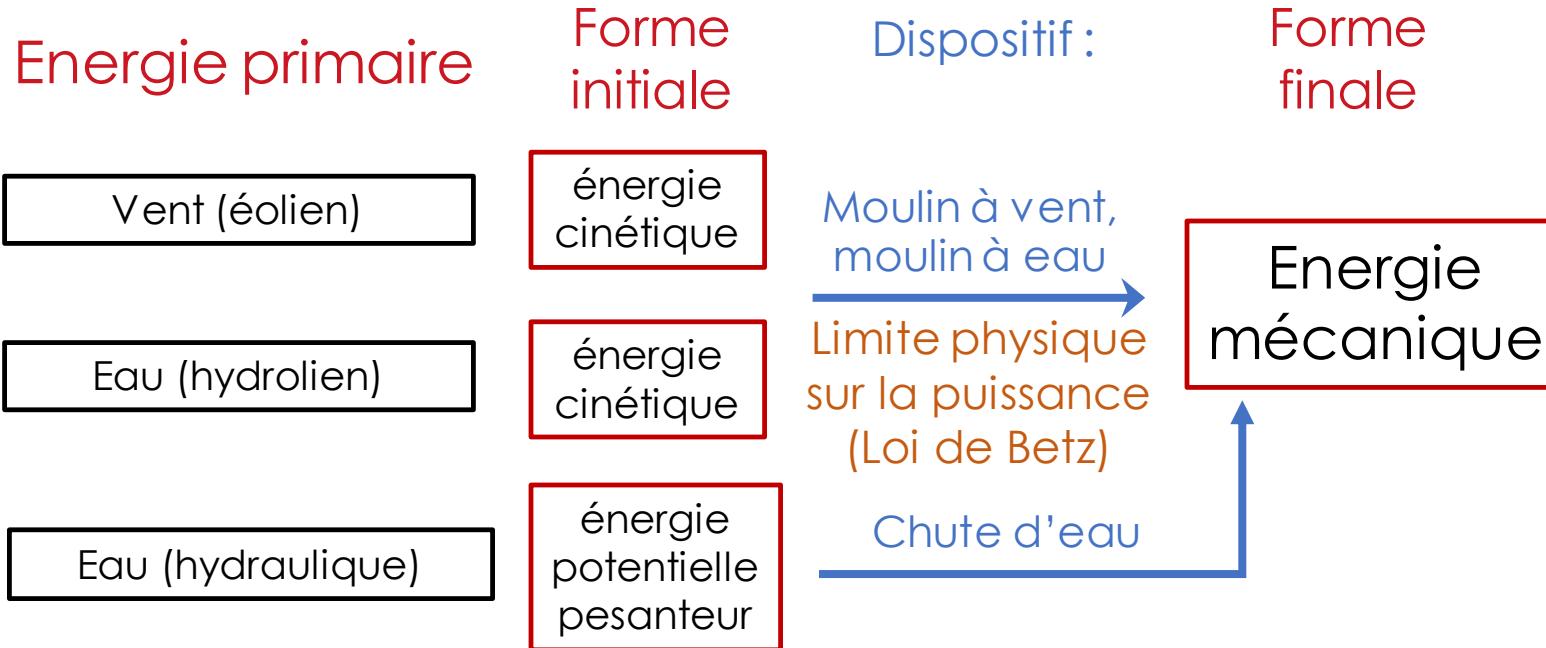
Forme finale

Energie mécanique

Limité physique
sur la puissance
(Loi de Betz)

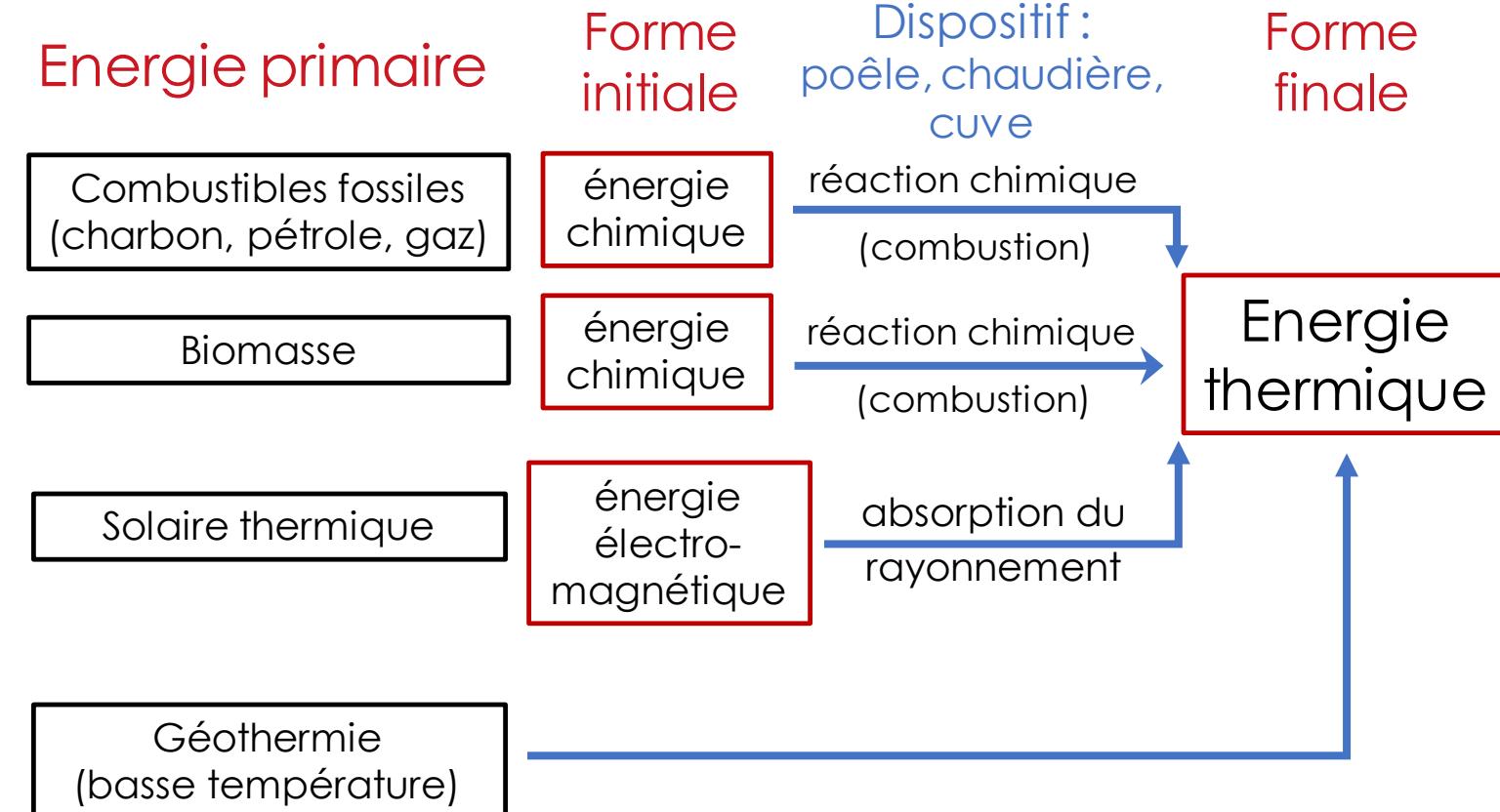
Conversions entre formes d'énergie

Service énergétique = « moudre, pomper, râper »



Conversions entre formes d'énergie

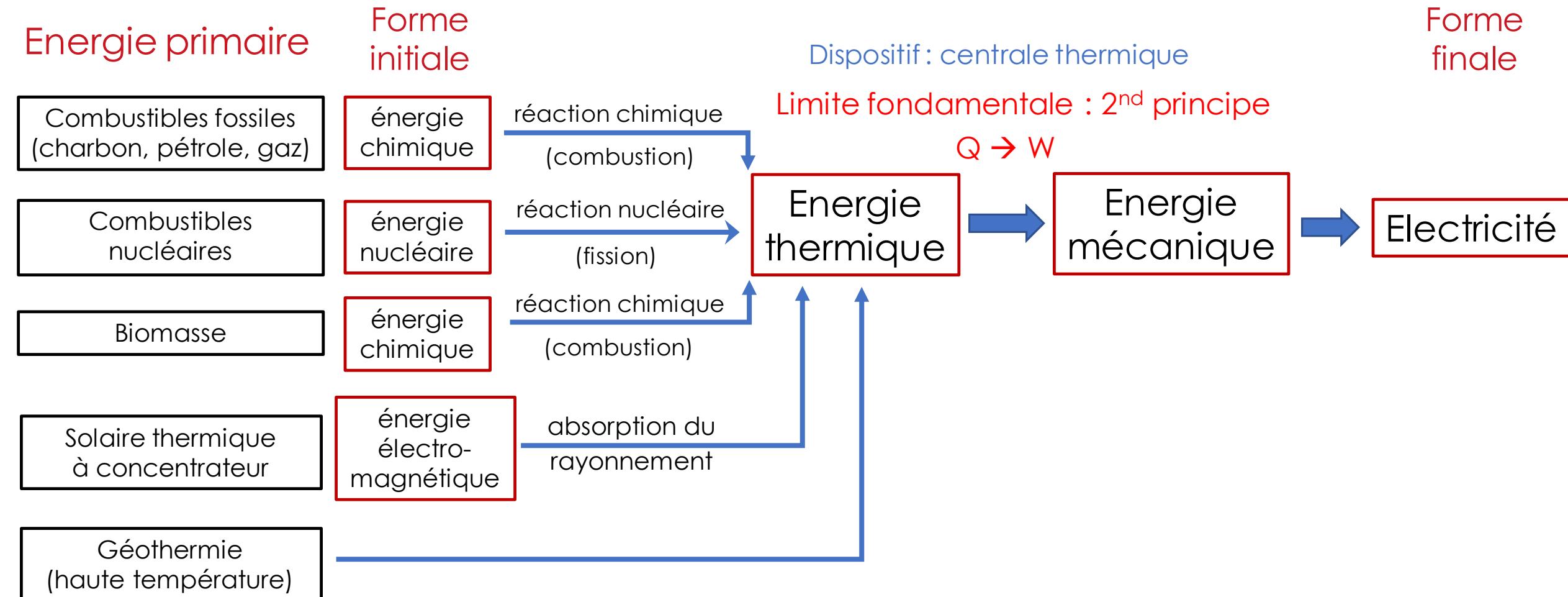
Service énergétique = « chauffer »



Conversions entre formes d'énergie

Service énergétique = « s'éclairer »

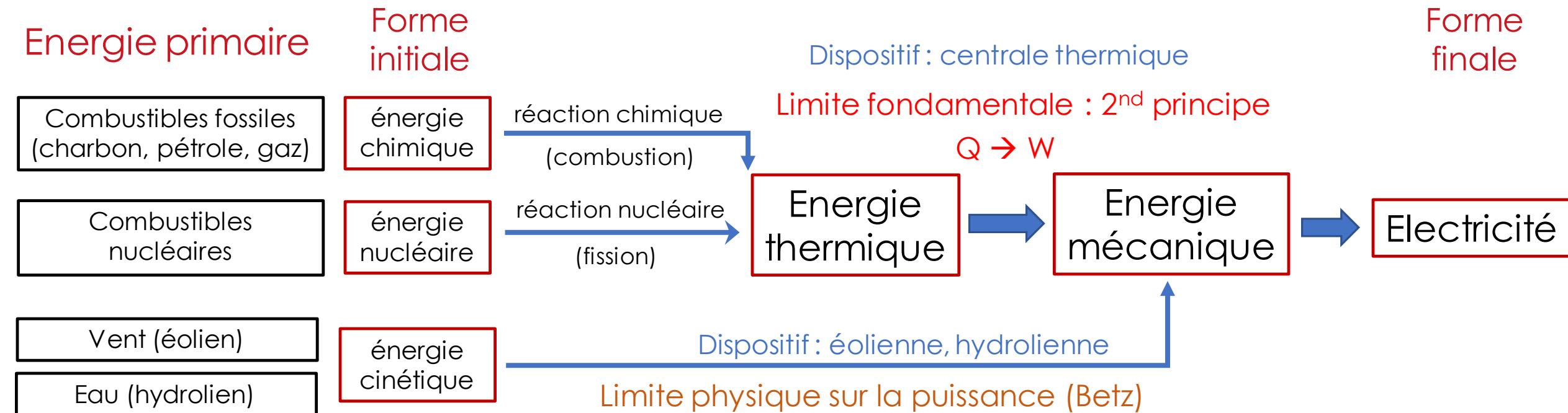
(ou faire fonctionner un appareil électrique : machine à laver, mixeur, radio, téléphone, etc)



Conversions entre formes d'énergie

Service énergétique = « s'éclairer »

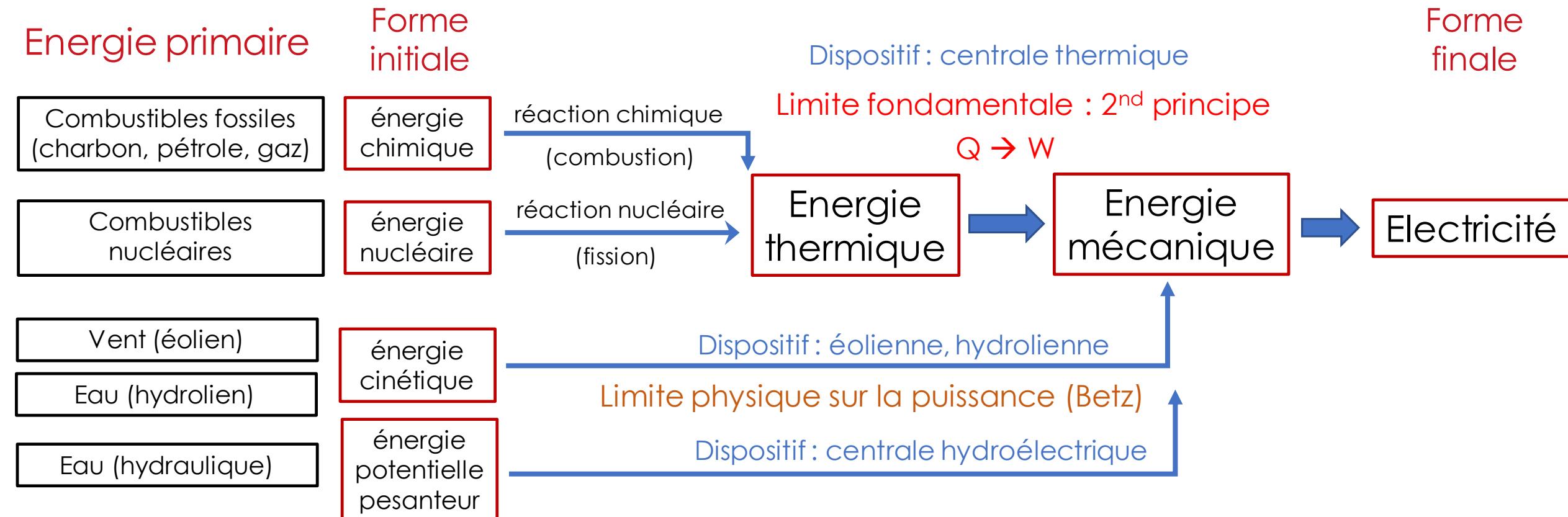
(ou faire fonctionner un appareil électrique : machine à laver, mixeur, radio, téléphone, etc)



Conversions entre formes d'énergie

Service énergétique = « s'éclairer »

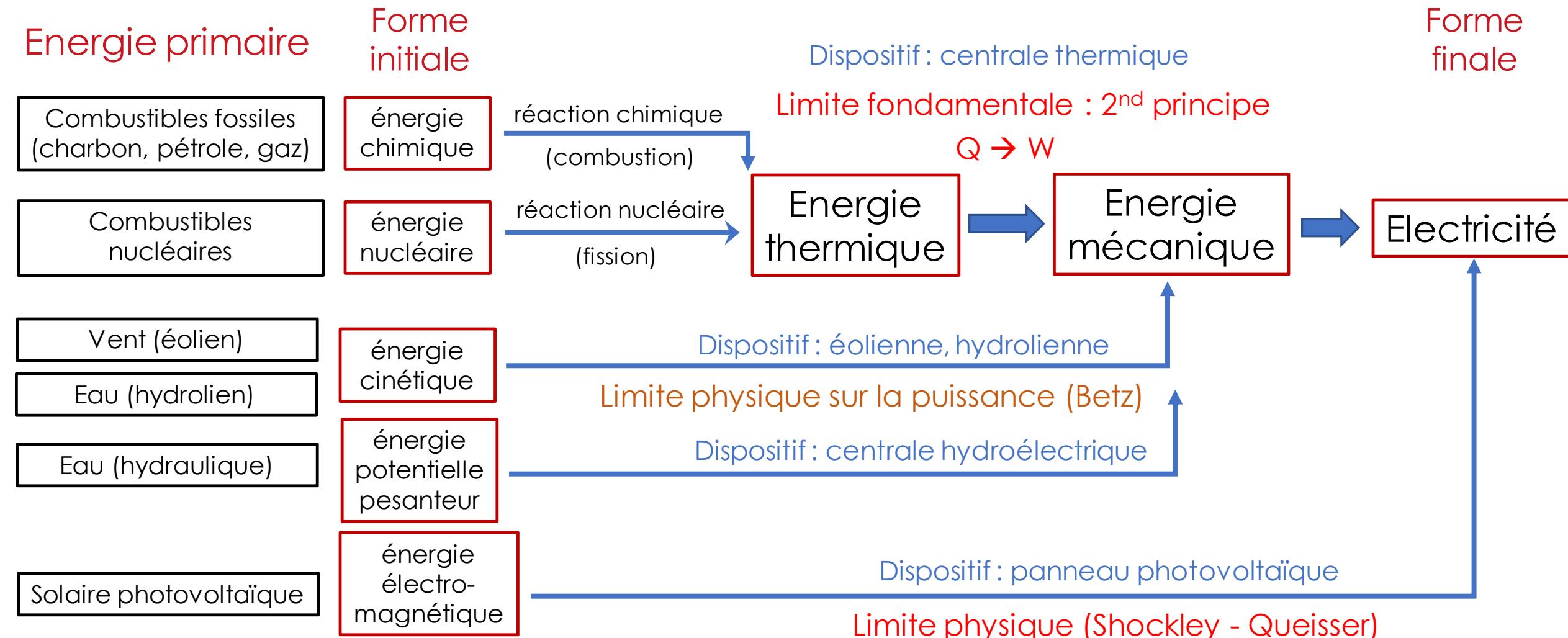
(ou faire fonctionner un appareil électrique : machine à laver, mixeur, radio, téléphone, etc)



Conversions entre formes d'énergie

Service énergétique = « s'éclairer »

(ou faire fonctionner un appareil électrique : machine à laver, mixeur, radio, téléphone, etc)

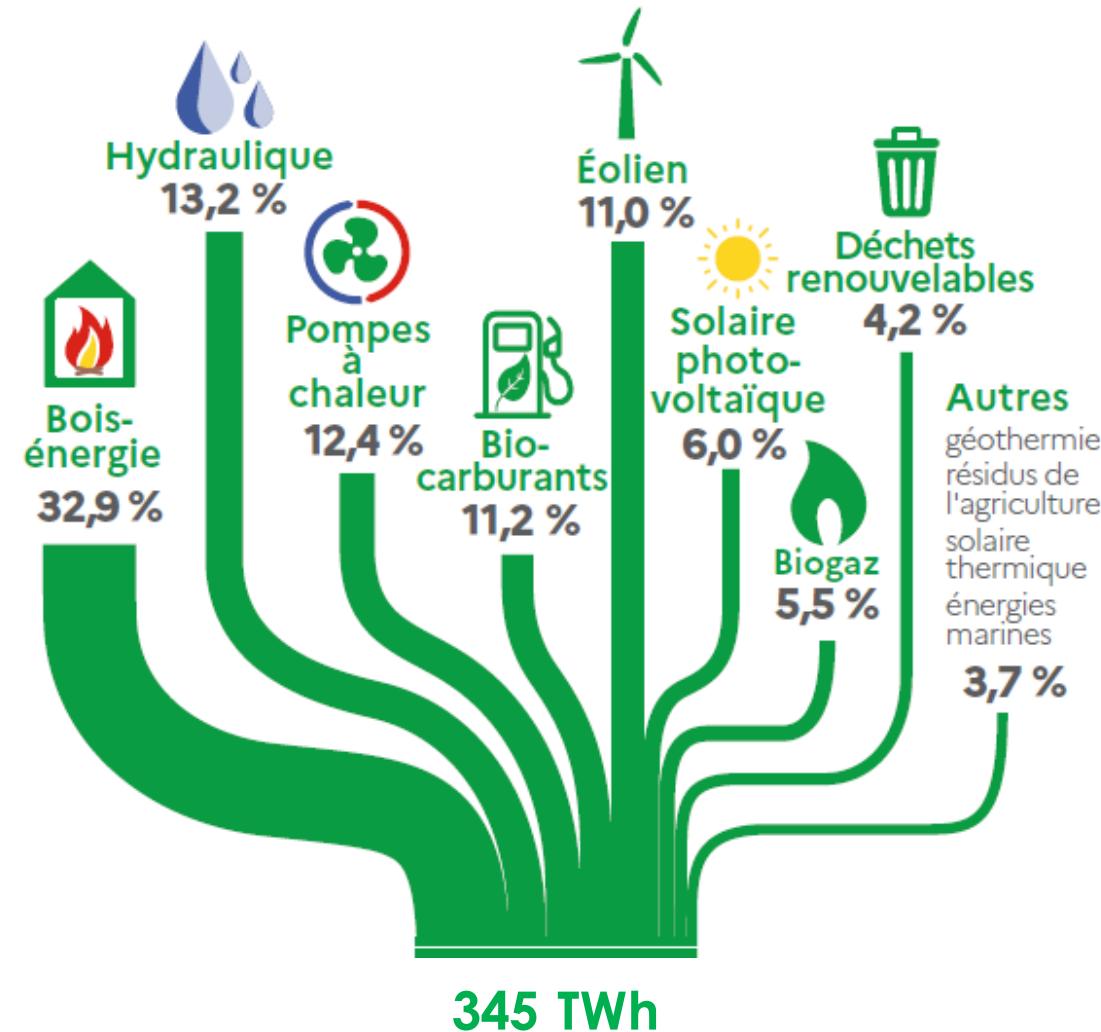


Energies (2022)

Monde	fossiles / nucléaire / renouvelables		
Production énergie primaire : 632 EJ ~ 176 000 TWh	79 %	/	5 % / 16 %
Production énergie finale : 442 EJ ~ 123 000 TWh			
dont électricité (20 %) : 89 EJ ~ 24 700 TWh	61 %	/	9 % / 30 %
France	fossiles / nucléaire / renouvelables		
Consommation énergie primaire : ~ 2540 TWh	54 %	/	32 % / 14 %
Consommation énergie finale : ~ 1660 TWh			
dont électricité (27 %) : 445 TWh	11 %	/	63 % / 26 %
Production d'énergie d'origine renouvelable : ~ 345 TWh			
↳ sous forme d'électricité (36 %), de chaleur (49 %), de gaz + carburants (15 %)			

Les filières d'énergie renouvelable

France (2022)



Plan du cours

Partie I :
Généralités

Partie II :
Eolien, Hydraulique,
Solaire

Densité d'énergie
Puissance surfacique
Puissance instantanée et moyenne
Puissance moyenne et installée

Energie éolienne
Energie hydraulique
Energie solaire :
– solaire thermique
– solaire photovoltaïque

Notions importantes :

*formes diffuse et
concentrée de l'énergie*

*intermittence et
facteur de charge*

Loi de Betz

*Limite de
Shockley - Queisser*

Densité (massique) d'énergie

Énergie mise en jeu dans la transformation d'1 kg de matière

Matière	Type d'énergie	MJ/kg	
Uranium-235	nucléaire	79×10^6	très concentrée
Hydrogène (700 bars)	chimique	123	
Essence - Fioul - Kérosène	chimique	47 / 45 / 43	
Charbon	chimique	24	
Sucres	chimique	16,5	
Bois	chimique	16	
Batterie lithium-ion	électrochimique	0,72	
Batterie au plomb	électrochimique	0,1	
1 kg d'eau lâché de 100 m de haut	gravitation	0,001	très diffuse

Densité (massique) d'énergie

Attention cependant :

- On n'obtient pas directement 1 kg d'uranium (ni même d'essence/fioul/kérosène) sous forme pure dans la nature.

Cas de l'uranium 235 : 0,7 % de l'uranium naturel, lui-même dilué dans la roche.

Teneur moyenne de l'uranium dans la croûte terrestre ~ qq ppm.

Gisement rentable à partir de ~ 100 ppm = 0,1 %.

Donc 1 kg d'uranium 238 (issu d'un gisement à 100 ppm) \leftrightarrow $1/(0,007 \times 0,001)$ kg = 143 000 kg de roche.

Densité d'énergie

Densité massique d'énergie

1 kg de bois : 16 MJ

Densité volumique

80 kg/m³

Densité volumique d'énergie

1280 MJ/m³

Densité d'énergie

Du bois aux énergies fossiles

Densité massique d'énergie	Densité volumique	Densité volumique d'énergie
1 kg de bois : 16 MJ	80 kg/m ³	1280 MJ/m ³
1 kg de charbon : 24 MJ	~ 800 kg/m ³	19 200 MJ/m ³

x 1,5 x 10 x 15

En Europe, à partir du 19^e siècle, les industries très intensives en énergie (ex. verrerie) délaisse le bois au profit du charbon : la surface de forêts (qui avait considérablement régressée au Moyen-Age) repart à la hausse.

Densité d'énergie

Du bois aux énergies fossiles

Densité massique d'énergie	Densité volumique	Densité volumique d'énergie
1 kg de bois : 16 MJ	80 kg/m ³	1280 MJ/m ³
1 kg de charbon : 24 MJ	~ 800 kg/m ³	19 200 MJ/m ³
1 kg de pétrole : 43 MJ	~ 800 kg/m ³	34 400 MJ/m ³

En Europe, à partir du 19^e siècle, les industries très intensives en énergie (ex. verrerie) délaisse le bois au profit du charbon : la surface de forêts (qui avait considérablement régressée au Moyen-Age) repart à la hausse.

Avantages du pétrole par rapport au charbon : plus énergétique, liquide donc plus facilement transportable (oléoduc), infrastructures d'exploitation centralisées donc nécessitant peu de mains d'œuvre.

Densité d'énergie

Du bois aux énergies fossiles

Densité massique d'énergie	Densité volumique	Densité volumique d'énergie
1 kg de bois : 16 MJ	80 kg/m ³	1280 MJ/m ³
1 kg de charbon : 24 MJ	~ 800 kg/m ³	19 200 MJ/m ³
1 kg de pétrole : 43 MJ <i>/ 1000</i>	~ 800 kg/m ³	34 400 MJ/m ³
1 kg de gaz naturel : 44 MJ (~ CH ₄) sous forme gaz	~ 0,8 kg/m ³	35 MJ/m ³

En Europe, à partir du 19^e siècle, les industries très intensives en énergie (ex. verrerie) délaisse le bois au profit du charbon : la surface de forêts (qui avait considérablement régressée au Moyen-Age) repart à la hausse.

Avantages du pétrole par rapport au charbon : plus énergétique, liquide donc plus facilement transportable (oléoduc), infrastructures d'exploitation centralisées donc nécessitant peu de mains d'œuvre.

Densité d'énergie

Du bois aux énergies fossiles

Densité massique d'énergie	Densité volumique	Densité volumique d'énergie
1 kg de bois : 16 MJ	80 kg/m ³	1280 MJ/m ³
1 kg de charbon : 24 MJ	~ 800 kg/m ³	19 200 MJ/m ³
1 kg de pétrole : 43 MJ	~ 800 kg/m ³	34 400 MJ/m ³
1 kg de gaz naturel : 44 MJ (~ CH ₄) sous forme gaz	~ 0,8 kg/m ³	35 MJ/m ³
1 kg de gaz naturel : 53 MJ (~ CH ₄) sous forme liquide	~ 423 kg/m ³	22 400 MJ/m ³

En Europe, à partir du 19^e siècle, les industries très intensives en énergie (ex. verrerie) délaisse le bois au profit du charbon : la surface de forêts (qui avait considérablement régressée au Moyen-Age) repart à la hausse.

Avantages du pétrole par rapport au charbon : plus énergétique, liquide donc plus facilement transportable (oléoduc), infrastructures d'exploitation centralisées donc nécessitant peu de mains d'œuvre.

Le gaz naturel liquéfié (GNL) requiert beaucoup d'énergie pour sa réfrigération. Usage limité essentiellement aux transports intercontinentaux (coûteux) par bateaux entre terminaux méthaniers.

Densité d'énergie

Hydraulique et éolien

Ecoulement d'un fluide de masse volumique ρ_0 à la vitesse v

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow \text{Densité volumique d'énergie : } \frac{E_c}{V} = \frac{1}{2}\rho_0v^2$$

Estimations en ordre de grandeur :

- Courant d'eau ($\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$) Densité volumique
d'énergie
 à la vitesse $v \sim 140 \text{ m/s}$ (Roselend. Chute de 1000 m) $\rightarrow \sim 10 \text{ MJ/m}^3$

à la vitesse $v \sim 44 \text{ m/s}$ (Chute de 100 m) $\rightarrow \sim 1 \text{ MJ/m}^3$

- Courant d'air ($\rho_0 \sim 1,2 \text{ kg/m}^3$)
 à la vitesse $v \sim 30 \text{ m/s}$ (108 km/h) $\rightarrow 540 \text{ J/m}^3 = 0,000540 \text{ MJ/m}^3$

à la vitesse $v \sim 6 \text{ m/s}$ (22 km/h) $\rightarrow 20 \text{ J/m}^3 = 0,000020 \text{ MJ/m}^3$

Densité d'énergie

Bois, fossiles, hydraulique, éolien

Densité massique d'énergie	Densité volumique	Densité volumique d'énergie
1 kg de bois : 16 MJ	80 kg/m ³	1280 MJ/m ³
1 kg de charbon : 24 MJ	~ 800 kg/m ³	19 200 MJ/m ³
1 kg de pétrole : 43 MJ	~ 800 kg/m ³	34 400 MJ/m ³
1 kg de gaz naturel : 44 MJ (~ CH ₄) sous forme gaz	~ 0,8 kg/m ³	35 MJ/m ³
1 kg de gaz naturel : 53 MJ (~ CH ₄) sous forme liquide	~ 423 kg/m ³	22 400 MJ/m ³
1 kg d'eau circulant à 44 m/s : 0,001 MJ (ou chutant de 100 m)	1 000 kg/m ³	1 MJ/m ³
1 kg d'air circulant à 5 m/s : 0,00002 MJ	1,2 kg/m ³	0,00002 MJ/m ³

Densité de puissance

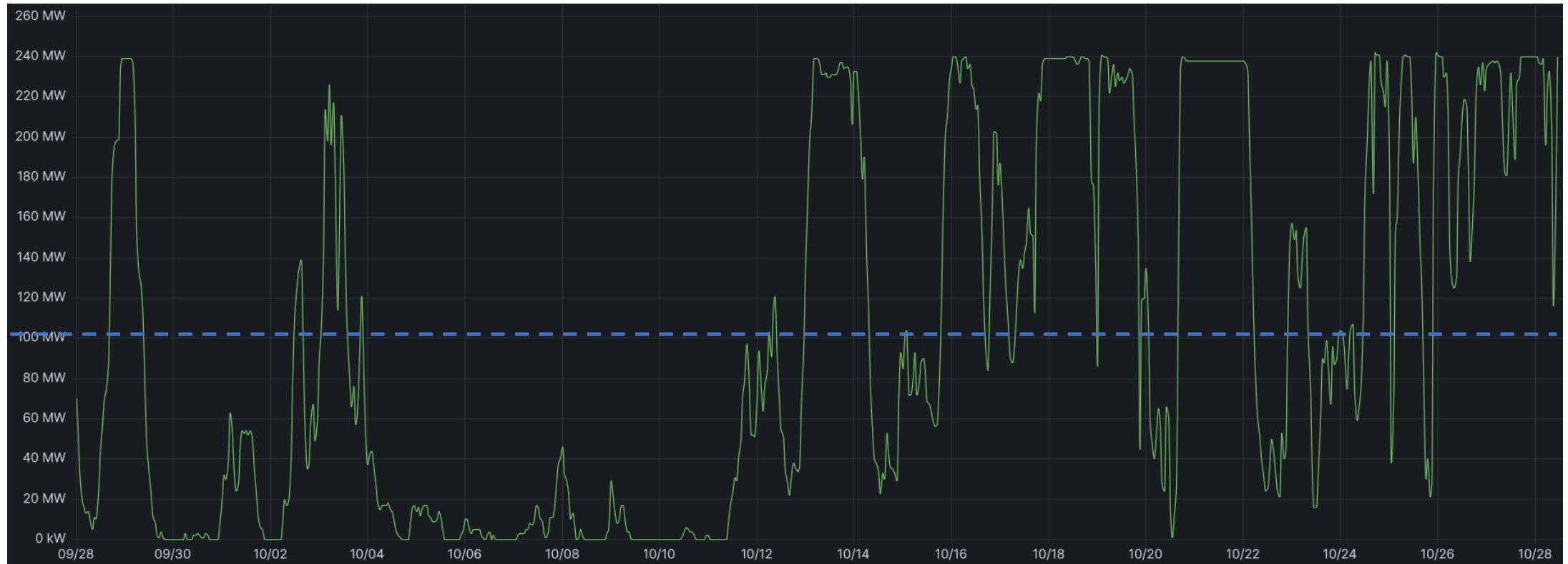
énergie disponible = densité d'énergie x « volume d'énergie disponible ».

- Dans le cas des énergies de stock, ce volume (stock) est important au départ mais s'épuise progressivement. Dans le cas des énergies de flux, le « volume » est *infini* dans le temps mais disponible en quantité finie à l'instant t. Pour les comparer, il est donc plus approprié de raisonner sur la **densité de puissance** des différentes formes d'énergies.
- Les flux en question (photons sur un panneau solaire, courant d'air/d'eau sur une turbine) s'exprimant naturellement en flux par unité de surface, on tendra à utiliser une **densité surfacique de puissance**.
- A l'échelle du dispositif de conversion, la surface considérée est celle du dispositif en question : surface éclairée d'un panneau, section de turbine ou d'éolienne traversée, etc.
- On peut également chercher à refléter l'occupation du sol (impact environnemental) par la prise en compte de l'ensemble de l'infrastructure requise dans une production d'énergie donnée (ex. : surface d'un réservoir hydraulique, superficie d'une ferme éolienne ou solaire, centrale nucléaire + routes associées à sa desserte, etc.). Le calcul est plus compliqué (périmètre pas toujours évident à définir). [On en reparlera plus tard]

En termes d'environnement, cette densité surfacique fournit par son inverse une mesure de l'intensité de l'utilisation des sols (en m^2/W). Mais il y a d'autres intensités à prendre en compte, en particulier l'intensité de l'utilisation de l'eau ($g H_2O/J$) et l'intensité carbone ($g C/J$),

Puissances : instantanée & moyenne

Intermittence de production et de consommation



Parc éolien offshore de Saint-Nazaire (Banc de Guérande n°1, octobre 2023)

Min	Max	Mean
0 kW	242 MW	102 MW

Puissances : moyenne et installée

Facteur de charge

Les installations ne fonctionnent pas à leurs capacités maximales en permanence. Le rapport de la puissance moyenne effective (dans le temps) et de la puissance nominale installée (ou puissance crête dans le cas du solaire photovoltaïque) définit le facteur de charge :

$$f = \frac{\mathcal{P}_{moyenne}}{\mathcal{P}_{installée}}$$

Ex. précédent : Banc de Guérande 1 : 40 éoliennes de 6 MW chacune $\rightarrow \mathcal{P}_{installée} = 240 \text{ MW}$

Moyenne observée en octobre 2023 : 102 MW \rightarrow facteur de charge : 42 %

Autres exemples :

- Centrale nucléaire de Cruas-Meysse (Ardèche). 4 réacteurs de 900 MW $\rightarrow \mathcal{P}_{installée} = 3600 \text{ MW}$.

Moyenne observée sur 1 an (oct. 2022 – oct. 2023) : 2490 MW \rightarrow facteur de charge : 69 %

- Centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe). 4 puits, 1000 m, 250°C, $\mathcal{P}_{installée} = 15,5 \text{ MW}$.

Moyenne observée sur 1 an (en 2019) : E = 110 GWh, soit 12,6 MW \rightarrow facteur de charge : 81 %

Puissances : moyenne et installée

Facteur de charge : valeurs typiques par filière

- Principales filières dites pilotables : centrales thermiques, nucléaires et géothermiques : ~ 70 - 90 %
- Hydraulique : ~ 30 – 60 %
- Eolien offshore (en mer) : ~ 40 %
- Eolien onshore (terrestre) : ~ 25 %
- Solaire photovoltaïque : ~ 10 - 25 %

Cela impacte les surfaces requises pour produire une quantité d'énergie donnée.

L'énergie éolienne

Introduction

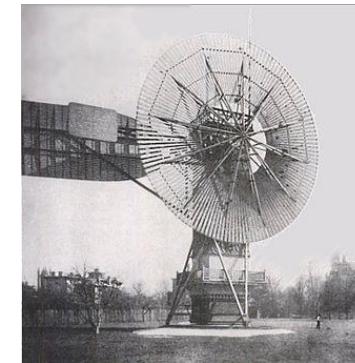
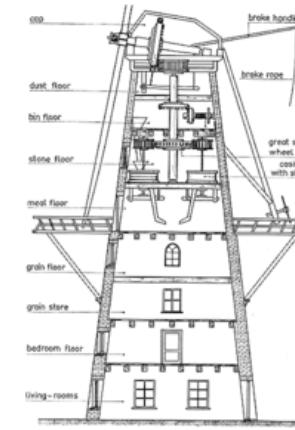
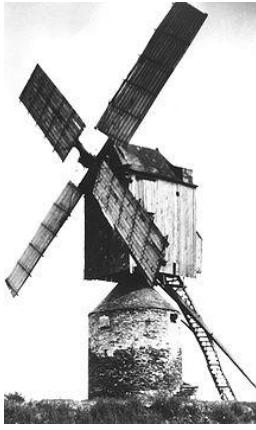
- ✓ Energie incidente du soleil (173 000 TW, au sommet de l'atmosphère) :
 - ~ 30 % réfléchie vers l'Espace (par l'atmosphère et la surface terrestre : Albedo)
 - ~ **70 %** (120 000 TW) absorbée et **transformée en énergie thermique** dans l'atmosphère, les terres et les eaux de surfaces océaniques (une part de l'énergie absorbée par les terres et surfaces océaniques passe aussi à l'atmosphère par conduction, radiation ou évaporation).
 - l'atmosphère s'échauffe et s'emplit d'humidité à différents degrés dans différents endroits : apparition de **gradients de température et pression** → mouvements de masses d'air (à des échelles globale et locale) : ces vents redistribuent l'énergie thermique et l'humidité (l'excédent d'énergie solaire reçue à l'équateur est transportée aux pôles).

Part de l'énergie solaire entrante transformée en vent : ~ **1 %** de 120 000 TW ~ 1 000 TW.
Mais part importante inaccessible (haute atmosphère, loin des côtes, tempêtes localisées, ...).
Part réellement accessible (très incertaine) : **entre 1 et 100 TW**
(Rappel : consommation actuelle de l'humanité ~ 20 TW).

Capacité installée 2022 : 906 GW (croissance annuelle ~ 20 % depuis 2000).
Facteur de charge moyen ~ 20 %.
Projection de l'IEA en 2050 : 2,3 – 2,7 TW avec un facteur de charge de 31 % → ~ 0,8 TW

L'énergie éolienne

Des usages anciens et modernes



Antiquité

Bateaux de navigation:
Phéniciens, Egyptiens
~ 4000 avant JC

Moulins à vent :
Babyloniens, Inde, ...

1100

Généralisation en Europe
des moulins à vent :
- pour moudre le grain
- pour drainer (pompe à eau)

1887

1ère turbine générant
de l'électricité
(Charles F. Brush, USA)

1957

Turbine de Gedser
à la base des
éoliennes actuelles
(Johannes Juul, Danemark)

Axe horizontal

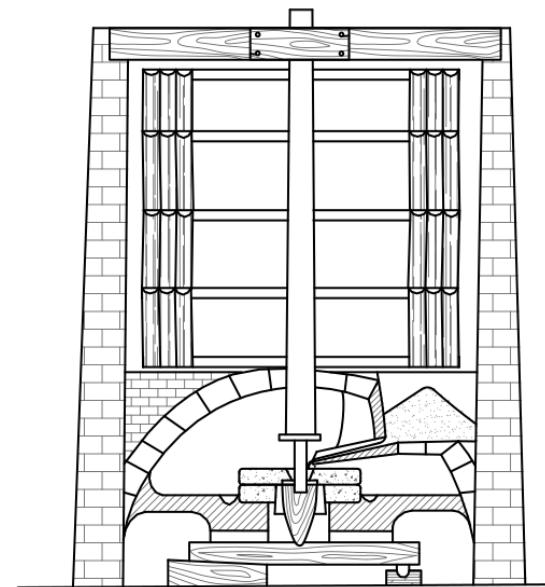


Axe vertical

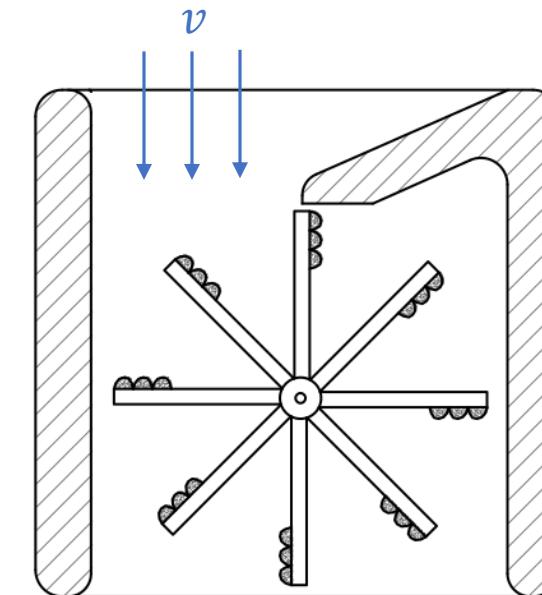
L'énergie éolienne

Panemone : premiers moulins (à axe vertical)

Les pales sont poussées par la force de trainée (c'est peu efficace)



Vue latérale

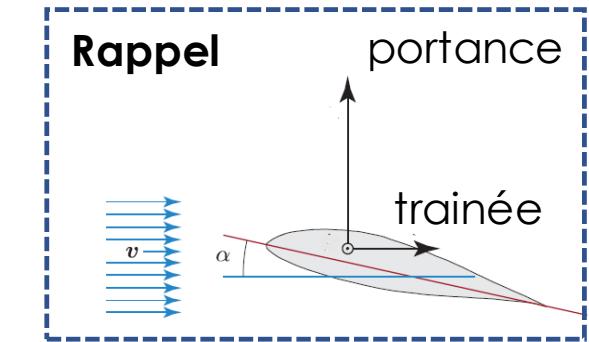
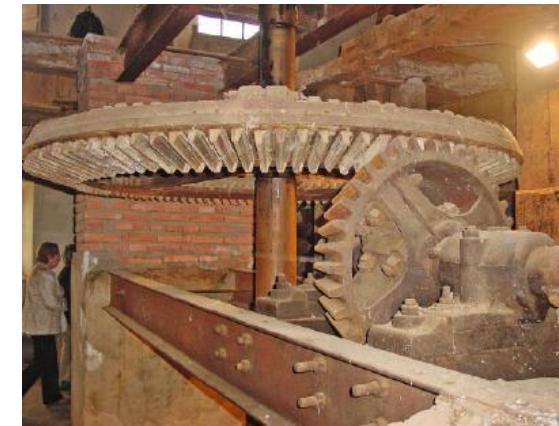
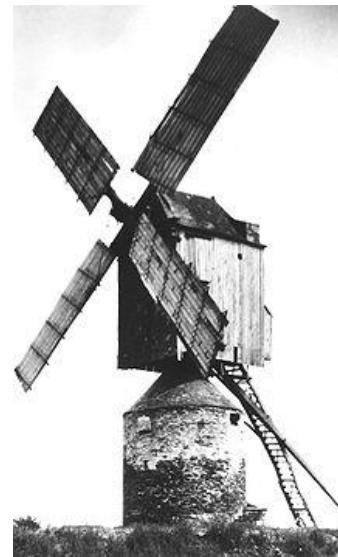


Vue du dessus

L'énergie éolienne

Premiers moulins à axe horizontal (Europe, moyen-âge)

- Les formes aérodynamiques des pales exploitent la force de portance pour exercer un **couple** sur le rotor (beaucoup plus efficace)



- Engrenages pour transmettre l'énergie de rotation du rotor à l'axe vertical

L'énergie éolienne

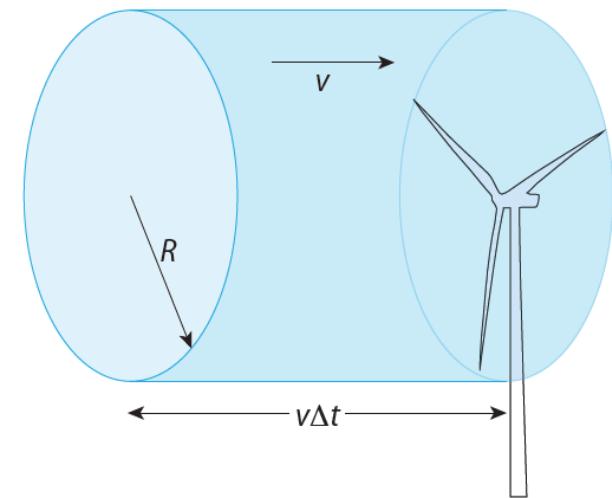
Puissance captée

Ecoulement d'un fluide de masse volumique ρ_0 à la vitesse v

On considère un *tube de fluide* parcourant la distance $v\Delta t$ en un temps Δt et traversant la section A_D couverte par le dispositif (éolienne de rayon R) :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho_0(A_Dv\Delta t)v^2$$

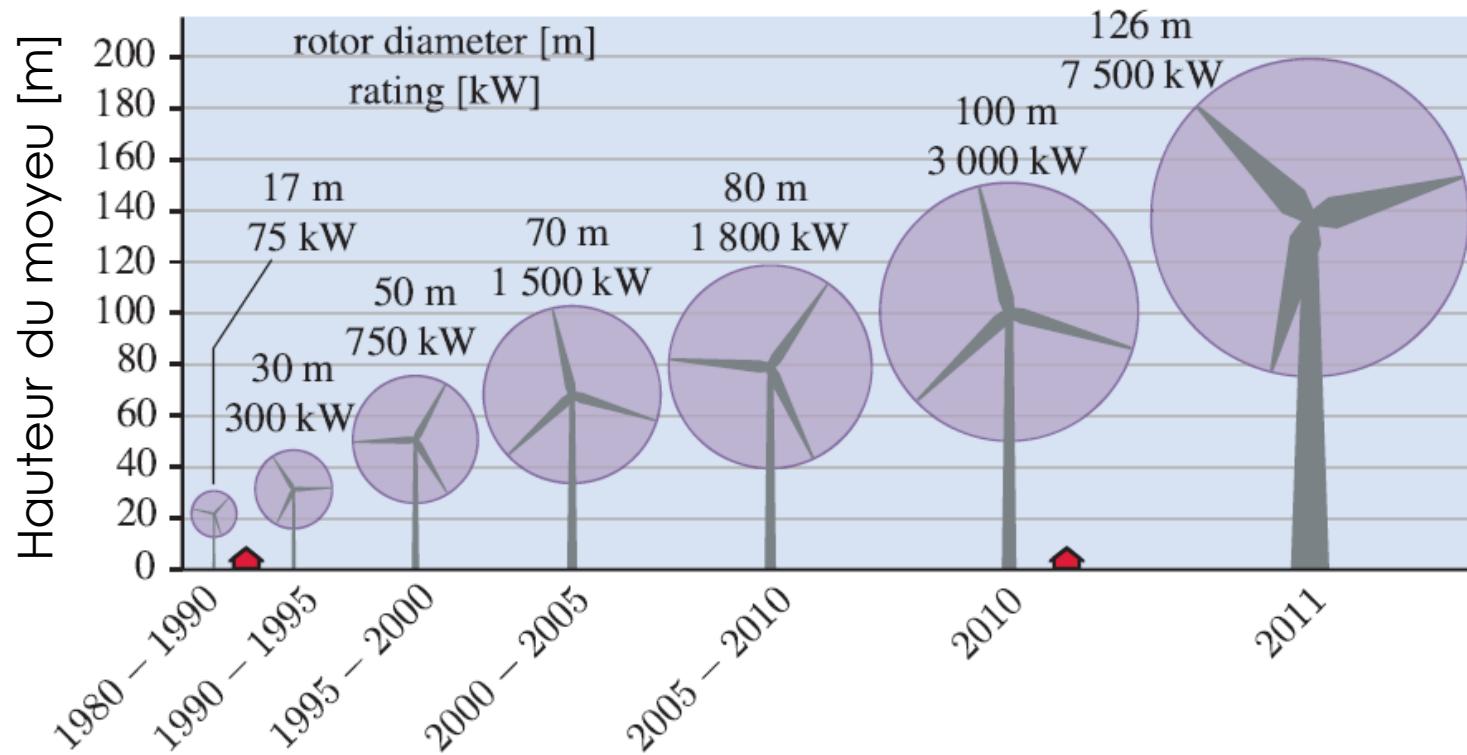
$$\mathcal{P} = \frac{E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2}\rho_0v^3A_D C_P$$



où l'on a introduit une efficacité C_P
(car on ne pas tout prendre comme on va le voir...)

L'énergie éolienne

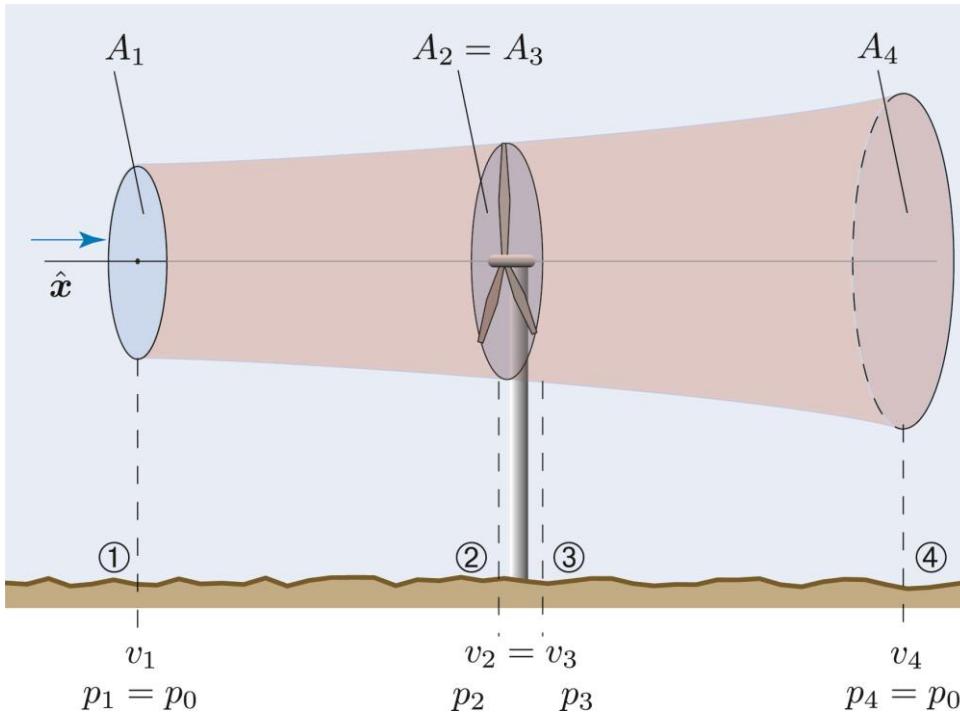
Evolutions récentes (hauteur, taille et puissance)



2023 (en construction, Chine) : diamètre de rotor 260 m (puissance prévue 8 500 kW)

L'énergie éolienne

Etude théorique : limite de Betz (démonstration en TD)



Un tube d'air est suivi depuis un point loin en amont ①, jusqu'à juste avant le disque capteur ②, et ensuite depuis juste après le disque ③ et en un point très en aval ④. Du fait que le disque capte de l'énergie, le flux ralentit et le tube s'élargit.

- Hypothèses :**
- Fluide parfait (mouvement adiabatique)
 - Fluide incompressible (ou faiblement compressible)
 - Ecoulement non-turbulent et constant dans la direction x

On exprime le flux d'énergie (puissance) de deux façons différentes,

1) en exploitant :

- la conservation d'énergie volumique entre ① et ② et entre ③ et ④
- la conservation de la masse

2) l'impulsion prise au courant d'air entre ② et ③ (par unité de temps)

$$\rightarrow \mathcal{P} = \frac{1}{2} \rho_0 v_1^3 A_D 4a(1-a)^2$$

où l'on a introduit le **facteur d'induction axial** : $a \equiv \frac{v_1 - v_2}{v_1}$
(chute de vitesse sur le disque)

Rq : lors du calcul, on a obtenu : $v_2 = \frac{1}{2}(v_1 + v_4)$

L'énergie éolienne

Limite de Betz (1)

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2} \rho_0 v_1^3 A_D 4a(1 - a)^2$$

Remarque : la puissance captée du vent s'annule :

- lorsque $a = 0$ ($v_2 = v_1$, le courant traverse la turbine sans ralentissement)
- lorsque $a = 1$ ($v_2 = 0$, aucun courant ne passe à travers la turbine)

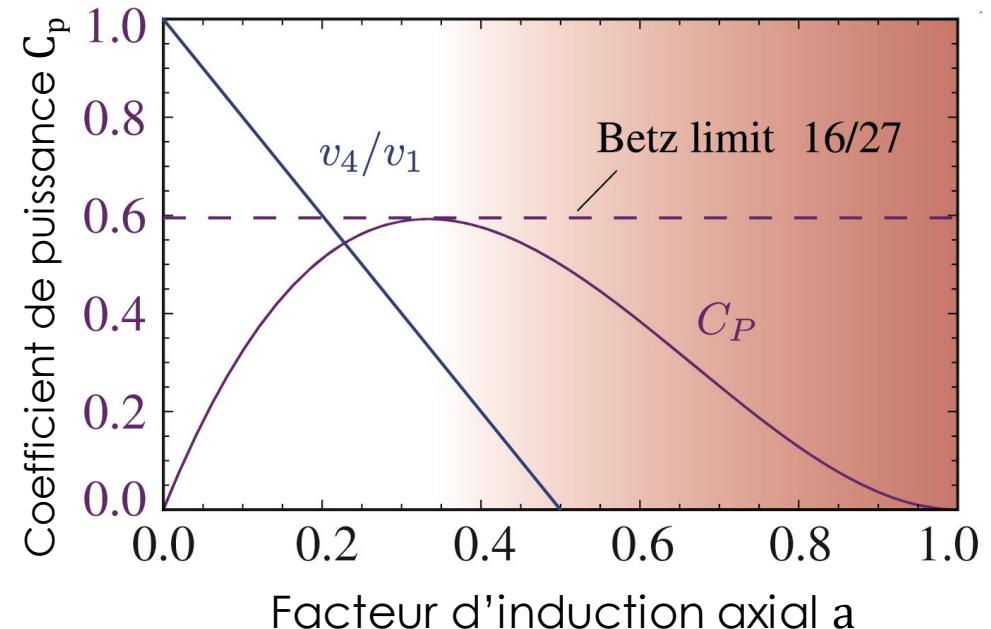
On définit le **coefficent de puissance** : $C_P = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_0}$ avec $\mathcal{P}_0 = \frac{1}{2} \rho_0 v_1^3 A_D$

(rapport de la puissance captée sur la puissance qui serait passée en l'absence de turbine à travers la même surface)

Dans notre modèle d'écoulement : $C_P = 4a(1 - a)^2$

$f(a) = 4a(1 - a)^2$ présente un maximum pour $a = 1/3$

$$\rightarrow C_P^{max} = C_P (a = 1/3) = \frac{16}{27} \sim 59\% \text{ (limite de Betz)}$$



L'énergie éolienne

Limite de Betz (2)

→ Limite supérieure à la puissance récupérable par un dispositif plan **unique** de surface fixe à partir de l'**écoulement libre** d'un fluide.

Supérieure car on a négligé : turbulence, vorticité (à la pointe des pales), pertes dues à la viscosité, ... Cependant il existe des stratégies pour la dépasser.

Remarque : La limite de Betz est qualitativement différente d'autres bornes sur l'efficacité énergétique telle que la limite de Carnot (ou celle de Shockley – Queisser). Dans le cas de Betz, l'énergie non-extraiet du flux retourne au champ de vent et peut être extraite par d'autres turbines. Cette limite est donc utile pour comprendre le taux avec lequel l'énergie peut être extraite d'un dispositif de dimensions données, et possède un intérêt pratique (ex. : développement d'une ferme éolienne) mais elle n'est pas très pertinente pour estimer les ressources totales disponibles du vent (à l'échelle globale).

L'énergie éolienne

Limite de Betz (3)

En passant à travers une éolienne, l'air exerce un couple sur les pales, ce qui les met en rotation : conversion énergie cinétique de translation → cinétique de rotation.

L'énergie récupérée par la turbine peut être vue comme l'énergie cinétique retirée au flux axial de vent ou comme le travail utilisé pour faire tourner le rotor.

Il y a donc un transfert de moment cinétique sur les pales, que l'on caractérise en définissant le rapport de la vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent v :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad R : \text{rayon des pales}$$

$\Omega : \text{vitesse angulaire des pales}$

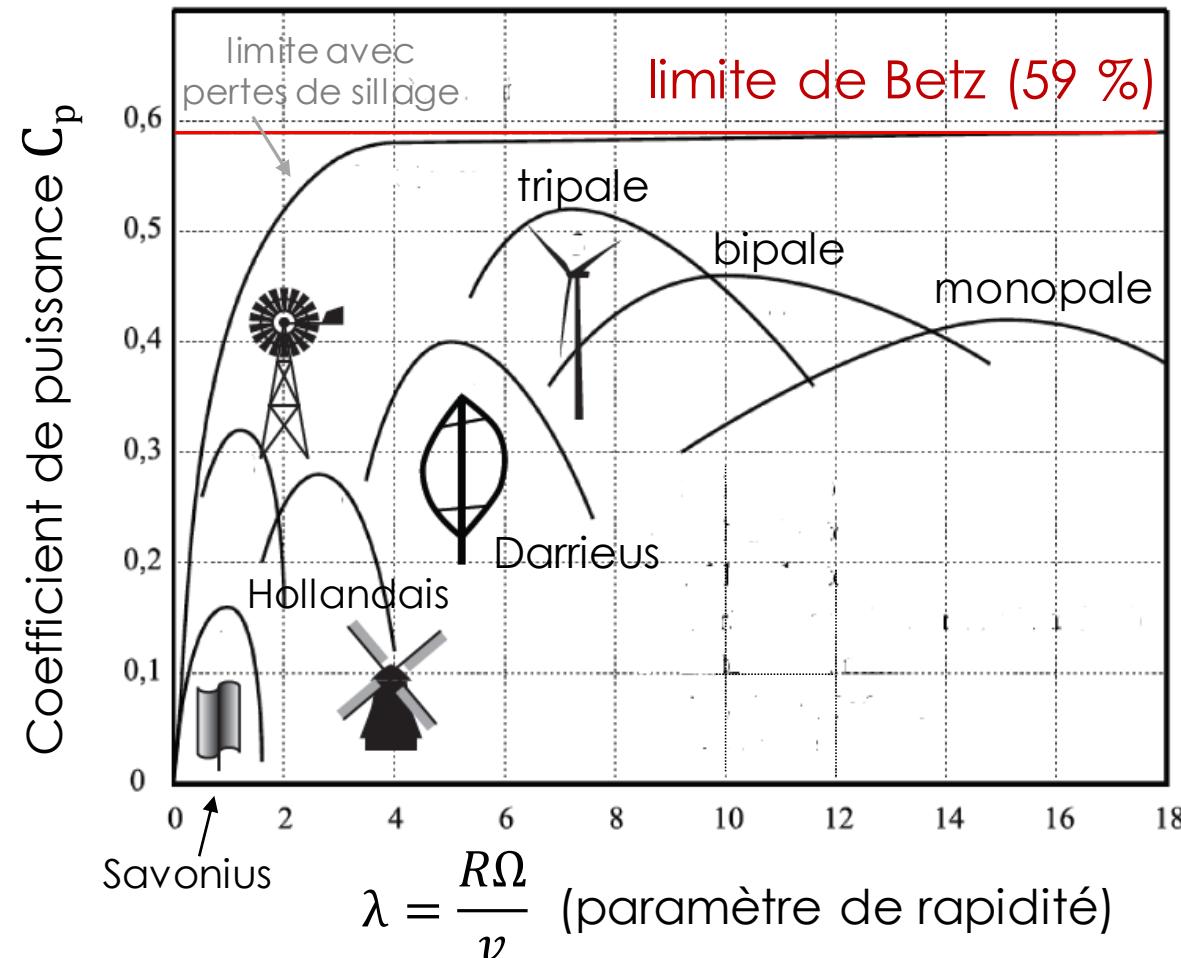
λ paramètre de rapidité (*tip speed ratio* en anglais)

N. B. : la rotation entraîne un alternateur : conversion *in fine* en énergie électrique (comme pour une turbine dans une centrale thermique).



L'énergie éolienne

Limite de Betz (4)



Courbe en arche pour chaque type de dispositif, illustrant un optimum d'efficacité λ_{opt} à une vitesse particulière (trop lente : la turbine ne transmet pas beaucoup d'énergie, trop rapide : la friction et la poussée commencent à dominer).

L'énergie éolienne

Considérations pratiques (1)

- ✓ Turbine à vitesse variable : $\lambda = \frac{R\Omega}{v}$ → Si la vitesse du vent v varie, il faut pouvoir adapter la vitesse angulaire du rotor Ω pour rester près de λ_{opt} .

Historiquement, la plupart des turbines ont opéré à une valeur fixe de Ω , dictée par la fréquence du réseau électrique à laquelle la turbine est connectée. Le coefficient de puissance optimal n'était atteint que pour une valeur particulière de vitesse de vent (pertes en-dehors de celle-ci). Aujourd'hui, les développements de l'électronique de puissance rendent possible de convertir la puissance générée par les turbines à vitesse variable à la fréquence désirée des lignes.

- ✓ Quand le vent est trop fort, il existe des risques d'endommagement du rotor → Il faut pouvoir limiter la puissance captée en modifiant par exemple l'angle d'attaque des pales.

L'énergie éolienne

Considérations pratiques (2)

- ✓ La conception des pales peut être très complexe (profil optimisé vis-à-vis de la portance, turbulence, etc.). Fabriquer des pales légères et durables aux profils complexes est un enjeu.
- ✓ Nombre de pales : dépend en grande partie de l'usage (électricité ou pompage)

Production électrique (à grande échelle) : critère du rendement important, profils complexes, matériaux très technologiques.

→ Diminuer le nombre de pales pour réduire les coûts. Optimum pour 3 pales car moment d'inertie bien réparti (éoliennes à 1 ou 2 pales possibles mais moins bien équilibrées).



Eolienne de pompage : critère important : maximiser le couple produit par le moulin $C = \frac{P}{\Omega}$

→ Diminuer Ω (donc diminuer λ par rapport à valeur optimale. Rendement en partie sacrifié au profit du couple).

Couple C proportionnel au nombre de pales (relation non démontrée ici)

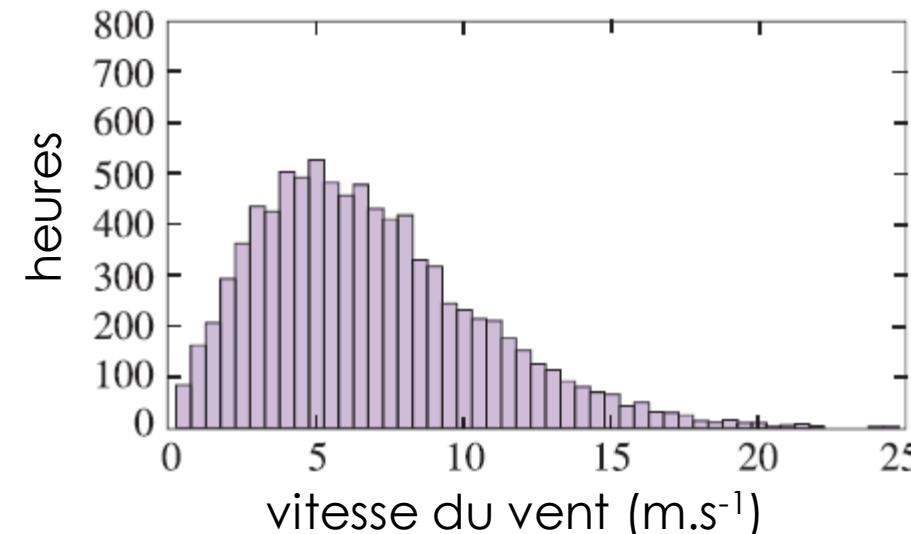


L'énergie éolienne

Considérations pratiques (3)

- ✓ Pour un flux régulier (vitesse constante), on a montré : $\mathcal{P} = \frac{1}{2} \rho_0 v^3 A_D C_P(v)$

En général, un site donné se caractérise par une distribution de vitesses $f(v)$



$$\text{D'où } \mathcal{P} = \int_0^\infty dv \frac{1}{2} \rho_0 v^3 A_D C_P(v) f(v)$$

En pratique, borne inférieure : vitesse minimale de démarrage $\sim 3 \text{ m.s}^{-1}$
 borne supérieure : vitesse d'arrêt : $20 - 30 \text{ m.s}^{-1}$

L'énergie éolienne

Considérations pratiques (4)

- ✓ Pour caractériser le potentiel d'un site, il faut s'intéresser à la valeur moyenne du cube de la vitesse (plutôt qu'au cube de la vitesse moyenne) :

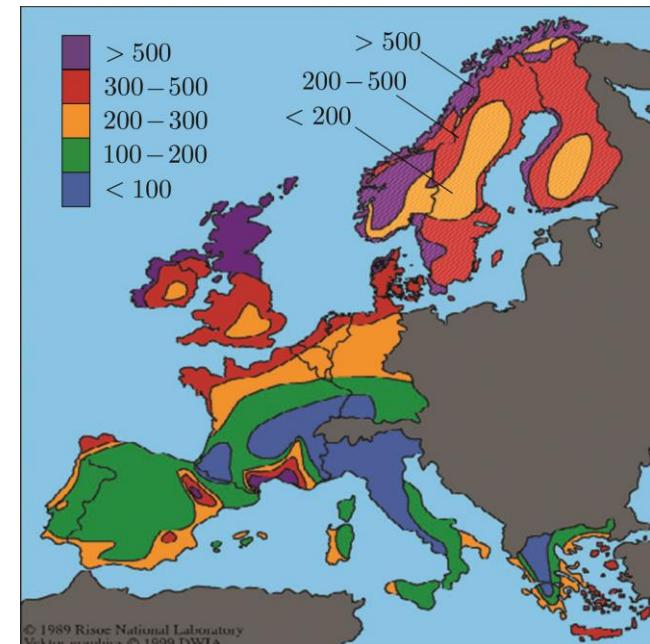
$$\langle v^3 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T dt v^3(t)$$

Alors en définissant $\tilde{v} \equiv \sqrt[3]{\langle v^3 \rangle} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T dt v^3(t) \right)^{\frac{1}{3}}$

on a une puissance (par unité de surface) : $\mathcal{P} = \frac{1}{2} \rho_0 \tilde{v}^3$

Atlas de la puissance éolienne annuelle moyenne en Europe de l'Ouest.

La légende donne la **puissance en W/m²** à une hauteur de 50 m au-dessus d'une plaine ouverte (les données pour la Finlande, la Suède et la Norvège sont désignées différemment). La puissance est plus grande le long des côtes, des océans, collines et crêtes, plus faible pour les terrains abrités.



Cas de la France : en retenant les régions $> 300 \text{ W/m}^2$, et un rendement de 40 %, on a $\mathcal{P}_{éolien} \sim 120 \text{ W/m}^2$.

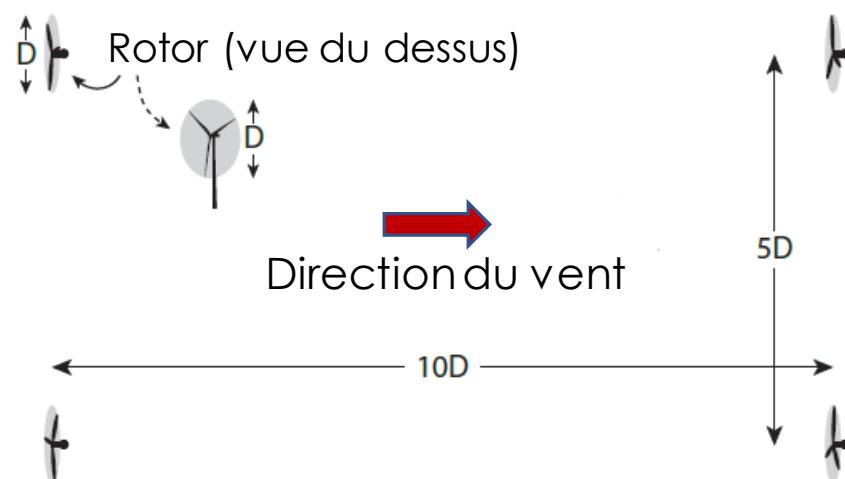
L'énergie éolienne

Autres limites

- ✓ Capter à un endroit de l'énergie du vent diminue le flux disponible en aval (sur une distance importante) → Effet d'ombrage du vent (vitesse réduite) derrière chaque turbine

→ **Cela place des contraintes spatiales** à l'extraction de l'énergie.

Les turbines doivent être espacées pour éviter des perturbations du courant d'air issu d'une turbine sur les autres. Règle du pouce (estimation) : pertes < 10 % si les turbines (diamètre de rotor D) sont espacées de 10D dans la direction du flux et 5D dans la direction perpendiculaire.



Grille régulière de turbines : un rotor d'aire πR^2 pour chaque
 $10D \times 5D = 50 D^2 = 50 \times (2R)^2 = 200 R^2$ de surface de terrain

→ Réduction d'un facteur $\pi/200$ de la puissance surfacique !



Sillages turbulents rendus visibles par des conditions inhabituelles (condensation)

L'énergie éolienne

Conclusions

- ✓ Renouvelable (ressource réapprovisionnée quotidiennement par l'énergie solaire)
- ✓ Technologie relativement *low-tech*
- ✓ Efficacité d'extraction de l'énergie correcte (40 – 50 %)
- ✓ Emissions CO₂ (ACV) parmi les plus faibles (~ 10 g/kWh)
- ✓ Secteur économiquement viable, en croissance
- ✓ Potentiel de développement pour couvrir une partie non-négligeable de la demande en énergie
- ✓ Ressource très intermittente et erratique
- ✓ Variabilité géographique (beaucoup d'endroits ne sont pas suffisamment venteux)
- ✓ Impacts directs sur la biodiversité, notamment oiseaux et chauve-souris
- ✓ Objections sociétales : nuisances sonores, intrusion dans le paysage [Règlementation : distance minimale d'une habitation : 500 m bruit < 35 dB dans les habitations],
- ✓ Faible densité de puissance surfacique (néanmoins les sols peuvent être utilisés simultanément pour d'autres usages). Impact sur le sol réversible.

L'énergie hydraulique

Introduction

- ✓ Cycle de l'eau (évaporation et transport vers l'intérieur des terres → précipitations → transfert et stockage en réservoirs). Le relief concentre spatialement (quelques rivières) de l'eau précipitée sur un large territoire.

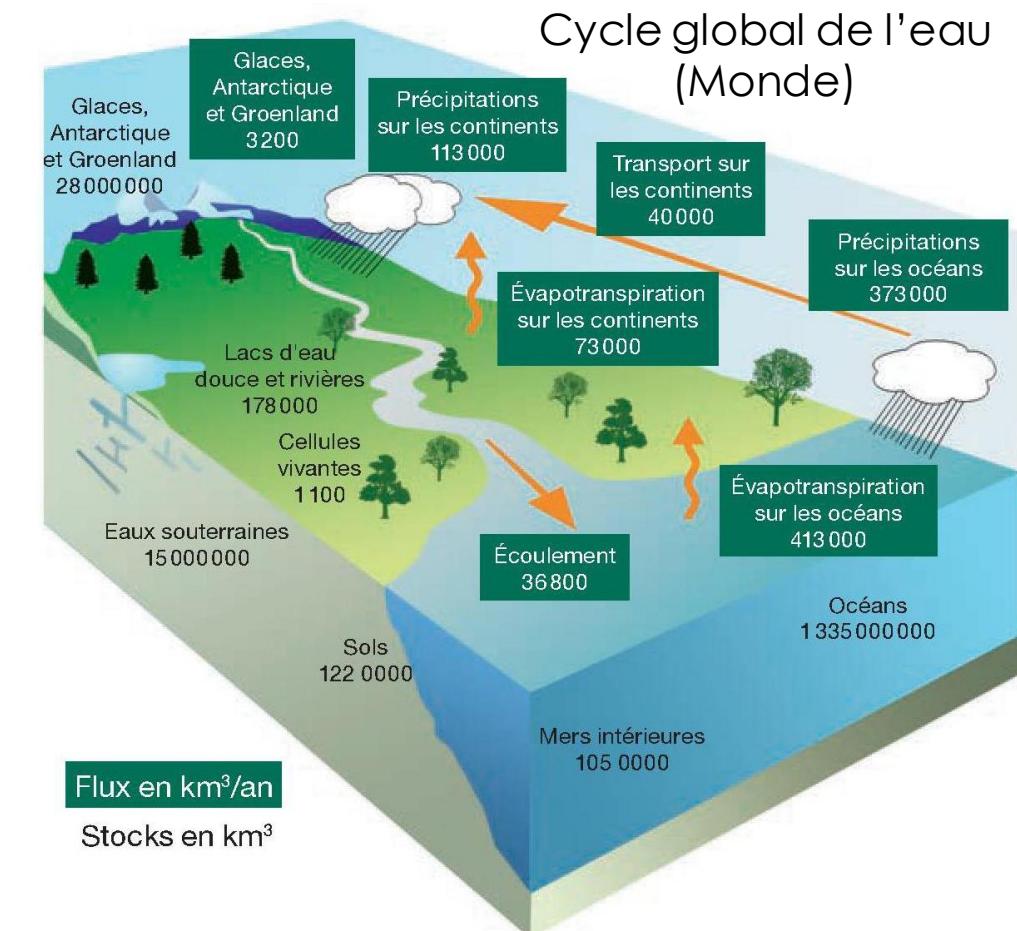
Moteur de ce cycle : énergie du Soleil (conversion chaleur → énergie potentielle ; rendement faible mais fonctionnement sans intervention humaine).

- ✓ Capacité installée 2022 : 1360 GW (France : 25,7 GW). Facteur de charge moyen ~ 36 %.

Potentiel de développement faible en Europe mais important en Asie, Amérique du Sud et Afrique.

- ✓ 1^{ère} source d'énergie bas-carbone : 17 % de la production d'électricité.

- ✓ Rôle très important pour le stockage d'énergie et la stabilité du réseau électrique (permet de réguler l'intermittence des autres énergies renouvelables).



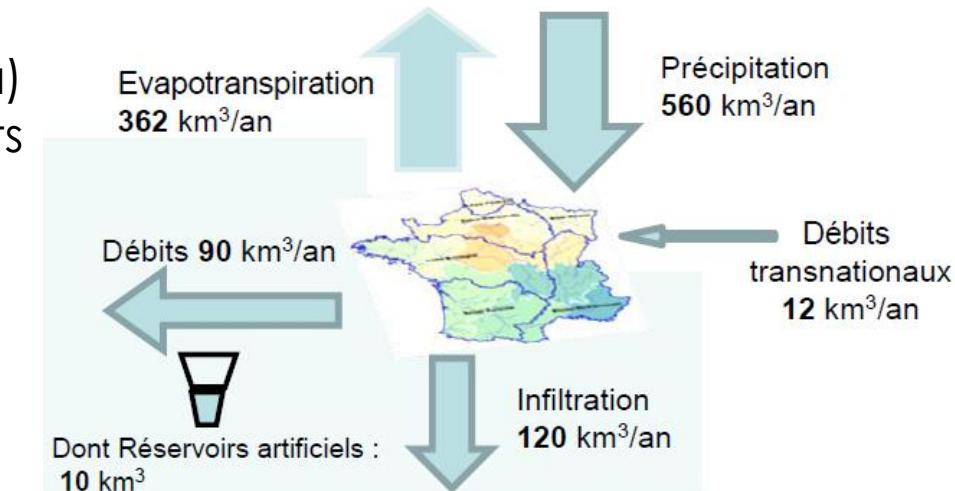
L'énergie hydraulique

Usages de l'eau en France

- ✓ Ressource en eau (tous usages confondus) constituée par a) écoulements de surface : $90 \text{ km}^3/\text{an}$ (+ $12 \text{ km}^3/\text{an}$ d'apports transnationaux) et b) infiltration dans les sols : $120 \text{ km}^3/\text{an}$.
- ✓ $33 \text{ km}^3/\text{an}$ sont prélevés ;
 $5,3 \text{ km}^3/\text{an}$ de ces prélèvements sont consommés.

Les prélèvements sont dominés par le secteur de l'énergie ; la consommation par celui de l'agriculture.

La période estivale concentre les tensions : restrictions plus fréquentes pour maintenir des débits suffisants pour les milieux naturels.



	Prélèvements	Consommation
	$33 \text{ km}^3/\text{an}$	$5,3 \text{ km}^3/\text{an}$
Agriculture	15 %	48 % (79 % été)
Energie	57 %	22 % (9 % été)
Tertiaire	18 %	24 % (10 % été)
Industrie	10 %	6 % (2 % été)

L'énergie hydraulique

Trois formes principales de production

- les centrales dites gravitaires (apports d'eau par gravitation) telles que les centrales hydroélectriques de lac ;
- les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) ou centrale de pompage-turbinage, dans lesquelles des turbines réversibles pompent l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Le transfert est temporel : pompage durant le creux de la demande (à partir d'électricité produite par des équipements de base) et production d'électricité par turbinage durant la pointe ;



Centrale de pompage-turbinage
de Geesthacht (Allemagne)

- les usines marémotrices, qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes) ou du mouvement des vagues.

L'énergie hydraulique

Les centrales gravitaires

- ✓ Centrales de moyenne chute (20 – 200 m) sur le cours des fleuves, associées à des réservoirs



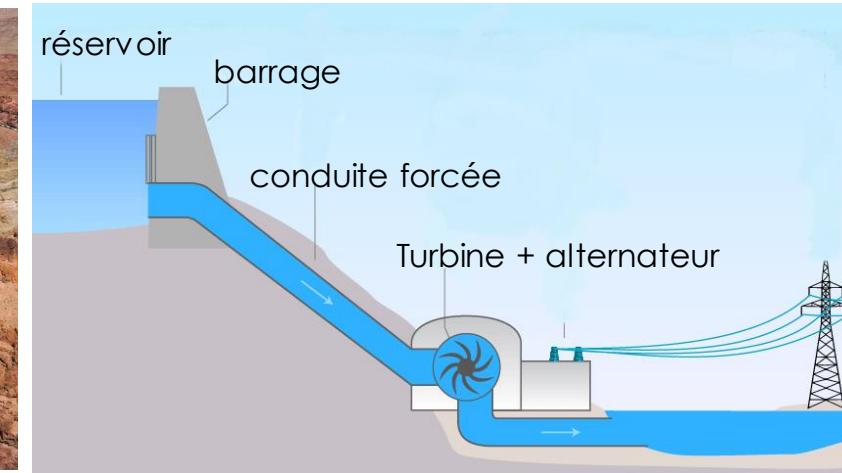
Les 3 gorges (Chine).

22 400 MW (32 turbines x 700 MW)
Hauteur de chute : 80 m ; débit : 900 m³/s
600 km² noyés ; 1,8 M personnes déplacées

- ✓ Centrales de haute chute (> 200 m) alimentées par des conduites forcées, associées à des réservoirs



Hoover (USA) : 2 080 MW (19 turbines), hauteur de chute : 220 m
Roselend (France) : 600 MW (6 turbines), hauteur de chute : 1 200 m



- ✓ Centrales de basse chute (< 20 m) : « au fil de l'eau » (sans réservoir), installées en chaîne

L'énergie hydraulique

Densité d'énergie et puissance (centrale gravitaire)

Chute d'une hauteur Z d'une masse m de fluide : $\Delta E_p = mgZ$

Pour un volume ΔV d'eau (masse volumique ρ_0) passant à travers la turbine : $\Delta E_p = \eta(\rho_0 \Delta V)gZ$

où η : efficacité de la turbine

→ **Densité d'énergie** : $e_p = \frac{\Delta E_p}{\Delta V} = \eta \rho_0 g Z$ [énergie par unité de volume]

La **puissance** en sortie est : $\mathcal{P} = \frac{\Delta E_p}{\Delta t} = e_p Q = \boxed{\eta \rho_0 g Z Q}$ où $Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ [débit volumique d'eau]

Estimation ($\eta = 1$) : eau $\rho_0 \sim 1000 \text{ kg/m}^3$. Chute de 1000 m : → densité d'énergie $\sim 10 \text{ MJ/m}^3$
avec débit $\sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$: → Puissance $\sim 100 \text{ MW}$ par turbine

Si cette énergie est convertie en énergie cinétique : $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \eta mgZ \rightarrow v = \sqrt{\eta 2gZ}$

Au final, elle sera convertie en énergie cinétique de rotation : $\frac{1}{2}J\omega^2$

L'énergie hydraulique

Densité d'énergie et puissance (hydrolienne ou moulin à eau)

Ecoulement à la vitesse v d'une masse m de fluide : $E_c = \frac{1}{2}mv^2$

Un volume ΔV d'eau (masse volumique ρ_0) poussant une roue transmet : $E_c = \eta \frac{1}{2}(\rho_0\Delta V) v^2$
où η : efficacité de la turbine

→ **Densité d'énergie** : $e_c = \frac{E_c}{\Delta V} = \eta \frac{1}{2}\rho_0v^2$ [énergie par unité de volume]

La **puissance** en sortie est : $\mathcal{P} = \frac{E_c}{\Delta t} = e_c Q = \eta \frac{1}{2}\rho_0v^2 Q$ où $Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ [débit volumique d'eau]

Estimation ($\eta = 1$) : eau $\rho_0 \sim 1000 \text{ kg/m}^3$. Vitesse de 4 m/s : → densité d'énergie $\sim 8 \text{ kJ/m}^3$
avec débit $\sim 1 \text{ m}^3/\text{s}$: → Puissance $\sim 8 \text{ kW}$ par roue

On peut écrire : $\Delta V = (v\Delta t)A$ d'où $Q = v \times A$ → $\mathcal{P} = \eta \frac{1}{2}\rho_0v^3 A$ N. B. $\eta \equiv C_p$ (Betz)
où A : surface d'écoulement capturé

Convertie (par la roue) en énergie cinétique de rotation : $\frac{1}{2}J\omega^2 = \eta \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow \omega = v \sqrt{\frac{\eta m}{J}}$

L'énergie hydraulique

Betz ou pas Betz ?

Eolienne (turbine à vent) ou hydrienne (turbine à courant marin) : Betz !

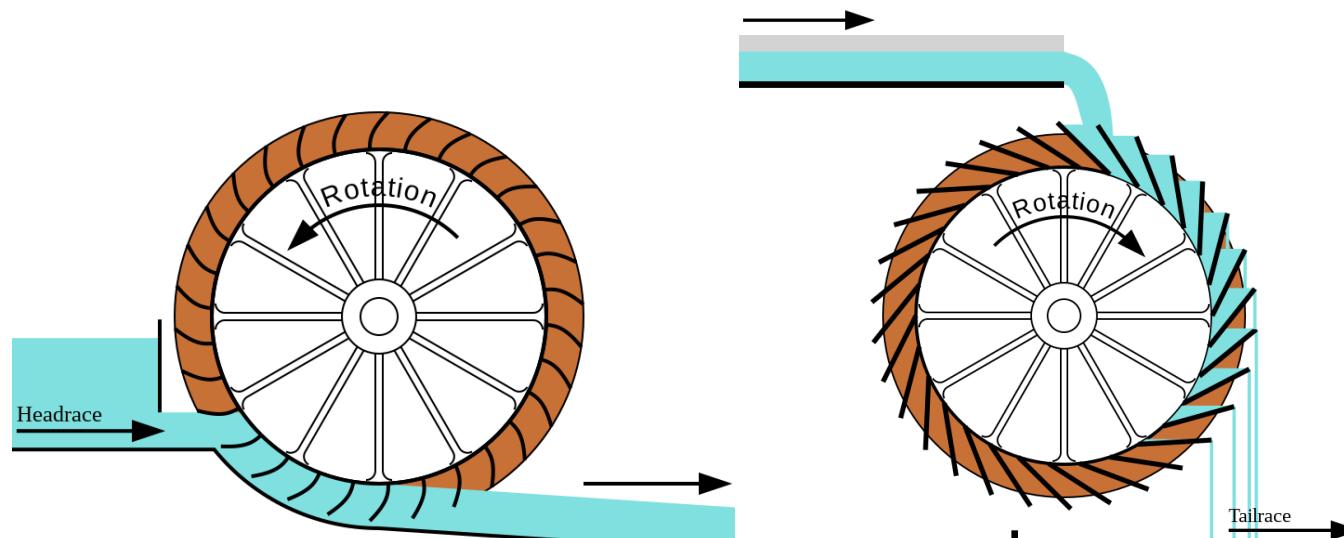
Turbine hydroélectrique (centrale gravitaire) : pas Betz !

A la différence d'une éolienne ou d'une turbine à courant marin qui extrait l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement, une turbine hydroélectrique extrait l'énergie potentielle gravitationnelle d'un volume d'eau, initialement sans vitesse, d'une région de haute pression (le réservoir) à une région de pression (atmosphérique) beaucoup plus faible. La limite de Betz n'est pas pertinente dans ces circonstances, puisque la force due à la pression de l'eau est associée à l'énergie potentielle mécanique et non à l'énergie cinétique globale d'un fluide en mouvement. Il n'y a donc pas de limite théorique à l'efficacité d'une turbine hydroélectrique.

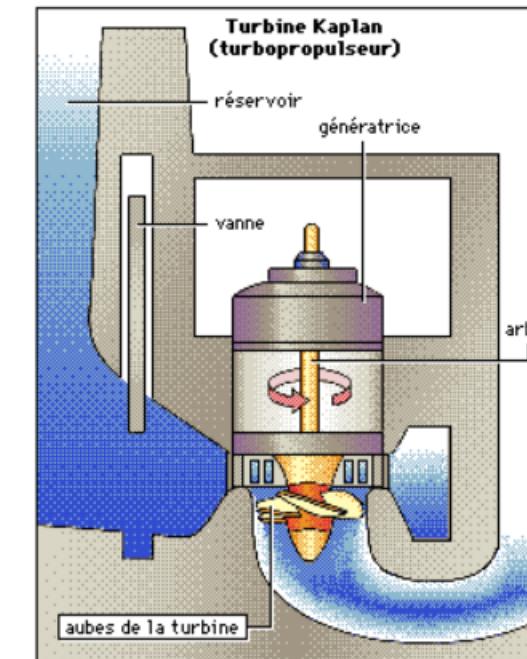
L'énergie hydraulique

Moulins à eau et turbines

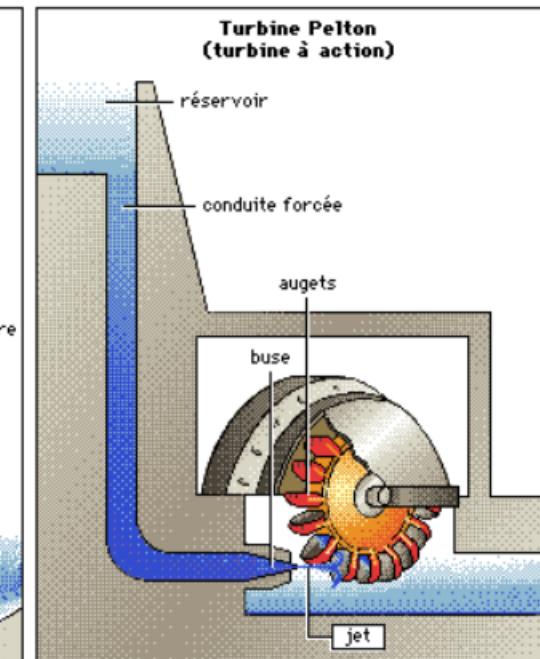
Conversion d'énergie potentielle de pesanteur ou cinétique en énergie cinétique de rotation :
Passage d'un mouvement de **translation à rotation** : **vis / hélice** ou utiliser le **moment d'une force**



$$\mathcal{P} = 5 - 20 \text{ kW}, \eta = 50 - 90 \%$$



$$\mathcal{P} = 5 \text{ kW} - 700 \text{ MW}, \eta = 80 - 95 \%$$



Conversion inverse : pompe, roue à aubes, ...

L'énergie hydraulique

Conclusions

- ✓ Renouvelable (cycle de l'eau), prévisible et pilotable (si réservoir)
- ✓ Énergie stockable (STEP) très efficacement
- ✓ Très bonne efficacité de conversion (80 – 90 %)
- ✓ Densité d'énergie correcte (énergie moins diffuse que l'éolien ou le solaire). Ressource reconcentrée par la géographie (facilement rentable en ces endroits). Mais ressource totale moins abondante que solaire ou éolien.
- ✓ Taux de retour énergétique (EROI) élevé.
- ✓ Emissions CO₂ (ACV) faibles (~ 24 g/kWh)
- ✓ Potentiel de développement limité (x2 d'ici 2050 ?) car la ressource est contrainte géographiquement (relief et emplacement des fleuves).
- ✓ Effets du changement climatique sur la production hydraulique incertains et a priori défavorables (augmentation de l'évaporation, précipitations plus contrastées). Plus généralement, question de la compétition des usages de l'eau (agriculture).
- ✓ Impacts sur les milieux naturels : obstacle aux passage de la faune aquatique et des sédiments, vallées inondées (grands barrages), production de méthane (décomposition de matière organique dans les réservoirs). Microhydraulique (qq kW - MW) intéressant dans les zones reculées.

Pilotable et stockable : caractères essentiels pour la stabilité du réseau électrique. Hydraulique : pilier de la transition énergétique (aide à l'intégration des énergies intermittentes en lissant la production).

L'énergie solaire

Introduction

- ✓ La quasi-totalité de l'énergie utilisée par l'humanité est d'origine solaire (seules exceptions : nucléaire, géothermie et énergie des marées), sous des formes indirectes : biomasse (pour l'alimentation et le chauffage) = solaire via la photosynthèse, énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) = formes concentrées d'énergie solaire via la décomposition de biomasse ; éolien = mouvements d'air induits par les gradients thermiques (d'origine solaire) ; hydraulique = mouvements d'eau dans un cycle induit par l'énergie solaire.

Pourtant la **captation directe** reste marginale : 3 % en 2020 (mais en croissance très rapide).

Immense défi du fait de la nature très diffuse de cette ressource : densité d'énergie faible, distribuée sur toute la planète → surfaces de captations importantes (même dans le désert).

Vraisemblablement la source possédant le plus de potentiel pour l'avenir en termes de simplicité et d'efficacité.

- ✓ Il existe essentiellement deux façons de capter l'énergie solaire :
 - le **solaire thermique**. Capacité installée (2020) ~ 500 GW. Facteur de charge ~ 10 %,
 - le **solaire photovoltaïque**. Capacité installée (2022) ~ 1 200 GW. Facteur de charge ~ 13 %.

Origine de l'énergie solaire : dans le Soleil, effondrement gravitationnel + enclenchement de réactions de fusion → production de photons (et neutrinos).

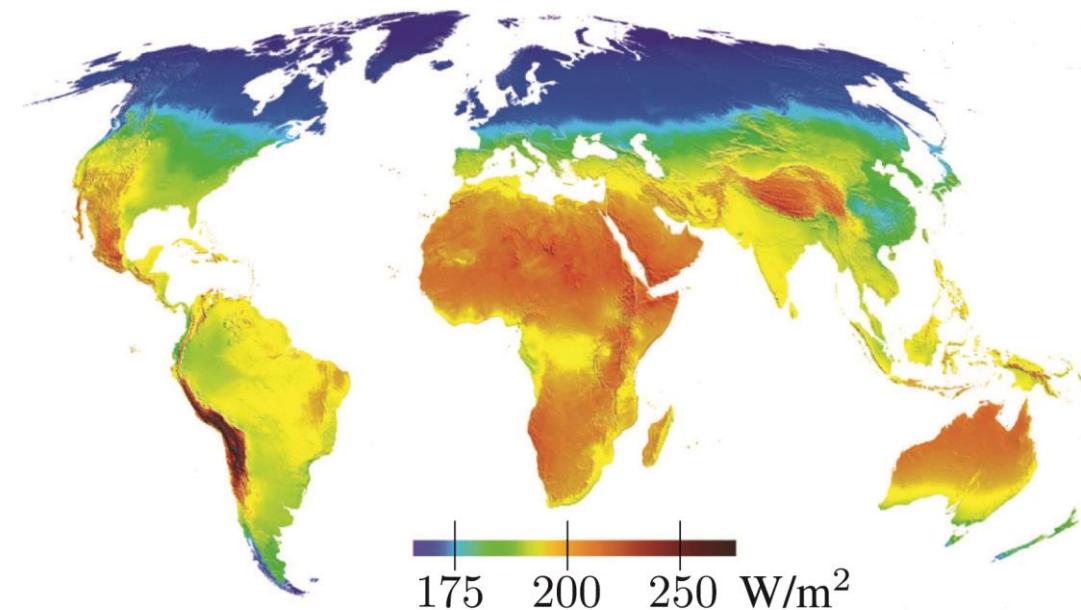
L'énergie solaire

Flux surfacique reçu

Au sommet de l'atmosphère : $E = 1368 \text{ W.m}^{-2}$

Au niveau de la mer : $E(1 - A_b) \sim 1000 \text{ W.m}^{-2}$

Moyenne géométrique sur la surface terrestre : $\mathcal{F}_{in} = \frac{E}{4}(1 - A_b) \sim 236 \text{ W.m}^{-2}$



Moyenne annuelle de l'irradiation qui tient compte à la fois des effets de géométrie et de conditions météorologiques.

L'énergie solaire thermique

Introduction

Un matériau absorbant du rayonnement solaire le convertit rapidement en énergie thermique. Moyen le plus simple et efficace est donc de l'utiliser sous forme de **chaleur**. Chauffage des bâtiments ou de l'eau : technologies simples (températures peu élevées). Cependant, certains usages industriels requièrent des hautes températures : nécessité de concentrer l'énergie solaire (miroirs et systèmes optiques).

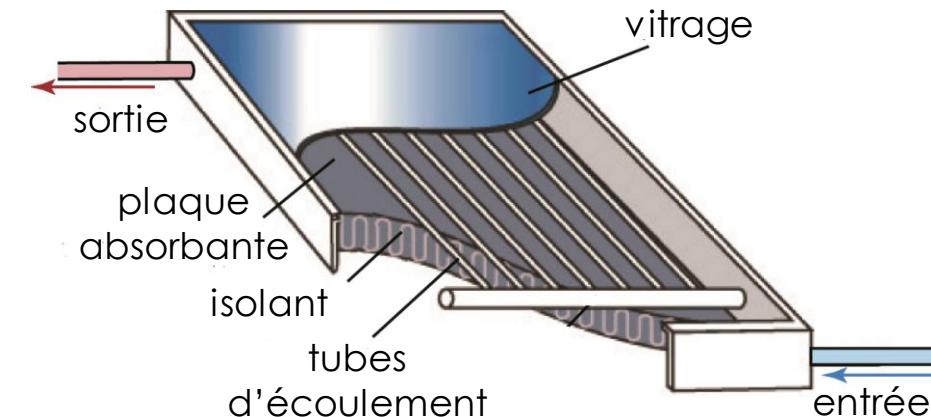
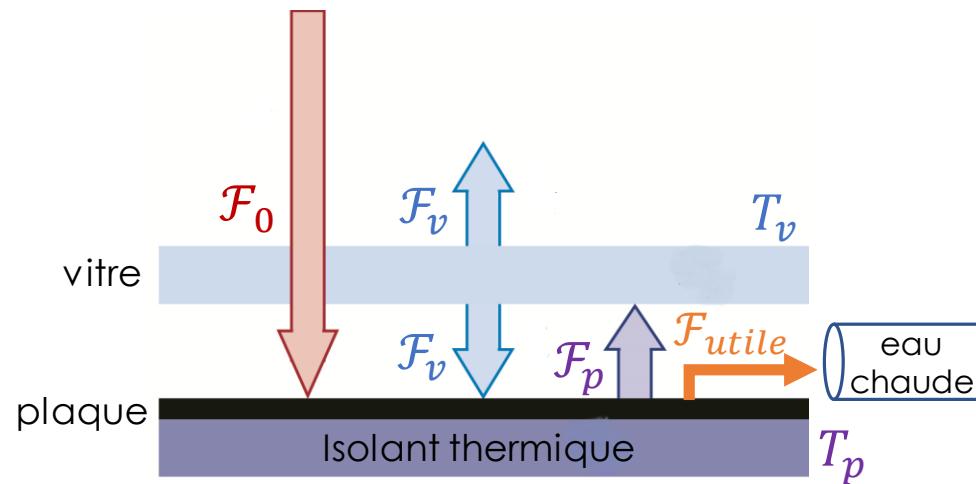
3 catégories de solaire thermique suivant la gamme de température en jeu :

- chauffage solaire passif/actif basse température (habitat, eau chaude).
- chauffage à température intermédiaire (80 - 250°C) : nécessité de concentrateurs (**Limite thermodynamique à la concentration**).
- conversion en électricité à partir de solaire thermique haute température (**Limite de Carnot**).

L'énergie solaire thermique

Collecteur basse température

Piéger la chaleur en recouvrant un objet absorbant d'un matériau transparent pour le visible, opaque pour l'infra-rouge (vitre) → effet de serre.



Pour la plaque : $S(\mathcal{F}_0 + \mathcal{F}_v) = S(\mathcal{F}_p + \mathcal{F}_{utile})$ avec $\mathcal{F}_v = \sigma T_v^4$
 $\mathcal{F}_p = \sigma T_p^4$

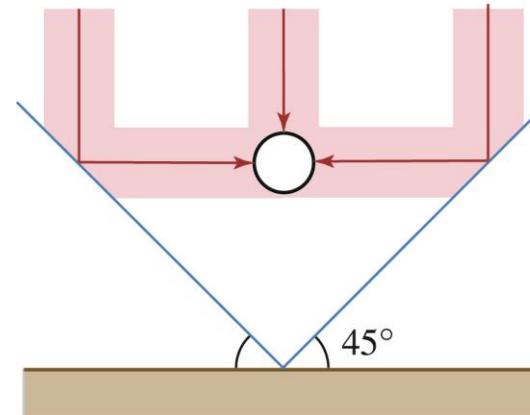
$$\eta = \frac{\mathcal{F}_{utile}}{\mathcal{F}_0} = 1 - \frac{\mathcal{F}_p - \mathcal{F}_v}{\mathcal{F}_0} = 1 - \frac{\sigma(T_p^4 - T_v^4)}{\mathcal{F}_0}$$

(~ 50 % simple vitre, ~ 80 % double vitre)

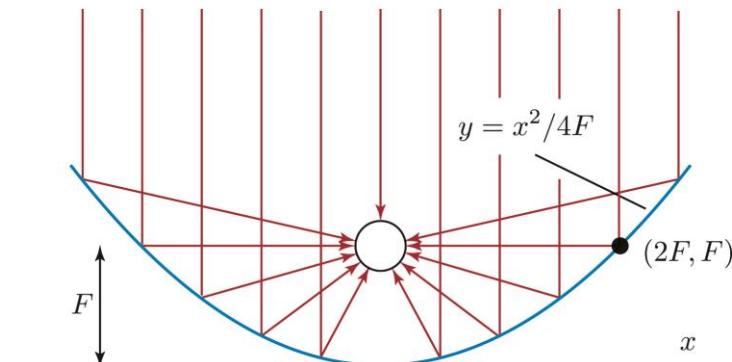
L'énergie solaire thermique

Concentrateurs

Pour atteindre les températures beaucoup plus élevées qui sont souhaitables pour la conversion en énergie mécanique ou électrique, il est généralement nécessaire de concentrer l'énergie solaire entrante au moyen de miroirs ou d'autres dispositifs optiques.



2 miroirs plans, inclinés de 45° permettent de tripler le rayonnement incident sur l'objet à chauffer (un absorbeur cylindrique)



Concentrateur parabolique de focale F



parabolique 2D (linéaire)



parabolique 3D (sphérique)

L'énergie solaire thermique

Concentrateurs

Pour comparer l'efficacité de différentes géométries, on définit la **concentration effective** C :

$$C = \frac{A_{ouverture}}{A_{abs}}$$

surface (normale au rayonnement incident) à travers laquelle sont passés les rayons dirigés vers l'absorbeur.

surface de l'absorbeur

A l'équilibre radiatif : $\sigma A_{abs} T_{abs}^4 = \mathcal{F} \times A_{ouverture}$

$$\rightarrow \sigma T_{abs}^4 = C \times \mathcal{F} \rightarrow T_{abs} = \left(\frac{C \mathcal{F}}{\sigma} \right)^{1/4}$$

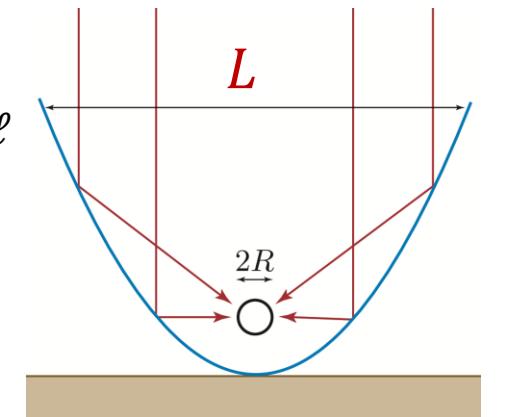
(sous les hypothèses : absorbeur parfait, miroirs parfaitement réfléchissants et absence de pertes par convection-conduction)

Exemple :

$$A_{ouverture} : L \times \ell$$

$$A_{abs} : 2\pi R \times \ell$$

$$\rightarrow C = \frac{L}{2\pi R}$$



Concentrateur parabolique linéaire de largeur L (de longueur ℓ dans le plan \perp de la figure)

L'énergie solaire thermique

Concentrateurs

Il existe une **limite fondamentale** à la **valeur maximale de la concentration effective C**

$$C_{3D} \leq \frac{1}{\sin^2 \theta_a}$$

où θ_a est l'angle d'acceptance du concentrateur : angle dans lequel toute la lumière arrivant sur une section transversale atteint l'absorbeur

[Pour les géométries 2D (étendues à la troisième dimension par translation linéaire d'une géométrie plane), le maximum est : $C_{2D} \leq \frac{1}{\sin \theta_a}$]

Cette condition sur C découle du 2nd principe de la thermodynamique [démonstration transparent suivant]

En pratique, $C_{max} \sim 40\,000$. Ces limites idéales sont atteintes à l'aide de géométries compliquées obtenues par association de branches de paraboles : concentrateur parabolique composé (CPC). Nécessité d'orienter le CPC au cours de la journée et de la saison.

L'énergie solaire thermique

Concentrateurs

Limite sur C : démonstration

Le flux incident sur le concentrateur, situé à la distance D du Soleil (source sphérique de rayon r, à la température T_s) est :

$$\mathcal{F} = \frac{4\pi r^2 \sigma T_s^4}{4\pi D^2} = \frac{r^2}{D^2} \sigma T_s^4$$

Les rayons lumineux provenant du bord extérieur de la source atteignent alors le concentrateur à un angle ψ , où $\sin \psi = \frac{r}{D}$

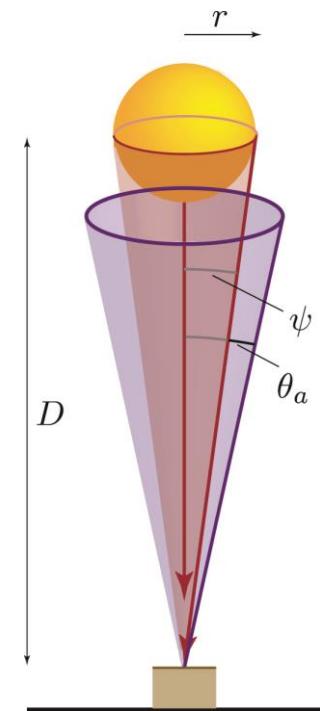
$$\begin{aligned} \text{Equilibre radiatif : } \sigma T_{abs}^4 &= C \times \mathcal{F} = C \frac{r^2}{D^2} \sigma T_s^4 = C (\sin \psi)^2 \sigma T_s^4 \\ \rightarrow T_{abs}^4 &= C \sin^2 \psi T_s^4 \end{aligned}$$

2nd principe : il ne peut pas y avoir de transfert de chaleur depuis un corps à une température plus basse vers un corps à plus haute température (sans fournir un travail).

$$\rightarrow T_{abs} \leq T_s$$

Pour un concentrateur de géométrie donnée, T_{abs} est maximisée quand $\psi = \theta_a$, d'où

$$\rightarrow C \sin^2 \theta_a \leq 1 \text{ CQFD}$$



L'énergie solaire thermique

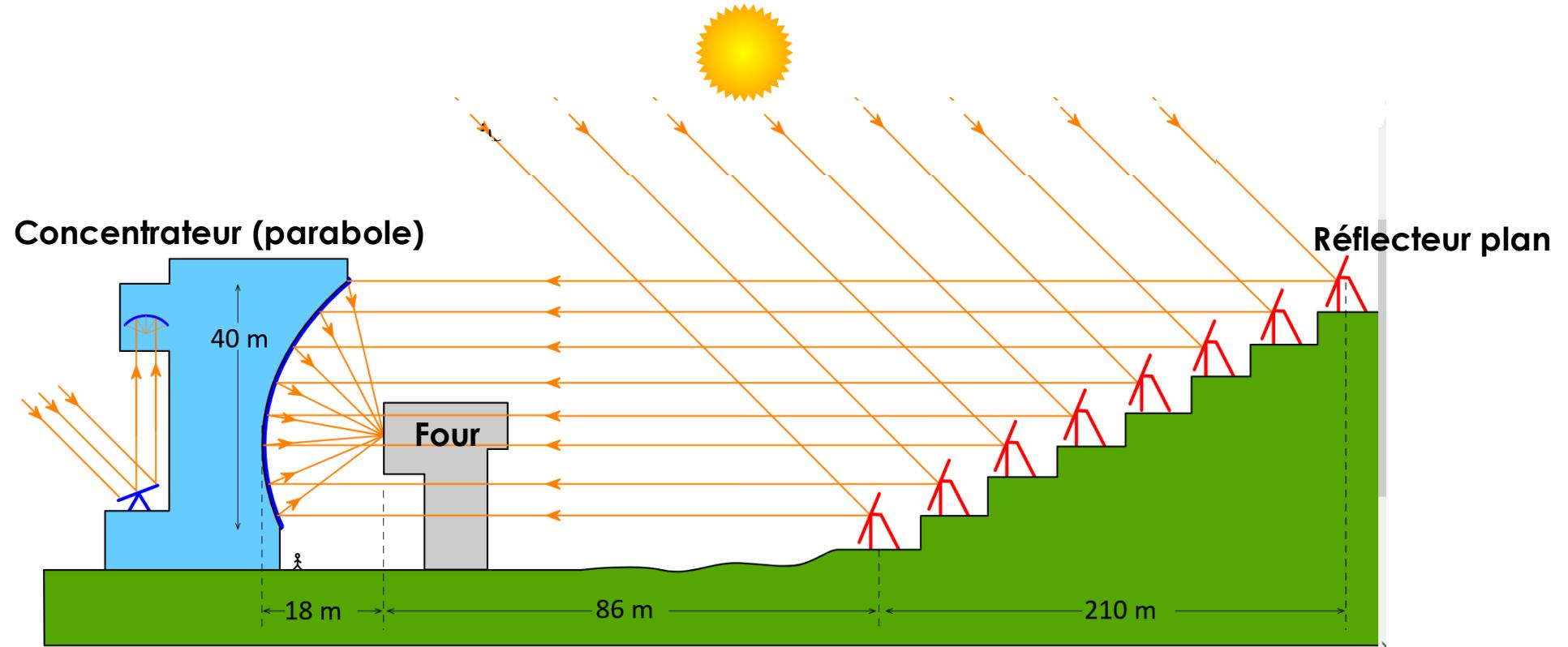
Four solaire d'Odeillo (Font-Romeu, Pyrénées orientales)



Concentrateur (50 x 60 x 30 m) + 63 réflecteurs plans + Bâtiment Four.
1 MW, concentre près de 10 000 fois la puissance du soleil pour atteindre jusqu'à 3 300 °C.
Mis en service en 1969.

L'énergie solaire thermique

Four solaire d'Odeillo (Font-Romeu, Pyrénées orientales)



Concentration maximale : 10 000 soleils - Concentration moyenne : 2000 soleils (1 soleil = 1 kW/m²)
Flux total concentré (moyen) : 1000 kW

L'énergie solaire thermique

Électricité par solaire thermique (STE)

- ✓ Centrales solaire électriques : utilisation de concentrateurs solaires (à haute concentration) pour chauffer un fluide (eau, sel fondu, huile) à une température élevée ($200\text{ }^{\circ}\text{C} - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) ; ce fluide est utilisé pour faire fonctionner un moteur thermique à rendement relativement élevé.
- ✓ Présente l'avantage de pouvoir stocker de l'énergie thermique (le jour) pour une utilisation ultérieure (production électrique la nuit), ce qui réduit la variabilité de l'énergie solaire.
Facteur de charge d'une centrale solaire thermique ~ 30 %, portée à 75 % avec stockage.
- ✓ L'implantation des centrales STE est limitée aux endroits où la couverture nuageuse et la brume sont les plus faibles (car seule la lumière directe du soleil peut être concentrée).



10 MW ; 15 h de capacité de stockage. Chine.

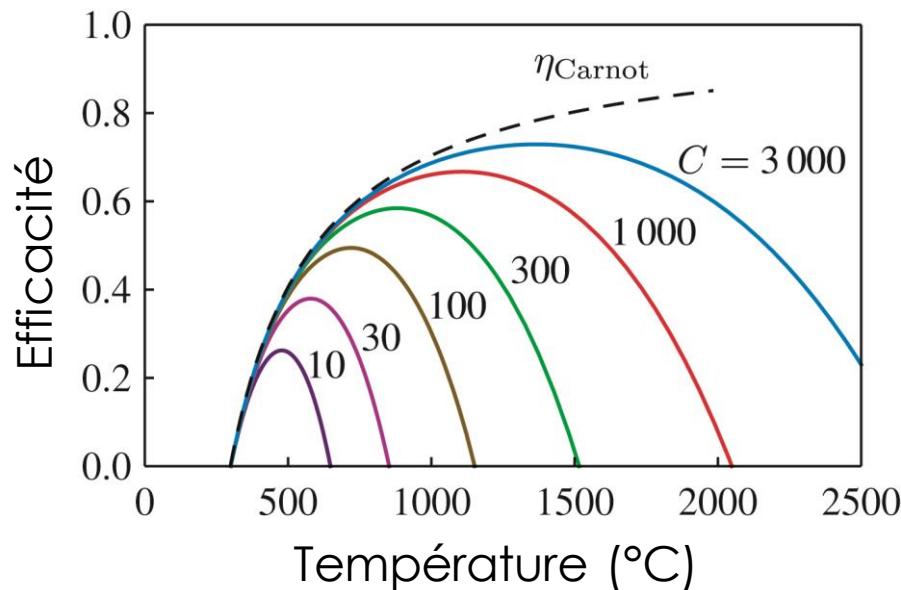
L'énergie solaire thermique

Electricité par solaire thermique (STE)

La température élevée du fluide de travail d'une installation STE permet d'augmenter l'efficacité maximale (Carnot) possible pour la conversion de l'énergie solaire thermique en électricité.

Mais d'un autre côté, plus sa température est élevée, plus l'absorbeur réémet une fraction importante de l'énergie incidente.

→ Il existe une température optimale.



On cherche l'efficacité de conversion maximale théorique pour la production d'électricité par énergie solaire concentrée en fonction de la température T de l'absorbeur (température ambiante 300 K ; puissance entrante $\mathcal{F}_0 = 1000 \text{ W/m}^2$).

$$\text{Puissance disponible : } \mathcal{P} = \mathcal{P}_{\text{entrant}} - \mathcal{P}_{\text{rayonnée}} = (C\mathcal{F}_0 - \sigma T^4)A$$

$$\text{Puissance électrique maximale : } \mathcal{P}_{\text{elec}} = \mathcal{P} \times \eta_{\text{Carnot}} = (C\mathcal{F}_0 - \sigma T^4)A \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T}\right)$$

$$\eta(T) = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{C\mathcal{F}_0 A} \quad \text{Max. : } \frac{d\eta}{dT} = 0 \rightarrow 3\sigma T_{\text{amb}} T^2 - 4\sigma T^3 + C\mathcal{F}_0 T_{\text{amb}} / T^2 = 0$$

→ On résout numériquement cette équation (figure ci-contre).

On voit ; à basse température, l'efficacité est supprimée par la limite de Carnot ; à haute température, la majeure partie de l'énergie est réémise par l'absorbant.

L'énergie solaire thermique

Électricité par solaire thermique (STE)

Efficacité brute de conversion :
$$\frac{\text{puissance électrique}}{\text{ensoleillement total sur la zone terrestre occupée par la centrale}}$$

Centrales actuelles : ~ 3 – 20 %.

Emprise au sol : 1 GW \leftrightarrow 100 km² (voir calculs de coin de table plus loin).

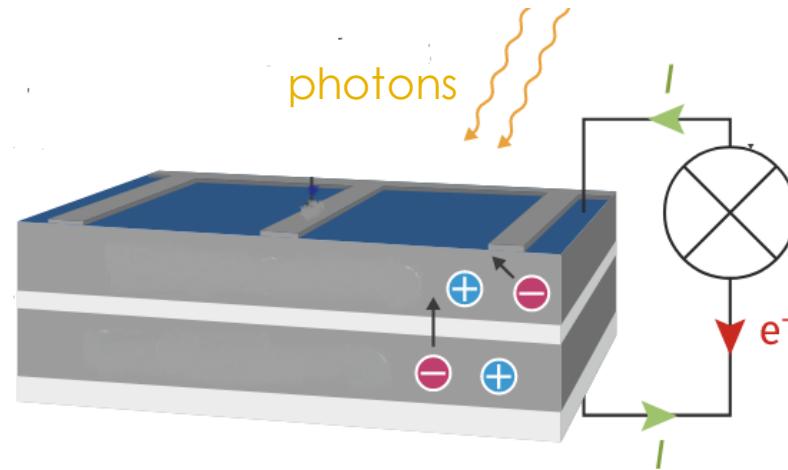
Difficultés techniques des STE à grande échelle :

- Produire en masse des miroirs hautement réfléchissants et les maintenir propres et intacts pendant des années d'exposition (poussière, pluie, vent, sable, etc.).
- Refroidir (source froide du moteur thermique : grande quantité d'eau nécessaire).
- Stocker et transmettre. Recherche en cours pour l'optimisation des fluides caloporteurs (capacité thermique élevée, faible coût).

L'énergie solaire photovoltaïque

Introduction

- ✓ Ressource disponible énorme ; potentiels de développement technologique et de réduction de coût importants. En croissance exponentielle : doublement de la puissance installée tous les 3 ans.
- ✓ Principe élémentaire : un photon est absorbé par un électron dans un dispositif structuré asymétriquement de façon à créer un potentiel électrique : cela donne lieu à un courant dans une direction préférentielle que l'on récupère dans un circuit extérieur.



- ✓ Plus en détail [Cours de MQ, Physique des solides, Electronique, niveau Master] : notions de : bandes électroniques, gap interdit, niveau de Fermi, semi - conducteur, paires électron – trou, dopage, jonction $p - n$, caractéristiques d'une diode, ...
Voir l'annexe pour une présentation simplifiée de certains de ces concepts.

L'énergie solaire photovoltaïque

Notions de bandes et de gap

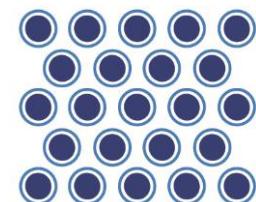
- ✓ Un atome isolé présente un ensemble de niveaux d'excitations électroniques (Hydrogène : niveaux 1s, 2s, ...). Un solide peut être vu comme une grosse molécule dans laquelle chaque atome « apporte » ses niveaux : son diagramme de niveaux électroniques est formé de groupements continus de niveaux accessibles (**bandes**) séparés par des intervalles d'énergies inaccessibles (**bandes interdites ou gap**).
- ✓ L'énergie électronique du système correspond à une répartition de l'énergie des N électrons du solide dans l'ensemble de ces bandes. Cependant, chaque bande ne peut accueillir qu'un nombre limité d'électrons (principe d'exclusion de Pauli). L'état fondamental correspond donc au remplissage de tous les niveaux autorisés successifs depuis le plus bas jusqu'à un certain niveau (appelé niveau de Fermi).



niveaux électroniques
d'un atome isolé



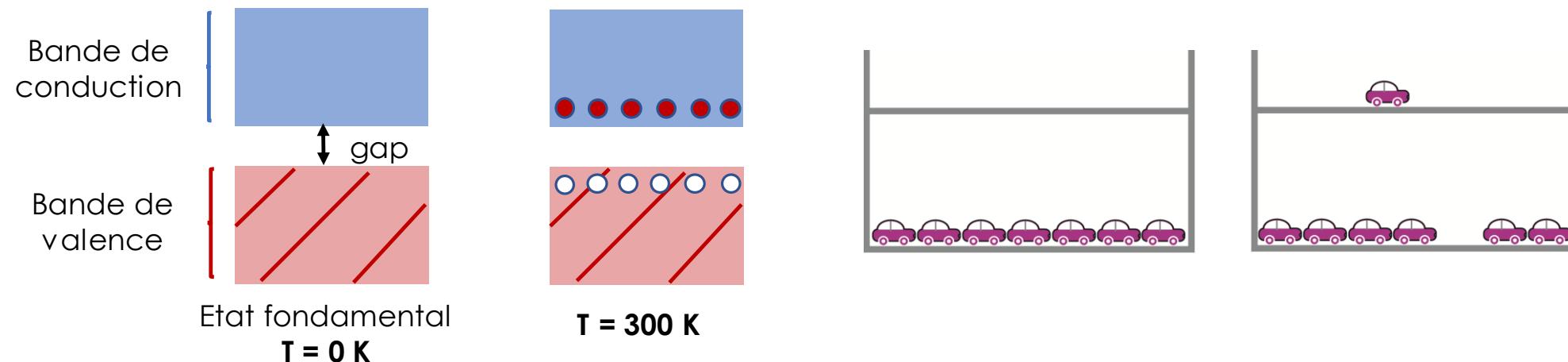
niveaux électroniques
dans un solide



L'énergie solaire photovoltaïque

Semi-conducteur

- ✓ L'état fondamental d'un semi-conducteur (ou d'un isolant) correspond à une situation dans laquelle la bande occupée la plus élevée, appelée **bande de valence**, est complètement **remplie**. La bande vide immédiatement au-dessus (disponible pour accueillir des électrons dans un état excité) s'appelle **bande de conduction**. Si un électron est excité vers la bande de conduction, il peut se déplacer librement dans le matériau et conduire le courant électrique. Les **trous** créés dans la bande de valence donnent lieu à un courant de charges positives.



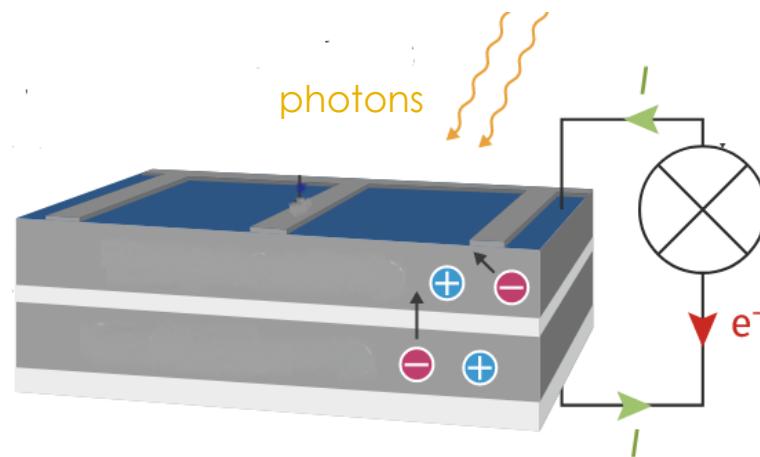
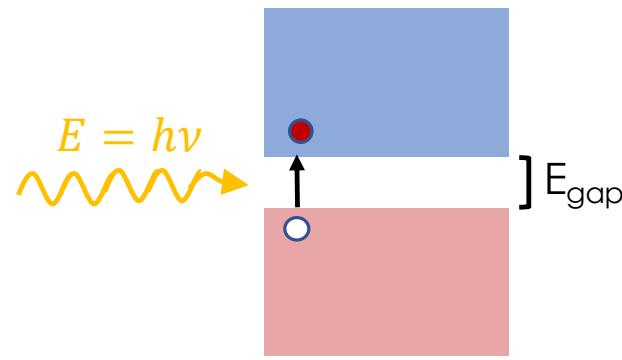
Un **semi-conducteur** est un matériau dont la bande interdite (ou gap) est suffisamment petite pour que les excitations thermiques suffisent à faire passer certains électrons de la bande de valence à la bande de conduction.

L'énergie solaire photovoltaïque

Effet photovoltaïque

Principe de l'effet PV : lumière sur un matériau semi-conducteur de **bande interdite** E_{gap}
→ des photons d'énergie $E = h\nu$ supérieure ou égale à E_{gap} excitent des électrons.

Ex. : silicium cristallin, excellent semi-conducteur, largeur de bande interdite $E_{\text{gap}} \sim 1,1 \text{ eV}$.



But de la cellule PV : utiliser les **électrons excités** et les **trous** pour alimenter un circuit externe.

Plus de détails en annexe sur la mise en mouvement des charges [dopage et jonction p – n].

L'énergie solaire photovoltaïque

Effet photovoltaïque

Les défis, pour rendre efficace cette conversion d'énergie solaire en énergie électrique, sont :

a) Efficacité de la collecte de photons. Pour un matériau de gap donné, seuls les photons d'énergie supérieure à l'énergie du gap peuvent exciter un électron vers la bande de conduction. Le choix du matériau est contraint par son gap de bande.

b) Eviter les recombinaisons électron - trou. En général, un électron excité va rapidement retomber dans la bande de valence et se recombiner avec un trou, ce qui donne lieu à une conversion de son énergie en une combinaison d'énergie thermique et de rayonnement (photon réémis). Cette recombinaison fait perdre des électrons pour le circuit électrique. De fait, une certaine proportion de recombinaison est associée avec des processus radiatifs qui ne peuvent être évités. Le challenge est donc de minimiser les processus de recombinaison non - radiatifs.

c) Amener le courant au circuit et minimiser les pertes d'impédance aux contacts électriques.

Ces 3 aspects sont à l'origine de limites fondamentales à l'efficacité des cellules photovoltaïques.

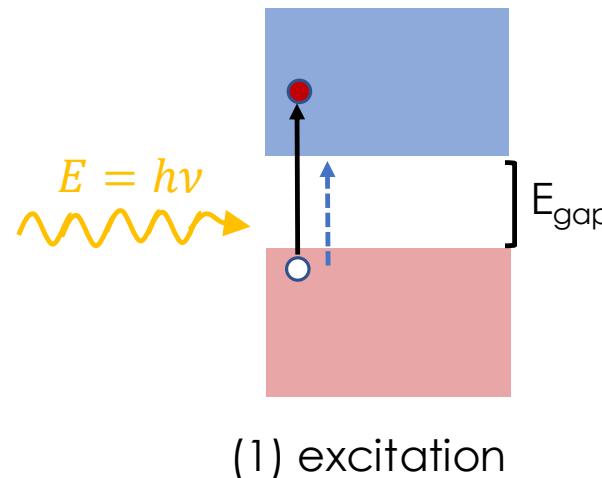
L'énergie solaire photovoltaïque

Limites à l'efficacité de conversion

[William Shockley & Hans Queisser (1961)]

a) Efficacité de collecte :

- Un électron de conduction est généré seulement si $E_{\text{photon}} \geq E_{\text{gap}}$.
Donc tous les autres photons ($E < E_{\text{gap}}$) du rayonnement incident ne sont pas utilisés.



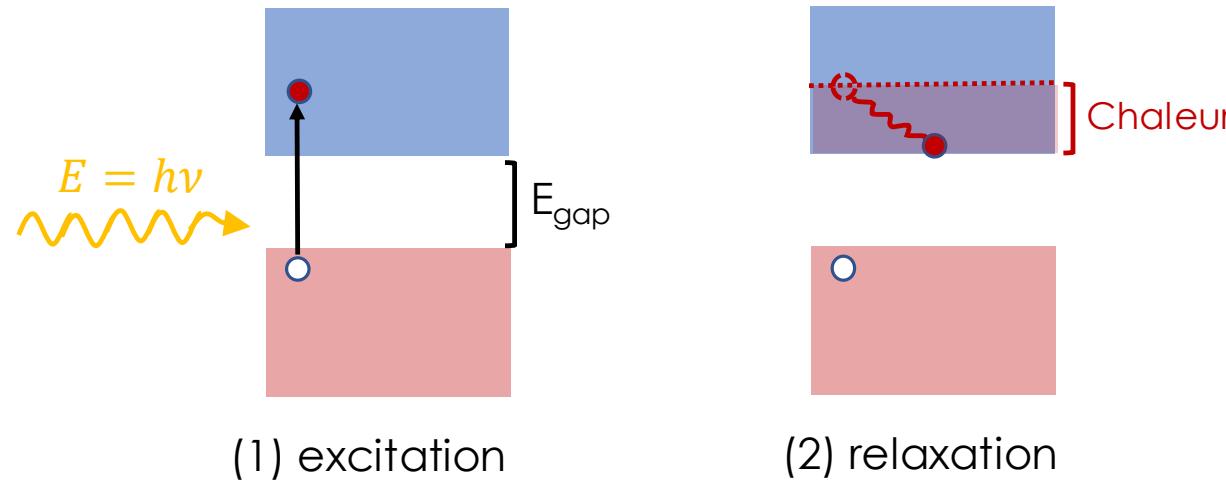
L'énergie solaire photovoltaïque

Limites à l'efficacité de conversion

[William Shockley & Hans Queisser (1961)]

a) Efficacité de collecte :

- Un électron de conduction est généré seulement si $E_{\text{photon}} \geq E_{\text{gap}}$.
Donc tous les autres photons ($E < E_{\text{gap}}$) du rayonnement incident ne sont pas utilisés.
- De plus, avant même d'être collecté par le circuit, l'électron excité relaxe une partie de son énergie : l'excédent $E_{\text{photon}} - E_{\text{gap}}$ est perdue en énergie thermique.



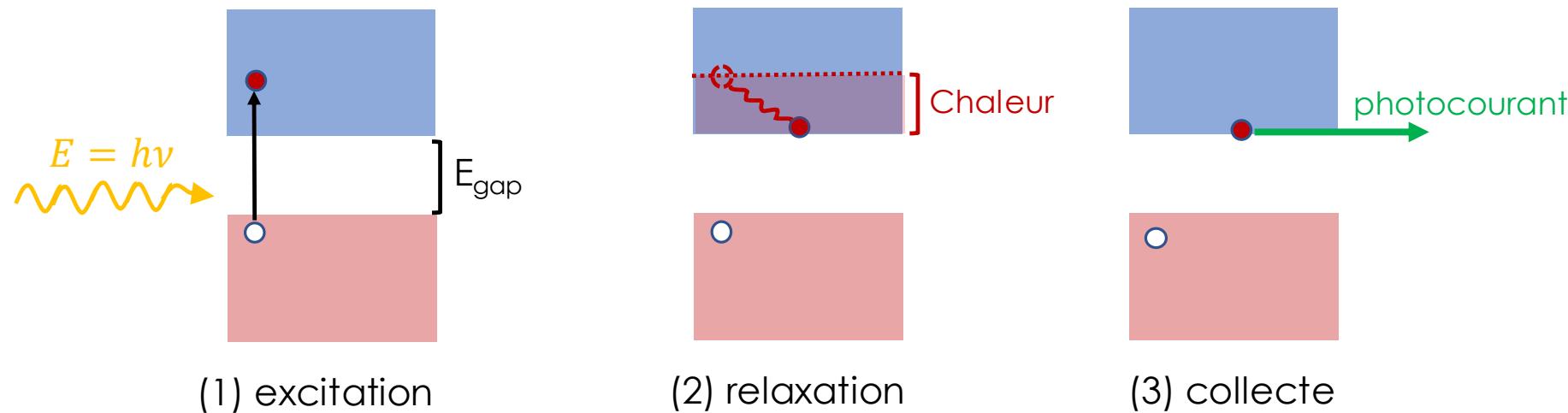
L'énergie solaire photovoltaïque

Limites à l'efficacité de conversion

[William Shockley & Hans Queisser (1961)]

a) Efficacité de collecte :

- Un électron de conduction est généré seulement si $E_{\text{photon}} \geq E_{\text{gap}}$.
Donc tous les autres photons ($E < E_{\text{gap}}$) du rayonnement incident ne sont pas utilisés.
- De plus, avant même d'être collecté par le circuit, l'électron excité relaxe une partie de son énergie : l'excédent $E_{\text{photon}} - E_{\text{gap}}$ est perdue en énergie thermique.
→ La part utile de l'énergie captée n'est au plus que de $\sim E_{\text{gap}}$ par photon.



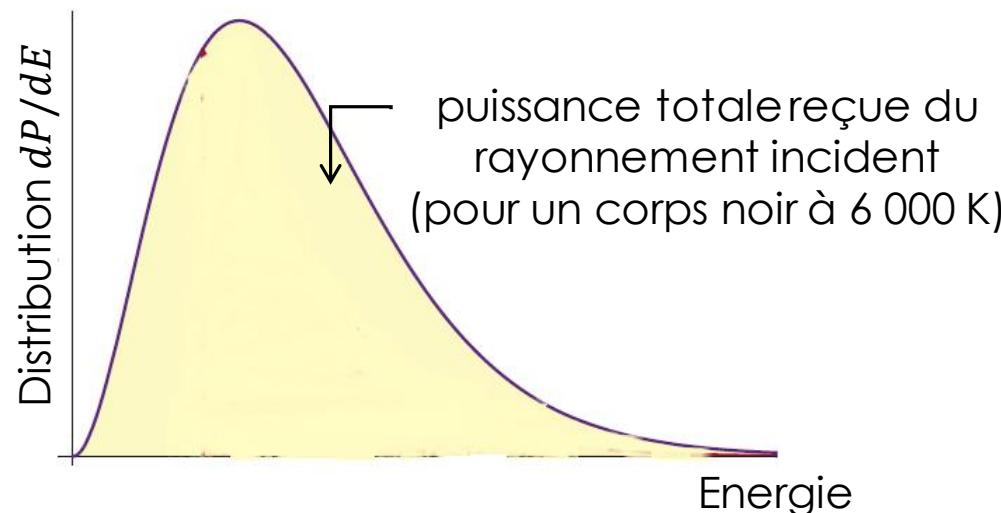
L'énergie solaire photovoltaïque

Limites à l'efficacité de conversion

[William Shockley & Hans Queisser (1961)]

a) Efficacité de collecte :

- Un électron de conduction est généré seulement si $E_{\text{photon}} \geq E_{\text{gap}}$.
Donc tous les autres photons ($E < E_{\text{gap}}$) du rayonnement incident ne sont pas utilisés.
- De plus, avant même d'être collecté par le circuit, l'électron excité relaxe une partie de son énergie : l'excédent $E_{\text{photon}} - E_{\text{gap}}$ est perdue en énergie thermique.
→ La part utile de l'énergie captée n'est au plus que de $\sim E_{\text{gap}}$ par photon.



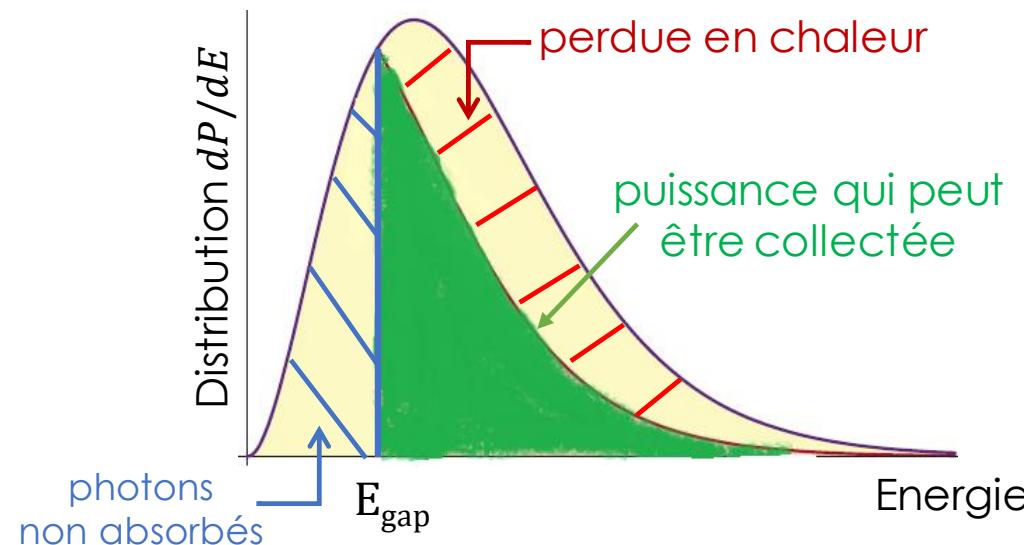
L'énergie solaire photovoltaïque

Limites à l'efficacité de conversion

[William Shockley & Hans Queisser (1961)]

a) Efficacité de collecte :

- Un électron de conduction est généré seulement si $E_{\text{photon}} \geq E_{\text{gap}}$.
Donc tous les autres photons ($E < E_{\text{gap}}$) du rayonnement incident ne sont pas utilisés.
- De plus, avant même d'être collecté par le circuit, l'électron excité relaxe une partie de son énergie : l'excédent $E_{\text{photon}} - E_{\text{gap}}$ est perdue en énergie thermique.
→ La part utile de l'énergie captée n'est au plus que de $\sim E_{\text{gap}}$ par photon.



$$\text{efficacité de collecte} = \frac{\text{Aire verte}}{\text{Aire jaune}} \quad (\text{voir calculs en TD})$$

Exemple : silicium, efficacité maximale prédictive : 44 %

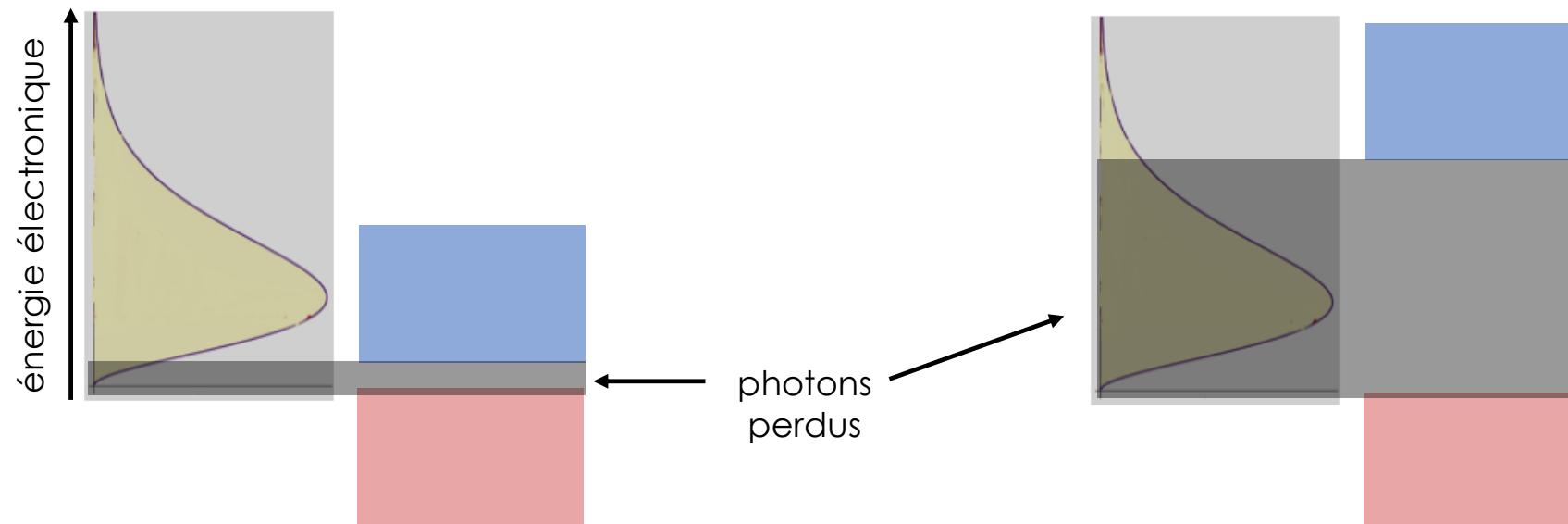
Efforts de recherche pour récupérer l'énergie thermique perdue (défi technique important qui n'a pas encore été surmonté pour les systèmes commercialement viables).

L'énergie solaire photovoltaïque

Limites à l'efficacité de conversion

[William Shockley & Hans Queisser (1961)]

Si E_{gap} est petit, tous les photons sont collectés mais les énergies récupérées sont petites, et si E_{gap} est grand, trop peu de photons sont collectés. Il y a un optimum à trouver.



L'énergie solaire photovoltaïque

Limites à l'efficacité de conversion

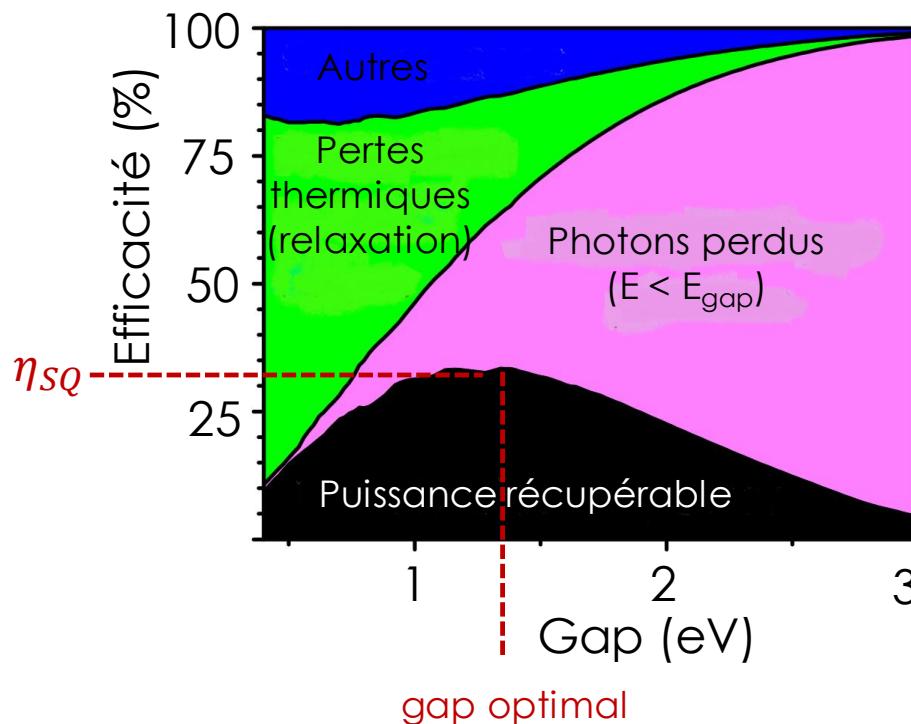
[William Shockley & Hans Queisser (1961)]

D'autres sources de pertes (recombinaison de la paire électron-trou et contraintes d'adaptation d'impédance liées à la caractéristique courant-tension de la cellule) existent mais elles jouent un rôle plus mineur (en bleu, ci-dessous).

→ **Limite de Shockley – Queisser :**

η_{SQ} : valeur maximale de l'efficacité
(pour une jonction p - n simple)

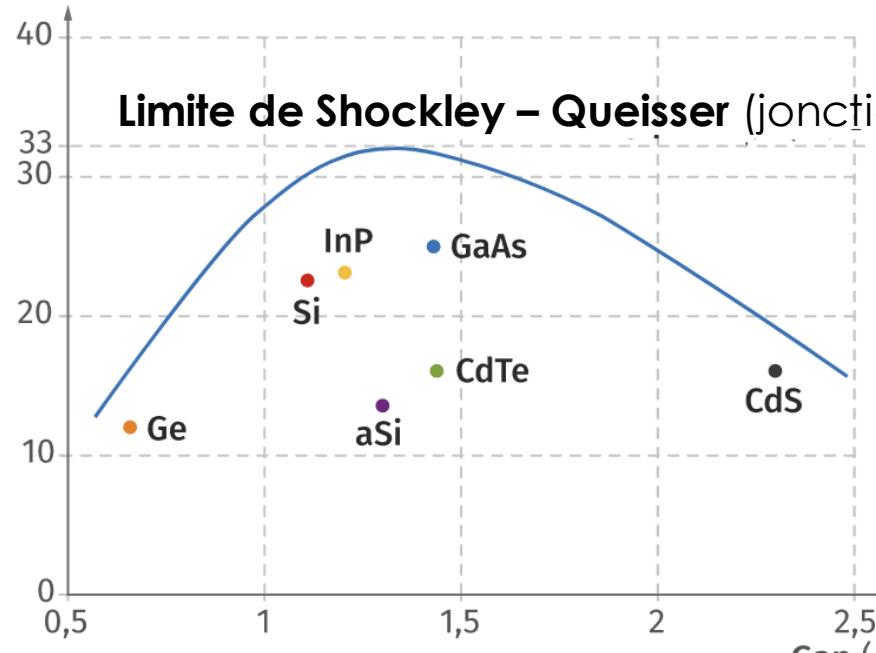
= 33,7 % atteinte quand $E_{gap} = 1,34 \text{ eV}$



L'énergie solaire photovoltaïque

L'enjeu matériaux (coût, impact, recyclabilité)

Efficacité (%)



Source : DOE, nsl.caltech.edu.

Limite de Shockley – Queisser (jonction simple)

PV commerciaux ($\eta = 20 \%$) : pour la plupart basés sur des jonctions simples de type silicium.

Stratégie pour augmenter l'efficacité de collecte : cellules multi-couches (assemblage de matériaux de différents gap, pour absorber différentes parties du spectre solaire). Efficacité maximale pour une bicouche 60,4 %, tricouche : 69,2 % (en pratique aujourd'hui, 40+ %). MAIS matériaux souvent rares et/ou chers (applications de niche).

L'énergie solaire photovoltaïque

L'enjeu matériaux (coût, impact, recyclabilité)

Défis pour le coût et l'efficacité sont :

- Contraintes matériaux : silicium abondant mais nécessite d'être purifié (typiquement à 99,9999 %). Réaction intensive en énergie qui relâche du carbone (à partir du quartz : $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$). Recherche d'autres méthodes.
- Dégradation. L'exposition aux UV endommage graduellement les panneaux, causant des défauts dans le réseau cristallin et réduisant l'efficacité. Durée de vie ~ 25 ans.
- Contacts. Les contacts électriques avec la jonction semiconductrice peuvent bloquer la lumière. Actuellement, des quantités significatives d'argent (Ag) sont utilisées (~ 10 mg par W). Recherche de solutions de remplacement.

Cellules solaires avancées, variété d'approches actuellement limitées à des applications de niche ou à des stades précoce de développement (cellules à pigments photosensibles, cellules organiques, quantum dots, graphène ...).

Ex. : films en couche mince, le plus répandu : CdTe, facilement produit en films flexibles peu coûteux, efficacité ~ 21 %. MAIS Cd toxique et Te très rare (plus rare que l'or ; coût faible pour le moment car produit dérivé de l'extraction du cuivre : futur obscure ...).

Nécessité d'appuyer ces recherches sur des matériaux abondants, non-toxiques, recyclables

L'énergie solaire

Calculs de coin de table (prudence de mise)

L'énergie solaire peut-elle subvenir à la consommation électrique (avec les technologies actuelles) ?

Consommation électrique mondiale : ~ 3 TW. Dans le futur, avec électrification du transport ~ **4 TW**.

Efficacité : - photovoltaïque (PV) ~ 15 % (réduit à 6 % dans le cas de fermes solaires à grande échelle)
 - concentrateurs solaires (STE) couplés à une machine thermique ~ 3 %.

$$\mathcal{P} = \eta \mathcal{F} S \quad [\text{efficacité} \times \text{flux surfacique reçu} \times \text{surface}]$$

Scénario 1 [à petite échelle et distribué]

Des panneaux PV sont installés sur les toits dans les villes. On prend $\mathcal{F} \sim 150 \text{ W.m}^{-2}$

→ (pour 4 TW), il faut une surface de panneaux :

$$S = \frac{\mathcal{P}}{\eta \mathcal{F}} \sim 178\,000 \text{ km}^2 \quad \sim 20 \% \text{ des toits}$$

Surface occupée par les villes dans le Monde : 4 M km²
 Proportion occupée par les toits dans les villes : 20 – 30 %
 → surface totale de toits dans les villes : ~ 1 M km²

Scénario 2 [à grande échelle, dans les déserts]

Panneaux PV et concentrateurs. $\mathcal{F} \sim 300 \text{ W.m}^{-2}$
 → Il faut une surface de panneaux :

$$s_{PV} \sim 56\,000 \text{ km}^2 \text{ par TW avec PV}$$

$$s_{STE} \sim 112\,000 \text{ km}^2 \text{ par TW avec STE}$$

→ Pour 4 TW, il faut une surface totale :

$$S \sim 225\,000 \text{ à } 450\,000 \text{ km}^2 \quad 1 - 2 \% \text{ des déserts}$$

Surface des déserts dans le Monde : 23 M km²

L'énergie solaire

Conclusions

- ✓ Renouvelable, la plus abondante et la mieux distribuée spatialement.
- ✓ Ressource très diluée.
- ✓ Intermittence en partie prévisible (cycle jour – nuit)

Solaire thermique (hors production d'électricité) :

- ✓ Très bonne efficacité.
- ✓ Low-tech. Impact environnemental faible, potentiel de déploiement.
- ✓ Concentrateurs : plus technique mais intéressant pour stockage ou couplage avec PV.

Solaire thermique électrique :

- ✓ Efficacité limitée par Carnot mais potentiellement élevée avec concentrateurs sophistiqués (peu développé, coût important).
- ✓ Sites géographiques propices limités (déserts, sud de l'Europe, ...).

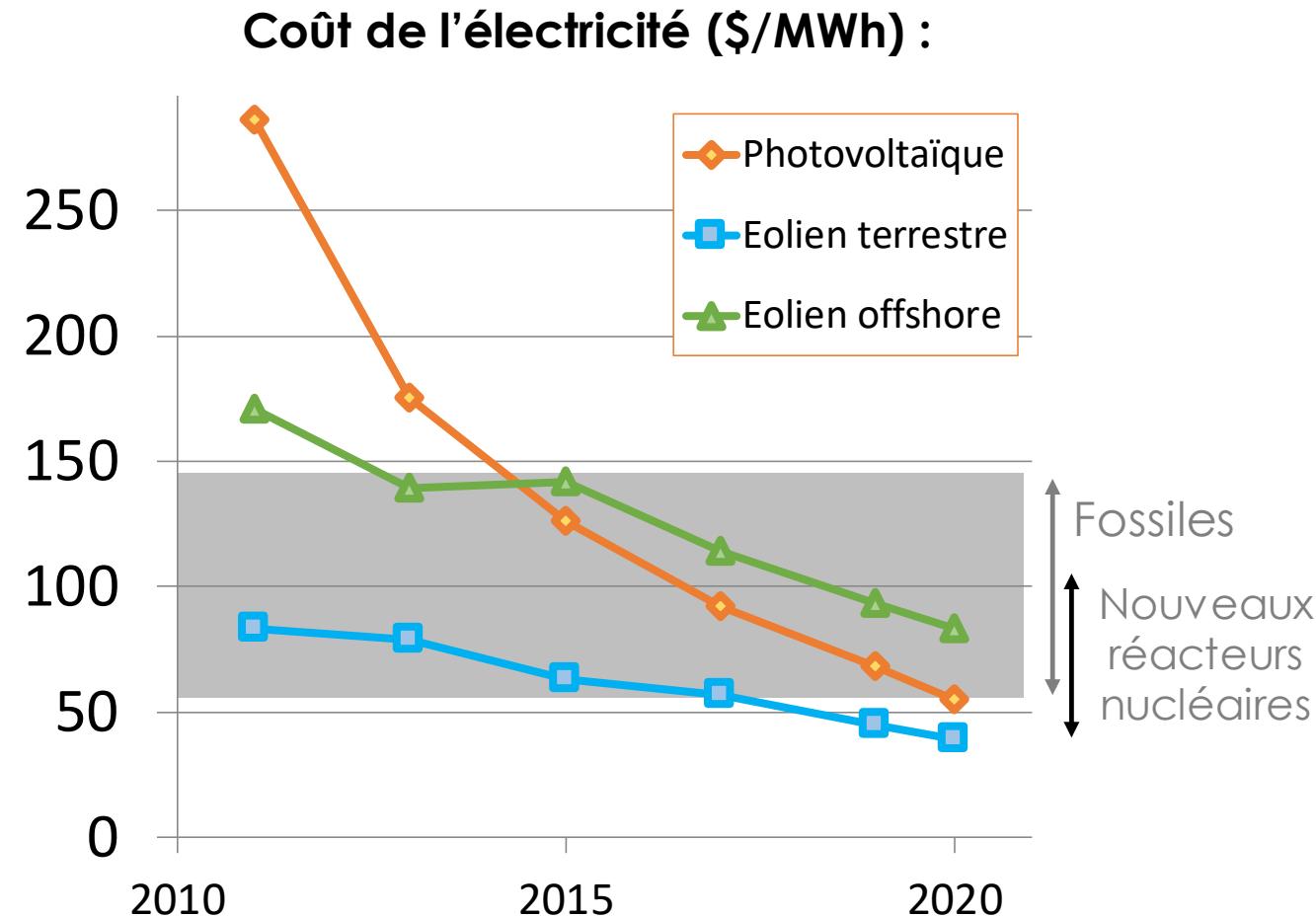
Solaire Photovoltaïque :

- ✓ Potentiel de déploiement très important ;
compétition pour l'usage des sols (sauf en toiture).
- ✓ Problématique matériaux (abondance, impact de l'extraction, recyclabilité).
- ✓ Efficacité limitée (Shockley-Queisser) :
contournement possible ? (recherche active)
- Emissions CO₂ plus élevées (~ 48 g/kWh) que hydraulique/éolien (mais reste très bas / fossile).

Quelques compléments de comparaison

Coût, emprise au sol, taux de retour énergétique,
empreinte carbone, eau et matériaux

Le coût économique



Occupation des sols (à l'usage)

Eolien versus solaire

- ✓ Comparaison difficile car dépend du site et de l'échelle de l'infrastructure. Quand elle est abondante, l'énergie éolienne est plus concentrée que l'énergie solaire. Mais capter à un endroit de l'énergie du vent diminue le flux disponible en aval. Localement, quand la distance minimale entre turbines est prise en compte, la densité de puissance éolienne est comparable (ou inférieure) à celle du solaire.

Justification :

- Solaire PV : en prenant une efficacité $\eta = 15\%$ et $\mathcal{F} = 240 \text{ W/m}^2$, on obtient $\mathcal{P}_{PV} \sim 40 \text{ W/m}^2$
- Eolien : en retenant les régions $> 300 \text{ W/m}^2$, et un rendement de 40 %, $\mathcal{P}_{éolien} = 120 \text{ W/m}^2$ (~ 3 fois plus grande que \mathcal{P}_{PV}). Mais, contrairement au photovoltaïque, les turbines ne peuvent pas être placées densément sur un plan 2D (du fait du phénomène d'ombrage du vent : diminution du flux derrière chaque turbine) \rightarrow grille régulière de turbine occupant $\pi D^2/4$ et espacées de $50xD^2$ \rightarrow réduction d'efficacité par unité de surface de $\pi/200$ \rightarrow Densité de puissance $\mathcal{P}_{éolien} \sim 2 \text{ W/m}^2$: c'est un ordre de grandeur moins bon que \mathcal{P}_{PV} ... Mais d'un autre côté, l'espacement nécessaire des turbines permet d'autres usages (agriculture) alors que dans le cas d'une ferme solaire aux collecteurs rapprochés (miroirs thermiques ou panneaux PV), le sol est très difficilement utilisable pour d'autres usages.

En résumé, la puissance d'énergie éolienne n'est pas proportionnelle à la surface comme le solaire l'est. Le flux ne peut se reconstituer en aval qu'un nombre limité de fois, donc dans le cas d'une exploitation à très grande échelle, les répercussions sur la captation sont mal connues et peuvent être importantes même à des centaines de kilomètres.

Emprise au sol globale

Eolien / solaire/ hydraulique (vers l'analyse en cycle de vie)

Les durées de vie d'une ferme PV ou éolienne sont comparables : ~ 25 ans. Facteurs de charge comparables : ~ 25 %. En gardant les chiffres précédents ($\mathcal{P}_{PV} \sim 40 \text{ W/m}^2$ et $\mathcal{P}_{éolien} = 2 \text{ W/m}^2$), on aboutit à une énergie totale produite par m^2 de :

$E_{PV} \sim 365 \text{ j} \times 24 \text{ h} \times 25 \text{ ans} \times 40 \text{ W/m}^2 \times 0,25 \sim 2 \text{ MWh /m}^2$ (et $E_{éolien}$ 20 fois inférieure).

On en déduit une emprise au sol de :

~ 0,5 m^2 / (MWh produit) pour PV

~ 10 m^2 / (MWh produit) pour l'éolien

Et l'hydraulique ? Exemple des 3 gorges : puissance 22 GW (facteur de charge ~ 0,8) ; surface de réservoir 1 100 km^2 : $\mathcal{P}_{hydrau} \sim 16 \text{ W/m}^2$ (2,5 fois inférieure à PV) ; durée de vie ~ 100 ans (~ 4 fois supérieure à PV) ?

Au final, emprise au sol très comparable à PV.

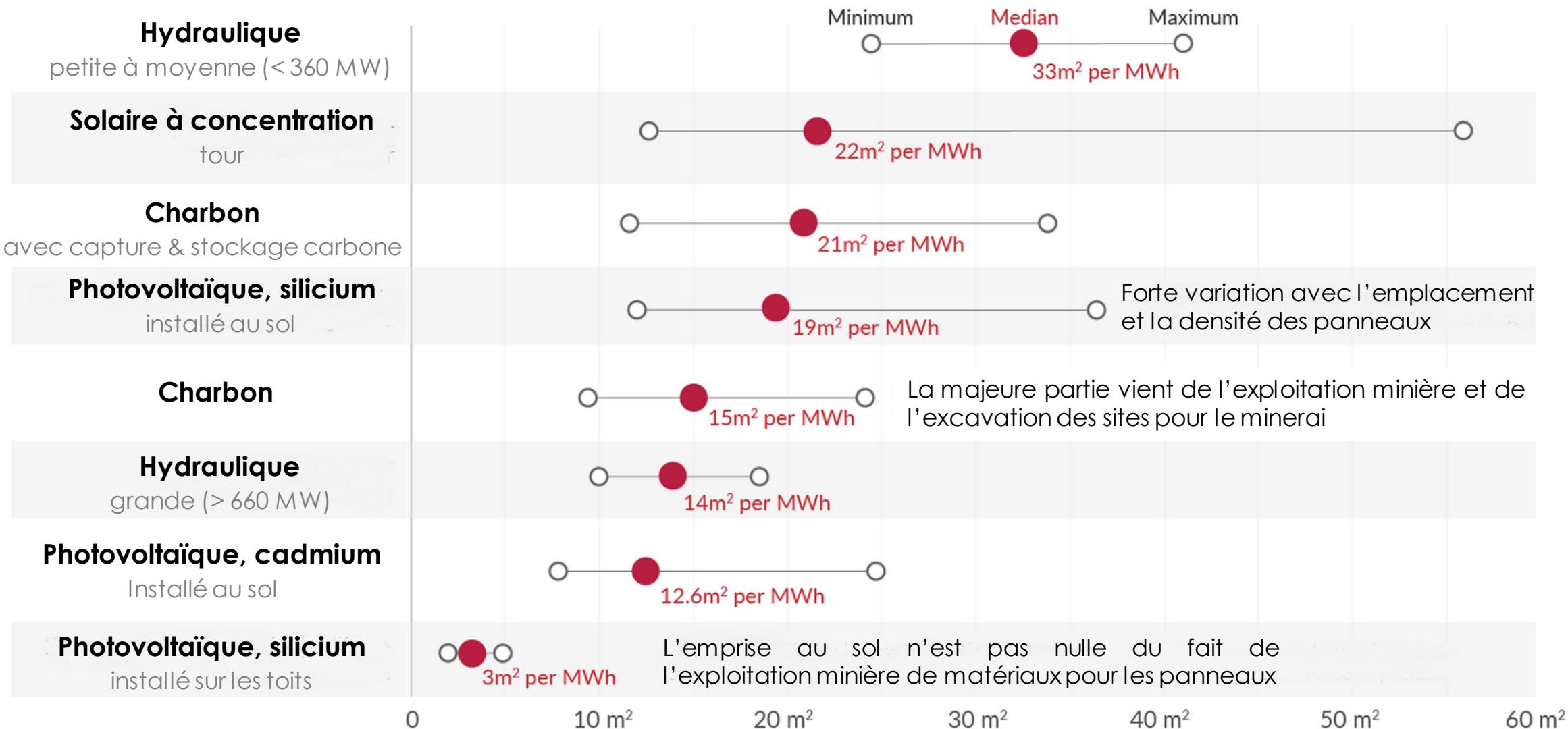
En fait, en effectuant une analyse de cycle de vie complète (prise en compte de la surface occupée par les infrastructures en amont et en aval de la chaîne de production et prise en compte de la densité réelle observée entre panneaux PV ou entre mâts d'éolienne), on obtient (travaux de Vaclav Smil, transparents suivants) des valeurs ~ un ordre de grandeur supérieures :

$E_{PV}(\text{au sol}) \sim 10 - 20 \text{ m}^2 / \text{MWh}$ (et $E_{hydrau} \sim 33 \text{ m}^2 / \text{MWh}$)

$E_{éolien} \sim 100 \text{ m}^2 / \text{MWh}$

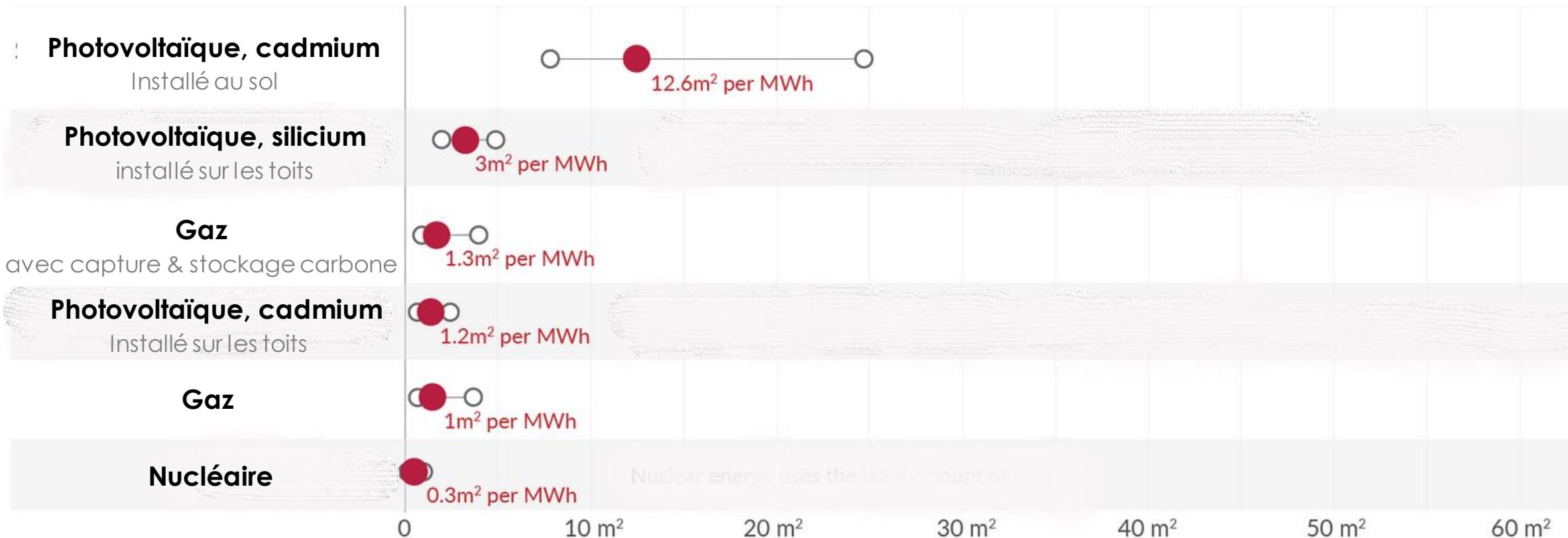
N. B. : ces chiffres sont affectés d'une grande variabilité, car 1) pour une même énergie, variété de dispositifs et de situations et 2) « subjectivité » dans le périmètre retenu de l'analyse en cycle de vie.

Emprise au sol par unité d'électricité produite (1)

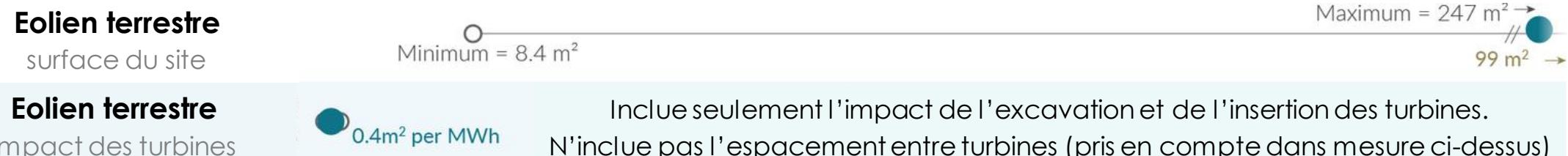


L'occupation des sols est basée sur l'analyse du cycle de vie : elle tient compte du sol occupé par la centrale elle-même, mais aussi des terres utilisées pour l'extraction des matériaux de construction, l'apport de combustibles, le démantèlement et le traitement des déchets.

Emprise au sol par unité d'électricité produite (2)



L'utilisation des terres pour l'éolien terrestre peut être mesurée de plusieurs manières et diffère nettement des autres technologies. Les terrains situés entre les mâts peuvent être utilisés à d'autres fins (comme l'agriculture). L'espacement des éoliennes et le contexte du site font que l'utilisation des terres est très variable.



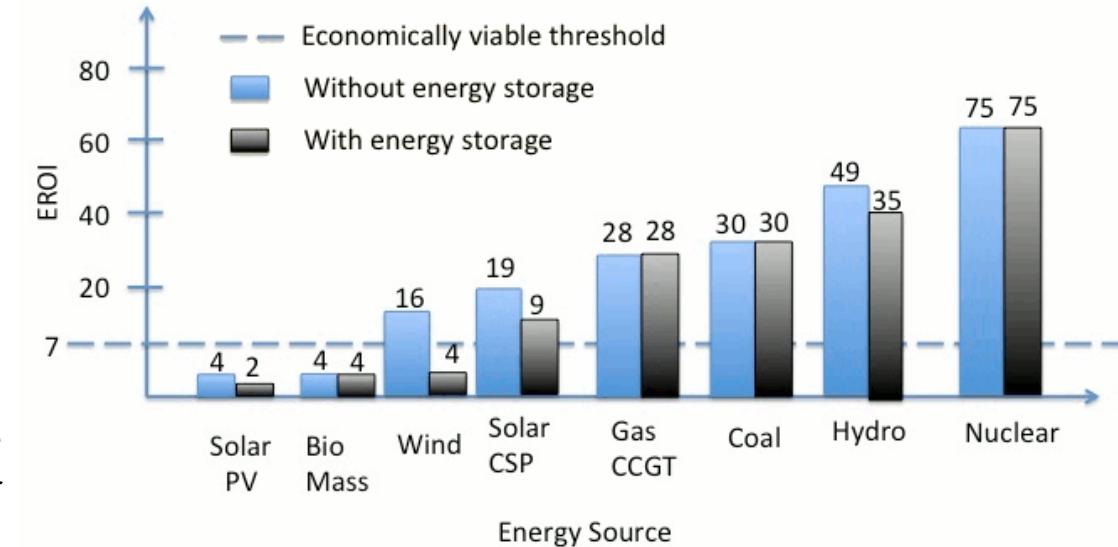
Taux de retour énergétique

TRE ou *EROI* : *energy return on (energy) invested*

$$EROI = \frac{\text{énergie récupérée d'une source}}{\text{énergie utilisée pour l'extraire}}$$

Quand le TRE d'une ressource est inférieur ou égal à 1, cette source d'énergie devient un « puits d'énergie », et ne peut plus être considérée comme une source d'énergie, car la dépense est supérieure au résultat.

Ainsi, quand le pétrole a commencé à être utilisé comme source d'énergie, il suffisait en moyenne d'un baril pour trouver, extraire et raffiner environ 100 barils. Ce ratio a décliné régulièrement au cours du siècle dernier.



[d'après D. Weissbach et al., \(2013\)](#)

Notion à forte teneur économique. Dépend des procédés, du périmètre, notamment pour les sources intermittentes. Valeurs très variables dans la littérature.

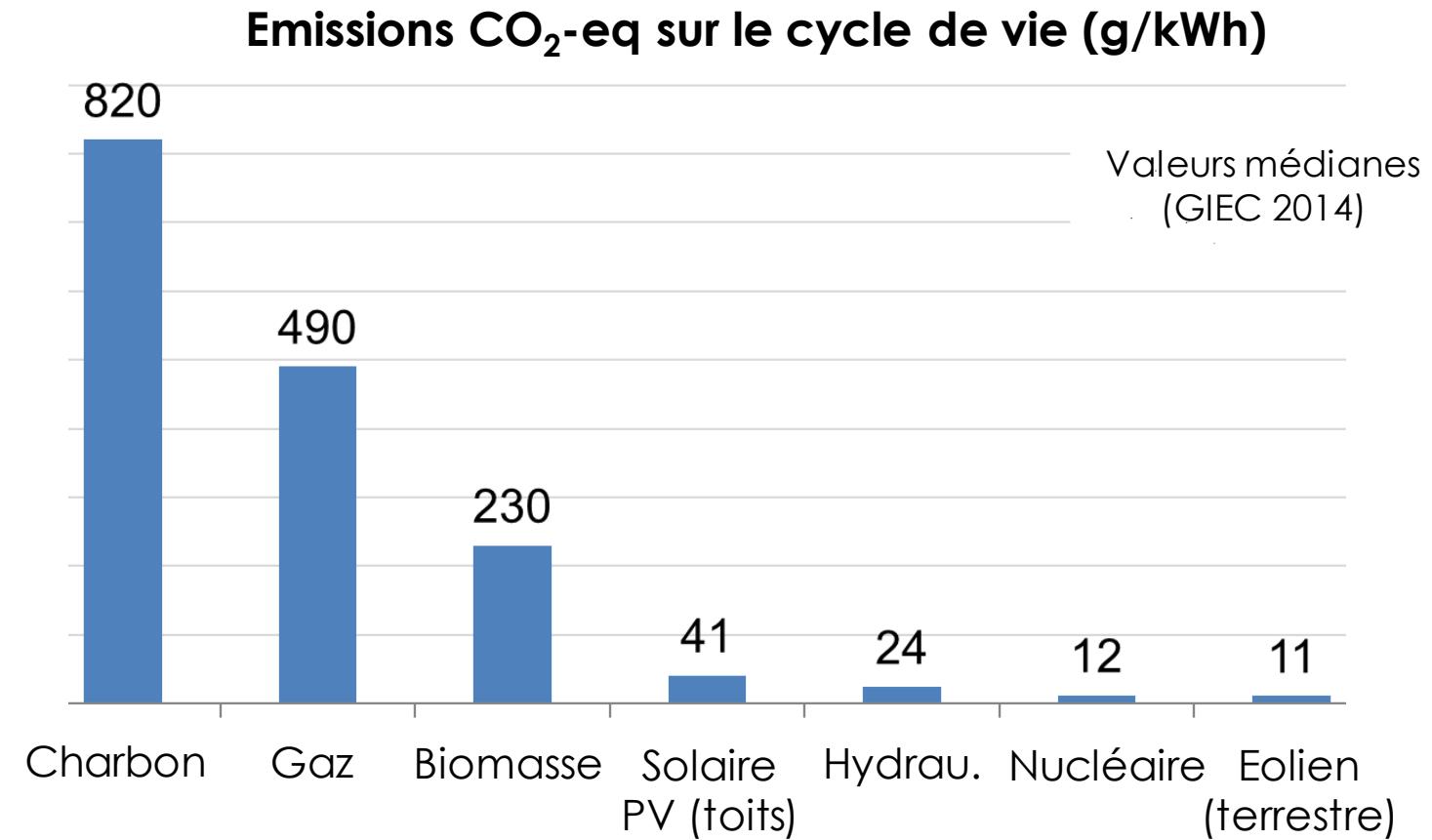
Energie grise

Quantité d'énergie consommée lors du cycle de vie d'un matériau ou d'un produit, **hors usage** : production, extraction, transformation, fabrication, transport, entretien, recyclage ou rebut.

L'énergie grise est une énergie « cachée », indirecte, au contraire de l'énergie liée à l'utilisation,

Difficile à calculer mais pertinent pour l'évaluation de l'impact environnemental.

Intensité carbone



Autres impacts environnementaux et humains

D'autres intensités à prendre en compte : en particulier l'intensité d'utilisation de l'**eau**, l'intensité d'utilisation en **minerais** (forts impacts sur les milieux et la biodiversité).

Excavation de roche (cuivre).

Ex. (Mine au Chili) : demande en eau : 200 m³/tonne Cu
Production cumulée en 30 ans : 200 km³ = 2 x Lac de Genève



Mine de Cuivre, Kennecott (Utah)
 $3,2 \times 1,2 \times 1,2 \text{ km}^3$

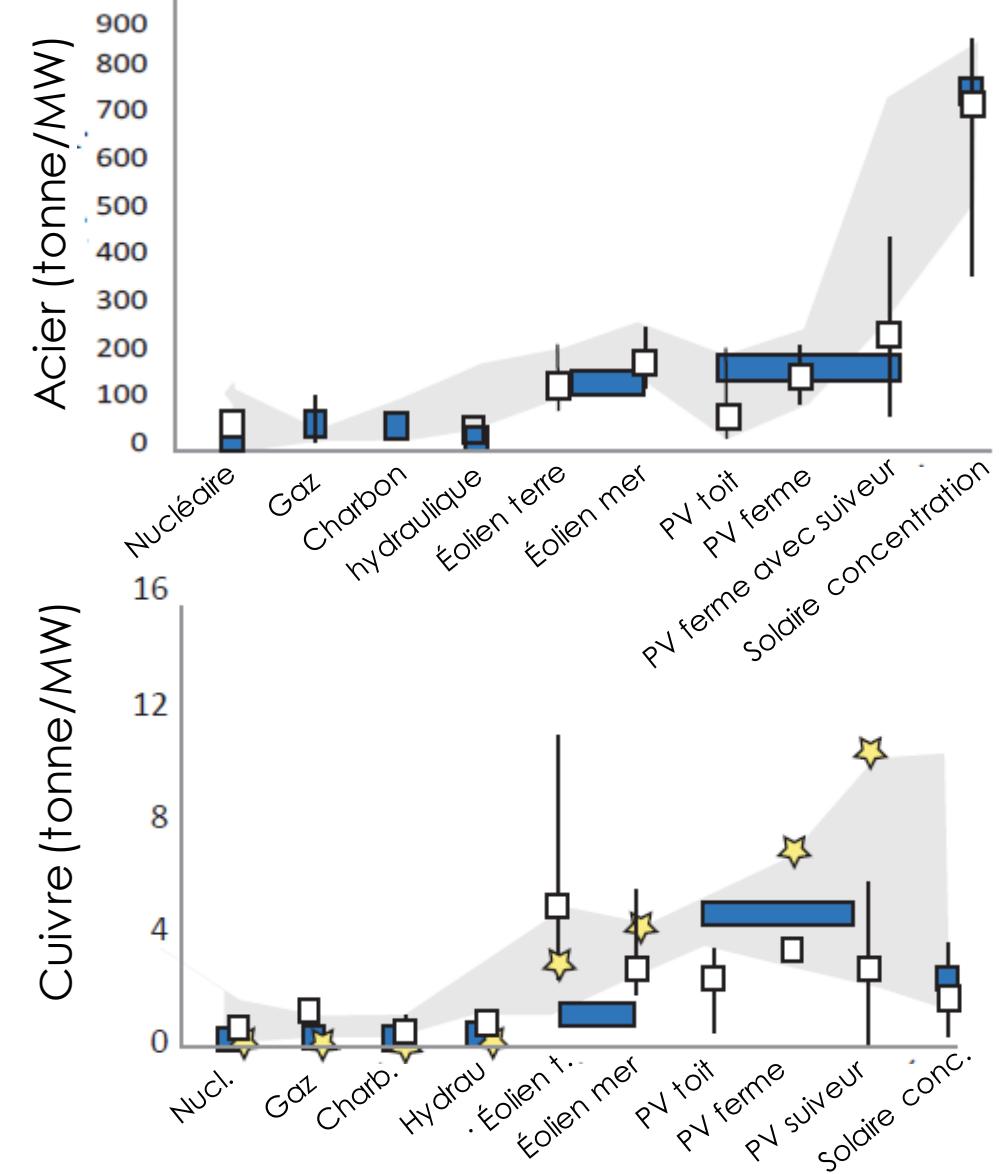
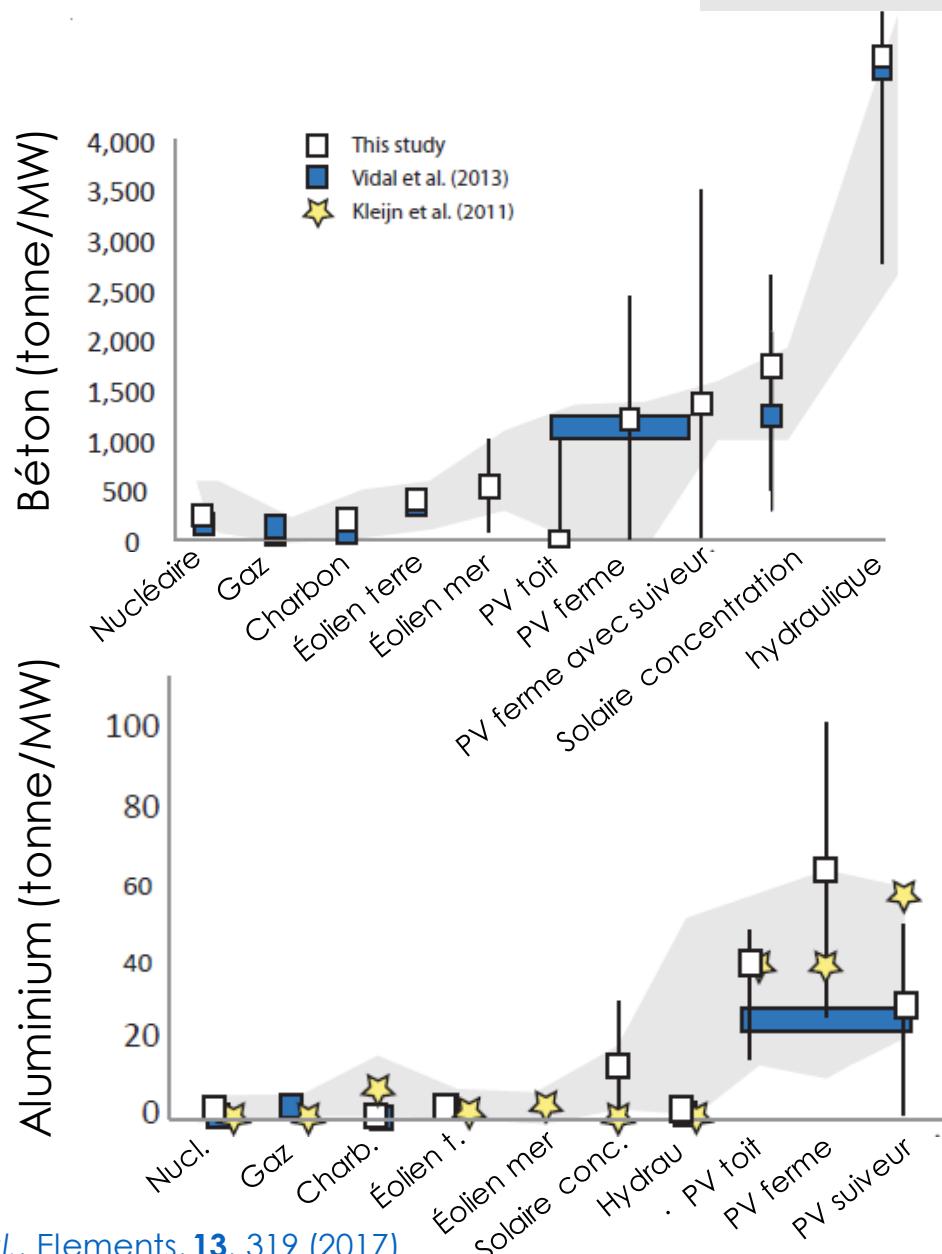
Extraction minière

Mine de cuivre de Palabora, en Afrique du Sud



Représentation imagée de la quantité de cuivre produite jusqu'en 2019 (photographe Dillon Marsh) - comparée à l'emprise surfacique de la mine - elle est équivalente à la taille de la ville de Grenoble.

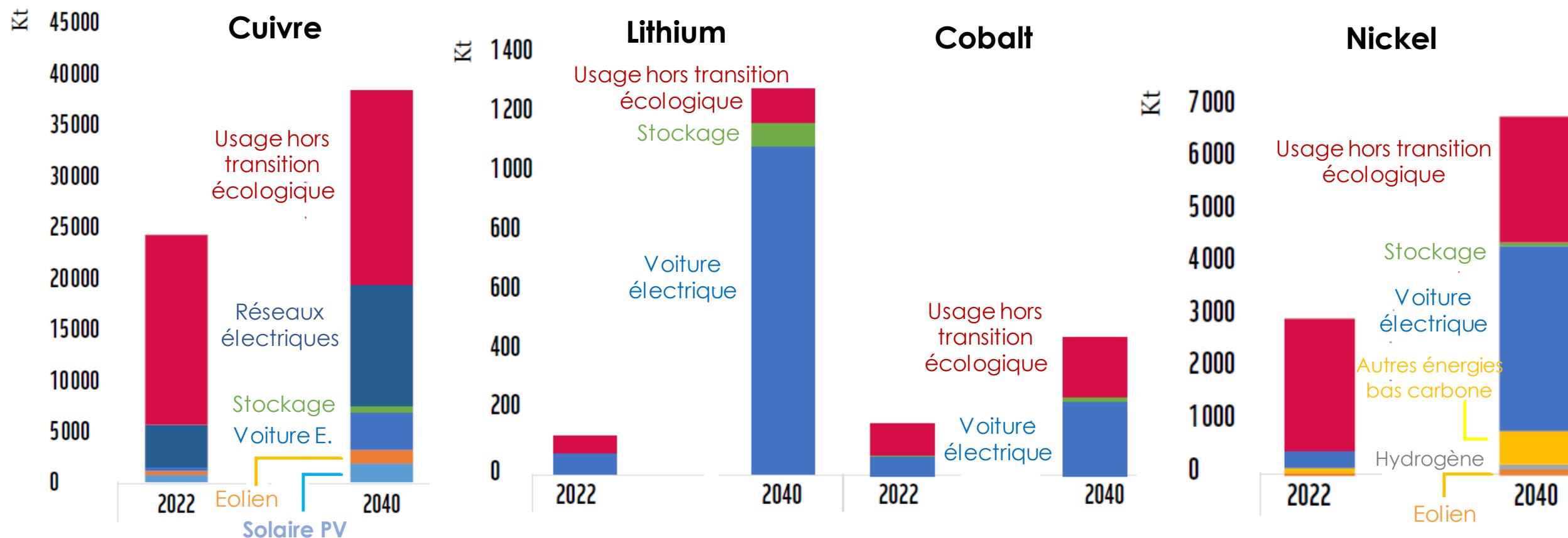
Empreinte Matériaux



Demande en métaux

Les énergies renouvelables : une part faible du problème

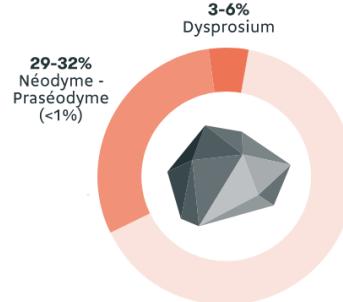
Demande en métaux critiques par usage final dans le scénario "net-zéro émission" (IEA 2023)



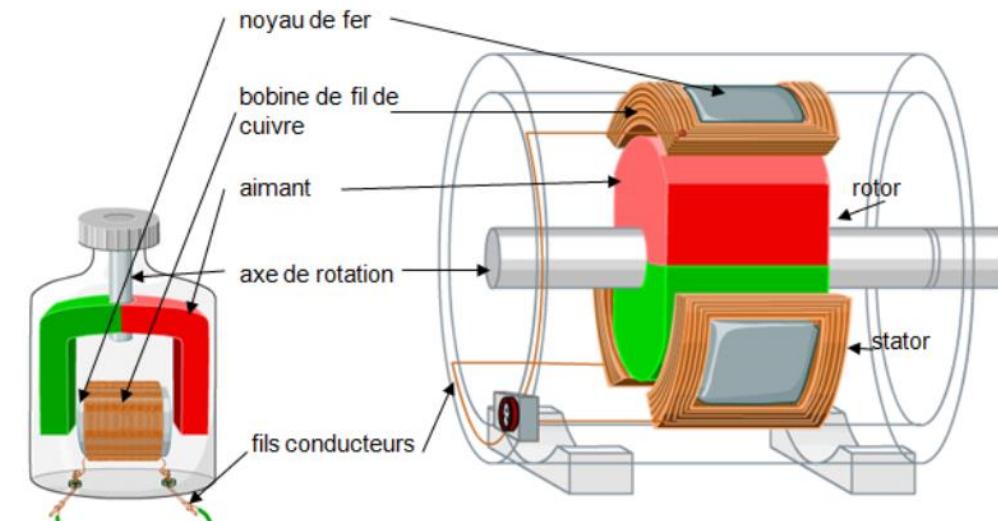
Alternateur

Dynamo (**aimant permanent**), courant continu

Peuvent contenir des terres rares.



Composition typique des aimants permanents avec terres rares [source : info-eolien.fr]



Dynamo de vélo

Alternateur industriel

Electro-aimants (grosses éoliennes et alternateurs de centrales jusqu'au GW), courant alternatif. Bobinage cuivre.

Eoliennes terrestres : 6 % seulement contiennent des terres rares.

Eoliennes offshore (6 MW, hauteur > 150 m) : 3 t d'aimant permanent dont 0,5 t de terres rares. 1500 t d'acier.

Annexes

Les filières d'énergie renouvelable en France.

Loi de Betz (démonstration)

Radiation thermique (loi de Planck)

Photovoltaïque :

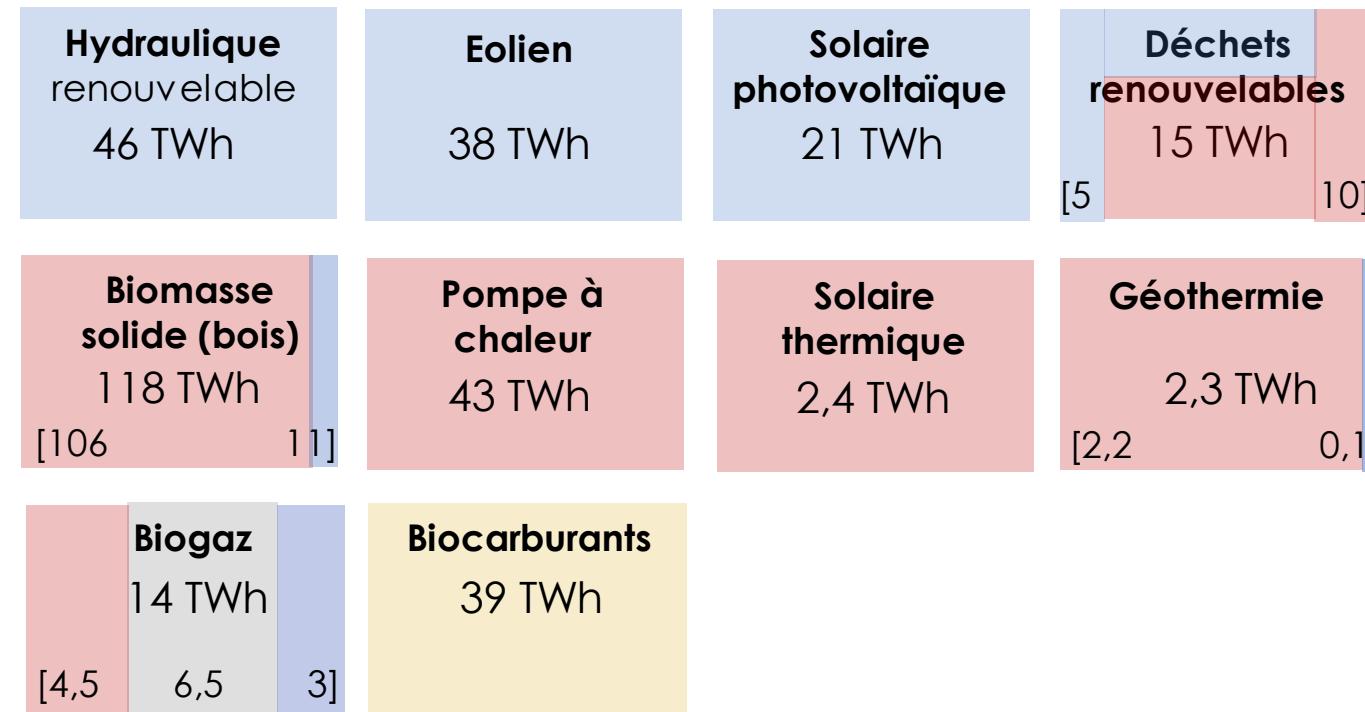
- principe du dopage et d'une jonction $p - n$

Ressources et réserves (définitions)

Analyse du cycle de vie (principe)

Les filières d'énergie renouvelable

France (2022)



Total renouvelables : 340 TWh

dont production d'électricité : 124,1 TWh (36 %)

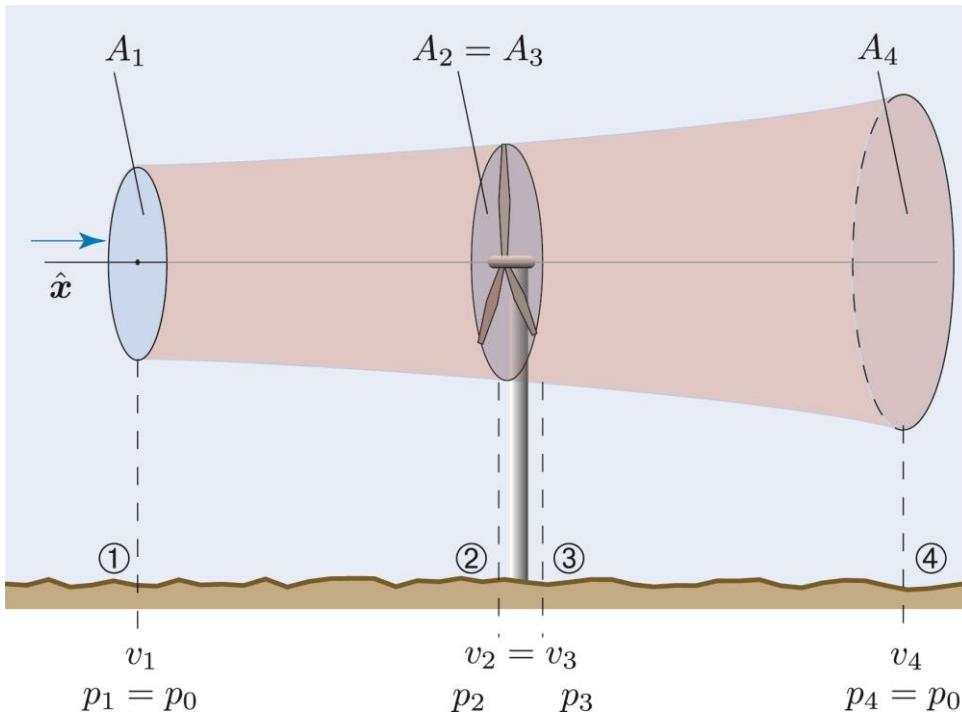
dont production de chaleur : 168,1 TWh (49 %)

dont production de gaz (méthane) : 6,5 TWh (4 %)

dont production de carburants : 39 TWh (11 %)

L'énergie éolienne

Etude théorique : limite de Betz (1)



Un tube d'air est suivi depuis un point loin en amont ①, jusqu'à juste avant le disque capteur ②, et ensuite depuis juste après le disque ③ et en un point très en aval ④. Du fait que le disque capte de l'énergie, le flux ralentit et le tube s'élargit.

- Hypothèses :**
- Fluide parfait (mouvement adiabatique)
 - Fluide incompressible (ou faiblement compressible)
 - Ecoulement non-turbulent et constant dans la direction x

Conservation de la masse : $A_1 v_1 = A_2 v_2 = A_3 v_3 = A_4 v_4 \equiv A v$ (1)

Pas d'accumulation de matière à la position du disque : $v_2 = v_3$ (2)

Equation de Bernoulli entre ① et ② : $p_0 + \frac{1}{2} \rho_0 v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_0 v_2^2$ (3)

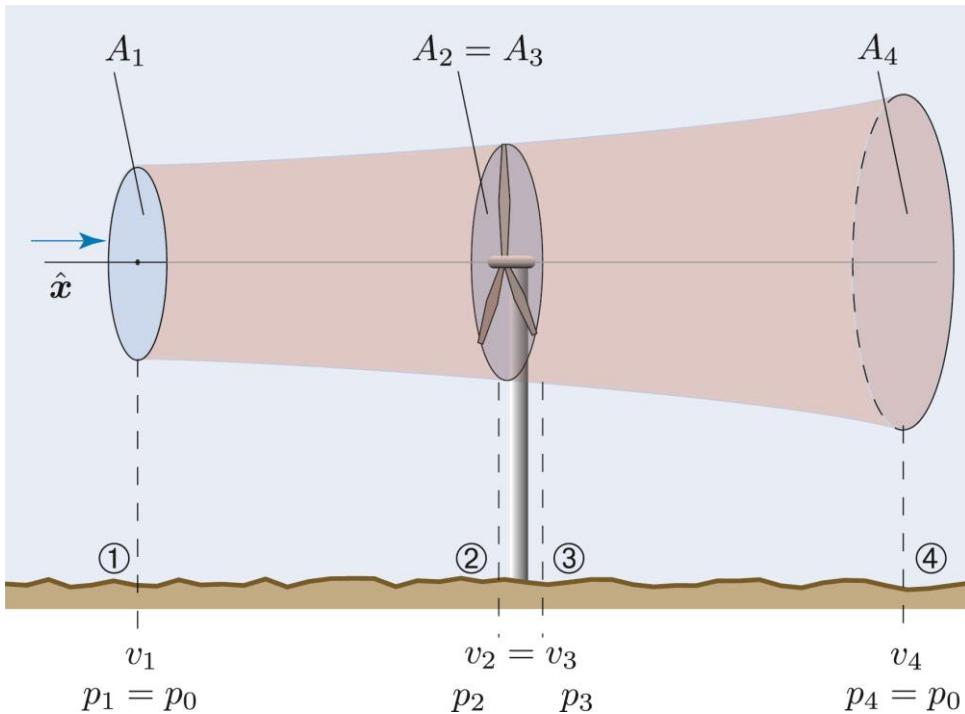
Equation de Bernoulli entre ③ et ④ : $p_0 + \frac{1}{2} \rho_0 v_4^2 = p_3 + \frac{1}{2} \rho_0 v_2^2$ (4)

$$\rightarrow p_2 - p_3 = \frac{1}{2} \rho_0 (v_1^2 - v_4^2) \quad (5)$$

Flux d'énergie (puissance) : $\mathcal{P} = \frac{1}{2} \rho_0 (v_1^2 - v_4^2)(A v)$ (6)

L'énergie éolienne

Etude théorique : limite de Betz (2)



On calcule d'une autre manière la puissance capturée par le disque à partir de l'impulsion prise au courant d'air. Dans un temps dt , l'impulsion entrante en ① est : $\rho_0 v_1 (A_1 v_1 dt) = \rho_0 v_1 (Av dt)$ (7a)
l'impulsion sortante en ④ est : $\rho_0 v_4 (A_4 v_4 dt) = \rho_0 v_4 (Av dt)$ (7b)

$$\text{Rappel : } \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m \dot{x}^2 \right) = m \dot{x} \ddot{x} = \frac{d}{dt} (m \dot{x}) \dot{x} \quad (8)$$

→ puissance capturée : différence d'impulsion par unité de temps entre les points ① et ④ multipliée par la vitesse v_2 à la turbine :

$$\mathcal{P} = \rho_0 (v_1 - v_4) (Av) v_2 \quad (9)$$

$$(6) = (9) \rightarrow v_2 = \frac{1}{2} (v_1 + v_4) \quad (10)$$

$$\text{On définit le \b{facteur d'induction axial} (chute de vitesse sur le disque) : } a \equiv \frac{v_1 - v_2}{v_1} \quad (11)$$

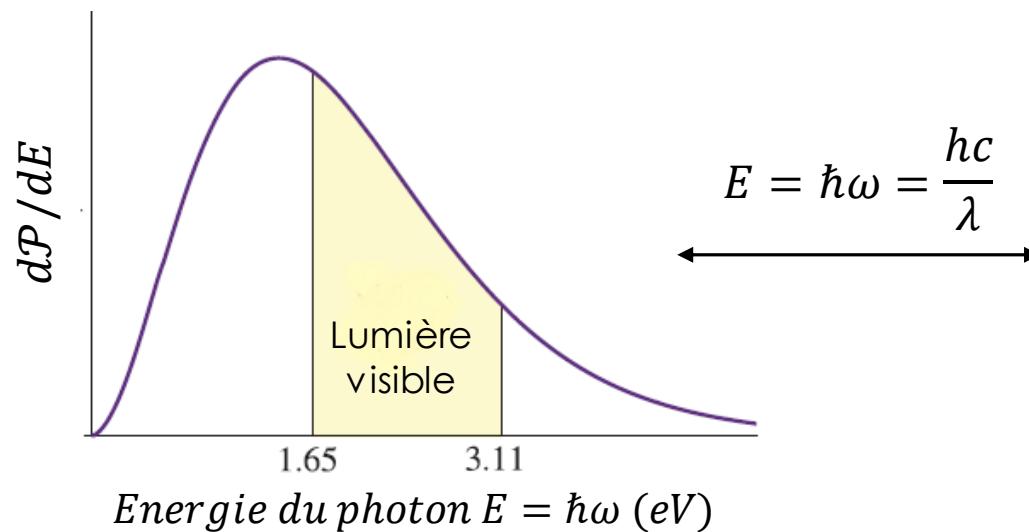
Et on réexprime toutes les quantités en fonction de $a, v_1, A_2 = A_D$ (aire du disque) :

$$v_2 = (1 - a)v_1 \quad \rightarrow \quad \mathcal{P} = \frac{1}{2} \rho_0 v_1^3 A_D 4a(1 - a)^2 \quad (12)$$

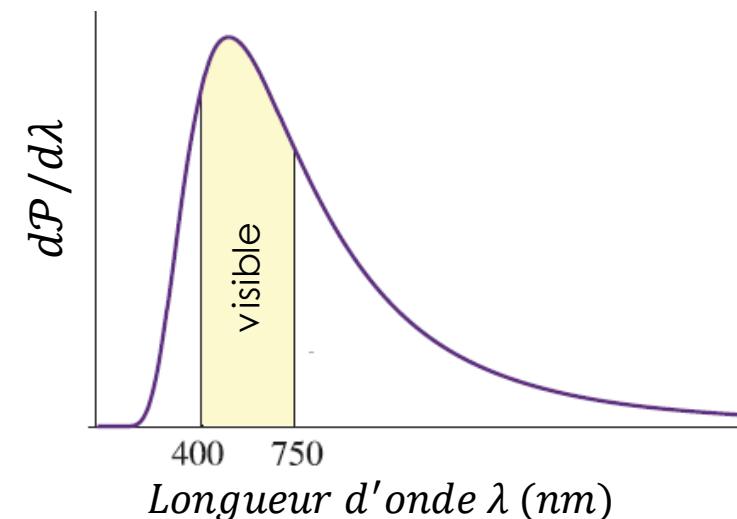
Radiation thermique

Tout objet à la température T rayonne de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. La puissance par unité de surface de l'énergie rayonnée est répartie entre des photons de fréquence ω selon la loi du rayonnement de Planck (formule démontrée en Physique statistique) :

$$d\mathcal{P} = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \varepsilon(\omega) \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1} dA d\omega, \quad \text{où } \varepsilon(\omega) \text{ caractérise l'émissivité de l'objet.}$$



$$E = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$$



Si ε est constant, **la puissance totale** est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann : $\mathcal{P} = \sigma \varepsilon A T^4$
où σ est la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2} = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$

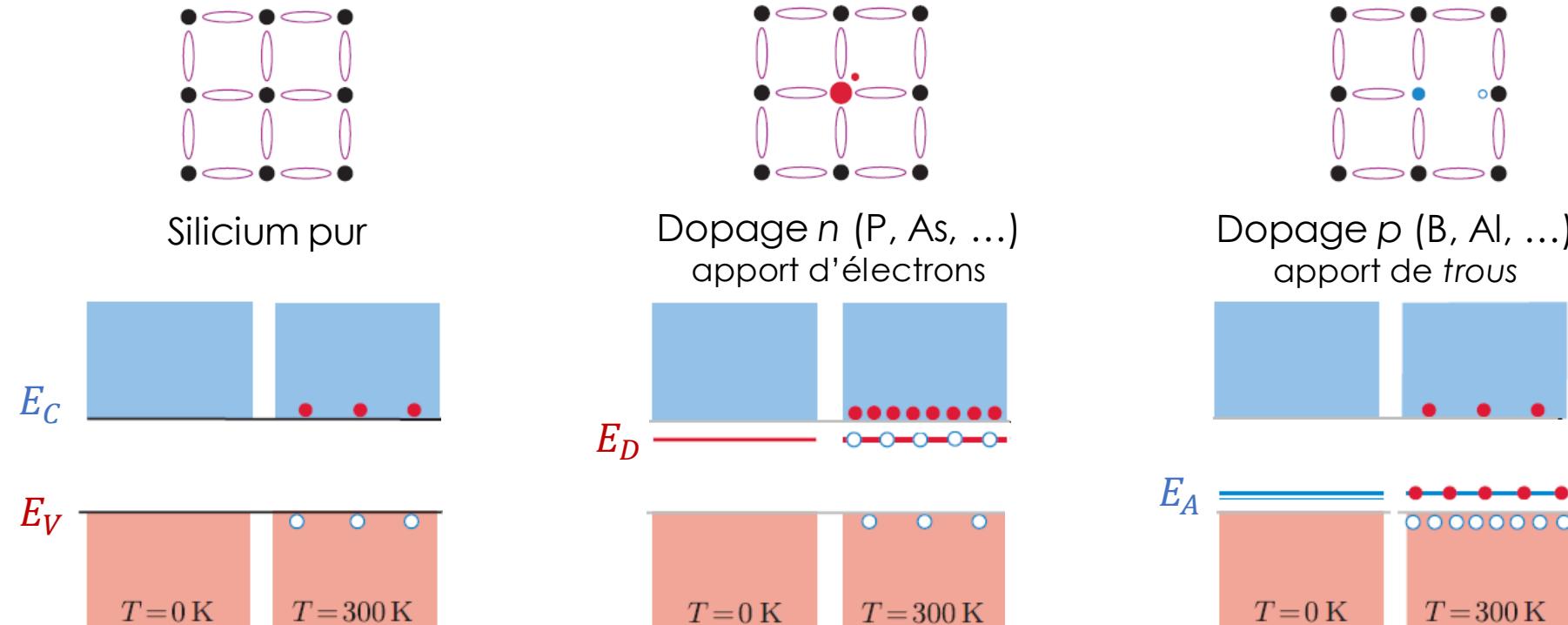
L'énergie solaire photovoltaïque

Mouvement des charges. Notion de dopage

Pour utiliser les électrons excités, il faut que les électrons se déplacent dans une direction privilégiée (si on prend simplement un bloc de silicium, connecté à un circuit et qu'on l'expose à la lumière solaire, il ne se passera rien d'intéressant car les électrons se déplaceront en moyenne autant dans une direction que dans une autre). Cette dissymétrie est réalisée en effectuant un **dopage** de différentes parties du matériau avec des impuretés : cette modification inhomogène du matériau incite les électrons à se déplacer préférentiellement dans une direction (et les trous dans l'autre direction).

L'énergie solaire photovoltaïque

Notion de dopage et de jonction p - n

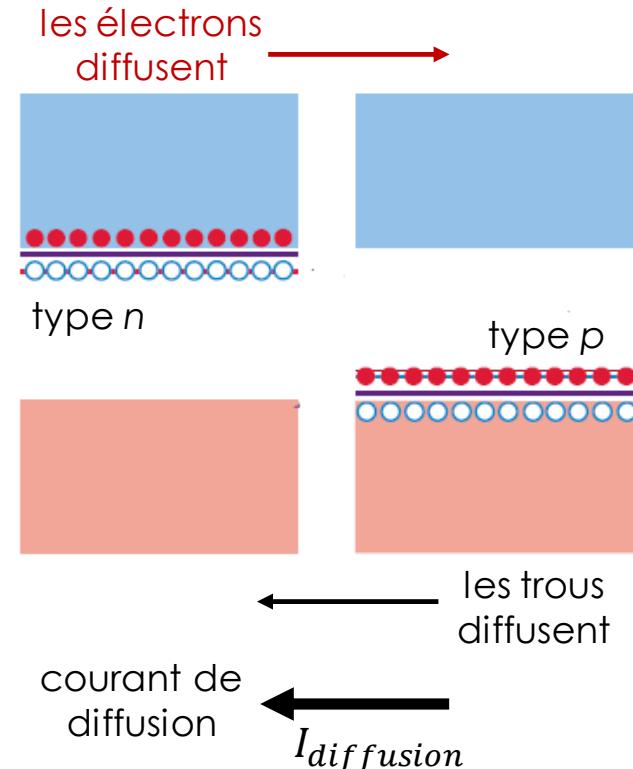


Le dopage crée des défauts dans la structure cristalline de départ qui se traduisent par la présence de nouveaux niveaux électroniques (dans le gap),

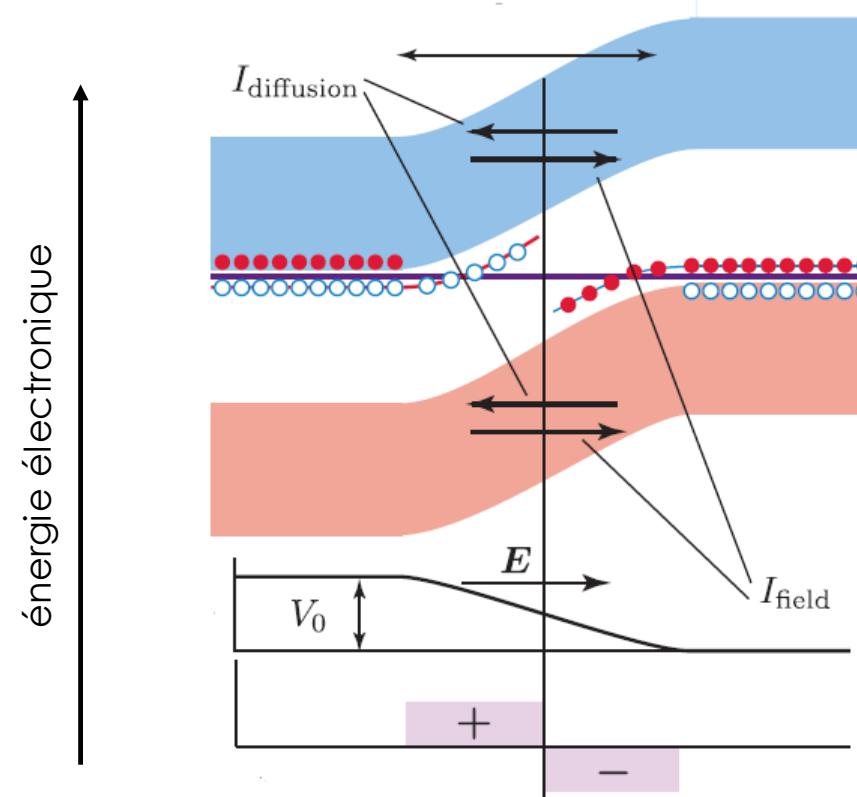
- Le dopage n (substitution par des impuretés avec des électrons de valence 5) produit un niveau de donneurs. A $T = 300 \text{ K}$, une partie des donneurs est excitée dans la bande de conduction.
- Le dopage p (substitution par des impuretés avec des électrons de valence 3) produit un niveau accepteur. A $T = 300 \text{ K}$, une partie des électrons de la bande de valence occupent le nouvel état accepteur (des trous se créent dans la bande de valence).

L'énergie solaire photovoltaïque

Notion de dopage et de jonction p - n



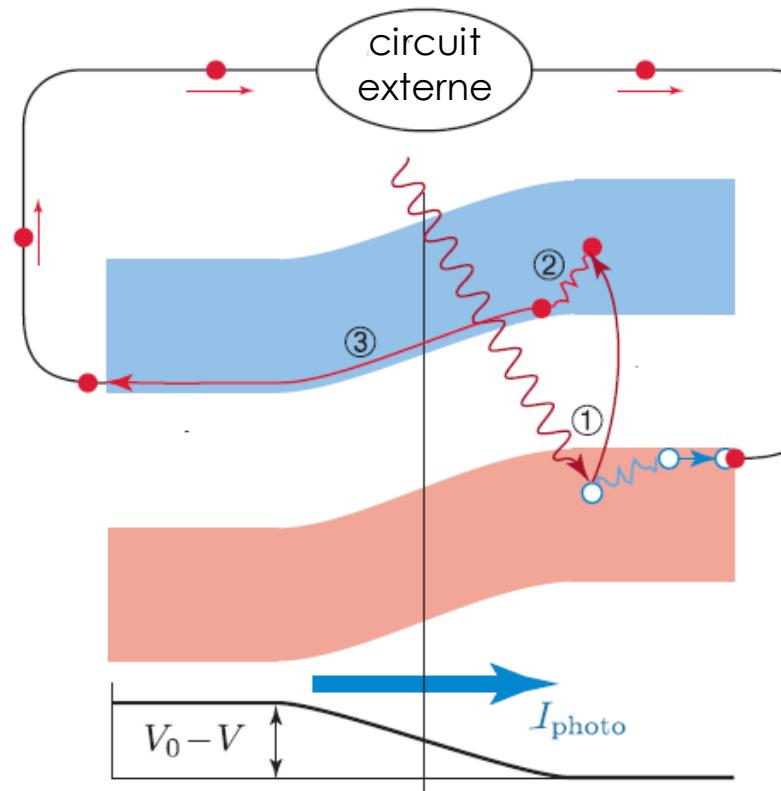
Lorsqu'elles sont mises en contact, les électrons mobiles diffusent des régions n à p (et les trous de p à n), créant un courant de diffusion $I_{diffusion}$ dans la direction de la région de type n .



Les électrons diffusés depuis la région n remplissent les trous dans la région p près de la jonction, laissant des densités de charge fixes qui créent un champ électrique et une différence de potentiel V_0 à travers la jonction. V_0 entraîne un courant de champ I_{field} dans la région de type p . Le système atteint un équilibre dynamique lorsque les deux courants s'équilibrivent.

L'énergie solaire photovoltaïque

Jonction $p - n$ et connexion au circuit



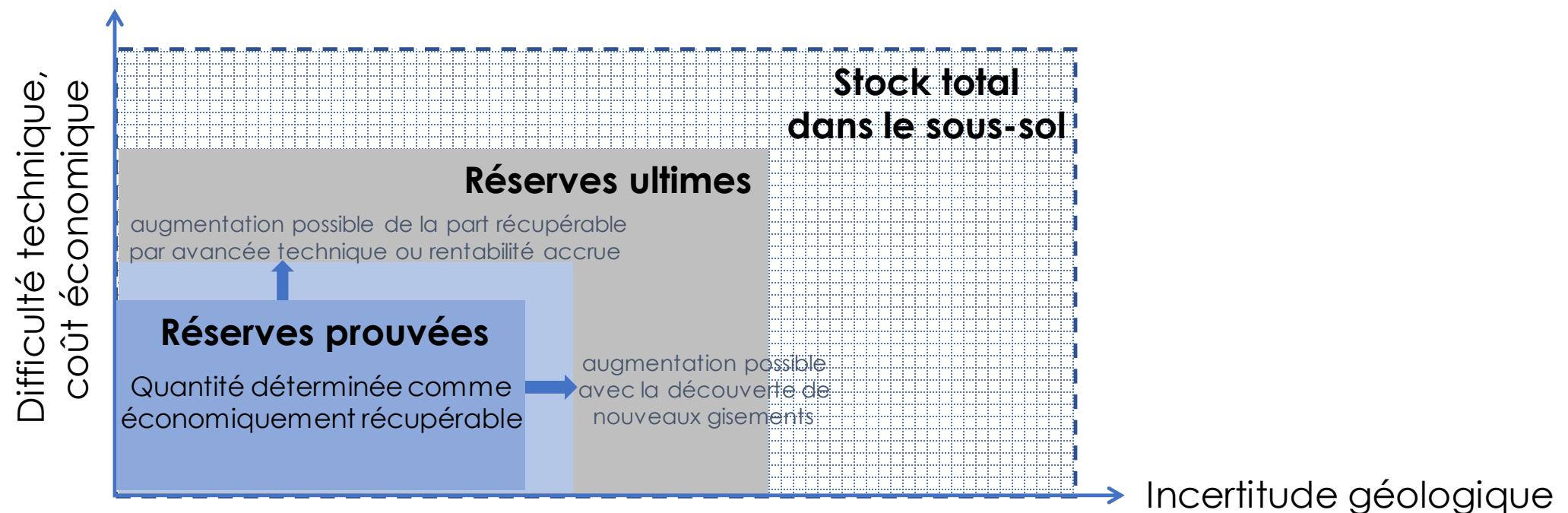
Un photon entrant (①) excite un électron vers la bande de conduction, laissant derrière lui un trou. Lorsque cela se produit dans la région dopée p , après avoir perdu l'énergie excédentaire par thermalisation (②), l'électron est poussé à travers la jonction (③) par la différence de potentiel $V_0 - V$ et quitte la jonction à gauche. Le trou produit par l'excitation de l'électron quitte la jonction à droite. Ces mouvements de charge contribuent au courant I_{photo} qui alimente un circuit connecté externe.

Ressources ou réserves

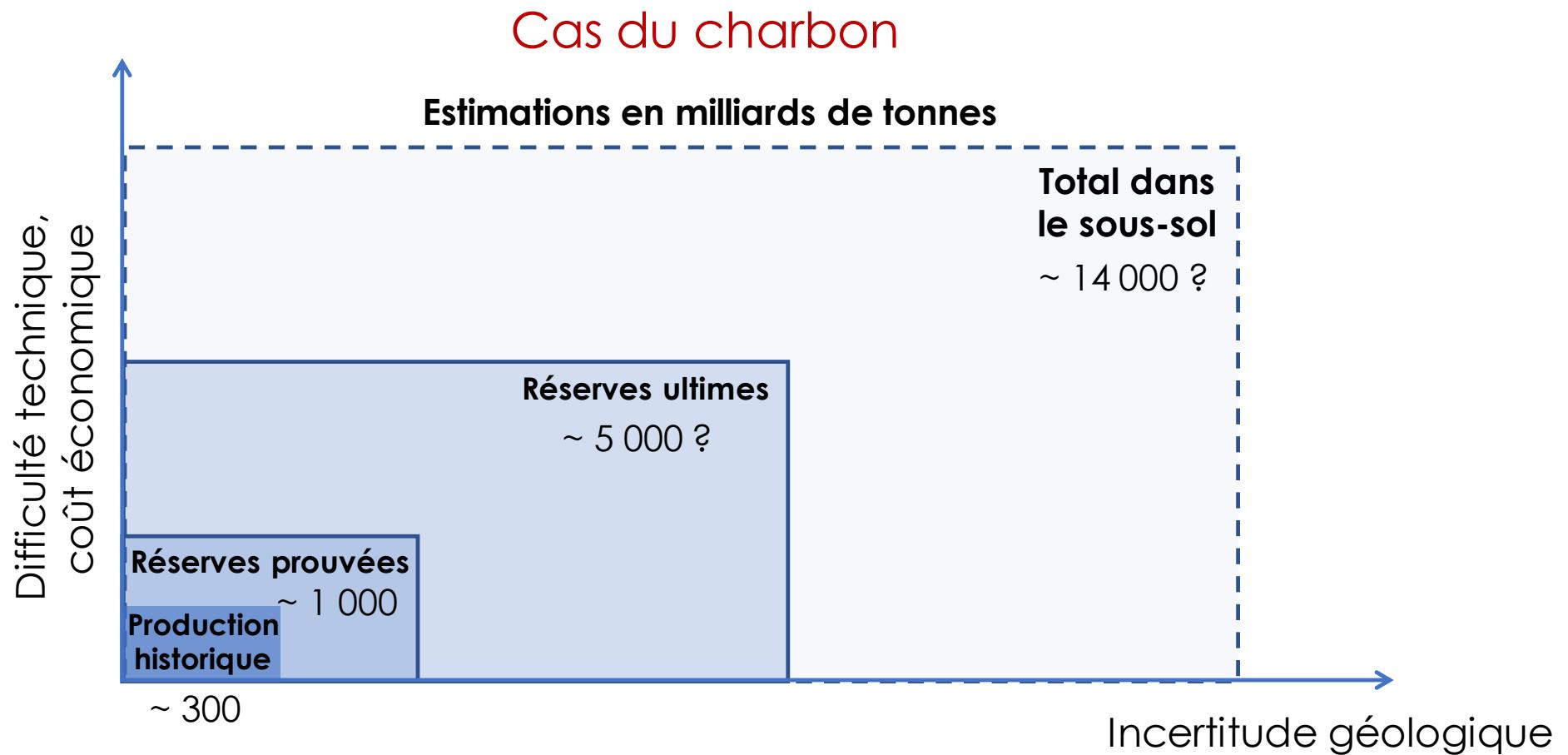
Lorsque l'on discute de la quantité d'une ressource minière, il faut distinguer trois notions essentielles :

- ce qui est présent dans le sous-sol,
- ce qui peut être extrait à l'avenir (avec une certitude raisonnable) : **réserves prouvées**
- ce qui pourrait probablement être extrait au total si cela était souhaité : **réserves ultimes** (resources)

De ces définitions découlent des valeurs très différentes, dont les estimations sont en général affectées d'importantes incertitudes (de différentes natures), et donc à prendre avec précaution.



Ressources ou réserves

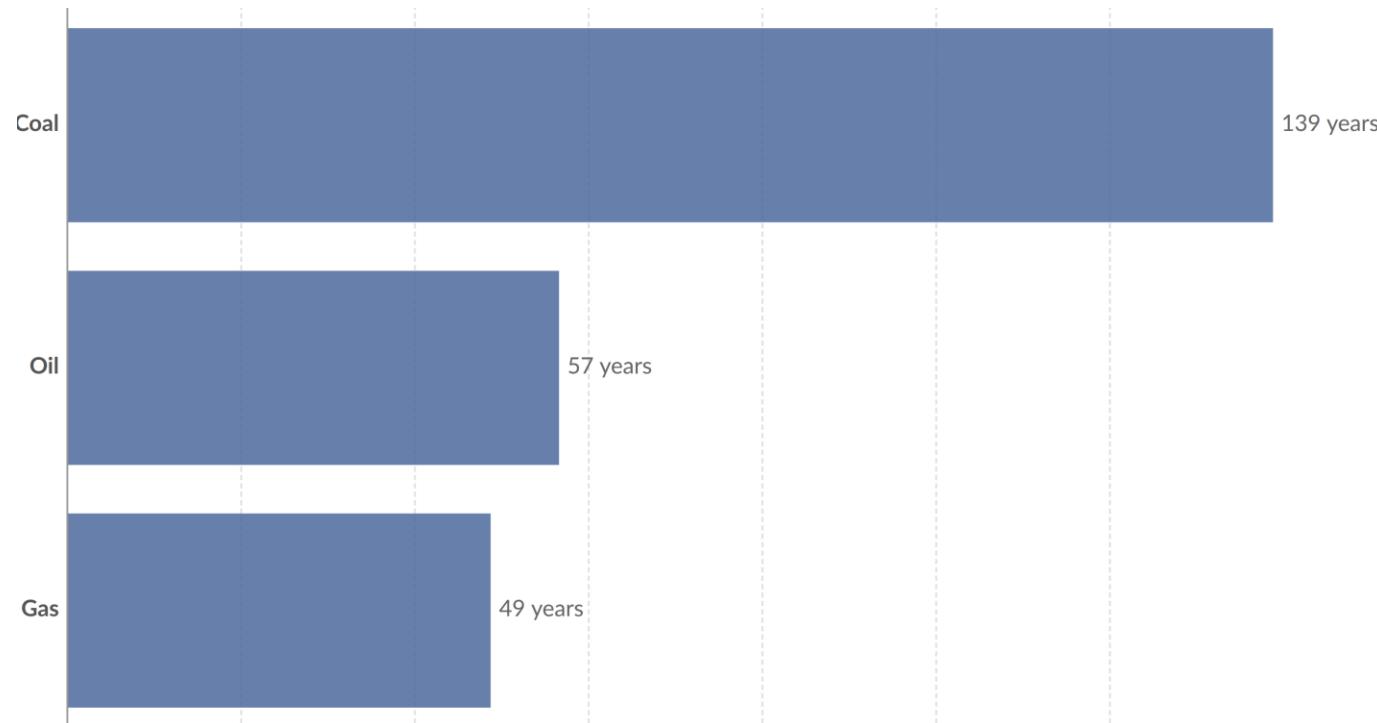


Réserves prouvées (2021) : ~ 1160 Gt ([source EIA](#))

Consommation annuelle actuelle : ~ 8,5 Gt / an

Années de réserves mondiales

Charbon, pétrole, gaz (2020)



Exprimées sous la forme du ratio réserves/produit (R/P), qui mesure le nombre d'années de production restantes sur la base des réserves connues et des niveaux de production annuels actuels. Il convient de noter que ces valeurs peuvent évoluer dans le temps en fonction de la découverte de nouvelles réserves, de l'évolution de la production annuelle et du rythme de consommation.

Ressources ou réserves

Trop de fossiles !

Agence internationale de l'Energie ([rapport net-zero by 2050, mai 2021](#)) :

[pour respecter l'objectif de limiter le réchauffement à 1,5°C]

A partir de 2021, aucun nouveau gisement de pétrole ou de gaz ne doit être développé ; aucune nouvelle mine de charbon ou extension de mine ne devrait être approuvée.

Le rythme du déclin de la demande en pétrole et en gaz dans les années 2030 pourrait signifier qu'un certain nombre de projets coûteux devront être mis à l'arrêt avant la fin de leur durée de vie technique.

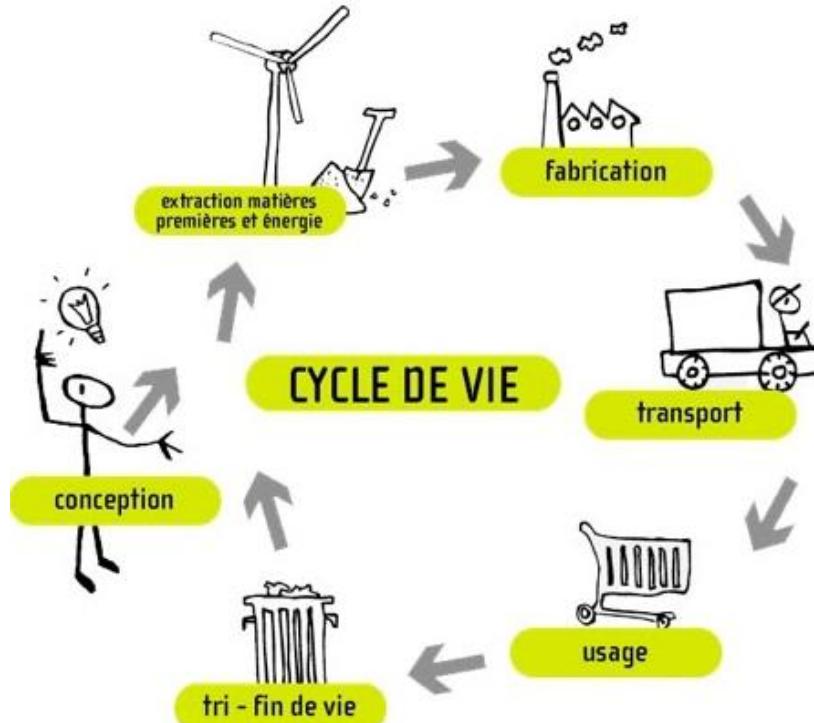
Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world. Nature (2021)

Here we use a global energy systems model to assess the amount of fossil fuels that would need to be left in the ground, regionally and globally, to allow for a 50 per cent probability of limiting warming to 1.5 °C. By 2050, we find that **nearly 60 % of oil and fossil methane gas, and 90 % of coal must remain unextracted** to keep within a 1.5 °C carbon budget. Furthermore, we estimate that oil and gas production must decline globally by 3 % each year until 2050. This implies that most regions must reach peak production now or during the next decade, rendering many operational and planned fossil fuel projects unviable.

Analyse du cycle de vie (ACV)

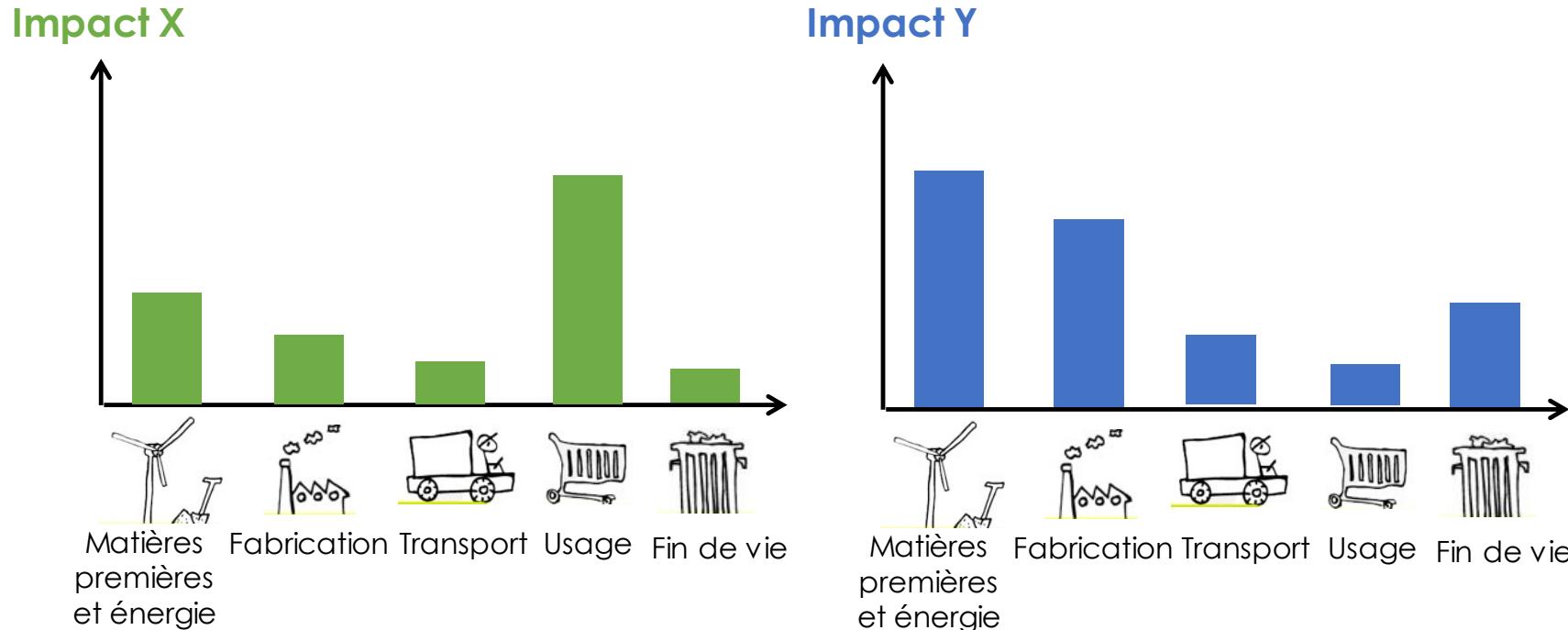
Principe

Méthode d'évaluation **normalisée** permettant de réaliser un bilan environnemental **multicritère** et **multi-étape** d'un système (produit, service, entreprise ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie.



Analyse du cycle de vie (ACV)

Analyse multi-étape et multicritère



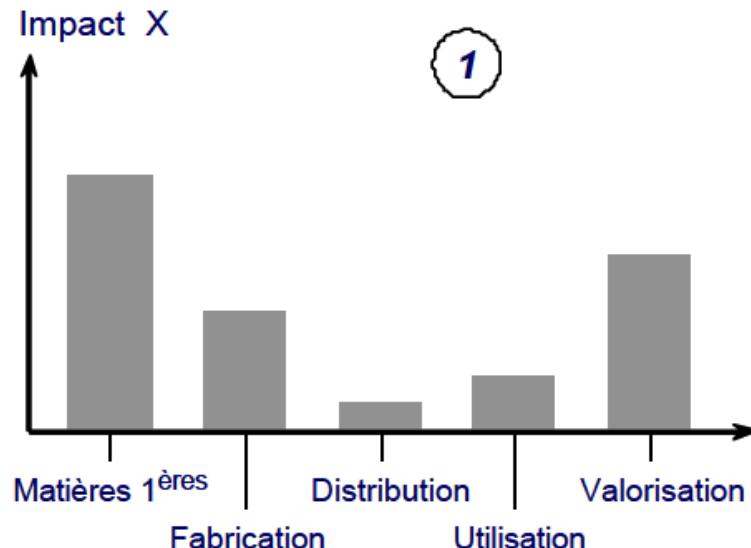
Catégorie d'impacts : ressources, changement climatique, santé humaine, qualité des écosystèmes.

Remarque : Le bilan carbone est l'un des critères d'une ACV plus complète.

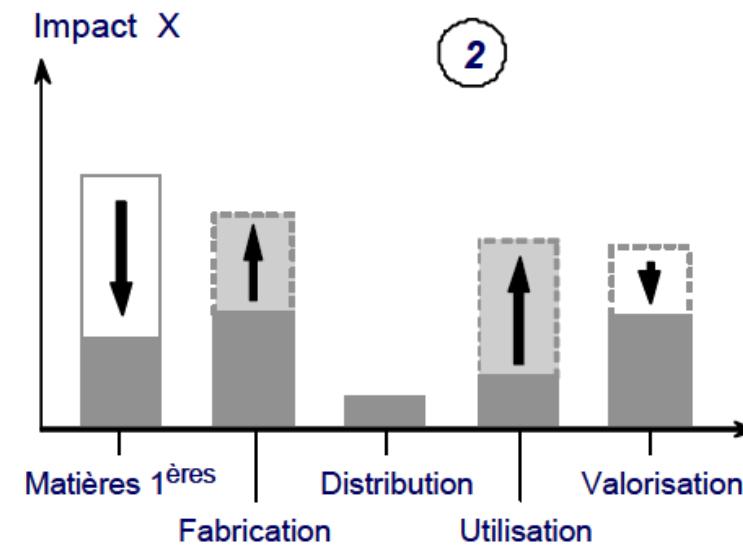
Analyse du cycle de vie (ACV)

A quoi sert une ACV ?

- I) Comparer du point de vue environnemental deux systèmes ayant la même fonction, à service rendu égal. Ex. : Voiture à moteur thermique versus voiture électrique.
- II) Identifier des pistes d'écoconception ou d'amélioration du bilan environnemental du système en quantifiant les contributions aux impacts **par étape de cycle de vie** (ou par sous-système : composants, matériaux utilisés, procédés).



Dans cet exemple, l'analyse de l'existant (1) montre que l'impact X est généré majoritairement au niveau des matières premières.



L'une des solutions envisagées (2) réduirait cet impact au niveau des matières premières mais l'aggraverait à d'autres étapes : cette solution constituerait un transfert de pollution.

Analyse du cycle de vie (ACV)

A quoi sert une ACV ?



VE : zéro émissions ?



Émissions ailleurs ...

Eviter les déplacements de problèmes environnementaux :

- ✓ D'une étape du cycle de vie à une autre
- ✓ D'un impact (ex : CO₂) à un autre (minéraux)
- ✓ D'un milieu à un autre
- ✓ D'une région géographique à une autre
- ✓ D'une génération à l'autre