

2. Énergie et durée : puissance



Roland Lehoucq
CEA Paris – Saclay
roland.lehoucq@cea.fr

Retour sur l'énergie

L'énergie est l'unité de compte des transformations de la matière (pour la matière produite ou pour l'énergie récupérée).

1. C'est une quantité **scalaire**, *i.e.* quantifiée par un nombre & son unité
Joule, tep, calorie, ...

Multiples courants méga- (10^6), giga- (10^9), téra- (10^{12}).

2. C'est une quantité **extensive**.

Elle est proportionnelle à la taille du système.

3. C'est une quantité **conservée**.

Équation du tiroir-caisse : « ce que j'ai, c'est ce que j'avais + gains - pertes ».

On ne peut donc ni « produire » ni « détruire » de l'énergie !

4. Au cours d'une transformation l'énergie subit une « **dégradation** ».

Une partie de l'énergie initiale est « perdue », transformée en chaleur.

Efficacité énergétique = E_{out}/E_{in} .

Énergie primaire, énergie utile, énergie finale.

Puissance : énergie et temps

Définition : la puissance, c'est le débit d'énergie.

$$\mathcal{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Variation d'énergie
Durée de la variation

Unité de la puissance : le watt (symbole W) ; 1 W = 1 J/s.

On peut réécrire la définition de la puissance : $\Delta E = \mathcal{P} \Delta t$

Cela permet de définir une nouvelle unité d'énergie : le watt-heure ; 1 Wh = 3 600 J.

Au quotidien l'énergie s'exprime souvent en kilowatt-heure, noté kWh.

C'est l'énergie consommée par le fonctionnement d'un appareil nécessitant une puissance de 1 000 watts pendant une heure (3 600 s).

1 kWh = 3,6 MJ ; 1 MJ = 0,28 kWh ; 1 tep \approx 42 GJ \approx 11 660 kWh.

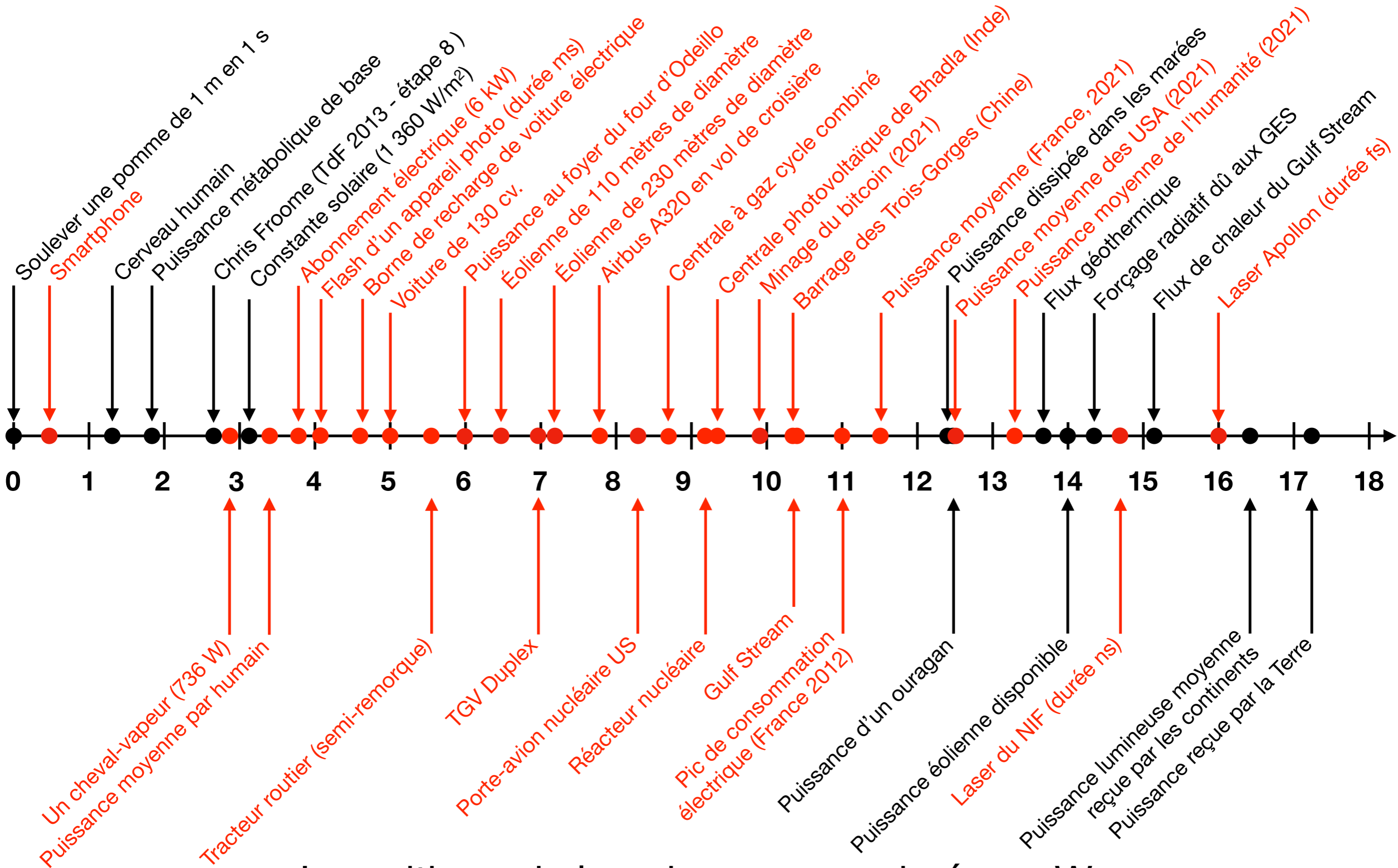
1 Français \approx 45 000 kWh par an (énergie primaire, bilan énergétique 2012).

1 bon repas \approx 1 kWh ; 1 litre d'essence \approx 9 kWh.

Stock et débit : une notion générale

Stock	Débit
Énergie (J)	Puissance (J/s = W)
Position (m)	Vitesse (m/s)
Vitesse (m/s)	Accélération (m/s ²)
Charge électrique (C)	Intensité électrique (A = C/s)
Quantité de mouvement (kg.m/s)	Force (N = kg.m/s ²)
Volume (m ³)	Débit (m ³ /s)
Dette (€)	Déficit (€/an)
Patrimoine (€)	Revenu net (€/mois)
Taille du fichier (Mo)	Taux de transfert (Mo/s)

Puissance : ordres de grandeur



Logarithme de la puissance exprimée en W.

Calculons un peu - 1

1. Un humain adulte a besoin d'avaler 2 000 kcal par jour.

Cela correspond à 8,36 millions de J (1 cal = 4,18 J) en 86 400 secondes (= 24 x 3 600)

La puissance nécessaire au métabolisme de base d'un humain adulte est donc de l'ordre de $8\,360\,000/86\,400 \approx 100$ W.

2. Un haltérophile soulève une charge de 265 kg sur une hauteur de 1 m en 1 s.

Il développe une puissance de $(265 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 1 \text{ m})/1 \text{ s} \approx 2\,600$ W !

3. Puissance produite par Chris Froome (étape 8 du tour de France 2013).

Arrivée à Ax 3 Domaines : 7,85 km en 21 min 40 s, entre 712 mètres et 1 362 mètres d'altitude.

Puissance nécessaire pour vaincre les frottements de l'air	= 45 watts
Puissance nécessaire pour vaincre les frottements sur le sol	= 18 watts
Puissance nécessaire pour vaincre la gravité	= 373 watts
Puissance totale, compte tenu de l'efficacité du vélo (97%)	= 447 watts

4. Potentiel hydraulique des Alpes françaises

Surface 21% de 190 959 km², altitude moyenne $\approx 1\,120$ mètres, pluviométrie 1 500 mm/an

Cela fait une puissance potentielle de 21 GW.

Puissance hydroélectrique installée Rhône-Alpes + PACA = 10,54 + 3,22 = 13,76 GW

Griller un toast en pédalant ?

**HOW MUCH ENERGY DOES IT TAKE
TO TOAST A SLICE OF BREAD?**

Calculons un peu - 2

Quelle est la différence entre faire un plein d'essence et recharger une voiture électrique ?

1. Faire le plein de SP95 = 60 litres en 2 minutes.

Cela correspond à 2,16 GJ (1 litre SP95 = 36 MJ) en 120 secondes (= 2 x 60).

La puissance associée est donc de $2,16 \cdot 10^9 / 120 \approx 18$ MW.

2. Charger un véhicule électrique dont les batteries ont une capacité de 20 kWh.

La capacité de la batterie correspond à 72 MJ (1 kWh = 3,6 MJ) soit l'équivalent de 2 L de SP95.

Avec une puissance de charge de 3 kW (prise secteur) cela prend $20 \text{ kWh} / 3 \text{ kW} = 6\text{h}40\text{m}$.

Avec une puissance de charge de 40 kW (borne) cela prend $20 \text{ kWh} / 40 \text{ kW} = 0\text{h}30\text{m}$.

Cet ordre de grandeur permet de comprendre pourquoi il est plus long de charger une batterie que de faire un plein d'essence : une batterie ne peut pas supporter la puissance associée au plein d'essence (sauf s'il s'agit des futurs supercondensateurs).

Le facteur de charge

Production totale (2022) = 445,2 TWh

Puissance installée = 144,2 GW



279,0 TWh

63 %

Nucléaire



49,6 TWh

11 %

Hydraulique



49,2 TWh

11 %

Thermique fossile



38,1 TWh

9 %

Éolien



18,6 TWh

4 %

Solaire



10,6 TWh

2 %

Thermique
renouvelable
et déchets

Répartition de la production par filière

Puissance installée = puissance maximale que peut fournir l'installation.

61,4 GW

25,9 GW

17,7 GW

21,2 GW

15,7 GW

2,3 GW

Puissance moyenne (GW) = E produite en un an (GWh)/8 760 h

31,8 GW

5,7 GW

5,6 GW

4,3 GW

2,1 GW

1,2 GW

Facteur de charge = $P_{\text{moy}}/P_{\text{installée}}$

51,9 %

21,9 %

31,7 %

20,5 %

13,5 %

52,6 %

Puissance : comparaisons

Pour fournir une puissance électrique *moyenne* de 1 GW, capable d'alimenter 1 000 000 foyers en électricité, il faut :

1 200 tonnes d'eau tombant chaque seconde de 100 m de hauteur.

Efficacité énergétique $\approx 85\%$

1 000 éoliennes de 5 MW.

Efficacité énergétique et intermittence $\approx 20\%$

80 km² de panneaux solaires

Flux solaire moyen 120 W/m² (intermittence : météo et jour-nuit) ; efficacité énergétique $\approx 10\%$

200 tonnes de fioul ou 375 tonnes de charbon chaque heure.

Efficacité énergétique $\approx 40\%$

27 tonnes d'uranium enrichi à 2% chaque année.

Efficacité énergétique $\approx 33\%$

De l'importance du temps - 1

Durée caractéristique d'un phénomène : stock/débit

Exemple 1 : Pour remplir une baignoire, il faut fournir un volume V d'eau (m^3).
La durée du remplissage est fixée par le débit D du robinet (m^3/s) : $\Delta t = V/D$.

Quotient entre énergie (stock) et puissance (débit) : $\Delta t = \frac{\Delta E}{\mathcal{P}}$

Exemple 2 : Pour qu'un humain de masse m (kg) monte une côte de dénivelé h (m) il doit fournir une énergie E (Joule) égale au produit $m \times g \times h$ ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).
La durée de la montée est fixée par la puissance fournie (J/s, i.e. W) : marche ou vélo ?

Exemple 3 : Énergie et puissance de l'effort physique

Métabolisme anaérobie alactique (< 30 s) : sprint, lancers, sauts

Métabolisme anaérobie lactique (< 3 min) : course 400 m, natation 200 m, sports de combat

Métabolisme aérobie (> 3 min) : sports d'endurance, marathon, cyclisme, triathlon

De l'importance du temps - 2

Quand il y a des pertes (il y en a toujours !), il faut comparer

- la durée typique de dépôt de l'énergie
- la durée typique des pertes d'énergie (transfert)

Comment faire bouillir de l'eau ? Comment maintenir l'ébullition ?

Pour faire bouillir, il faut transférer de l'énergie à l'eau plus vite qu'elle ne la transfère à l'environnement, par convection, rayonnement ou évaporation : grande puissance.

Puis, l'ébullition est maintenue en ajustant la puissance aux pertes.

Quelle est la différence entre la rouille et une explosion ?

Ce sont des réactions d'oxydoréduction, dont les durées sont différentes !

Rouille : du mois à l'année.

Explosion : quelques millièmes de secondes.

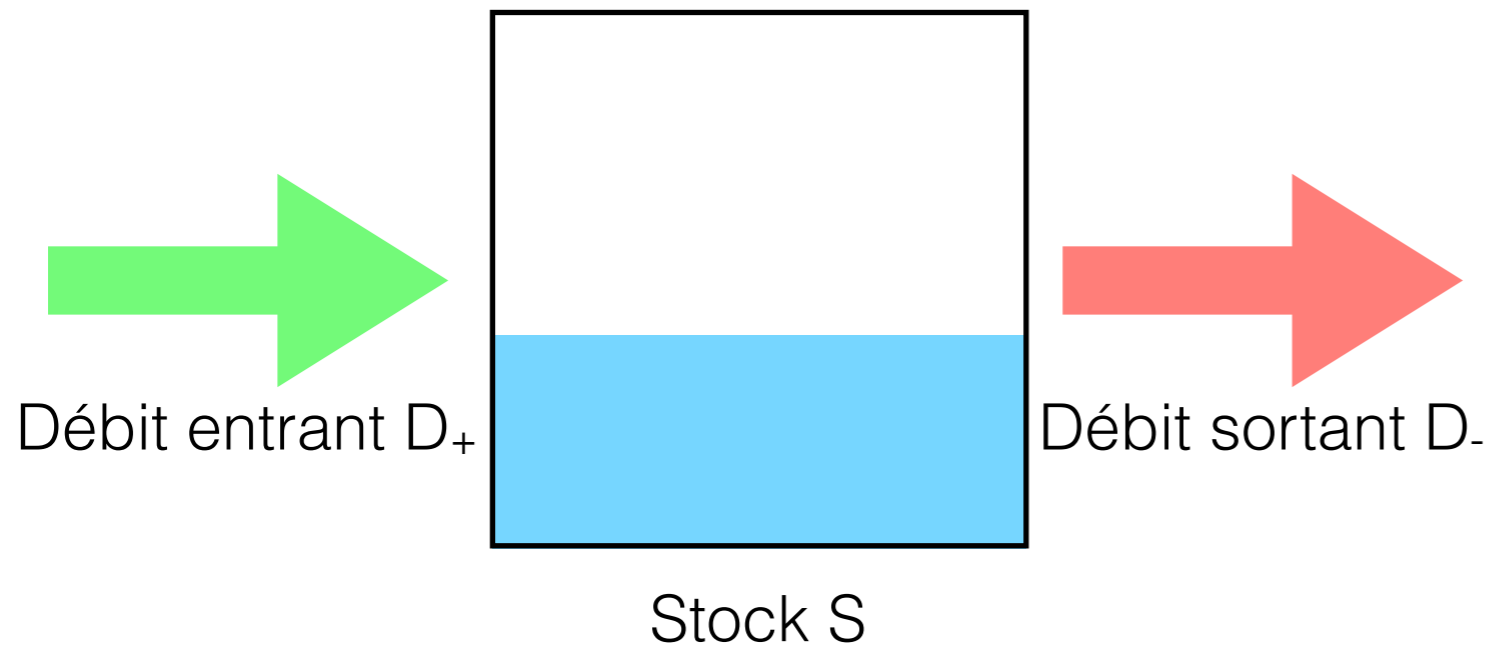
Comment gérer un appel de puissance dans le réseau électrique ?

Il faut des sources capables de réagir en quelques secondes (turbines à gaz ou l'hydroélectricité).

La constante de temps d'une centrale nucléaire est plus grande, de l'ordre de la minute.

Éolien et solaire sont intermittents (énergie de flux à utiliser immédiatement, énergie dite fatale).

Retour sur l'équation du tiroir-caisse



$$\Delta S = \text{stock final} - \text{stock initial}$$

Variation ΔS du stock durant Δt

$$\Delta S = D_+ \Delta t - D_- \Delta t$$

Si $D_+ > D_-$: le stock augmente

Si $D_+ < D_-$: le stock diminue

Si $D_+ = D_-$: le stock est stationnaire

Deux échelles de durée : S/D_+ et S/D_- .

Stock S	Débit entrant	Débit sortant
Compte bancaire	Salaire	Dépenses
Capital emprunté	Intérêts	Mensualité
Réserves fossiles	—	Extraction
Réserves minerais	Recyclage	Extraction
CO ₂ atmosphérique	Sources	Puits
Chaleur terrestre	Flux solaire	Rayonnement

Les avatars de l'énergie

Énergie de stock : la quantité de matière que l'on peut transformer est finie.

C'est le cas des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) et nucléaire (uranium).

Énergie de flux : le débit d'énergie disponible (la puissance) est imposé par la nature.

C'est le cas de des énergies solaire, éolienne, hydraulique, marine, de la biomasse et de la géothermie.

	Source	
	Stock	Flux
Énergie	Fini	Illimité ²
Puissance	Illimité ¹	Contraint

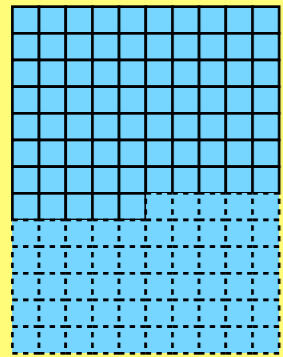
¹ À concurrence du stock restant...

² Le Soleil a une durée de vie finie...

Énergies de stock et de flux

Flux

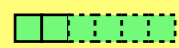
Stock



Vents 75-130 TW



OTEC 3-11 TW



Biomasse 2-6 TW



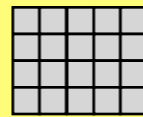
Hydraulique 3-4 TW



Géothermie 0,2-3 TW



Vagues 0,3 TW



Puissance mondiale = 20 TW
préfixe T = téra = 10^{12}

□ 1 TW = 1 TW.an/an

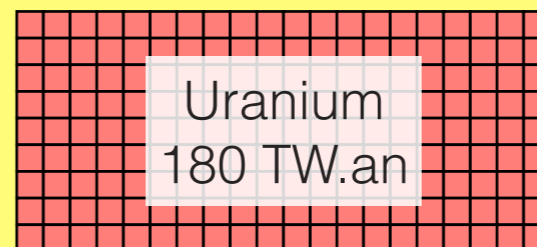
Puissance moyenne reçue
du Soleil 23 000 TW
(3 fois la surface de la page)



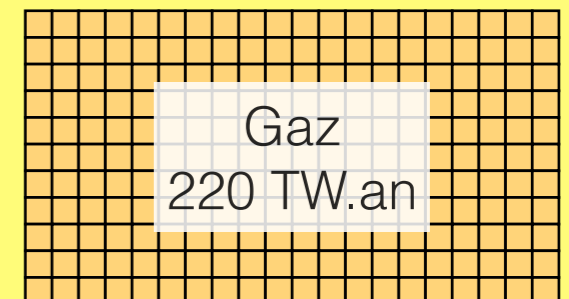
Charbon
840 TW.an



Pétrole
340 TW.an



Uranium
180 TW.an



Gaz
220 TW.an

