Conférence - cours - participative du 8 septembre 2022

Physique et ordres de grandeur en énergie

Emmanuel Plaut

1. Approche du scientifique... physicien...

   Quatre qualités primordiales :

2. Qu'est-ce que l'énergie ?

Conférence - cours - participative du 8 septembre 2022

Physique et ordres de grandeur en énergie

Emmanuel Plaut

1. Approche du scientifique... physicien...

Quatre qualités primordiales :

- savoir de quoi on parle
- savoir observer et faire des expériences
- être capable de développer des modèles... en langue mathématique
- connaître les ordres de grandeur

2. Qu'est-ce que l'énergie ?

Conférence - cours - participative du 8 septembre 2022

Physique et ordres de grandeur en énergie

Emmanuel Plaut

1. Approche du scientifique... physicien...

   Quatre qualités primordiales :

   - savoir de quoi on parle
   - savoir observer et faire des expériences
   - être capable de développer des modèles... en langue mathématique
   - connaître les ordres de grandeur

2. Qu'est-ce que l'énergie ?

   Quantité scalaire dont la variation traduit un changement d'état dans un système.

Conférence - cours - participative du 8 septembre 2022

Physique et ordres de grandeur en énergie

Emmanuel Plaut

1. Approche du scientifique... physicien...

   Quatre qualités primordiales :

   - savoir de quoi on parle
   - savoir observer et faire des expériences
   - être capable de développer des modèles... en langue mathématique
   - connaître les ordres de grandeur

2. Qu'est-ce que l'énergie ?

   Quantité scalaire dont la variation traduit un changement d'état dans un système.

$$E = ? \quad \text{ou} \quad dE = ? \quad \text{ou} \quad \frac{dE}{dt} = ?$$

   Multiples formules possibles, qui révèlent chacune certains aspects de l'énergie...

Énergie cinétique

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$m = \qquad , \quad v = \qquad \Longrightarrow \quad E_c =$$

Énergie cinétique

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

$$m = 80 \text{ kg} \ , \quad v = \qquad \Longrightarrow \quad E_c =$$

Énergie cinétique

$$E_c \;=\; \frac{1}{2} m v^2$$

$$m = 80 \text{ kg} \;, \quad v = 20 \text{ km/h} \quad \Longrightarrow \quad E_c \;=$$

Énergie cinétique

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$m = 80 \text{ kg} , \quad v = 20 \text{ km/h} \quad \Longrightarrow \quad E_c = 1200 \text{ J}$$

Lien énergie - puissance

$$\frac{dE_c}{dt} = P = \overline{\mathbf{F}} \cdot \overline{\mathbf{v}} \iff dE_c = Pdt = \overline{\mathbf{F}} \cdot d\overline{\mathbf{x}} \ \textbf{travail}\ \delta W$$

Lien entre le joule et le watt :

Puissance développée par un vrai sportif :

Lien énergie - puissance

$$\frac{dE_c}{dt} = P = \overline{\mathbf{F}} \cdot \overline{\mathbf{v}} \quad \Longleftrightarrow \quad dE_c = Pdt = \overline{\mathbf{F}} \cdot d\overline{\mathbf{x}} \ \ \textbf{travail } \delta W$$

Lien entre le joule et le watt :

$$E = P\,t \quad \Longrightarrow \quad 1\text{ J} = 1\text{ W s}$$

Puissance développée par un vrai sportif :

Lien **énergie - puissance**

$$\frac{dE_c}{dt} = P = \overline{\mathbf{F}} \cdot \overline{\mathbf{v}} \iff dE_c = Pdt = \overline{\mathbf{F}} \cdot d\overline{\mathbf{x}} \quad \textbf{travail } \delta W$$

Lien entre le joule et le watt :

$$E = P\, t \implies 1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{W\,s}$$

Puissance développée par un vrai sportif :

$$P = \frac{\delta E_c}{\delta t} = \frac{1200\ \mathrm{J}}{3\ \mathrm{s}}$$

Lien énergie - puissance

$$\frac{dE_c}{dt} = P = \overline{\mathbf{F}} \cdot \overline{\mathbf{v}} \iff dE_c = Pdt = \overline{\mathbf{F}} \cdot d\overline{\mathbf{x}} \quad \textbf{travail } \delta W$$

Lien entre le joule et le watt :

$$E = P\ t \implies 1\ \text{J} = 1\ \text{W s}$$

Puissance développée par un vrai sportif :

$$P = \frac{\delta E_c}{\delta t} = \frac{1200\ \text{J}}{3\ \text{s}} = 400\ \text{W}$$

Lien énergie - puissance

Autres unités d'énergie plus macroscopiques :

$$P\ t\ =\ E \quad \Longrightarrow \quad 1\ \text{kWh}\ = \qquad\qquad \Longrightarrow \quad 1\ \text{MWh}\ =$$

Lien énergie - puissance

Autres unités d'énergie plus macroscopiques :

$$P\,t = E \implies 1 \text{ kWh} = 3{,}6 \text{ MJ} \implies 1 \text{ MWh} = 3{,}6 \text{ GJ}$$

Lien énergie - puissance

Autres unités d'énergie plus macroscopiques :

$$P\ t = E \implies 1\ \text{kWh} = 3{,}6\ \text{MJ} \implies 1\ \text{MWh} = 3{,}6\ \text{GJ}$$

Prix du kWh eDF pour un particulier en « tarif bleu réglementé »

Lien énergie - puissance

Autres unités d'énergie plus macroscopiques :

$$P\ t = E \quad \Longrightarrow \quad 1\ \mathrm{kWh} = 3{,}6\ \mathrm{MJ} \quad \Longrightarrow \quad 1\ \mathrm{MWh} = 3{,}6\ \mathrm{GJ}$$

Prix du kWh eDF pour un particulier en « tarif bleu réglementé »

Année	c€/kWh	€/MWh
2005	10,57	
2007	10,85	
2009	11,25	
2011	12,09	
2014	13,72	
2016	14,62	
2018	14,83	
2020	15,97	
2022	17,40	

% d'augmentation en 17 ans !

Lien énergie - puissance

Autres unités d'énergie plus macroscopiques :

$$P\ t = E \quad \Longrightarrow \quad 1 \text{ kWh} = 3{,}6 \text{ MJ} \quad \Longrightarrow \quad 1 \text{ MWh} = 3{,}6 \text{ GJ}$$

Prix du kWh eDF pour un particulier en « tarif bleu réglementé »

Année	c€/kWh	€/MWh
2005	10,57	105,7
2007	10,85	108,5
2009	11,25	112,5
2011	12,09	120,9
2014	13,72	137,2
2016	14,62	146,2
2018	14,83	148,3
2020	15,97	159,7
2022	17,40	174,0

% d'augmentation en 17 ans !

Lien énergie - puissance

Autres unités d'énergie plus macroscopiques :

$$P\ t = E \implies 1\ \mathrm{kWh} = 3{,}6\ \mathrm{MJ} \implies 1\ \mathrm{MWh} = 3{,}6\ \mathrm{GJ}$$

Prix du kWh EDF pour un particulier en « tarif bleu réglementé »

Année	c€/kWh	€/MWh	
2005	10,57	105,7	
2007	10,85	108,5	
2009	11,25	112,5	
2011	12,09	120,9	
2014	13,72	137,2	
2016	14,62	146,2	
2018	14,83	148,3	
2020	15,97	159,7	
2022	17,40	174,0	64% d'augmentation en 17 ans !

Lien énergie - puissance

Autres unités d'énergie plus macroscopiques :

$$P\,t \;=\; E \quad\Longrightarrow\quad 1\ \text{kWh} \;=\; 3{,}6\ \text{MJ} \quad\Longrightarrow\quad 1\ \text{MWh} \;=\; 3{,}6\ \text{GJ}$$

Prix du kWh eDF pour un particulier en « tarif bleu réglementé »

Année	c€/kWh	€/MWh	
2005	10,57	105,7	
2007	10,85	108,5	
2009	11,25	112,5	
2011	12,09	120,9	
2014	13,72	137,2	
2016	14,62	146,2	
2018	14,83	148,3	
2020	15,97	159,7	
2022	17,40	174,0	64% d'augmentation en 17 ans !

Ainsi 1 J $\leftrightarrow$

Lien énergie - puissance

Autres unités d'énergie plus macroscopiques :

$$P\ t = E \implies 1\ \mathrm{kWh} = 3{,}6\ \mathrm{MJ} \implies 1\ \mathrm{MWh} = 3{,}6\ \mathrm{GJ}$$

Prix du kWh eDF pour un particulier en « tarif bleu réglementé »

Année	c€/kWh	€/MWh	
2005	10,57	105,7	
2007	10,85	108,5	
2009	11,25	112,5	
2011	12,09	120,9	
2014	13,72	137,2	
2016	14,62	146,2	
2018	14,83	148,3	
2020	15,97	159,7	
2022	17,40	174,0	64% d'augmentation en 17 ans !

Ainsi 1 J $\leftrightarrow$ 47 n€ pas cher :

situation d'abondance énergétique... très fragile !

Énergie cinétique dérivée :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mV^2\right) = \frac{1}{2}\dot{m}V^2$$

avec $\dot{m} =$

Énergie cinétique dérivée : énergie éolienne

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2} m V^2\right) = \frac{1}{2} \dot{m} V^2$$

avec $\dot{m} = \rho q$ débit massique

$q = VS$ débit volumique

$$\Longrightarrow \frac{P}{S} =$$

Énergie cinétique dérivée : énergie éolienne

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mV^2\right) = \frac{1}{2}\dot{m}V^2$$

avec $\dot{m} = \rho q$ débit massique

$q = VS$ débit volumique

$$\Longrightarrow \quad \frac{P}{S} = \frac{1}{2}\rho V^3$$

pour $\rho = 1{,}2$ kg/m^3 , $V = 12$ m/s.

Énergie cinétique dérivée : énergie éolienne

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mV^2\right) = \frac{1}{2}\dot{m}V^2$$

avec $\dot{m} = \rho q$ débit massique

$q = VS$ débit volumique

$$\Longrightarrow \quad \frac{P}{S} = \frac{1}{2}\rho V^3 \simeq 1\ \mathrm{kW/m^2}$$

pour $\rho = 1{,}2\ \mathrm{kg/m^3}$, $V = 12\ \mathrm{m/s}$.

Ex. : éolienne de la Route des Énergies Renouvelables, avec pales de 40 m :

$P \simeq$

Énergie cinétique dérivée : énergie éolienne

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mV^2\right) = \frac{1}{2}\dot{m}V^2$$

avec $\dot{m} = \rho q$ débit massique

$q = VS$ débit volumique

$$\Longrightarrow \frac{P}{S} = \frac{1}{2}\rho V^3 \simeq 1 \text{ kW/m}^2$$

pour $\rho = 1{,}2 \text{ kg/m}^3$, $V = 12$ m/s.

Ex. : éolienne de la Route des Énergies Renouvelables, avec pales de 40 m :

$$P \simeq 5 \text{ MW}$$

Énergie cinétique dérivée : énergie éolienne

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mV^2\right) = \frac{1}{2}\dot{m}V^2$$

avec $\dot{m} = \rho q$ débit massique

$q = VS$ débit volumique

$$\Longrightarrow \frac{P}{S} = \frac{1}{2}\rho V^3 \simeq 1 \text{ kW/m}^2$$

pour $\rho = 1{,}2 \text{ kg/m}^3$, $V = 12$ m/s.

Ex. : éolienne de la Route des Énergies Renouvelables, avec pales de 40 m :

$P \simeq 5$ MW trop optimiste, en réalité $P \simeq 2$ MW.

Énergie cinétique dérivée : énergie éolienne

L'odg de la densité surfacique d'**énergie du vent atmosphérique**

$$\frac{P}{S} \simeq 1 \text{ kW/m}^2$$

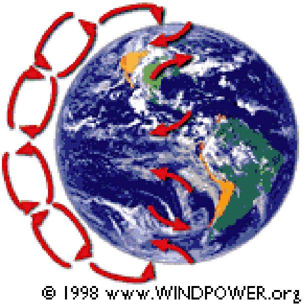
est aussi l'odg de la densité surfacique d'une autre **énergie renouvelable**...

Énergie cinétique dérivée : énergie éolienne

L'odg de la densité surfacique d'**énergie du vent atmosphérique**

$$\frac{P}{S} \simeq 1 \text{ kW/m}^2$$

est aussi l'odg de la densité surfacique d'une autre **énergie renouvelable**...
l'**énergie solaire**... à l'origine du **vent atmosphérique** !



[Danish Wind Industry Association web site]

Énergie potentielle de pesanteur

$$E_p = m\,g\,z \simeq 1\ \text{J} \quad \text{si} \quad \text{j'élève} \qquad\qquad \text{de 1 m.}$$

Applications plus industrielles :

Énergie potentielle de pesanteur

$$E_p = m\,g\,z \simeq 1\text{ J} \quad \text{si} \quad \text{j'élève } 100\text{ g de } 1\text{ m.}$$

Applications plus industrielles :

Énergie potentielle de pesanteur

$$E_p = m\,g\,z \simeq 1\ \text{J} \quad \text{si} \quad \text{j'élève}\ \ 100\ \text{g de 1 m.}$$

Applications plus industrielles : centrales hydroélectriques, par ex. STEP :

[STEP de Revin ; photo Airdiasol pour eDF]

4 groupes turbine-pompe, en turbinage chaque turbine a

$P =$

Énergie potentielle de pesanteur

$$E_p \ = \ m \ g \ z \ \simeq \ 1 \text{ J} \quad \text{si} \quad \text{j'élève} \ \ 100 \text{ g de } 1 \text{ m.}$$

Applications plus industrielles : centrales hydroélectriques, par ex. STEP :

[STEP de Revin ; photo Airdiasol pour eDF]

4 groupes turbine-pompe, en turbinage chaque turbine a

$P \ = \ \dot{m} \ g \ h$ avec $q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, $h = 240$ m .

Énergie potentielle de pesanteur

$$E_p = m\,g\,z \simeq 1 \text{ J} \quad \text{si} \quad \text{j'élève } 100 \text{ g de } 1 \text{ m.}$$

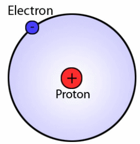
Applications plus industrielles : centrales hydroélectriques, par ex. STEP :

[STEP de Revin ; photo Airdiasol pour eDF]

4 groupes turbine-pompe, en turbinage chaque turbine a

$$P = \dot{m}\,g\,h \simeq 240 \text{ MW (trop optimiste !)} \quad \text{avec} \quad q = 100 \text{ m}^3/\text{s} \,, \quad h = 240 \text{ m} \,.$$

Énergie potentielle électrostatique, sur l'ex. de l'atome d'hydrogène

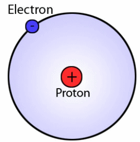


$$\text{Force électrostatique } \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} = \frac{q_p q_e}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = q_e\overline{\mathbf{E}}$$

$$\text{avec le champ électrique } \overline{\mathbf{E}} = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}V$$

$$\text{avec le potentiel électrique } V = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \quad \Longrightarrow \quad \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}(q_e V)$$

Énergie potentielle électrostatique, sur l'ex. de l'atome d'hydrogène



$$\text{Force électrostatique } \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} = \frac{q_p q_e}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = q_e\overline{\mathbf{E}}$$

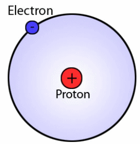
$$\text{avec le champ électrique } \overline{\mathbf{E}} = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}V$$

$$\text{avec le potentiel électrique } V = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \implies \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}(q_e V)$$

Variation d'énergie cinétique

$$dE_c = \delta W = \overline{\mathbf{F}}_{p\to e}\cdot d\overline{\mathbf{r}} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{x}}}(q_e V)\cdot d\overline{\mathbf{x}}$$

Énergie potentielle électrostatique, sur l'ex. de l'atome d'hydrogène



$$\text{Force électrostatique } \overline{\mathbf{F}}_{p\rightarrow e} = \frac{q_p q_e}{4\pi\epsilon_0} \frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = q_e \overline{\mathbf{E}}$$

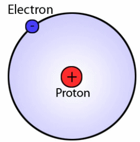
$$\text{avec le champ électrique } \overline{\mathbf{E}} = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0} \frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}} V$$

$$\text{avec le potentiel électrique } V = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \implies \overline{\mathbf{F}}_{p\rightarrow e} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}(q_e V)$$

Variation d'énergie cinétique

$$dE_c = \delta W = \overline{\mathbf{F}}_{p\rightarrow e} \cdot d\overline{\mathbf{r}} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{x}}}(q_e V) \cdot d\overline{\mathbf{x}} = -d(q_e V) = -dE_p$$

Énergie potentielle électrostatique, sur l'ex. de l'atome d'hydrogène



$$\text{Force électrostatique } \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} = \frac{q_p q_e}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = q_e\overline{\mathbf{E}}$$

$$\text{avec le champ électrique } \overline{\mathbf{E}} = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}V$$

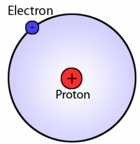
$$\text{avec le potentiel électrique } V = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \quad \Longrightarrow \quad \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}(q_e V)$$

Variation d'énergie cinétique

$$dE_c = \delta W = \overline{\mathbf{F}}_{p\to e}\cdot d\overline{\mathbf{r}} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{x}}}(q_e V)\cdot d\overline{\mathbf{x}} = -d(q_e V) = -dE_p$$

$$\Longleftrightarrow \quad E_c + E_p = constante = H \quad \text{avec} \quad E_p = q_e V < 0$$

Énergie potentielle électrostatique, sur l'ex. de l'atome d'hydrogène



$$\text{Force électrostatique } \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} = \frac{q_p q_e}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = q_e\overline{\mathbf{E}}$$

$$\text{avec le champ électrique } \overline{\mathbf{E}} = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}V$$

$$\text{avec le potentiel électrique } V = \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \quad \Longrightarrow \quad \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}(q_e V)$$

Variation d'énergie cinétique

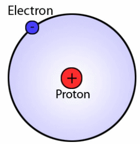
$$dE_c = \delta W = \overline{\mathbf{F}}_{p\to e}\cdot d\overline{\mathbf{r}} = -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{x}}}(q_e V)\cdot d\overline{\mathbf{x}} = -d(q_e V) = -dE_p$$

$$\Longleftrightarrow \quad E_c + E_p = constante = H \quad \text{avec} \quad E_p = q_e V < 0$$

Unité particulaire d'énergie : l'électron Volt

$$1 \text{ eV} = q_e \; 1 \text{ V}$$

Énergie potentielle électrostatique, sur l'ex. de l'atome d'hydrogène



$$\text{Force électrostatique } \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} \;=\; \frac{q_p q_e}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} \;=\; q_e \overline{\mathbf{E}}$$

$$\text{avec le champ électrique } \overline{\mathbf{E}} \;=\; \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{\overline{\mathbf{r}}}{r^3} \;=\; -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}} V$$

$$\text{avec le potentiel électrique } V \;=\; \frac{q_p}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \quad\Longrightarrow\quad \overline{\mathbf{F}}_{p\to e} \;=\; -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{r}}}(q_e V)$$

Variation d'énergie cinétique

$$dE_c \;=\; \delta W \;=\; \overline{\mathbf{F}}_{p\to e}\cdot d\overline{\mathbf{r}} \;=\; -\overline{\boldsymbol{\nabla}}_{\overline{\mathbf{x}}}(q_e V)\cdot d\overline{\mathbf{x}} \;=-d(q_e V) \;=-dE_p$$

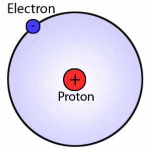
$$\Longleftrightarrow \quad E_c + E_p \;=\; constante \;=\; H \quad \text{avec} \quad E_p \;=\; q_e V \;<\; 0$$

Unité particulaire d'énergie : l'électron Volt

$$1\ \text{eV} \;=\; q_e\ 1\ \text{V} \;=\; 1{,}6\ 10^{-19}\ \text{J}\ .$$

Énergie potentielle électrostatique

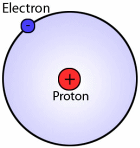
Modèle planétaire de l'**atome d'hydrogène** :



Électron en orbite circulaire autour du proton à la fréquence angulaire ω...
Équation d'évolution de la quantité de mouvement

Énergie potentielle électrostatique

Modèle planétaire de l'**atome d'hydrogène** :

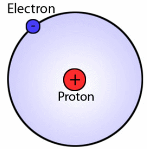


Électron en orbite circulaire autour du proton à la fréquence angulaire ω...
Équation d'évolution de la quantité de mouvement

$$\Longrightarrow \quad E_c = -\frac{E_p}{2} \quad \Longrightarrow \quad H = \frac{E_p}{2} < 0$$

Énergie potentielle électrostatique

Modèle planétaire de l'**atome d'hydrogène** :



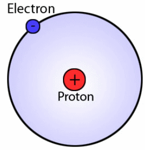
Électron en orbite circulaire autour du proton à la fréquence angulaire ω...
Équation d'évolution de la quantité de mouvement

$$\Longrightarrow \quad E_c = -\frac{E_p}{2} \quad \Longrightarrow \quad H = \frac{E_p}{2} < 0$$

Pour amener à un **état ionisé**, tel que

Énergie potentielle électrostatique

Modèle planétaire de l'**atome d'hydrogène** :



Électron en orbite circulaire autour du proton à la fréquence angulaire ω...
Équation d'évolution de la quantité de mouvement

$$\Longrightarrow \quad E_c = -\frac{E_p}{2} \quad \Longrightarrow \quad H = \frac{E_p}{2} < 0$$

Pour amener à un **état ionisé**, tel que $H = 0$

faire agir une **autre force exercée par une autre part. « chaude »** t.q.

$$dH = \delta W \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta H = -\frac{E_p}{2} = W = E_i$$

énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène !

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i = \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} =$$

avec $\epsilon_0 = 8{,}9\ 10^{-12}$ SI , $r =$

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i \;=\; \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \;=$$

avec $\epsilon_0 \;=\; 8{,}9\ 10^{-12}\ \mathrm{SI}\ , \quad r \;=\; 0{,}5\ \text{Å}$

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i \;=\; \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \;=\; 14\ \text{eV}$$

avec $\epsilon_0 \;=\; 8{,}9\ 10^{-12}$ SI , $r \;=\; 0{,}5$ Å

proche de la valeur expérimentale $E_i = 13{,}6$ eV !

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i = \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} = 14 \text{ eV}$$

avec $\epsilon_0 = 8{,}9\ 10^{-12}$ SI , $r = 0{,}5$ Å

proche de la valeur expérimentale $E_i = 13{,}6$ eV !

Énergie chimique contenue dans 1 kg de matière carbonée ?

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i \;=\; \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \;=\; 14 \text{ eV}$$

avec $\epsilon_0 \;=\; 8{,}9\ 10^{-12}$ SI , $r \;=\; 0{,}5$ Å

proche de la valeur expérimentale $E_i = 13{,}6$ eV !

Énergie chimique contenue dans 1 kg de matière carbonée ?

$$E_\chi \;\simeq\; 5 \text{ eV } N_{\text{atomes}}$$

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i \;=\; \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \;=\; 14 \text{ eV}$$

avec $\epsilon_0 \;=\; 8{,}9\ 10^{-12}$ SI , $r \;=\; 0{,}5$ Å

proche de la valeur expérimentale $E_i = 13{,}6$ eV !

Énergie chimique contenue dans 1 kg de matière carbonée ?

$$E_\chi \;\simeq\; 5 \text{ eV } N_{\text{atomes}} \;\simeq\; 5 \text{ eV } \frac{1000 \text{ g}}{12 \text{ g}}\; N_A$$

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i = \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} = 14 \text{ eV}$$

avec $\epsilon_0 = 8{,}9\ 10^{-12}$ SI , $r = 0{,}5$ Å

proche de la valeur expérimentale $E_i = 13{,}6$ eV !

Énergie chimique contenue dans 1 kg de matière carbonée ?

$$E_\chi \simeq 5 \text{ eV } N_{\text{atomes}} \simeq 5 \text{ eV } \frac{1000 \text{ g}}{12 \text{ g}} N_A \simeq 40 \text{ MJ}$$

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i \;=\; \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \;=\; 14\ \text{eV}$$

avec $\epsilon_0 \;=\; 8{,}9\ 10^{-12}\ \text{SI}\ ,\ \ r \;=\; 0{,}5\ \text{Å}$

proche de la valeur expérimentale $E_i = 13{,}6$ eV !

Énergie chimique contenue dans 1 kg de matière carbonée ?

$$E_\chi \;\simeq\; 5\ \text{eV}\ N_{\text{atomes}} \;\simeq\; 5\ \text{eV}\ \frac{1000\ \text{g}}{12\ \text{g}}\ N_A \;\simeq\; 40\ \text{MJ}$$

Énergie chimique contenue dans 1 t de matière carbonée ?

Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

D'après ce modèle

$$E_i \;=\; \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \;=\; 14 \text{ eV}$$

avec $\epsilon_0 \;=\; 8{,}9\ 10^{-12}$ SI , $r \;=\; 0{,}5$ Å

proche de la valeur expérimentale $E_i = 13{,}6$ eV !

Énergie chimique contenue dans 1 kg de matière carbonée ?

$$E_\chi \;\simeq\; 5 \text{ eV } N_{\text{atomes}} \;\simeq\; 5 \text{ eV } \frac{1000 \text{ g}}{12 \text{ g}} N_A \;\simeq\; 40 \text{ MJ}$$

Énergie chimique contenue dans 1 t de matière carbonée ?

$$E_\chi \;\simeq\; 40 \text{ GJ} \;\simeq\; 1 \text{ tep} \;=\; 42 \text{ GJ}$$

Énergie chimique de combustion

Combustion = réaction chimique exothermique d'oxydo-réduction.

Exemple : combustion du méthane

- constituant minoritaire du pétrole,
- constituant majoritaire (à $\simeq 90\%$) du gaz naturel :

$$CH_4 \; + \; 2O_2 \; \longrightarrow \; CO_2 \; + \; 2H_2O \; + E_\chi$$

$$\textbf{Pouvoir calorifique inférieur} \; = \; \textbf{PCI} \; = \; \frac{E_\chi}{m_{\text{combustible}}}$$

Pouvoir calorifique supérieur = **PCS** prend de + en compte la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau ; typiquement

$$\textbf{PCS} \; \simeq \; 1{,}1 \; \textbf{PCI}$$

Ordre de grandeur en MJ/kg = GJ/t ?

Énergie chimique de combustion

Combustion = réaction chimique exothermique d'oxydo-réduction.

Exemple : combustion du méthane

- constituant minoritaire du pétrole,
- constituant majoritaire (à $\simeq 90\%$) du gaz naturel :

$$CH_4 \; + \; 2O_2 \; \longrightarrow \; CO_2 \; + \; 2H_2O \; + E_\chi$$

$$\textbf{Pouvoir calorifique inférieur} \; = \; \textbf{PCI} \; = \; \frac{E_\chi}{m_{\text{combustible}}}$$

Pouvoir calorifique supérieur = **PCS** prend de + en compte la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau ; typiquement

$$\textbf{PCS} \; \simeq \; 1{,}1 \; \textbf{PCI}$$

Ordre de grandeur en MJ/kg = GJ/t ? 40 MJ/kg

Énergies de combustion : quelques pouvoirs calorifiques

Combustible	**PCI** en MJ/kg = GJ/t	
Bois	15 - 18	
Charbon	26 - 32	
Pétrole	42	
Gaz naturel	38 - 48	
Hydrogène	120	

Énergies de combustion : quelques pouvoirs calorifiques

Combustible	**PCI** en MJ/kg = GJ/t	**Révolution énergétique**
Bois	15 - 18	âge du feu
Charbon	26 - 32	1ère : couple charbon - vapeur
Pétrole Gaz naturel	42 38 - 48	2ème : couple pétrole - électricité
Hydrogène	120	

3ème révolution énergétique ≃ transition énergétique

Épuisement des énergies fossiles, réchauffement climatique, pb. environnementaux

$\Rightarrow$ revoir notre mix énergétique en incluant + d'én. renouvelables et faisant + attention à l'effet de serre

Énergies de combustion : quelques pouvoirs calorifiques

Combustible	**PCI** en MJ/kg = GJ/t	**Révolution énergétique**
Bois	15 - 18	âge du feu
Charbon	26 - 32	1$^{\text{ère}}$: couple charbon - vapeur
Pétrole	42	2$^{\text{ème}}$: couple pétrole - électricité
Gaz naturel	38 - 48	
Hydrogène	120	

3$^{\text{ème}}$ révolution énergétique $\simeq$ transition énergétique

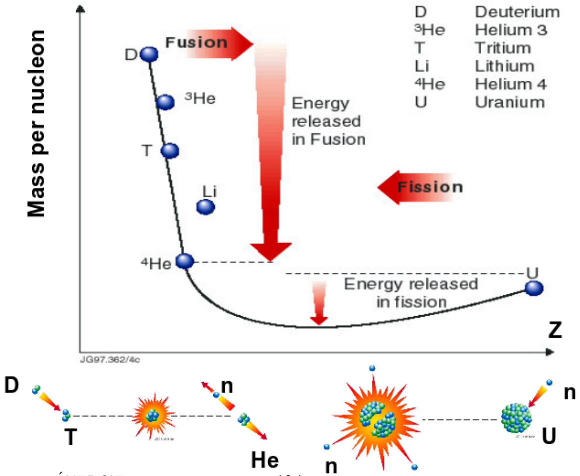
Épuisement des énergies fossiles, réchauffement climatique, pb. environnementaux

$\Rightarrow$ revoir notre mix énergétique en incluant + d'én. renouvelables et nucléaire ?
et faisant + attention à l'effet de serre

Énergie nucléaire : réaction de fission utilisée par EDF :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{93}_{38}\mathrm{Sr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} + E_{\mathrm{nuc}}$$

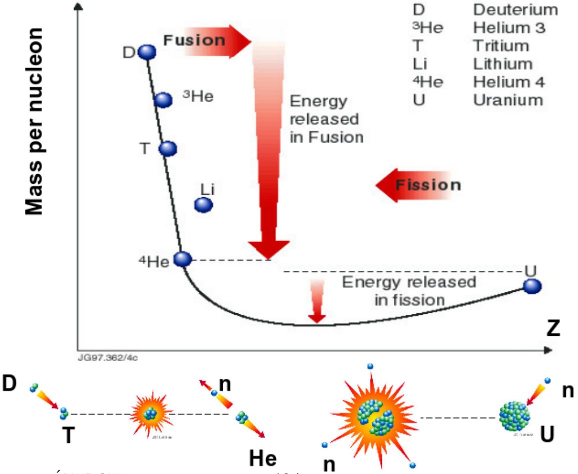
$E_{\mathrm{nuc}} \leftrightarrow$ **énergie de masse** des atomes



Énergie nucléaire : réaction de fission utilisée par eDF :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow ^{140}_{54}\mathrm{Xe} + ^{93}_{38}\mathrm{Sr} + 3\ ^{1}_{0}\mathrm{n} + E_{\mathrm{nuc}}$$

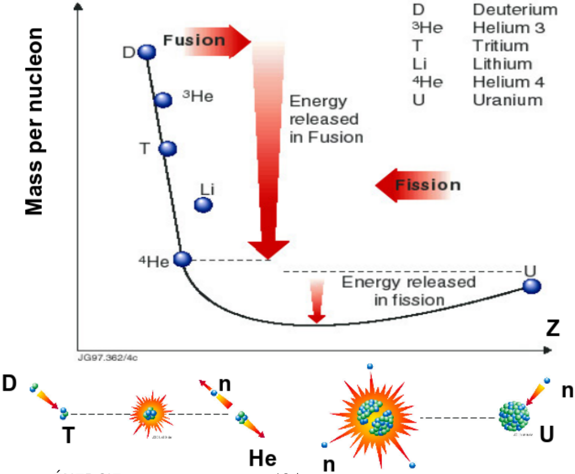
$E_{\mathrm{nuc}} \leftrightarrow$ **énergie de masse** des atomes $\simeq \delta m\, c^2$



Énergie nucléaire : réaction de fission utilisée par eDF :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{93}_{38}\mathrm{Sr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} + E_{\mathrm{nuc}}$$

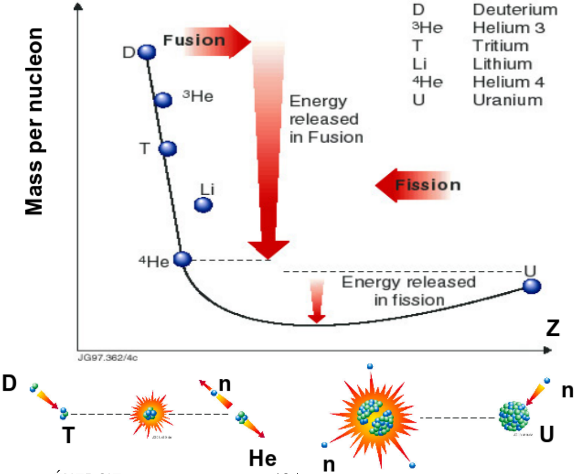
$E_{\mathrm{nuc}} \leftrightarrow$ **énergie de masse** des atomes $\simeq \delta m\, c^2 \simeq 200$ MeV



Énergie nucléaire : réaction de fission utilisée par eDF :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow ^{140}_{54}\mathrm{Xe} + ^{93}_{38}\mathrm{Sr} + 3\ ^{1}_{0}\mathrm{n} + E_{\mathrm{nuc}}$$

$E_{\mathrm{nuc}} \leftrightarrow$ **énergie de masse** des atomes $\simeq \delta m\, c^2 \simeq 200$ MeV $\gg E_\chi$

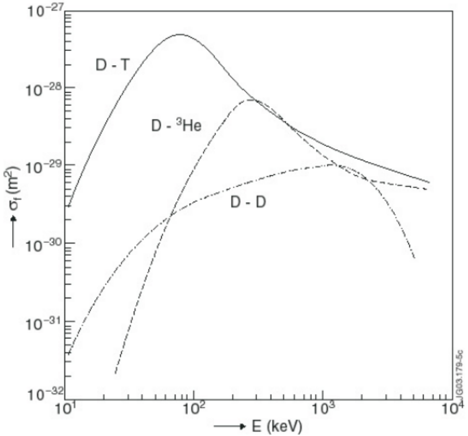


Pour la fusion la réaction deutérium-tritium est la + efficace

- D+T → ^{4}He +n +17.6MeV
- Section efficace maximale à E≈ 70keV → plasmas T ≈ 20keV
- Tritium généré par les réactions:

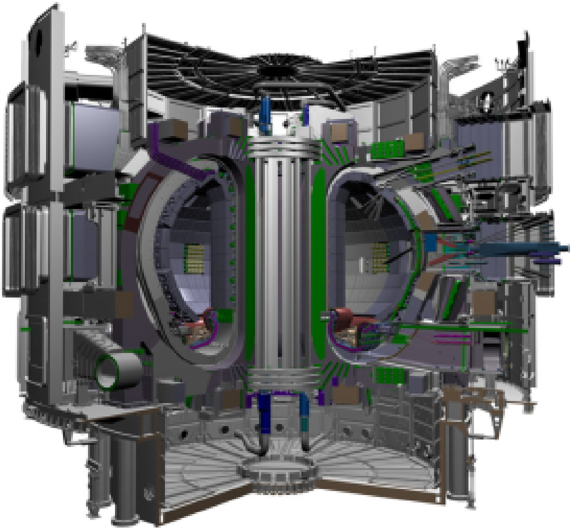
$$n + {}^6Li \rightarrow {}^4He + T$$

$$n + {}^7Li \rightarrow {}^4He + T + n$$



[Garbet 2009 Conférence CEA au CFM]

⇒ **projet ITER pour la fusion par confinement magnétique**



Conclusion

Les formules **mathématiques**

$$E = E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

$$\frac{dE_c}{dt} = P = \sum \overline{\mathbf{F}} \cdot \overline{\mathbf{v}} \iff dE_c = \delta W = \sum \overline{\mathbf{F}} \cdot d\overline{\mathbf{x}}$$

$$E = E_p = mgz$$

$$E = E_p = qV = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$E = mc^2$$

nous apprennent sur la **physique de l'énergie**,
et, avec de l'**analyse physico-dimensionnelle**,
sur les **ordres de grandeur en énergie** !

Conclusion

Les formules **mathématiques**

$$E = E_c = \frac{1}{2}mv^2 \iff P = \frac{1}{2}\dot{m}v^2$$ énergie éolienne

$$\frac{dE_c}{dt} = P = \sum \overline{\mathbf{F}} \cdot \overline{\mathbf{v}} \iff dE_c = \delta W = \sum \overline{\mathbf{F}} \cdot d\overline{\mathbf{x}}$$

$$E = E_p = mgz \iff P = \dot{m}gh$$ énergie hydraulique

$$E = E_p = qV = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r}$$ énergie chimique, de combustion

$$E = mc^2$$ énergie nucléaire

nous apprennent sur la **physique de l'énergie**,
et, avec de l'**analyse physico-dimensionnelle**,
sur les **ordres de grandeur en énergie** !