Exercice 1

1.1 L'énergie "produite" à chaque seconde est de $1'200 \cdot 10^6$ [J] = $1,20 \cdot 10^9$ [J].
L'énergie "produite" en une année est de :

$$E_{année} = 365\left[\frac{jours}{année}\right]\cdot 24\left[\frac{heures}{jours}\right]\cdot 3600\left[\frac{secondes}{heure}\right]\cdot 1,2\cdot 10^9\left[\frac{joules}{seconde}\right] = 3,78\cdot 10^{16}\,[J]$$

1.2 L'énergie produite ne représente que le 33% de l'énergie consommée chaque année.
Donc l'énergie consommée chaque année = $\dfrac{3,78\cdot 10^{16}\,[J]}{0,333} = 1,14\cdot 10^{17}\,[J]$.
Selon la formule $E = m \cdot c^2$, cela correspond à une masse transformée en énergie de :

$$m = \frac{1,14\cdot 10^{17}\,[J]}{(3,00\cdot 10^8)^2} = 1,26[kg].$$

1.3 La consommation finale d'énergie en Suisse en 2015 = 838'360 térajoules = $8,3836 \cdot 10^{17}$ [J].
La consommation finale d'énergie électrique en Suisse en 2015 était de :
$E_{électrique}$ = 25% de $8,3836 \cdot 10^{17}$ [J] = $2,10 \cdot 10^{17}$ [J].
Selon la formule $E = m \cdot c^2$, cela correspond à une masse transformée en énergie de :

$$m = \frac{2,10\cdot 10^{17}\,[J]}{(3,00\cdot 10^8)^2} = 2,33\,[kg].$$

Il y a assez d'énergie dans 2,33 [kg] de matière pour fournir l'énergie l'électrique à la Suisse durant une année !
Le problème est que nous ne savons que très mal convertir la matière en énergie électrique.
Même une bombe nucléaire ne convertir qu'une toute petite fraction de la matière en énergie.

Exercice 2

Puissance fournie par le Soleil sous forme de rayonnement = $3,826 \cdot 10^{26}$ [W].

2.1 Donc en une année, le Soleil fourni une énergie rayonnante égale à :

$$E_{année} = 365\left[\frac{jours}{année}\right]\cdot 24\left[\frac{heures}{jours}\right]\cdot 3600\left[\frac{secondes}{heure}\right]\cdot 3,826\cdot 10^{26}\left[\frac{joules}{seconde}\right] = 1,21\cdot 10^{34}\,[J]$$

Selon la formule $E = m \cdot c^2$, cela correspond à une masse transformée en énergie en une année de :

$$m = \frac{1,21\cdot 10^{34}\,[J]}{(3,00\cdot 10^8)^2} = 1,34\cdot 10^{17}[kg].$$

2.2 En 4,5 milliards d'année, cela fait une masse transformée en énergie de

$$m_2 = 1,34\cdot 10^{17}\,[kg]\cdot 4,5\cdot 10^9 = 6,03\cdot 10^{26}[kg].$$

° Sachant que la masse du Soleil est d'environ $2,0 \cdot 10^{30}$ [kg], la proportion de masse transformée vaut : $\dfrac{6,03\cdot 10^{26}\,[kg]}{2,0\cdot 10^{30}\,[kg]} = 0,030\,\%$.

Exercice 3
L'énergie cinétique de l'électron vaut 2,00 [MeV].
La masse au repos d'un électron vaut : $m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ [kg].
L'énergie totale de l'électron vaut : $E_{totale} = m_0 \cdot c^2 \cdot \gamma$
L'énergie au repos de l'électron vaut : $E_{repos} = m_0 \cdot c^2$
L'énergie cinétique de l'électron vaut : $E_{cin} = m_0 \cdot c^2 \cdot (\gamma - 1)$. $E_{cin} = E_{totale} - E_{repos}$

3.1 L'énergie au repos de l'électron vaut :

$$E_{repos} = m_0 \cdot c^2 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\,[J] \cdot \frac{1}{1{,}602 \cdot 10^{-19}} \left[\frac{eV}{J}\right] \cdot \left(3{,}00 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]\right)^2 = 0{,}512\,[MeV]$$

3.2 L'énergie totale $E_{totale} = E_{repos} + E_{cin} = 0{,}512\,[MeV] + 2{,}00\,[MeV] = 2{,}512\,[MeV]$
Dans ce cas, son énergie est principalement due à sa vitesse.

3.3 La quantité de mouvement de l'électron est reliée à son énergie par : $E_{totale}^2 = E_{repos}^2 + p^2 \cdot c^2$,
Donc la quantité de mouvement vaut :

$$p = \frac{\sqrt{E_{totale}^2 - E_{repos}^2}}{c} = \sqrt{2{,}512^2 - 0{,}512^2} \left[\frac{MeV}{c}\right] = 2{,}46 \left[\frac{MeV}{c}\right].$$

3.4 $1 \left[\frac{MeV}{c}\right] = 10^6 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} \left[\frac{J}{eV}\right] \cdot \frac{1}{3{,}00 \cdot 10^8\,[m/s]} = 5{,}34 \cdot 10^{-22} \left[\frac{kg \cdot m}{s}\right]$

° La quantité de mouvement de l'électron dans les unités du Système International (MKSA) vaut :

$p = 2{,}46 \cdot 5{,}34 \cdot 10^{-22} = 1{,}31 \cdot 10^{-21} \left[\frac{kg \cdot m}{s}\right]$. C'est pas très parlant.

3.5 De $E_{totale} = m_0 \cdot c^2 \cdot \gamma$ et $E_{repos} = m_0 \cdot c^2$, on en déduit que : $\gamma = \frac{E_{totale}}{E_{repos}} = \frac{2{,}512}{0{,}512} = 4{,}91$ sans unités.

Donc $\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{4{,}91^2}} = 0{,}979$.
La vitesse de l'électron est de $0{,}979 \cdot c$.
Cette donnée ne caractérise pas bien l'électron, car c'est quasiment la vitesse de la lumière. Dans ce cas, on préfère donner la valeur de γ ou son énergie totale.

Exercice 4
La masse au repos d'un proton vaut : $m_0 = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ [kg].
L'énergie totale de l'électron vaut : $E_{totale} = m_0 \cdot c^2 \cdot \gamma$
L'énergie cinétique de l'électron vaut : $E_{cin} = m_0 \cdot c^2 \cdot (\gamma - 1)$.

4.1 L'énergie au repos du proton vaut : $E_{repos} = m_0 \cdot c^2$

$$E_{repos} = m_0 \cdot c^2 = 1{,}673 \cdot 10^{-27}\,[J] \cdot \frac{1}{1{,}602 \cdot 10^{-19}} \left[\frac{eV}{J}\right] \cdot \left(3{,}00 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]\right)^2 = 0{,}940\,[GeV]$$

4.2 La valeur de γ correspondante à la vitesse de $0{,}99999999 \cdot c$ vaut :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0{,}99999999^2}} = 7'071$$

L'énergie totale est 7'071 fois supérieure à l'énergie au repos
L'énergie cinétique est 7'070 fois supérieure à l'énergie au repos.
Il y a de quoi produire des particules plus de 1'000 fois plus lourds qu'un proton !

Exercice 5

5.1 L'énergie du photon vaut :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 6{,}62 \cdot 10^{-34} \ [J \cdot s] \cdot \frac{1}{1{,}602 \cdot 10^{-19} \ [J/eV]} \cdot \frac{3{,}00 \cdot 10^{8}}{632{,}8 \cdot 10^{-9} \ [m]} = 1{,}96 \ [eV] \cdot$$

5.2 La quantité de mouvement est reliée à l'énergie par la relation : $E_{totale}^2 = m_0^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2$.

Pour un photon, la masse au repos m_0 est nulle.

La relation se simplifie en $E_{totale} = p \cdot c$, donc la quantité de mouvement de ce photon vaut :

$P = \frac{E_{totale}}{c} = 1{,}96 \ [eV/c]$, dans ces unités, c'est simple.

C'est une énergie et une quantité de mouvement plus de un million de fois inférieure à celle de l'électron de l'exercice 3.

Exercice 6

6.1 1 [kJ] = $\frac{1\,'000}{1{,}602 \cdot 10^{-19}} = 6{,}24 \cdot 10^{21} \ [eV] \cdot$

Une mole = $6{,}022 \cdot 10^{23}$ liaisons.

Donc 1 [kJ / mol] = $\frac{6{,}24 \cdot 10^{21}}{6{,}022 \cdot 10^{23}}$ = 0,0104 [eV] par liaison.

6.2 L'énergie d'un photon de fréquence ν vaut : $E = h \cdot \nu$, où $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ [J · s]

$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ [J · s]

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = 6{,}62 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{1}{1{,}602 \cdot 10^{-19}} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8} \cdot \frac{1}{\lambda} = 1240 [eV \cdot nm] \cdot \frac{1}{\lambda}$$

$$E = 1240 [eV \cdot nm] \cdot \frac{1}{\lambda}$$

Donc si on exprime la longueur d'onde en [nm] et l'énergie en [eV], on a : $E = \frac{1240}{\lambda}$.

On a donc $\lambda = \frac{1240}{E}$.

6.3, 6.4 et 6.5 Donc on a les correspondances suivantes :

348 [kJ / mol] = 3,62 [eV] par liaison. Correspond à $\lambda = 342 \ [nm]$, cela correspond au proche ultra-violet. La lumière visible a une longueur d'onde comprise entre 800 et 400 [nm].

614 [kJ / mol] = 6,39 [eV] par liaison. Correspond à $\lambda = 194 \ [nm]$.

839 [kJ / mol] = 8,73 [eV] par liaison. Correspond à $\lambda = 142 \ [nm]$.

---

7. Énergie au repos du deutéron : 1'875,612 [MeV], sa masse = $3{,}343584 \cdot 10^{-27}$ [kg] c.f. page 1077
Énergie au repos du proton : 938,272 [MeV]
Énergie au repos du neutron : 939,566 [MeV]

7.1 Énergie libérée lors de la fusion du proton et du neutron pour former le deutéron :
$E =$ 938,272 + 939,566 – 1'875,612 = 1'877,838 + 939,566 – 1'875,612 = 2,226 [MeV].
$= 2{,}226 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-13} = 3{,}566 \cdot 10^{-13} [J]$

7.2 1 [kg] de deutéron contient : $\dfrac{1}{3{,}343584 \cdot 10^{-27}}$ = $2{,}911 \cdot 10^{26}$ deutérons.
Lors de la fusion d'un [kg] de deutéron, l'énergie dégagée est de :
$3{,}566 \cdot 10^{-13}[J] \cdot 2{,}911 \cdot 10^{26} = 1{,}038 \cdot 10^{14}[J]$.

7.3 Une tonne équivalent pétrole vaut : 1 tep = $4{,}19 \cdot 10^{10}$ [J]
Donc la fusion pour créer un [kg] de deutéron, correspond à une énergie de
$\dfrac{1{,}038 \cdot 10^{14}[J]}{4{,}19 \cdot 10^{10}[J]} = 2'477$ tonnes de pétroles !

---

8. Énergie au repos de l'hélium-3 $^{3}_{2}He$: 2'809,41 [MeV], sa masse = $5{,}008237 \cdot 10^{-27}$ [kg]
Énergie au repos du deutérium : 1'876,12 [MeV]
Énergie au repos du neutron : 939,566 [MeV]

8.1 Énergie libérée lors de la fusion pour former de l'hélium-3 :
$E =$ 2 · 1'876,12 – 2'809,41 – 939,566 = 3,26 [MeV].
$= 3{,}26 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-13} = 5{,}22 \cdot 10^{-13}[J]$

8.2 1 [kg] d'hélium-3 contient : $\dfrac{1}{5{,}008237 \cdot 10^{-27}}$ = $2{,}00 \cdot 10^{26}$ atomes d'hélium-3.
Lors de la fusion pour former un [kg] d'hélium-3, l'énergie dégagée est de :
$5{,}22 \cdot 10^{-13}[J] \cdot 2{,}00 \cdot 10^{26} = 10{,}44 \cdot 10^{13}[J]$.

8.3 Une tonne équivalent pétrole vaut : 1 tep = $4{,}19 \cdot 10^{10}$ [J]
Donc la fusion pour créer un [kg] d'hélium-3, correspond à une énergie de
$\dfrac{10{,}44 \cdot 10^{13}[J]}{4{,}19 \cdot 10^{10}[J]} = 2'490$ tonnes de pétroles !

---

9. Énergie au repos de l'hélium-4 $\left(^{4}_{2}He\right)$: 3'728,40 [MeV], sa masse = $6{,}646482 \cdot 10^{-27}$ [kg]
Énergie au repos du deutérium ($^{2}_{1}H$) : 1'876,12 [MeV]
Énergie au repos du tritium ($^{3}_{1}H$) : 2'809,43 [MeV]
Énergie au repos du neutron (n) : 939,566 [MeV]

9.1 Energie libérée lors de la fusion pour former de l'hélium-4 :
$E =$ 1'876,12 + 2'809,43 – 3'728,40 – 939,566 = 17,58 [MeV].
$= 17{,}58 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-13} = 2{,}817 \cdot 10^{-12}[J]$

° 1 [kg] d'hélium-4 contient : $\dfrac{1}{6{,}6465 \cdot 10^{-27}}$ = $1{,}50 \cdot 10^{26}$ atomes d'hélium-4.
Lors de la fusion pour former un [kg] d'hélium-4, l'énergie dégagée est de :
$2{,}817 \cdot 10^{-12}[J] \cdot 1{,}50 \cdot 10^{26} = 4{,}23 \cdot 10^{14}[J]$.

° Une tonne équivalent pétrole vaut : 1 tep = $4{,}19 \cdot 10^{10}$ [J]
Donc la fusion pour créer un [kg] d'hélium-4, correspond à une énergie de
$\dfrac{4{,}23 \cdot 10^{12}[J]}{4{,}19 \cdot 10^{10}[J]} = 10'100$ tonnes de pétroles !
