

# **PHYSQ 261 – Révision, examen final**

Lundi 20 décembre 2021, 9 h à 12 h

Faculté Saint-Jean, local 366

N'oubliez pas votre aide-mémoire (pp. suivantes) et votre calculatrice!

L'examen vaut 40% de la note finale, et compte 40 points.

Implique toute la matière vue dans le cours, mais les questions seront tirées des sections C, D, E, F

Nom : \_\_\_\_\_

À compléter des deux côtés. À retourner avec l'examen quand vous aurez terminé.

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}, 1 \text{ Cal} = 4184 \text{ J}, 1 \text{ btu} = 1055 \text{ J}, 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}, 1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho v A \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad N(t) = N_0 e^{kt} \quad k = \frac{\ln 2}{T_2}$$

$$N(t) = N_M \exp\left(-\frac{(t-T_M)^2}{2\sigma^2}\right) = N_M \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad z = \frac{|t-T_M|}{\sigma} \quad N(t) = \frac{Q_\infty}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

$$Q_\infty = \sqrt{2\pi}\sigma N_M \quad T_k = T_c + 273.15 \quad N_A = 6.02214 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$$

$$\frac{dQ}{dt} = rQ \left(1 - \frac{Q}{Q_\infty}\right) \quad Q(t) = \frac{Q_\infty Q_0 e^{rt}}{Q_\infty + Q_0 (e^{rt} - 1)} = \frac{Q_\infty Q_0}{Q_0 + (Q_\infty - Q_0) e^{-rt}} = \frac{Q_\infty}{1 + e^{-r(t-t^*)}}$$

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{t=0} = R_0 Q_0 = rQ_0 \left(1 - \frac{Q_0}{Q_\infty}\right) \Rightarrow R_0 = r \left(1 - \frac{Q_0}{Q_\infty}\right) \quad \eta_{\max} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad Q = mL \quad W = Q_h - Q_c \quad \eta = \frac{\text{travail de sortie}}{\text{chaleur fournie}} = \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W} \quad \text{COP} = \frac{Q_h}{W} \quad 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$$

$$\rho_{\text{eau}} = [\text{eau}] = 1 \text{ kg/L} = 1000 \text{ kg/m}^3 = 10^6 \text{ g/m}^3 \quad 1 \text{ g/m}^3 = 10^{-6} \rho_{\text{eau}}$$

$$\left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{[\text{ppm}]_w}{22.4} \times \frac{273}{T(^{\circ}\text{K})} \times \frac{P(\text{atm})}{1 \text{ atm}} \quad \text{entrée} = \text{sortie} + \text{conversion} + \text{accumulation}$$

$$S = \rho Q + \kappa \rho V + V \frac{d\rho}{dt} \quad \rho(t) = (\rho_0 - \rho_\infty) \exp\left[-\left(\kappa + \frac{Q}{V}\right)t\right] + \rho_\infty \quad \rho_\infty = \frac{S}{Q + \kappa V}$$

$$\eta = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie utile} + \text{énergie perdue}} \quad c = \lambda f \quad I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad \lambda_m(\text{nm}) = \frac{2.8972 \times 10^6 \text{ nm} \cdot ^{\circ}\text{K}}{T(^{\circ}\text{K})}$$

$$I(T) = \sigma T^4, \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \quad P_A = \pi R^2 I_0 \rightarrow I = \frac{P_A}{4\pi R^2} = \frac{\pi R^2 I_0}{4\pi R^2} = \frac{I_0}{4}$$

$$P_R = \sigma 4\pi R^2 T^4 \quad P_A = (1 - \alpha)\pi R^2 I_0 \quad T_e = \left(\frac{I_0(1 - \alpha)}{4\sigma}\right)^{1/4} \quad P_{\text{nette}} = \pi R^2 I_0 (1 - \alpha) - 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

$$I_{\text{nette}} = \frac{P_{\text{nette}}}{4\pi R^2} = \frac{1}{4} I_0 (1 - \alpha) - \sigma T_e^4 \quad \lambda_m (\mu\text{m}) = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T (\text{K})} \quad I_E = 2I_A = \frac{1}{2} I_0 (1 - \alpha) = \sigma T_E^4$$

$$\Delta T = \frac{\Delta T_d}{\ln 2} \ln \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) \rightarrow \rho = \rho_0 \times 2^{\frac{\Delta T}{\Delta T_d}} \quad 1 \text{ pp CO}_2 \Leftrightarrow 2.12 \text{ Gtonnes C} \quad \% \text{ C atmos} = 48\%$$

$$m(t) = m(0)e^{-t/\tau} \quad \frac{dm(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} m(t) \quad m(t) = m(0)e^{-t/\tau} + m(\infty) \left[ 1 - e^{-t/\tau} \right] \quad m(\infty) = P\tau$$

$$V = RI \quad R = \frac{\rho L}{A} \quad \rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad P = VI \quad V = \underbrace{NBA\omega}_{V_{\text{max}}} \cos(\omega t)$$

$$P(t) = V(t)I(t) = V_p I_p \cos^2 \omega t \quad P_{\text{av}} = \frac{1}{2} V_p I_p = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \quad I_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_p, \quad V_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_p$$

$$P_{\text{av}} \equiv RI_{\text{av}}^2 = \frac{1}{2} RI_{\text{max}}^2 = RI_{\text{rms}}^2 \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad A \equiv \left| \frac{dN}{dt} \right|$$

$$e^{-\lambda t} \equiv e^{-\lambda_p t} \cdot e^{-\lambda_b t} \rightarrow \lambda_e = \lambda_p + \lambda_b \rightarrow T_{\frac{1}{2},e}^{-1} = T_{\frac{1}{2},p}^{-1} + T_{\frac{1}{2},b}^{-1} \quad N = N_0 e^{-\lambda_e t}$$

$$n = \frac{N_a m}{A} \quad n\sigma_{\text{geom}} = \frac{N_a m \sigma_{\text{geom}}}{A} \quad \frac{\Delta N}{N} = \frac{N_a m \sigma_{\text{geom}}}{A} \rightarrow \Delta N = \frac{N_a m \sigma_{\text{geom}} N}{A}$$

$$B = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{noyau}})c^2 \quad N(x) = N_0 e^{-\mu x} \quad \mu = \frac{\ln 2}{L_{1/2}}$$

$$H_T = \sum_R (w_R D_R) \quad E = \sum_T (w_T H_T) \quad v = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} \quad T\tau n > 6 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$$

$$P_{\text{in}} = \frac{K}{t} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_i^3 \quad P = \frac{1}{4} \rho_{\text{air}} \pi r^2 (v_i + v_f) (v_i^2 - v_f^2) \quad P_{\text{max}} = R_{\text{max}} P_{\text{in}} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_i^3 = \frac{8}{27} \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_i^3$$

$$P_e = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_i^3 \eta \eta_e \quad r_1^2 v_1 = r_2^2 v_2$$

$$\frac{P}{\ell} = \frac{1}{4} \rho g A^2 \frac{\lambda}{T} = \frac{1}{4} \rho g^{\frac{3}{2}} A^2 \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi}} \quad \frac{\lambda}{T} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad \frac{P}{\ell} \approx 3A^2 \sqrt{\lambda} \text{ kW/m}$$

**Matière à l'examen final du lundi 20 décembre 2021 : chapitres C, D, E, F (définis dans le plan de cours)**

**Concepts de base et mathématiques à connaître des chapitres A, B**

Aucune question tirée de ces chapitres, mais les concepts des sections A.1-3 (énergie et unités), A.5.1-A5.2 (exponentielle, gaussienne), B.2 (chaleur spécifique, chaleur latente, calorimétrie), B.7 (machine thermique, efficacité) peuvent être requis pour l'examen.

# **PHYSQ 261 : Physique de l'énergie et de l'environnement**

**Section C : Pollution, effet de serre  
MHC, chapitres 5, 6**

## Section C.1. Concentration dans les gaz et les liquides

### Liquides

$$\text{concentration} = \frac{\text{masse}}{\text{volume}} \quad (\text{kg/m}^3, \text{mg/L}, \mu\text{g/L}, \dots)$$

ou

$$\text{concentration} = \frac{\text{masse polluant}}{\text{masse mélange}} \quad (\text{ppm}, \text{ppb}, \dots)$$

**Notation**  $\rho_{\dots}$  (rho) ou [...]

**Concentration de l'eau**  $\rho_{\text{eau}} = [\text{eau}] = 1 \text{ kg/L} = 1000 \text{ kg/m}^3 = 10^6 \text{ g/m}^3$

d'où  $1 \text{ g/m}^3 = 10^{-6} \rho_{\text{eau}}$

Pour de faibles concentrations:  $1 \text{ g/m}^3 = 1 \text{ mg/L} = 1 \text{ ppm (au poids)}$

$$1 \mu\text{g/L} = 1 \text{ ppb (au poids)}$$

Rappel :  $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$

## Gaz

Concentration des polluants exprimée en termes de volumes

Exemple  $1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ volume de gaz polluant}}{10^6 \text{ volumes d'air}}$

La conversion de ppm (volumique) en  $\text{mg}/\text{m}^3$  dépend de la densité du polluant, qui en retour dépend de sa pression  $P$ , sa température  $T$  et son poids moléculaire  $w$ .

$$\left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{[\text{ppm}] w}{22.4} \times \frac{273}{T(^{\circ}\text{K})} \times \frac{P (\text{atm})}{1 \text{ atm}}$$

### Remarque

22.4 L = volume occupé par 1 mole de gaz parfait à 0 °C et 1 atm

**Exemple** La norme US de qualité de CO est 9 ppm. Exprimez en % volumique et en  $\text{mg}/\text{m}^3$  à 1 atm et 25 °C.  $w_{\text{C}} = 12$  et  $w_{\text{O}} = 16$   
(Rép.  $9 \times 10^{-4}\%$ ;  $10.3 \text{ mg}/\text{m}^3$  )

PERIODS	s		d										p					
	GROUP I	GROUP II	Transition elements										GROUP III	GROUP IV	GROUP V	GROUP VI	GROUP VII	GROUP VIII
1	1 <b>H</b> 1.01 1s <sup>1</sup>																	2 <b>He</b> 4.00 1s <sup>2</sup>
2	3 <b>Li</b> 6.94 2s <sup>1</sup>	4 <b>Be</b> 9.01 2s <sup>2</sup>											5 <b>B</b> 10.81 2p <sup>1</sup>	6 <b>C</b> 12.01 2p <sup>2</sup>	7 <b>N</b> 14.01 2p <sup>3</sup>	8 <b>O</b> 16.00 2p <sup>4</sup>	9 <b>F</b> 19.00 2p <sup>5</sup>	10 <b>Ne</b> 20.18 2p <sup>6</sup>
3	11 <b>Na</b> 22.99 3s <sup>1</sup>	12 <b>Mg</b> 24.31 3s <sup>2</sup>											13 <b>Al</b> 26.98 3p <sup>1</sup>	14 <b>Si</b> 28.09 3p <sup>2</sup>	15 <b>P</b> 30.97 3p <sup>3</sup>	16 <b>S</b> 32.07 3p <sup>4</sup>	17 <b>Cl</b> 35.45 3p <sup>5</sup>	18 <b>Ar</b> 39.95 3p <sup>6</sup>
4	19 <b>K</b> 39.10 4s <sup>1</sup>	20 <b>Ca</b> 40.08 4s <sup>2</sup>	21 <b>Sc</b> 44.96 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>	22 <b>Ti</b> 47.88 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>	23 <b>V</b> 50.94 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>	24 <b>Cr</b> 52.00 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>	25 <b>Mn</b> 54.94 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>	26 <b>Fe</b> 55.85 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	27 <b>Co</b> 58.93 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>	28 <b>Ni</b> 58.69 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	29 <b>Cu</b> 63.55 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	30 <b>Zn</b> 65.39 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	31 <b>Ga</b> 69.72 4p <sup>1</sup>	32 <b>Ge</b> 72.61 4p <sup>2</sup>	33 <b>As</b> 74.92 4p <sup>3</sup>	34 <b>Se</b> 78.96 4p <sup>4</sup>	35 <b>Br</b> 79.90 4p <sup>5</sup>	36 <b>Kr</b> 83.80 4p <sup>6</sup>
5	37 <b>Rb</b> 85.47 5s <sup>1</sup>	38 <b>Sr</b> 87.62 5s <sup>2</sup>	39 <b>Y</b> 88.96 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>	40 <b>Zr</b> 91.22 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>	41 <b>Nb</b> 92.91 4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup>	42 <b>Mo</b> 95.94 4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup>	43 <b>Tc</b> (98) 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>	44 <b>Ru</b> 101.07 4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup>	45 <b>Rh</b> 102.91 4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup>	46 <b>Pd</b> 106.42 4d <sup>10</sup> 5s <sup>0</sup>	47 <b>Ag</b> 107.87 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	48 <b>Cd</b> 112.41 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	49 <b>In</b> 114.82 5p <sup>1</sup>	50 <b>Sn</b> 118.71 5p <sup>2</sup>	51 <b>Sb</b> 121.76 5p <sup>3</sup>	52 <b>Te</b> 127.60 5p <sup>4</sup>	53 <b>I</b> 126.90 5p <sup>5</sup>	54 <b>Xe</b> 131.29 5p <sup>6</sup>
6	55 <b>Cs</b> 132.91 6s <sup>1</sup>	56 <b>Ba</b> 137.33 6s <sup>2</sup>	57 <b>La</b> 138.91 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	58 <b>Ce</b> 140.12 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	59 <b>Pr</b> 140.91 4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	60 <b>Nd</b> 144.24 4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	61 <b>Pm</b> (145) 4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	62 <b>Sm</b> 150.36 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	63 <b>Eu</b> 151.96 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	64 <b>Gd</b> 157.25 5d <sup>1</sup> 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	65 <b>Tb</b> 158.93 4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>	66 <b>Dy</b> 162.50 4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	67 <b>Ho</b> 164.93 4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>	68 <b>Er</b> 167.26 4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup>	69 <b>Tm</b> 168.93 4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup>	70 <b>Yb</b> 173.04 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	71 <b>Lu</b> 174.97 5d <sup>1</sup> 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	
7	87 <b>Fr</b> (223) 7s <sup>1</sup>	88 <b>Ra</b> 226.03 7s <sup>2</sup>	89 <b>Ac</b> 227.03 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	90 <b>Th</b> 232.04 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	91 <b>Pa</b> 231.04 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	92 <b>U</b> 238.03 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	93 <b>Np</b> 237.05 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	94 <b>Pu</b> (244) 5f <sup>6</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	95 <b>Am</b> (243) 5f <sup>7</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	96 <b>Cm</b> (247) 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	97 <b>Bk</b> (247) 5f <sup>8</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	98 <b>Cf</b> (251) 5f <sup>10</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	99 <b>Es</b> (252) 5s <sup>11</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	100 <b>Fm</b> (257) 5f <sup>12</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	101 <b>Md</b> (258) 5f <sup>13</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	102 <b>No</b> (259) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	103 <b>Lr</b> (262) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	

Atomic number — 26 **Fe** — Symbol  
 Atomic mass — 55.85  
 Outer electron configuration — 3d<sup>6</sup>4s<sup>2</sup>

	f														
*	58 <b>Ce</b> 140.12 5d <sup>1</sup> 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	59 <b>Pr</b> 140.91 4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	60 <b>Nd</b> 144.24 4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	61 <b>Pm</b> (145) 4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	62 <b>Sm</b> 150.36 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	63 <b>Eu</b> 151.96 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	64 <b>Gd</b> 157.25 5d <sup>1</sup> 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	65 <b>Tb</b> 158.93 4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>	66 <b>Dy</b> 162.50 4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	67 <b>Ho</b> 164.93 4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>	68 <b>Er</b> 167.26 4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup>	69 <b>Tm</b> 168.93 4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup>	70 <b>Yb</b> 173.04 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	71 <b>Lu</b> 174.97 5d <sup>1</sup> 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	Lanthanides
†	90 <b>Th</b> 232.04 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	91 <b>Pa</b> 231.04 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	92 <b>U</b> 238.03 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	93 <b>Np</b> 237.05 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	94 <b>Pu</b> (244) 5f <sup>6</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	95 <b>Am</b> (243) 5f <sup>7</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	96 <b>Cm</b> (247) 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	97 <b>Bk</b> (247) 5f <sup>8</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	98 <b>Cf</b> (251) 5f <sup>10</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	99 <b>Es</b> (252) 5s <sup>11</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	100 <b>Fm</b> (257) 5f <sup>12</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	101 <b>Md</b> (258) 5f <sup>13</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	102 <b>No</b> (259) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>0</sup> 7s <sup>2</sup>	103 <b>Lr</b> (262) 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	Actinides

© 2010 Pearson Education, Inc.

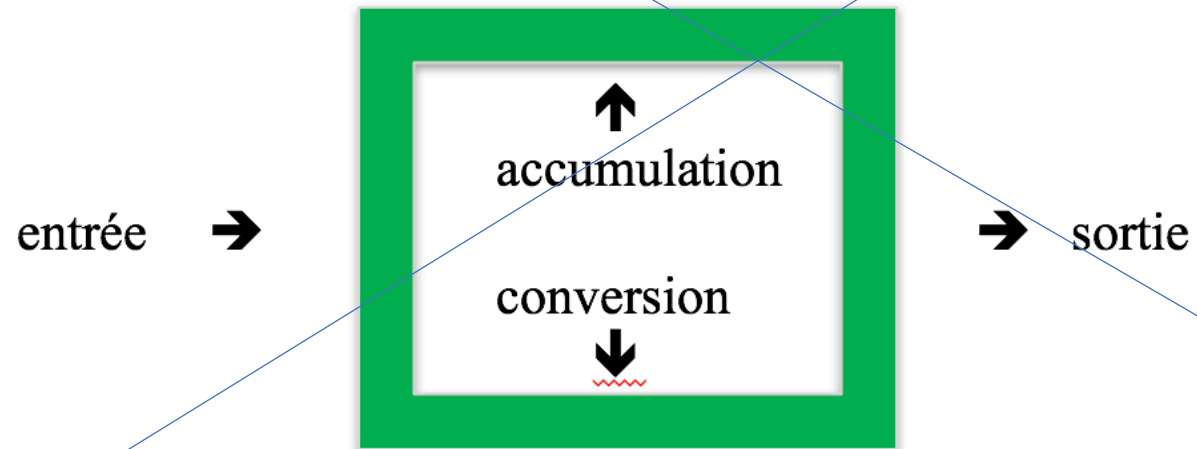


## Section C.2. Principe du bilan matière

En anglais, *principle of materials balance*.

Essentiellement, le principe de conservation de la masse (oublions la conversion masse-énergie de la relativité spéciale...).

Dans cette section, *taux = masse/temps*



$$\text{taux d'entrée} = \text{taux d'accumulation} + \text{taux de conversion} + \text{taux de sortie}$$

## Section C.3. Extraction, transport, raffinage (MHC 5.1)

**Pétrole, huile, gaz:** hydrocarbures simples et gazeux tels méthane  $\text{CH}_4$ , butane  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , propane  $\text{C}_3\text{H}_8$ , ou plus complexes et liquides comme l'heptane  $\text{C}_7\text{H}_{16}$ , octane  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ , nonane  $\text{C}_9\text{H}_{20}$ .

L'existence de combustibles fossiles nécessitent des pression et température élevées et autres conditions géologiques particulières, qui sont présentes seulement dans certaines régions.

Exploitation dictée par la rentabilité. Impact sur le développement d'autres types d'énergie. Évolue avec la technologie et l'accessibilité à d'autres types de combustibles non conventionnels: sables bitumineux, gaz/huile de schiste, exploitation en mer, gaz naturel, fracturation hydraulique, etc. Ceci affecte les ressources et réserves.

## Section C.4. Pollution thermique (MHC 5.2)

Dans les centrales électriques et nucléaires, la majorité de l'énergie thermique n'est pas convertie en énergie électrique, mais en *chaleur perdue* (dans l'air ou l'eau).

Centrales nucléaires: refroidies par l'eau à un taux 2 ou 3 fois plus élevé que le taux de production d'électricité.

Centrales électriques à pétrole: 10% de l'énergie échappée dans l'atmosphère; plus efficace que le nucléaire et demande beaucoup moins d'eau.

Centrales au charbon : efficacité 37-42%. Centrales au gaz naturel : 43-49%

Impact du refroidissement à l'eau: réchauffement de l'eau, affecte l'écosystème, la faune et animaux aquatiques, etc.

**Efficacité**

$$\eta = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie utile} + \text{énergie perdue}}$$

**Cas général:** efficacité  $\eta = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$

$$\frac{\text{waste}}{E_{\text{out}}} = \frac{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}{E_{\text{out}}} = \frac{E_{\text{in}}}{E_{\text{out}}} - 1 = \frac{1}{\eta} - 1$$

**MHP #5.1.** Si une centrale a une efficacité de 40%, quel est le rapport de la chaleur perdue à l'énergie électrique produite? (Rép. 1.5)

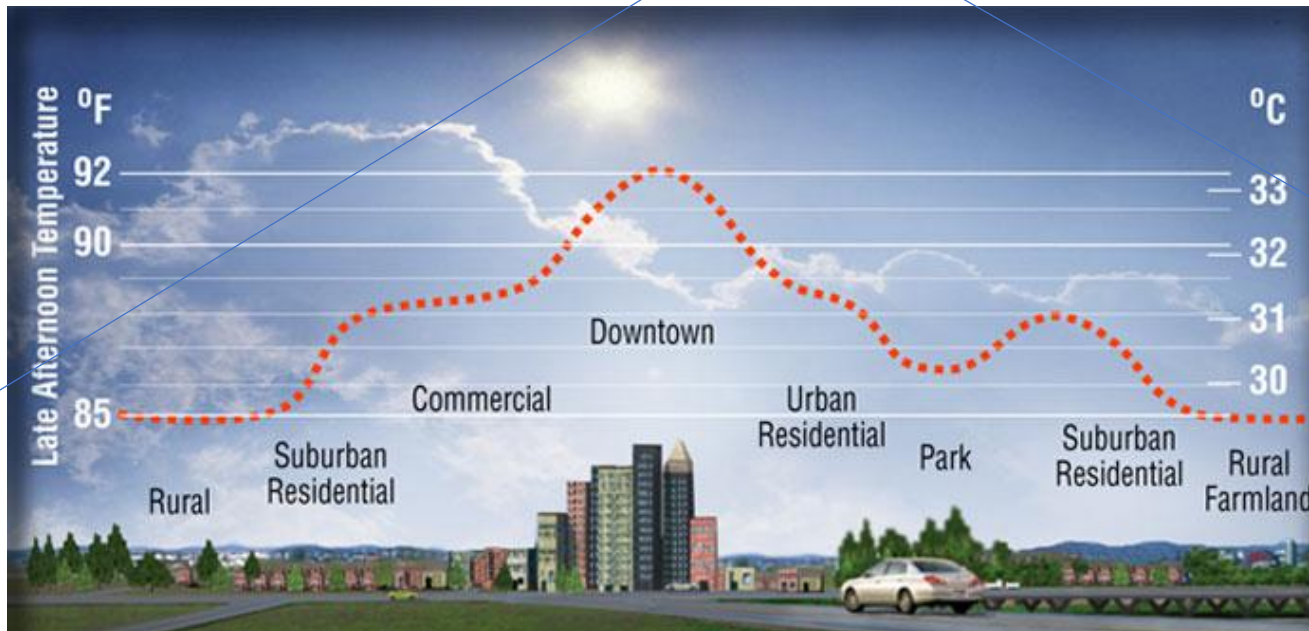
**MHP #5.2** Si une centrale a une efficacité de 30%, quel est le rapport de la chaleur perdue à l'énergie électrique produite? (Rép. 2.3)

**MHP P 5-4, Exemple 5.1** Une centrale électrique a un taux de 1000 MWe avec une efficacité de 40%. Quel débit (vol/s) minimal d'eau est requis pour retirer la chaleur perdue, pour que l'eau réchauffe de 10 °C?  
(Rép. 36 m<sup>3</sup>/s)

## Section C.5. Ilot de chaleur urbain (MHC 5.3)

Chaleur produite par la société: concentrée en certains endroits, moyenne globale beaucoup plus faible que la chaleur solaire; chaleur générée par les bâtiments et les véhicules; absence de mécanisme de refroidissement (évaporation par l'eau due à l'asphalte et aux drains); air climatisé relâche de la chaleur dans l'environnement. À Edmonton, vers 1990, l'aéroport municipal était env. 1.5 °C plus chaud que l'aéroport international.

<http://heatisland.lbl.gov/>



## Section C.6. Pollution atmosphérique et son impact (MHC 5.4, 5.5)

### Composition de l'air (sec et propre)

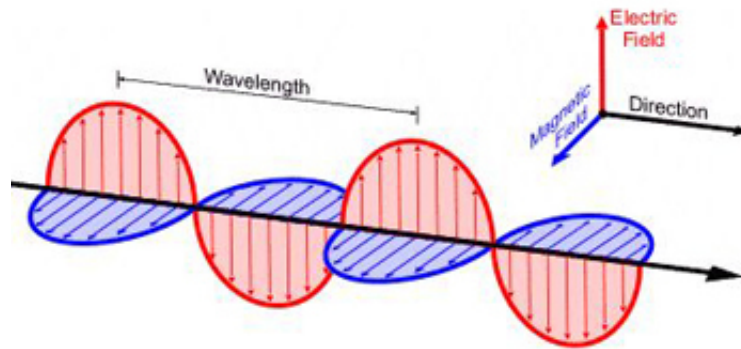
- Azote 78.08% (par volume)
- Oxygène 20.95%
- Argon 0.93%
- CO<sub>2</sub> 405 ppm (ppm au volume,  
<https://www.co2.earth/>)
- Néon 18 ppm
- Hélium 5.2 ppm
- Méthane 1.8 ppm
- Krypton 1.1 ppm
- Oxyde d'azote 0.3 ppm
- Hydrogène 0.5 ppm
- Ozone 0.01 ppm

## Section C.7. Rayonnement électromagnétique et corps noir (MHC 6.1-6.3)

Au sens classique (c.-à-d. non quantique), *la lumière est une onde* de longueur d'onde  $\lambda$ , de fréquence  $f$  et de vitesse  $c$ , reliées par

$$c = \lambda f$$

Vitesse de la lumière dans le vide  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \cong 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$



*Intensité*  $I = \frac{P}{4\pi r^2}$  en W/m<sup>2</sup> à distance  $r$  d'une source de puissance  $P$

Pour deux distances  $r_1$  et  $r_2$ , on trouve

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

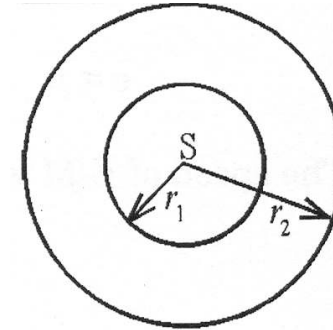


Figure 6-3 Inverse Square Law

*Constante solaire* intensité  $I$  par le soleil au niveau supérieur de l'atmosphère de la planète considérée

Constante solaire de la Terre :  $I = 1368 \text{ W/m}^2$

**Exemple:** pour  $\lambda = 4 \mu\text{m}$ , calculez (a)  $f$  et (b)  $E = hf$   
(Rép. (a)  $7.5\text{E}13 \text{ Hz}$ , (b)  $4.97\text{E}-20\text{J} = 0.31 \text{ eV}$ )



## Caractéristiques de la courbe

### 1. Maximum à (*Loi de Wien*)

$$\lambda_m \text{ (nm)} = \frac{2.8972 \times 10^6 \text{ nm} \cdot \text{°K}}{T \text{ (°K)}}$$

Le soleil a  $T = 6000 \text{ K}$ , donc  $\lambda_m = 485 \text{ nm}$ , qui est au centre du spectre em: toutes les longueurs d'onde à peu près égales, d'où la lumière blanche

Si  $T = 2000 \text{ K}$ ,  $\lambda_m = 1450 \text{ nm}$  est dans l'infrarouge. Donc, la longueur d'onde *visible* est surtout dans le rouge.

### 2. *Loi de Stefan*

$$I(T) = \sigma T^4, \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Donne l'*aire totale* sous la courbe (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ).  $\sigma =$  constante de Stefan

## Section C.8. Rayonnement solaire (MHC 6.4)

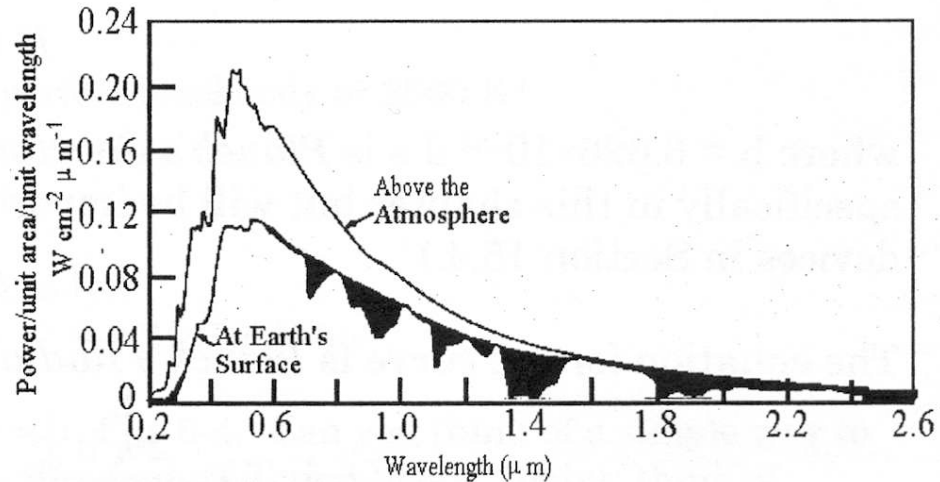


Figure 6-5 Solar Radiation at the Earth.

Courbe similaire au corps noir.

Les zones sombres montrent l'*absorption d'intensité* par les molécules d'eau et de dioxyde de carbone dans l'infrarouge. Environ 20% de l'énergie solaire est ainsi absorbée.

31% de l'intensité est diffusée ou réfléchi dans l'atmosphère

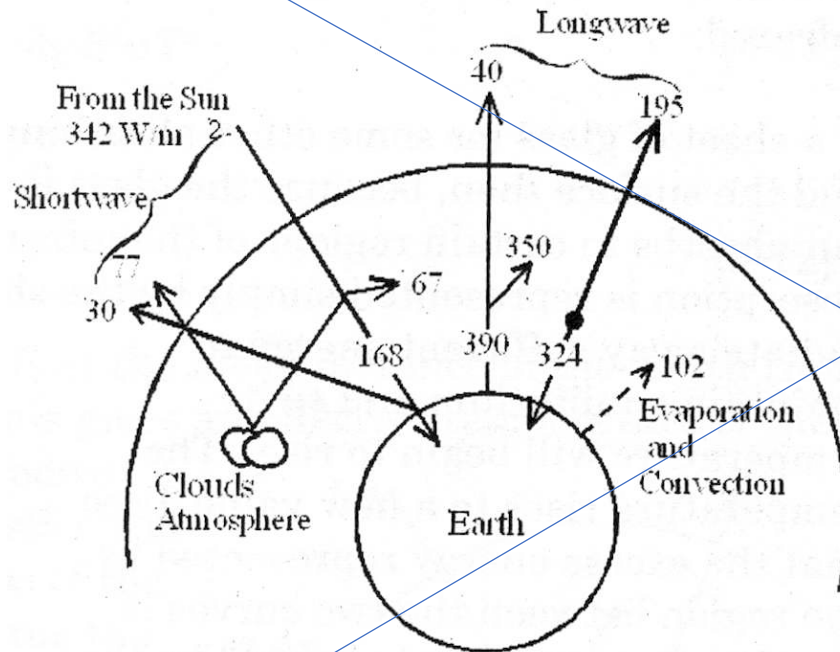
**Albédo  $\alpha$**  : (nom masculin) fraction de  $I$  perdue

Planète	$\alpha$
Terre	0.31
Lune	0.07
Mars	0.16
Uranus	0.30

Vu que  $\alpha_{\text{Terre}}$  est grande, la Terre est plus brillante.

**MHC #6.12** Refaites l'exemple 6.11 en tenant compte de l'albédo terrestre. (Rép. 255 °K ou -18 °C)

## Section C.9. Bilan énergétique de l'atmosphère terrestre (MHC 6.5)



**Figure 6-6** Energy Balance in the Earth's Atmosphere. All numbers are in  $\text{W/m}^2$ . The arrow heads indicate where the energy is deposited; the arrow tails, where it originates.

Vous pouvez trouver d'autres schémas semblables en cherchant "Energy balance in Earth's atmosphere" ou "bilan énergétique de l'atmosphère terrestre"

## Section C.10. Effet de serre (MHC 6.6-6.9)

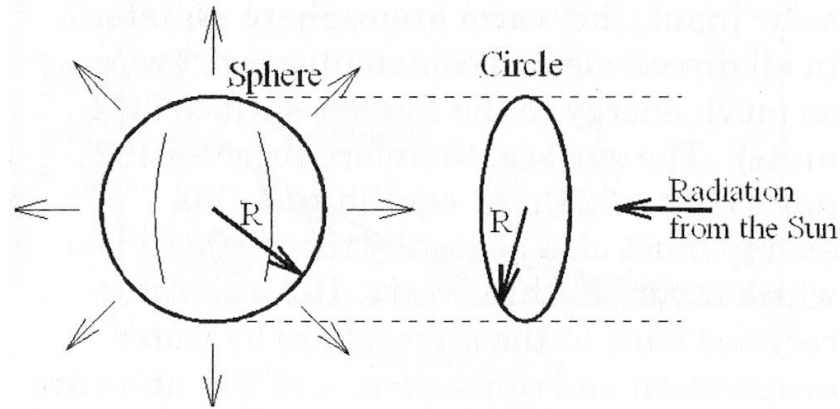


Figure 6-8 The Energy Balance of the Earth.

Puissance absorbée ( $P_A$ ) par le disque et redistribuée sur la surface sphérique de la Terre

$$P_A = \pi R^2 I_0 \rightarrow I = \frac{P_A}{4\pi R^2} = \frac{\pi R^2 I_0}{4\pi R^2} = \frac{I_0}{4}$$

où  $I_0$  est la constante solaire (définie en p. 40).

**Exemple** Pour la Terre,  $I = \frac{I_0}{4} = \frac{1368}{4} = 342 \text{ W/m}^2$

## Relation empirique entre CO<sub>2</sub> et $T$

Relation exacte inconnue. Un point de repère utile est la variation de température  $\Delta T_d$  prédite advenant un doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Les valeurs généralement admises sont  $1.5 < \Delta T_d < 4.5$  °C

Équation 
$$\Delta T = \frac{\Delta T_d}{\ln 2} \ln \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) \rightarrow \rho = \rho_0 \times 2^{\frac{\Delta T}{\Delta T_d}}$$

$\Delta T$  : variation de température

$\Delta T_d$  : variation de température pour un doublement de concentration

$\rho$  : concentration au temps où on a  $\Delta T$

$\rho_0$  : concentration initiale

**Exemple** Si  $\Delta T_d = 3$  °C, quel est le  $\Delta T$  si  $\rho(1850) = 280$  ppm et  $\rho(1984) = 345$  ppm? (Rép. 0.9 °C)

**Exemple** Estimez le nombre de tonnes de carbone dans l'atmosphère correspondant à 315 ppm de CO<sub>2</sub> (1957), 355 ppm (1990) et 367 ppm (1997). Supposez la masse totale d'air  $5.1 \times 10^{18}$  kg. La densité de l'air à  $P = 1$  atm et  $T = 0$  °C vaut 1.29 kg/m<sup>3</sup>. Rappelez-vous de la p. 4 que

$$\left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{[\text{ppm}]_w}{22.4} \times \frac{273}{T(^{\circ}\text{K})} \times \frac{P (\text{atm})}{1 \text{ atm}}$$

(Rép. 667 Gtonnes, 752 Gtonnes, 777 Gtonnes)

**Facteur de conversion** L'exemple nous montre que

$$1 \text{ ppm CO}_2 \longleftrightarrow 2.12 \text{ Gtonnes C}$$

Cependant, la consommation de carbone n'est pas suffisante pour prédire la concentration de CO<sub>2</sub>. Une partie du carbone libéré dans l'atmosphère peut être absorbé par les océans, ou capté par photosynthèse.

Soit  $\Delta C$ , un changement de la quantité de carbone. Il est utile de définir la quantité

$$\text{fraction de } C \text{ atmosphérique} = \frac{\Delta C (\text{atmosphère})}{\Delta C (\text{total émis})}$$

	biomasse :	0.9 Gtonnes/an
+	énergie fossile:	5.6 Gtonnes/an
=	<b>total</b>	<b>6.5 Gtonnes/an</b>

Ce qui donne une émission totale de 3.1 ppm de CO<sub>2</sub>/an, avec le facteur de conversion. Si la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère croît de 1.5 ppm/an, la fraction ci-dessus est **0.48**

**Exemple** Utilisez le modèle exponentiel pour écrire une fonction de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère en fonction du temps, sachant que  $\rho(1965) = 320$  ppm et  $\rho(1990) = 355$  ppm. Que vaut  $k$  ? En quelle année, la concentration sera le double de celle de l'époque pré-industrielle, alors de 288 ppm? (Rép.  $k = 0.41\%$  par an, 2100)



**Exemple** Modèle gaussien, selon lequel

$$N(t) = N_M \exp\left(-\frac{(t - T_M)^2}{2\sigma^2}\right) = N_M \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

$$Q_\infty = \sqrt{2\pi}\sigma N_M$$

$N$  : taux d'échappement de carbone (Gtonne/an)

$N_M = N$  maximum

$T_M$  : temps où  $N$  est maximum

$Q_\infty$  : quantité totale de carbone libéré

**Exemple** Supposez que l'échappement total mondial du carbone dû à l'utilisation du combustible fossile soit équivalent à brûler 200 000 quads de charbon à raison de 25.2 Mtonnes C par quad. Le taux d'échappement de carbone en 1980 était de 5.2 Gtonnes par an. Si le taux maximum d'émission est 33 Gtonnes C par an, déterminez en quelle année ce maximum sera atteint. (Rép. 2096)

Si des CFC sont émis et retirés à la fois, alors le principe du bilan matière (Section C.2) devient ici :

Taux d'accroissement = taux d'émission – taux d'élimination

Si le taux d'émission =  $P$ , on obtient

$$\frac{dm(t)}{dt} = P - \frac{1}{\tau}m(t)$$

Si  $P$  est constant, la masse à l'équilibre est obtenue en posant  $dm/dt = 0$ , d'où

$$m(\infty) = P\tau$$

et la solution

$$m(t) = m_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + m_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = (m_0 - m_\infty) e^{-\frac{t}{\tau}} + m_\infty$$

## **Chapitre D**

Aucune question tirée de la section D.1 qui est une révision, mais ses concepts sont utilisés par la suite (loi d'Ohm, résistivité et température, circuits en série, puissance électrique). Questions tirées des sections D.3, D.4, D.5 et D7.

# **PHYSQ 261 : Physique de l'énergie et de l'environnement**

**Section D : Électricité et magnétisme**  
**MHC, chapitres 7, 8, 9**

### D.1.3. Résistance et loi d'Ohm (MHC 7.4)

Le concept de résistance est important pour évaluer la perte d'énergie sous forme de chaleur (e.g.  $P = RI^2$ )

*Loi d'Ohm*

$$V = RI$$

*Valide seulement pour les matériaux ohmiques*

Unité de  $R$  : ohm ( $\Omega$ )

*Résistivité*  $\rho$

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

**Exemple** Considérez une résistance cylindrique. Si  $R = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $\rho = 1.5 \times 10^{-8} \text{ }\Omega \text{ m}$  et que sa longueur est 12 mm, quel est son rayon? (Rép.  $0.14 \text{ }\mu\text{m}$ )

Relation avec la température  $\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$

$\alpha$  : coefficient thermique de résistivité

$\rho_0$  est la résistivité à une température donnée

Résistance vs température  $R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$

**Table 25.2** Temperature Coefficients of Resistivity  
(Approximate Values Near Room Temperature)

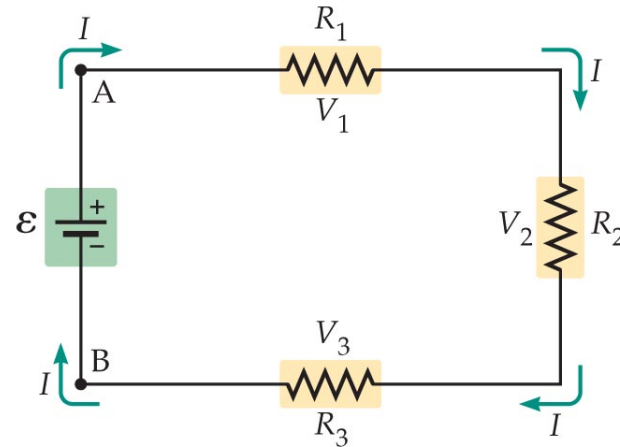
Material	$\alpha [(\text{°C})^{-1}]$	Material	$\alpha [(\text{°C})^{-1}]$
Aluminum	0.0039	Lead	0.0043
Brass	0.0020	Manganin	0.00000
Carbon (graphite)	-0.0005	Mercury	0.00088
Constantan	0.00001	Nichrome	0.0004
Copper	0.00393	Silver	0.0038
Iron	0.0050	Tungsten	0.0045

## D.1.4. Circuits électriques (MHC 7.5)

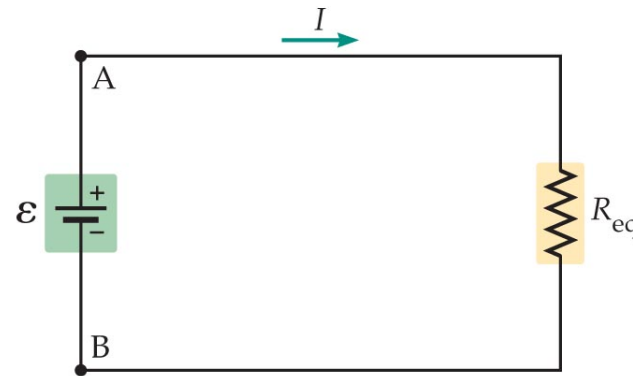
### *Résistances en série*

Mêmes  $I$ , on additionne les  $V$

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots$$



(a) Three resistors in series



(b) Equivalent resistance has the same current

© 2010 Pearson Education, Inc.

## D.1.5. Puissance électrique (MHC 7.6)

*Puissance électrique*       $P = VI$

Si  $V = RI$ , alors  $P = RI^2 = \frac{V^2}{R}$

**Exemple** Un grille-pain (toaster) a un câble d'alimentation de résistance  $0.020 \Omega$  en série avec un élément chauffant de  $9.6 \Omega$ . Si les bornes du grille-pain sont branchées à  $120 \text{ V}$ , combien de puissance est dissipée (a) dans le câble, (b) dans l'élément?  
(Rép. (a)  $3.1 \text{ W}$ , (b)  $1.5 \text{ kW}$ )



# Force magnétique

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

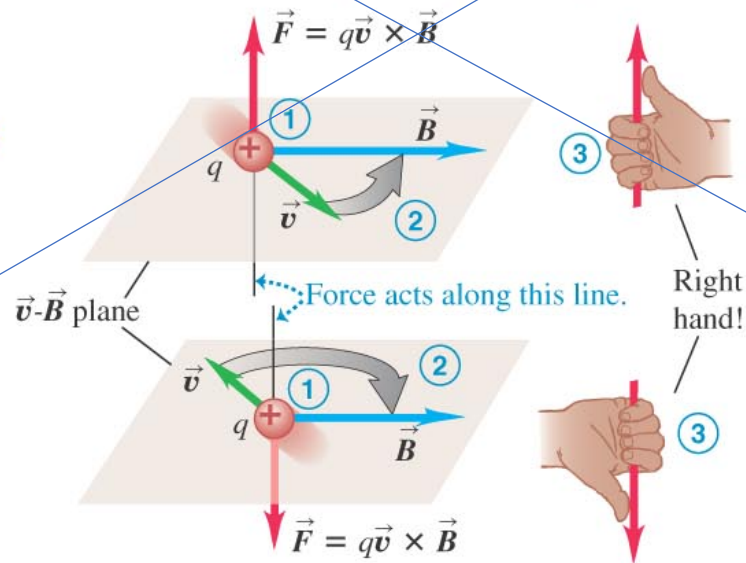
$$F_B = qvB \sin \theta$$

Unités : Tesla (T), Gauss (G)  $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$

(a)

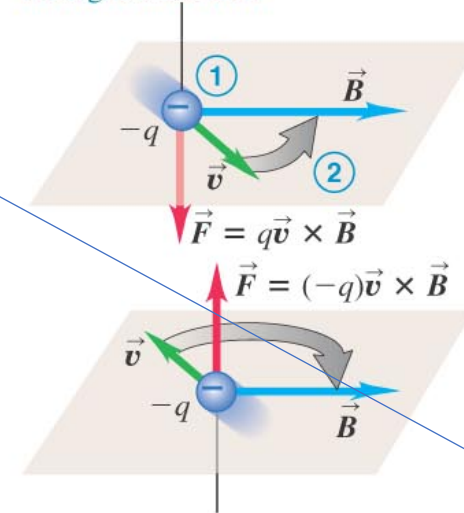
**Right-hand rule** for the direction of magnetic force on a **positive** charge moving in a magnetic field:

- ① Place the  $\vec{v}$  and  $\vec{B}$  vectors tail to tail.
- ② Imagine turning  $\vec{v}$  toward  $\vec{B}$  in the  $\vec{v}$ - $\vec{B}$  plane (through the smaller angle).
- ③ The force acts along a line perpendicular to the  $\vec{v}$ - $\vec{B}$  plane. Curl the fingers of your *right hand* around this line in the same direction you rotated  $\vec{v}$ . Your thumb now points in the direction the force acts.



(b)

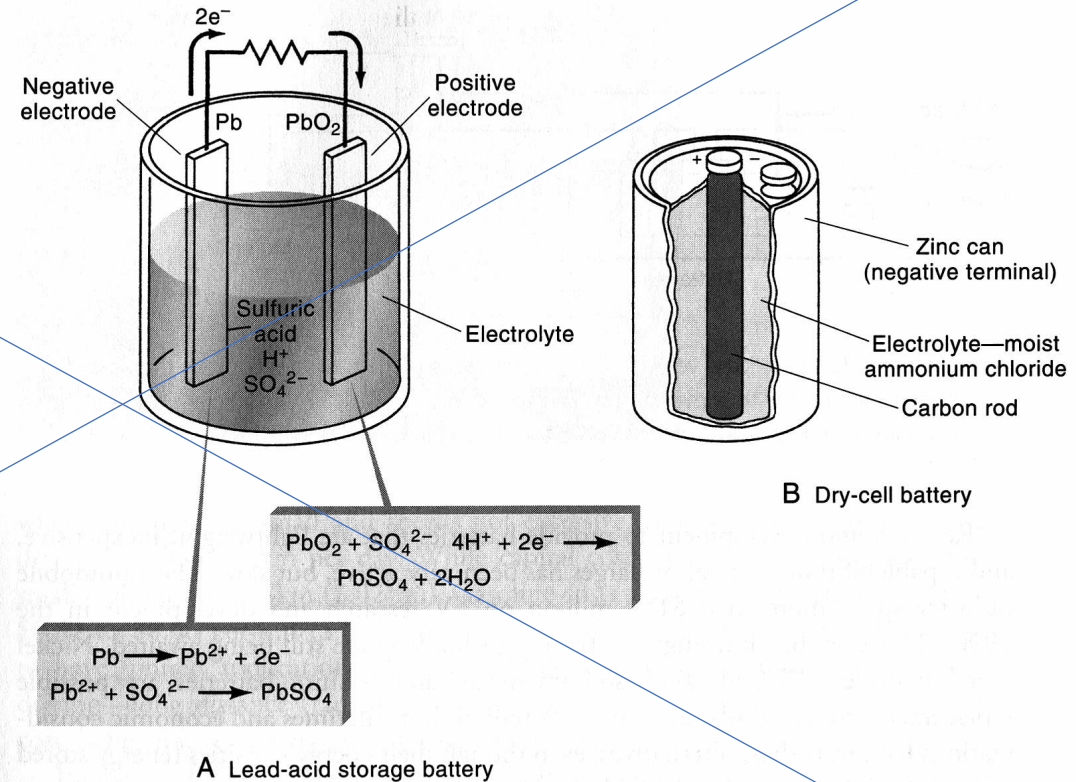
**If the charge is negative**, the direction of the force is **opposite** to that given by the right-hand rule.



## Section D.2. Piles (MHC 7.7)

Conversion d'énergie chimique en énergie électrique.

**Principe** 2 électrodes et une solution électrolyte. Les électrodes perdent des ions (une plus –la *négative*– plus vite que l'autre)

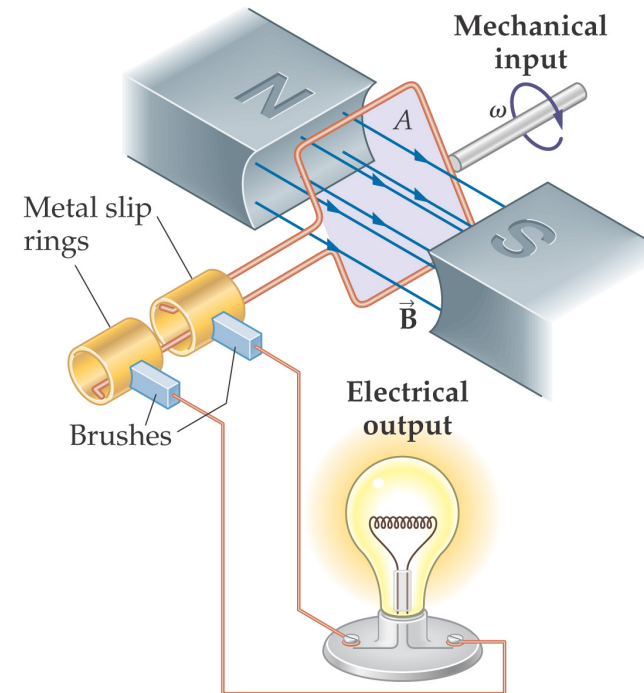


## Section D.3. Générateur à courant alternatif (MHC 8.4)

Fém induite – boucle en rotation

$$V = \underbrace{NBA\omega}_{V_{\max}} \cos(\omega t)$$

Transformation d'énergie mécanique (qui fait tourner la boucle) en énergie électrique (produite par induction).



[http://www.walter-fendt.de/ph14e/generator\\_e.htm](http://www.walter-fendt.de/ph14e/generator_e.htm)

## Section D.4. Puissance dans des circuits AC (MHC 8.5)

Puissance instantanée

$$P(t) = V(t)I(t) = V_p I_p \cos^2 \omega t$$

Puissance moyenne

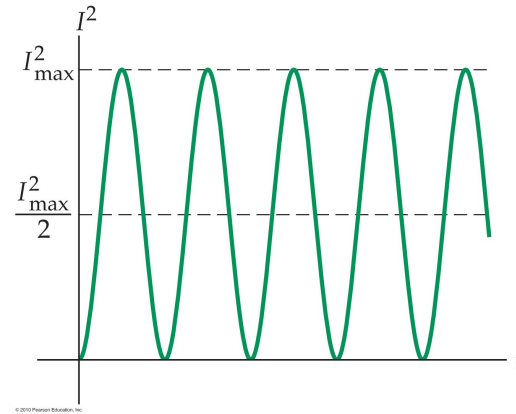
$$P_{\text{av}} \text{ ou } P_{\text{rms}} = \frac{1}{2} P_{\text{max}} = \frac{1}{2} V_{\text{max}} I_{\text{max}} = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}$$

*Valeurs efficaces* (ou rms)

$$I_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{\text{max}}, \quad V_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{\text{max}}$$

$$P_{av} \equiv RI_{av}^2 = \frac{1}{2}RI_{max}^2 = RI_{rms}^2$$

$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2}{R}$$



**Exemple** En Europe, la valeur efficace des voltages dans les maisons est typiquement égale à 240 V. Quelle est le voltage maximal correspondant? Quel est  $V_{max}$  si  $V_{rms} = 120$  V? (En Amérique du Nord, on a  $f = 60$  Hz. En Europe et ailleurs,  $f = 50$  Hz.) (Rép. 340 V, 170 V)

**Exemple** Une ampoule de “75 watt” utilise une *puissance moyenne* de 75 W quand elle est branchée à  $V_{rms} = 120$  V. (a) Calculez la résistance de l’ampoule. (b) Quel est le courant maximal de l’ampoule? (c) Quelle est la puissance maximale de l’ampoule à tout instant?  
(Rép.(a) 190 ohms, (b) 0.88 A, (c) 150 W)

## Section D.5. Transport de courant AC (MHC 8.6)

**Exemple** 10 résidences ont besoin de 1000 W chacune. La puissance totale requise vaut donc \_\_\_\_\_

Si la puissance est transmise à 120 V, on obtient  $I =$  \_\_\_\_\_

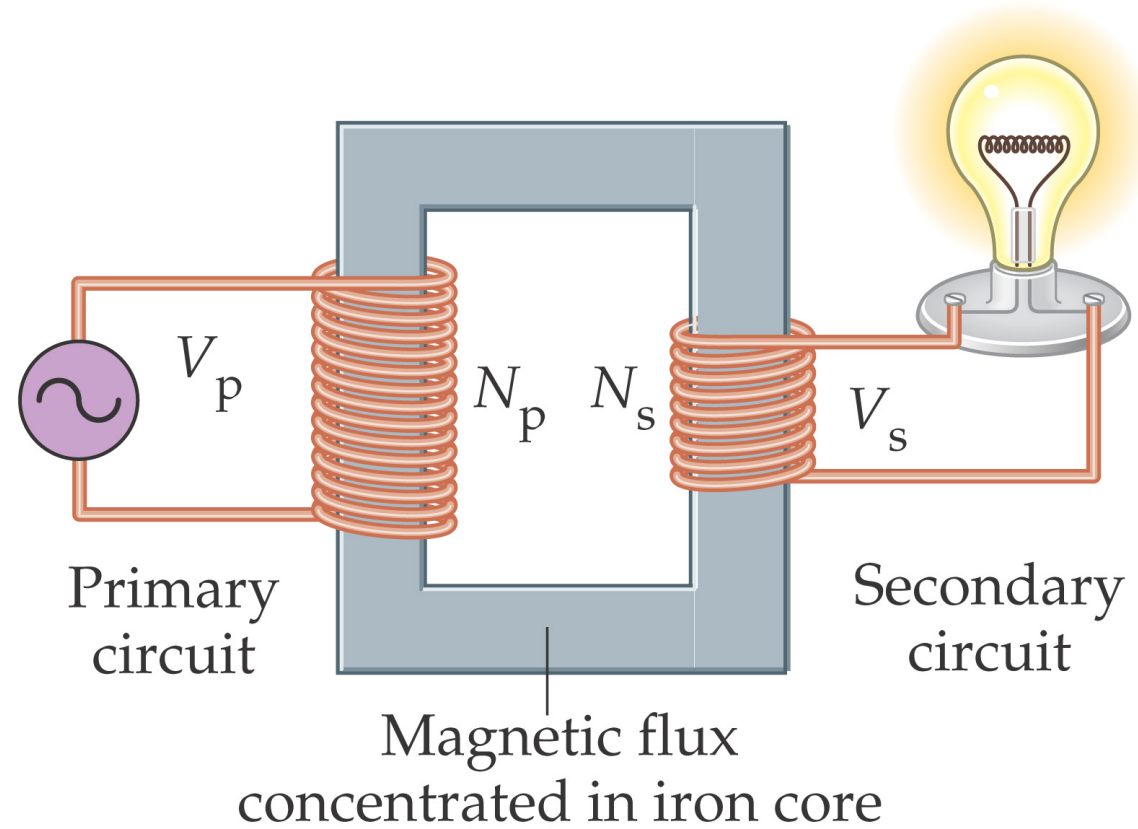
Si la ligne de transport a une résistance totale de 1 ohm, alors la puissance dissipée est de \_\_\_\_\_. Pour alimenter les 10 résidences, la centrale devrait donc fournir une puissance totale de \_\_\_\_\_.

L'efficacité serait donc de \_\_\_\_\_%

**Solution pour améliorer l'efficacité:** réduire  $I$  en transmettant à un plus grand voltage  $V$ .

**Exemple** Revoir l'exemple avec 1200 V. Efficacité = \_\_\_\_\_%

Un *transformateur* change le voltage entre l'entrée (1) et la sortie (2)



Pour la bobine primaire

$$V_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t}$$

et pour la bobine secondaire

$$V_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t}$$

d'où

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Puissance  $P = V_1 I_1 = V_2 I_2$  implique  $\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$



## Section D.7. Transport d'énergie électrique (MHC 9.2)

Puissance de production :  $P_{\text{prod}} = VI$

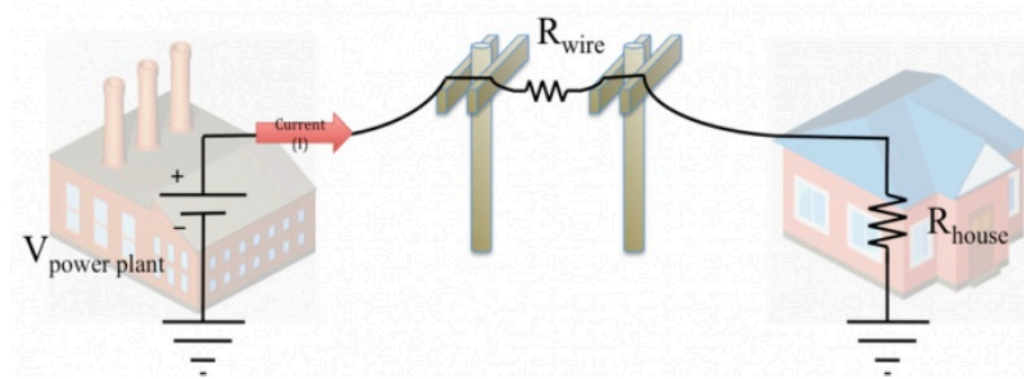
Taux de dissipation :  $P_{\text{chaleur perdue}} = RI^2$

Réduction de pertes en augmentant  $V$  (via transformateur) et réduisant ainsi  $I$ . Typiquement  $V \approx 1000$  kV, en courant alternatif (AC).

**Problème** Si on veut augmenter la puissance fournie, et qu'on maintient  $V$ , alors  $I$  augmente, et  $P_{\text{chaleur}}$  d'autant plus. Des solutions sont présentées ci-dessous.



## Lignes de transport



Le schéma représente le générateur (*plant*), le transport (*wire*) et les résidences (*house*).

Puissance perdue dans le transport:  $P_{\text{trans}} = V_{\text{trans}} I_{\text{trans}} = R_{\text{trans}} I_{\text{trans}}^2$

Puissance générée:  $P_{\text{gén}} = V_{\text{gén}} I_{\text{gén}}$

Comme  $I$  est le même partout, nous obtenons

$$P_{\text{trans}} = R_{\text{trans}} \left( \frac{P_{\text{gén}}}{V_{\text{gén}}} \right)^2$$

Débit volumique  $Q = vA$

Bernoulli  $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy = \text{constante}$

En divisant par  $\rho g$  et utilisant  $z$  plutôt que  $y$ , on obtient la **charge totale** (*head energy*)  $H$ :

$$H = \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z$$

que l'on utilise pour calculer la puissance :

$$\begin{aligned} \text{puissance} &= \frac{\text{poids}}{\text{volume}} \frac{\text{volume}}{\text{temps}} \frac{\text{énergie}}{\text{poids}} \\ &= (\rho g)(Q)(H) \end{aligned}$$

## Section D.8. Impact sur la santé (MHC 9.3)

### Énergie des ondes EM

La relation  $E = hf$  donne (avec  $f = 60$  Hz)  $4 \times 10^{-32}$  J qui est beaucoup plus petit que l'énergie de liaison moléculaire (quelques eV ou  $10^{-19}$  J).

Voir MHC p. 9-6. Selon leur réf. 9, pas de liens directs avec le cancer (leucémie).

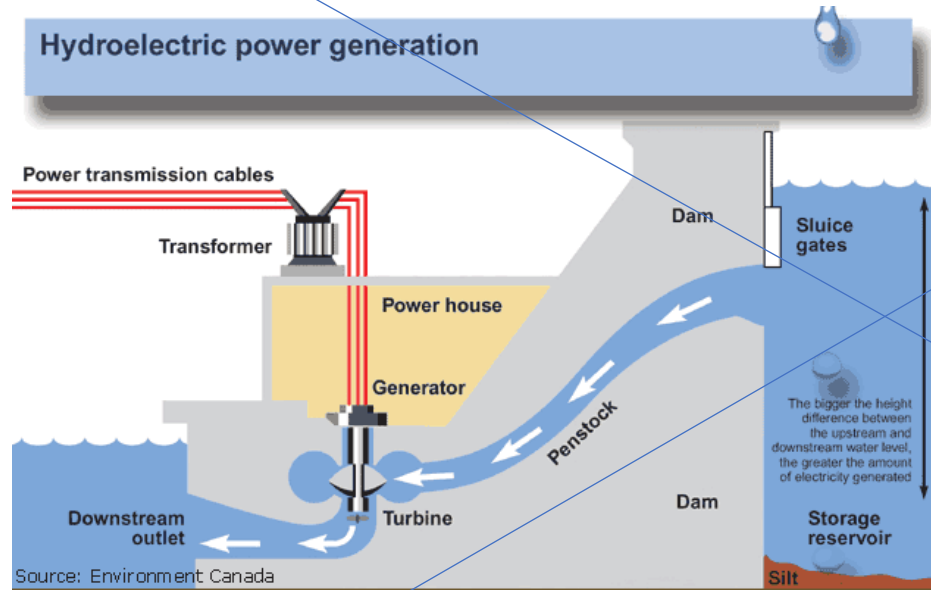
### Champ B produits

Loi d'Ampère:  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

$B$  décroît avec la distance

Valeurs typiques :  $B(\text{sous ligne de } 765 \text{ kV}) = 1 \text{ G}$ ,  $B(\text{terrestre}) = 0.5 \text{ G}$

## Section D.9. Hydroélectricité (MHC 9.4)



Sir Adam Beck Hydroelectric Power Station (Ontario)

## **Chapitre E**

Sections E.1 (sauf pp 11-14), E.2 (sauf pp 16-17, 25), E.3-5, E.6 (exemple p.43), E.9 et E.10.

# **PHYSQ 261 : Physique de l'énergie et de l'environnement**

**Section E : Physique nucléaire  
MHC, chapitres 10, 11, 12, 13**

## Section E.1. Physique nucléaire (MHC 10.1 à 10.3)

*Isotopes*  ${}^A_Z X$  ou  $X(A, Z)$

*Nombre de masse*  $A$  = nombre de nucléons (p + n)  
 $\approx$  masse molaire de  
l'élément (g/mol)

*Numéro atomique*  $Z$  = nombre de protons (identifie l'élément)

Particule	Masse	Charge
Proton	$1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938.27 \text{ MeV}$	$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Neutron	$1.6750 \times 10^{-27} \text{ kg} = 939.57 \text{ MeV}$	0
Électron	$9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 511 \text{ keV}$	$-e$



## *Équivalence masse-énergie*

$$E = mc^2$$

*Unité d'énergie* (électron-volt eV)

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

*Unité de masse atomique* (u)

$$1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J}/c^2 = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 5.4857990943 \times 10^{-4} \text{ u}$$

$$m_p = 1.00727646677 \text{ u}$$

$$m_n = 1.00866491597 \text{ u}$$

# Physique des particules pp. 11-14 (Facultatif)

**TABLE 32-5 The Fundamental Forces**

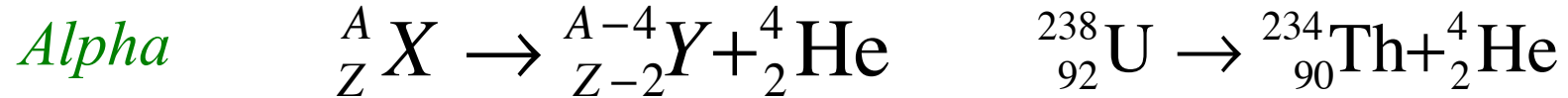
Force	Boson	Relative Strength	Range
Strong nuclear	Gluons	1	$\approx 1$ fm
Electromagnetic	Photons	$10^{-2}$	Infinite ( $\propto 1/r^2$ )
Weak nuclear	$W^\pm, Z^0$	$10^{-6}$	$\approx 10^{-3}$ fm
Gravitational	Gravitons	$10^{-43}$	Infinite ( $\propto 1/r^2$ )

© 2010 Pearson Education, Inc.

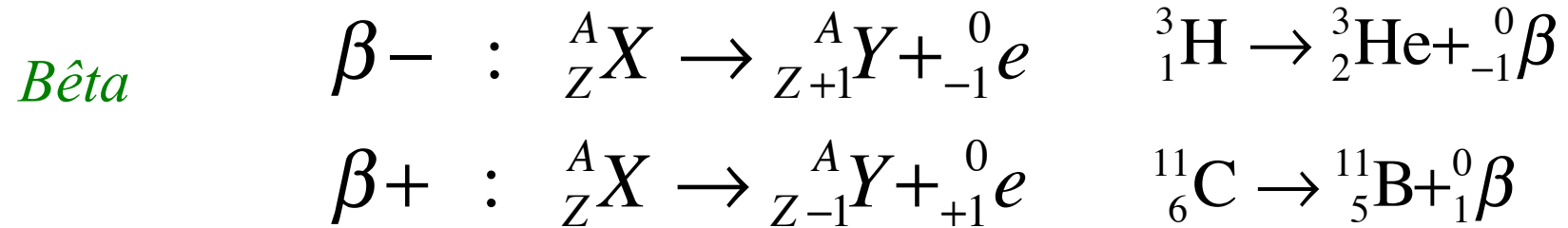
Atomes décrits par l'interaction électromagnétique. Particules ponctuelles

Noyaux décrits par les interactions em, forte et faible. Forme non ponctuelle.

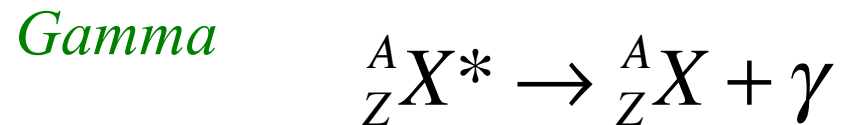
## Section E.2. Radioactivité (MHC 10.4, 10.5)



Noyaux positifs (+2e), bloqués par une feuille de papier ou 5 cm d'air



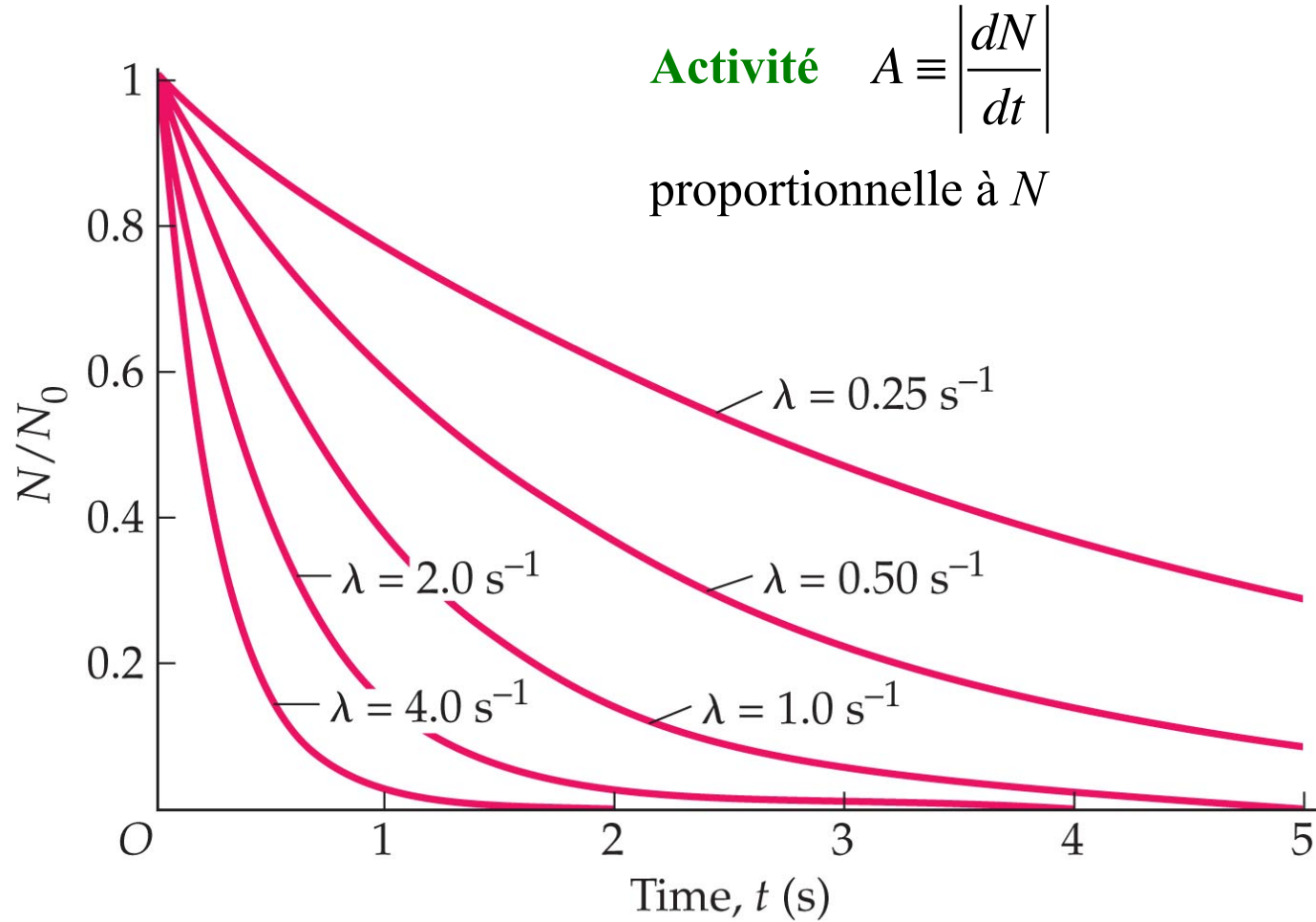
Peuvent parcourir plusieurs mètres dans l'air. Bloqué par quelques mm d'aluminium. Domageable si ingéré via air, nourriture, etc.



Requiert plus de protection: quelques cm de plomb, etc. Ondes em dont  $\lambda \approx 10^{-11}$  m .

Mathématiquement :  $\frac{dN}{dt} \propto N \rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda N$

Plus  $\lambda$  est grand, plus la décroissance est rapide.



## Demi-vie effective

**Demi-vie physique**  $T_{1/2,p}$  : temps après lequel la moitié d'un échantillon radioactif s'est désintégrée (discussion précédente).

**Demi-vie biologique**  $T_{1/2,b}$  : temps après lequel la moitié d'un isotope a été éliminée d'un organisme.

**Demi-vie effective**  $T_{1/2,e}$  : temps après lequel la moitié d'un isotope reste dans un organisme à cause de l'élimination et de la radioactivité.

$$e^{-\lambda_e t} \equiv e^{-\lambda_p t} \cdot e^{-\lambda_b t} \rightarrow \lambda_e = \lambda_p + \lambda_b \rightarrow T_{1/2,e}^{-1} = T_{1/2,p}^{-1} + T_{1/2,b}^{-1}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda_e t}$$

**Exemple MHC p. 10-8** De l'iode ingurgité par des humains est éliminé de sorte qu'il n'en reste que la moitié après 4 jours. Si de l'iode radioactif I(131) de demi-vie égale à 8.1 jours est injecté dans un patient, après combien de temps en restera-t-il 1%? (Rép. 18 jours)

## Section E.3. Réactions nucléaires (MHC 10.6)

**Réactions nucléaires** : *transmutations* de nucléides (généralement de stables en radioactifs). Effectuées par des réacteurs ou accélérateurs; pour que les particules chargées qui ciblent les nucléides franchissent la *barrière de Coulomb*

$$U_{Coul} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$$

La **section efficace de réaction** (en anglais, *reaction cross section*) est une *surface* qui décrit la probabilité d'une réaction. Une *collision* ne mène pas nécessairement à une *réaction*: la première sera mesurée par la *section efficace géométrique*, et la seconde par la section efficace de réaction.

Symbole:  $\sigma$

Unité: 1 barn =  $10^{-28}$  m<sup>2</sup>

$m$  = masse de matériau cible [g]

$A$  = masse molaire de la cible [g/mole]

$\frac{m}{A}$  = nombre de moles dans la cible

$n = \frac{N_a m}{A}$  = nombre de noyaux dans la cible

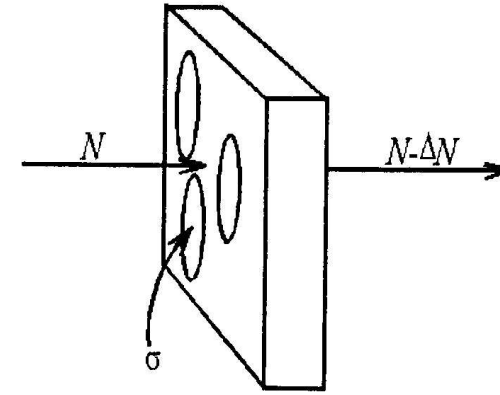


Figure 10-3 Absorption Cross Section

$\sigma_{\text{geom}}$  = surface, ou section, efficace de chaque noyau [ $\text{m}^2$ ]

$n\sigma_{\text{geom}} = \frac{N_a m \sigma_{\text{geom}}}{A}$  = surface totale de tous les noyaux

$N$  = nombre de particules incidentes sur la cible par  $\text{m}^2$  par s

$\Delta N$  = nombre de particules interceptées par la cible par s

$N_a = 6.0221413 \times 10^{23}$  nombre d'Avogadro

Si toute collision menait à une réaction, nous aurions

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N_a m \sigma_{\text{geom}}}{A} \rightarrow \Delta N = \frac{N_a m \sigma_{\text{geom}} N}{A}$$

mais une collision ne garantit pas une réaction! On remplace donc la “section géométrique efficace” par le concept de *section efficace de réaction*  $\sigma$ . Elle décrit non seulement l’aire géométrique de la surface mais tient compte aussi de la probabilité de réaction (qui dépend de la structure des noyaux, de l’énergie des particules incidentes, etc.)

**Table 10-3:** Neutron Absorption Cross Sections

Isotope	Cross section (barns)	Isotope	Cross section (barns)
$^1_1\text{H}$	0.332	$^{135}_{54}\text{Xe}$	$2.64 \times 10^6$
$^2_1\text{H}$	$5.2 \times 10^{-4}$	$^{157}_{64}\text{Gd}$	$2.54 \times 10^5$
$^{59}_{27}\text{Co}$	37	$^{197}_{79}\text{Au}$	99
$^{113}_{48}\text{Cd}$	$2 \times 10^4$	$^{235}_{92}\text{U}$	582
$^{115}_{49}\text{In}$	198	$^{238}_{92}\text{U}$	2720

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$$



## Section E.4. Énergie de liaison (MHC 10.7)

Considérez un noyau d'hélium, qui contient 2 protons et 2 neutrons. Leur masse totale vaut donc

$$2m_p + 2m_n = 2(1.007276 \text{ u}) + 2(1.008665 \text{ u}) = 4.031882 \text{ u}$$

D'autre part, le noyau de He(4,2) a une masse de 4.001506 u (masse de l'atome d'hélium moins deux électrons).

La *somme des constituants a une plus grande masse que le noyau total*, avec un écart de  $4.031882 \text{ u} - 4.001506 \text{ u} = 0.030376 \text{ u} = 28.3 \text{ MeV}/c^2$ .

Cette différence de masse correspond à l'*énergie de liaison B*, c.-à-d. l'énergie minimale nécessaire pour séparer le noyau d'hélium en ses constituants.

Pour l'hélium, cette énergie est de 28.3 MeV, soit  $B/A = 7.07 \text{ MeV}$  par nucléon (il y en a *quatre*).

**Rappel:**  $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2 = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$

L'énergie de liaison nucléaire vaut donc

$$B = \left( Zm_p + Nm_n - m_{\text{noyau}} \right) c^2$$

L'énergie de liaison par nucléon varie peu, généralement entre 8 et 9 MeV. Ceci montre que l'interaction forte nucléaire est de *courte portée*, sinon l'énergie de liaison par nucléon augmenterait au fur et à mesure que le nombre de nucléons augmente, ce qui n'est pas le cas.

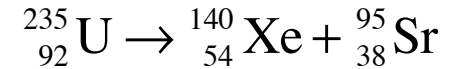
**Exemple MHC#10.18** Trouvez l'énergie de liaison par nucléons pour He(4,2), C(12,6), U(235,92).  
(Rép. 7.07 MeV, 7.68 MeV, 7.59 MeV)

Pour trouver l'énergie de liaison totale d'un noyau, on multiplie  
(énergie de liaison par nucléon)  $\times A$

**Exemple** Trouver l'énergie de liaison de U(235,92), Xe(140,54) et Sr(95,38)  
(Rép. 1784 MeV, 1161 MeV, 812 MeV)

## Section E.5. Fission nucléaire (MHC 10.8)

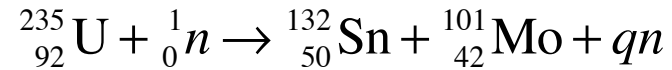
### Fission spontanée



De l'exemple précédent, on voit que 190 MeV serait libérée sous forme d'énergie cinétique des fragments, puis de la chaleur en frappant les atomes voisins.

Réaction rare. Moins commune que la *fission induite* par des neutrons à l'état thermique (*thermalized*) ou neutrons lents ( $K \approx 1/40$  eV  $\approx$  molécules à température de la pièce).

**Exemple** Combien de neutrons sont libérés par la réaction suivante?



(Rép.  $q = 3$ )

**Exemple** En supposant que 170 MeV soit libéré par fission, déterminez la masse minimum de U(235,92) requise pour produire  $8.4 \times 10^{19}$  J, soit les besoins énergétiques annuels des USA. (Rép.  $1.2 \times 10^6$  kg)

**Exemple** Un gallon d'essence libère environ  $2.0 \times 10^8$  J quand il est brûlé. Combien de gallons sont nécessaires pour libérer la même quantité d'énergie que 0.455 kg (ou 1 lb) de U(235,92) qui dégage 170 MeV par fission? (Rép.  $1.6 \times 10^5$  gallons)

Voir MHC bas de la p. 10-19, où ils expliquent que 1 kg de charbon produit  $2.7 \times 10^7$  J et 1 kg d'uranium produit  $5.9 \times 10^{11}$  J, soit 25 000 fois plus!

**Table 10-5:** Typical Energy Released in  $^{235}\text{U}$  Fission

Fragment Kinetic Energies	170 MeV
KE of 2 or 3 neutrons emitted	5
Prompt $\gamma$ -rays (~5 gammas)	6
~7 $\beta$ -particles	8
Fission Fragment Decay - Antineutrinos	12
-Gammas	6
Total	207 MeV

**Exemple** On voit qu'un joule correspond à

$$1 \text{ J} \times \frac{1.6 \times 10^{-13} \text{ MeV}}{1 \text{ J}} \times \frac{1 \text{ fission}}{200 \text{ MeV}} \approx 3 \times 10^{10} \text{ fissions}$$

**Exemple MHC 10.7:** A.  $E$  libéré par la fission de tous les noyaux de U-235 dans  $1 \text{ cm}^3$  de U naturel? (densité  $19000 \text{ kg/m}^3$ ) B. Masse d'eau à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  que cette énergie peut bouillir?

## Section E.6. Réacteurs nucléaires (MHC 11.1-5)

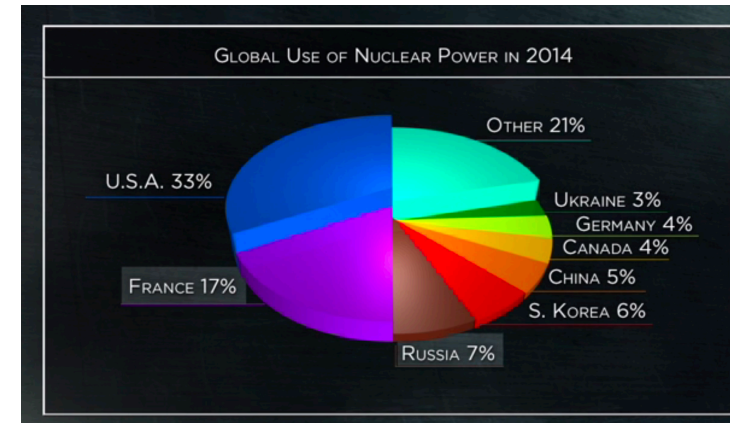
**But:** Établir et maintenir des réactions en chaîne contrôlées. Le combustible nucléaire est souvent l'uranium-235 (abondant à 0.72% de l'uranium naturel, l'uranium-238 l'est à 99.2745%), qui est le seul uranium *fissile*. L'U-235 est souvent *enrichi* de 0.72% à 3-4%.

Nucléaire = 11% de l'énergie électrique mondiale (US, Japon, France en produisent la moitié).

Réduction des émissions de carbone.

Risques d'accidents: Three Mile Island (1979, pas de décès immédiats, cancers), Chernobyl (1986, 30 morts immédiates et 3 fois plus ensuite), Fukushima (2011, suite à un tsunami). L'enfouissement des déchets radioactifs est un défi.

La durée de vie d'un réacteur est typiquement 30 à 40 ans.



## MHC #11.2

(a) Sachant qu'une fission émet  $E = 200$  MeV et qu'un réacteur à eau lourde spécifique produit 1000 MWe d'électricité avec un rendement de 30%, quelle est la masse d'uranium *naturel* requise *par jour* pour le fonctionnement en considérant seulement la fission d'uranium-235, ignorant ainsi les isotopes de plutonium produits? Supposez qu'un noyau d'uranium-235 produise 1 fission.

(b) Même question, pour un réacteur à eau ordinaire avec de l'uranium-235 enrichi à 3.5%.

(Rép. (a) 488 kg d'uranium naturel, (b) 100 kg d'uranium naturel)

## Section E.7. Contrôle, stabilité, sécurité (MHC 11.6,7)

Extraordinairement sécuritaire, si on tient compte de la quantité d'énergie produite en comparant avec d'autres sources. Pas d'émissions de gaz à effet de serre, pas d'émission toxique dans l'atmosphère, ne contribue pas aux changements climatiques, 100aine d'accidents mineurs sans décès.

Problèmes = fusion du coeur du réacteur (core meltdown) et déchets radioactifs.

*Three Mile Island*: 28 mars 1979 (12 jours après la sortie de *China Syndrome*), tournant dans l'industrie nucléaire mondiale, nettoyage complété en 1993 au coût de 1 milliard \$

*Tchernobyl*: 26 avril 1986, 56 décès directs, 4000 décès dûs aux retombées radioactives

*Fukushima Daiichi*: 11 mars 2011, série de malchances, aucun décès immédiat, peut-être quelques centaines dûs aux retombées dans les années à venir.

D'autres ressources et meilleure technologie (ex. Gaz naturel, fracturation hydraulique) diminue l'intérêt pour l'énergie nucléaire.



## Section E.8. Uranium (MHC 11.8)

**Table 11-2: "Reasonably Assured Resources" (RAR), Production and Use of Uranium<sup>1</sup>**

	RAR (units of 1000 tonnes)	Production in 2004 (t)	Tonnes used in 2004
Africa	530	6284	280
Americas			
Canada	345	11957	1700
USA	102	878	24145
Rest	164	300	750
Asia			
China	38	730	1260
Japan	0	0	7140
Khazakstan & Uzbekhistan	438	5806	0
Rest	46	270	3505
Australia	714	8982	0
Mid-East	30		0
Europe			
France	0	6	7185
Russian Fed.	132	3280	4740
Ukraine	58	800	2220
Rest	29	583	13565
<b>TOTAL</b>	<b>2626</b>	<b>40263</b>	<b>66490</b>

## Section E.9. Protection (MHC 12.1)

Particules alpha et bêta faciles à freiner (quelques cm de plastique). Si leur activité est grande ( $>10^{19}$  Bq), elles peuvent endommager le matériel de protection ou le chauffer.

Les particules gamma sont plus difficiles à freiner.

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}$$
$$\mu = \frac{\ln 2}{L_{1/2}}$$

$L_{1/2}$  est la distance après laquelle la moitié des gammas ont été arrêtées.

**Exemple MHC#12.3.** Un morceau de bois d'épaisseur égale à 5.0 cm entre une source de gammas et un détecteur réduit le taux d'un facteur 12. Quelle épaisseur additionnelle permettrait de réduire par un facteur 4 additionnel? (Rép. 2.8 cm)

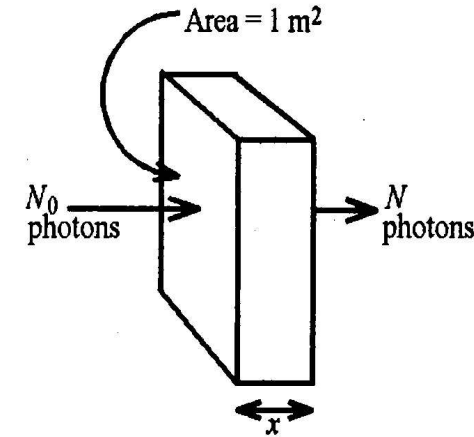


Figure 12-1. Attenuation of a Gamma Ray Beam

## Section E.9. Protection (MHC 12.1)

Particules alpha et bêta faciles à freiner (quelques cm de plastique). Si leur activité est grande ( $>10^{19}$  Bq), elles peuvent endommager le matériel de protection ou le chauffer.

Les particules gamma sont plus difficiles à freiner.

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}$$
$$\mu = \frac{\ln 2}{L_{1/2}}$$

$L_{1/2}$  est la distance après laquelle la moitié des gammas ont été arrêtées.

**Exemple MHC#12.3.** Un morceau de bois d'épaisseur égale à 5.0 cm entre une source de gammas et un détecteur réduit le taux d'un facteur 12. Quelle épaisseur additionnelle permettrait de réduire par un facteur 4 additionnel? (Rép. 2.8 cm)

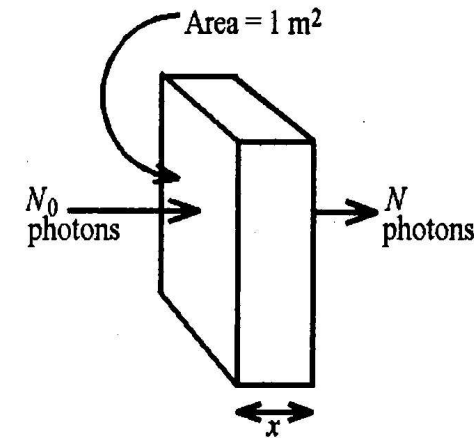


Figure 12-1. Attenuation of a Gamma Ray Beam

## Section E.10. Dosimétrie, santé (MHC 12.2-5)

### Dosimétrie

Rad (*radiation absorbed dose*)  $D$  = énergie déposée par unité de masse de tissu vivant (1 Gy (gray) = 1 J/kg)

$$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ J/kg}$$

L'impact sur le tissu  $T$  est décrit par la *dose équivalente*  $H_T$ , donnée par

$$H_T = \sum_R (w_R D_R)$$

où  $D_R$  est la dose de la radiation  $R$ ,  $w_R$  est le *facteur biologique* (*radiation weighting factor*) donné en page suivante, et la somme est sur les différents types de radiations  $R$  reçues.

$H_T$  est exprimé en **Sievert** (Sv) si  $D$  est en Gy, ou en **rem** si  $D$  est en rad. Donc 1 Sv = 100 rem.

## Section E.10. Dosimétrie, santé (MHC 12.2-5)

### Dosimétrie

Rad (*radiation absorbed dose*)  $D$  = énergie déposée par unité de masse de tissu vivant (1 Gy (gray) = 1 J/kg)

$$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ J/kg}$$

L'impact sur le tissu  $T$  est décrit par la *dose équivalente*  $H_T$ , donnée par

$$H_T = \sum_R (w_R D_R)$$

où  $D_R$  est la dose de la radiation  $R$ ,  $w_R$  est le *facteur biologique* (*radiation weighting factor*) donné en page suivante, et la somme est sur les différents types de radiations  $R$  reçues.

$H_T$  est exprimé en **Sievert** (Sv) si  $D$  est en Gy, ou en **rem** si  $D$  est en rad. Donc 1 Sv = 100 rem.

**Table 12-2:** Values of the Radiation Weighting Factor  $w_R$ \*

Radiation	$w_R$	Radiation	$w_R$
Photons, all energies	1	Neutrons, energy < 10 keV	5
Electrons, all energies	1	Neutrons, 10 –100 keV	10
Protons, energy > 2 MeV	5	Neutrons, 100 keV – 2 MeV	20
$\alpha$ -particles, fission fragments	20	Neutrons, 2 – 20 MeV	10

\* Adapted from reference <sup>2</sup>

**Table 12-3:** Values of the Tissue Weighting Factors  $w_T$ \*

Tissue or Organ	$w_T$
Gonads	0.20
Bone Marrow, Colon, Lung, Stomach (each)	0.12
Bladder, Breast, Liver Oesophagus, Thyroid (each)	0.05
Skin, Bone Surface (each)	0.01
Remainder	0.05

\* Adapted from reference <sup>2</sup>

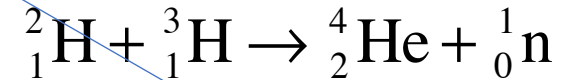
On définit aussi la *dose effective E*, donnée par

$$E = \sum_T (w_T H_T)$$

où  $w_T$  est le *facteur biologique du tissu T* (*tissue weighting factor*) donné à gauche, et la somme est sur les tissus  $T$ .

## Section E.11. Fusion nucléaire (MHC 13.8)

La réaction



libère 17.6 MeV.

Défis causés par : interactions nucléaires de courte portée, répulsion électrostatique de grande portée.

Méthode: chauffer le mélange deutérium-tritium, vitesse moyenne des particules

$$v = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} \quad k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

**Chapitre F**  
**Sections F1, 2**



# **PHYSQ 261 : Physique de l'énergie et de l'environnement**

- **Section F : Sources d'énergie renouvelables**
- **MHC, chapitres 14, 15**

## Section F.1. Énergie éolienne, puissance, flot éolien (MHC 14.1 à 14.3)

La puissance solaire reçue à la surface terrestre vaut environ 500 fois le taux de consommation des USA. La deuxième meilleure ressource est l'énergie éolienne, qui fournit environ 30 fois le taux de consommation des USA.

L'énergie éolienne est créée par le vent. Le mouvement de l'air est celui d'un *fluide*.

**Avantages:** énergie renouvelable, pas de pollution, faible coût d'entretien

**Restrictions:** source intermittante, peu d'électricité sur une base continue, vulnérable aux intempéries, peu esthétique, bruit, interaction avec la faune

Environ 5% de l'électricité mondiale, croît rapidement

Puissance globale 733 GW (croissance de 12%=50 GW en 2016)

Chine 281 GW, USA 118 GW, Allemagne, 62 GW, Inde 39 GW

Canada 13.6 GW

## Éoliennes

$$P \approx 2 \text{ MWe}, P_{\max} \approx 5 \text{ MWe}$$

On suppose le vent perpendiculaire aux *pales* (*blade*, en anglais)

$$\begin{aligned} \text{Débit volumique} & Av_i = \pi r^2 v_i \\ \text{Débit de masse (kg/s)} & Q = \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_i \end{aligned}$$

$$\text{Puissance d'entrée} \quad P_{in} = \frac{K}{t} = \frac{1}{2} Q v_i^2 = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_i^3$$

$$\begin{aligned} \text{Puissance électrique} \quad P_e &< P_{in} && \text{sinon on aurait} \\ \text{alors qu'en fait, } v_f &< v_i && \text{Supposons que} \end{aligned}$$

$$v_{av} = \frac{v_f + v_i}{2} \quad \text{soit la vitesse moyenne de l'air aux pales.}$$

**Exemple** De quel facteur  $P_{in}$  change si  $v_i$  passe de 7.0 à 7.5 m/s?

La masse d'air par seconde qui circule est  $\frac{M}{t} = \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_{av}$

la puissance électrique produite est donc

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \left( \frac{M}{t} \right) v_i^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{M}{t} \right) v_f^2 = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_{av} (v_i^2 - v_f^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho_{\text{air}} \pi r^2 (v_i + v_f) (v_i^2 - v_f^2) \end{aligned}$$

Le rapport  $R$  de cette puissance à la puissance d'entrée est

$$R = \frac{P}{P_{in}} = \frac{\frac{1}{4} \rho_{\text{air}} \pi r^2 (v_i + v_f) (v_i^2 - v_f^2)}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \pi r^2 v_i^3}$$

Cette expression devient, en définissant  $x \equiv \frac{v_f}{v_i}$ ,

$$R = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{v_f}{v_i} \right) \left( 1 - \frac{v_f^2}{v_i^2} \right) = \frac{1}{2} (1 + x)(1 - x^2)$$

**Exemple:** Pour quel  $x$  le  $R$  est-il maximal? Quel est le  $R$  maximal?  
La réponse est appelée la **limite de Betz** (d'après le physicien allemand Albert Betz, qui a obtenu ce résultat en 1919.)

$$\text{On a alors } P_{\max} = R_{\max} P_{in} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho_{air} \pi r^2 v_i^3 = \frac{8}{27} \rho_{air} \pi r^2 v_i^3$$

En pratique, la puissance électrique est plutôt

$$P_e = \frac{1}{2} \rho_{air} \pi r^2 v_i^3 \eta \eta_e$$

$\eta$ : efficacité de la conversion de  $P_{in}$  en puissance rotationnelle de sortie. Inférieur à 0.59.

$\eta_e$ : efficacité de la conversion de la puissance rotationnelle en puissance électrique. Inférieur et proche de 1.00.

Typiquement, on considère l'efficacité globale  $\eta_e \eta$ .

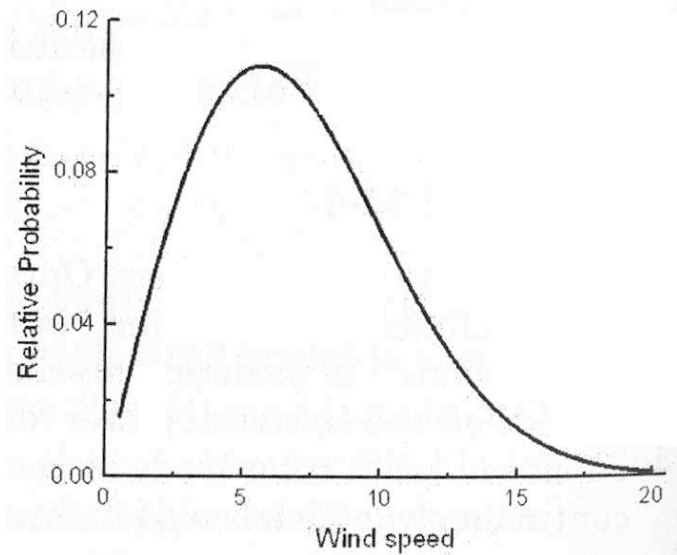
Par conservation de la masse (c.-à-d. l'équation de continuité, vue en PHYSQ 126), on voit que le rayon du cylindre d'air augmente au fur et à mesure que l'air avance et ralentit, selon la relation:

$$r_1^2 v_1 = r_2^2 v_2$$

ou encore

$$r_2 = r_1 \sqrt{\frac{v_1}{v_2}}$$

## Section F.2. Distribution de Weibull (MHC 14.4)



**Figure 14-3** Weibull Distribution with Mean Wind Speed 7 m/s

**Table 14-1:** Wind speed classes

Wind power Class	Average wind speed $\text{ms}^{-1}$	Wind power density $\text{W/m}^2$
1	< 5.6	0 – 200
2	5.6 – 6.4	200 – 300
3	6.4 – 7.0	300 – 400
4	7.0 – 7.5	400 – 500
5	7.5 – 8.0	500 - 600
6	8.0 – 8.8	600 – 800
7	> 8.8	> 800