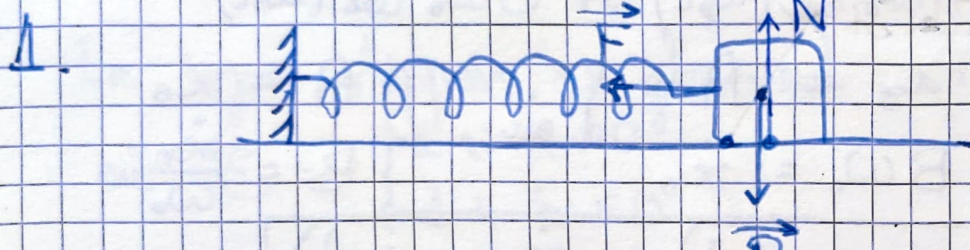


Corrigé - DS2 Type CCINP

I - Oscillateur à frottements solides



La masse M , dans le référentiel terrestre supposé galiléen, est soumise à :

- * Son poids $\vec{P} = m\vec{g} = -mg\vec{e}_z$
- * La force de rappel $\vec{F} = -kx\vec{e}_x$
- * La réaction du support $\vec{N} = N\vec{e}_z$ qui est normale car on néglige les frottements.

On projette le PFD selon $\vec{e}_x$:

$$m\ddot{x} = -kx$$

2. $E_{p,s} = \frac{1}{2}kx^2$ ("Donner" $\rightarrow$ pas de démonstration demandée)

3. L'énergie cinétique vaut $E_c = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$, ainsi :

$$E_m = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2 \quad \text{car } E_{p,grav} = mgz = 0$$

La seule force non conservative qui s'applique à la masse est la réaction du support, qui ne travaille pas puisque l'on néglige les frottements, ainsi E_m est conservée.

4. On a $\frac{dE_m}{dt} = m\dot{x}\ddot{x} + kx\dot{x} = 0$

Or $\dot{x}$ est non nuliquement nul, on retrouve bien $m\ddot{x} + kx = 0$

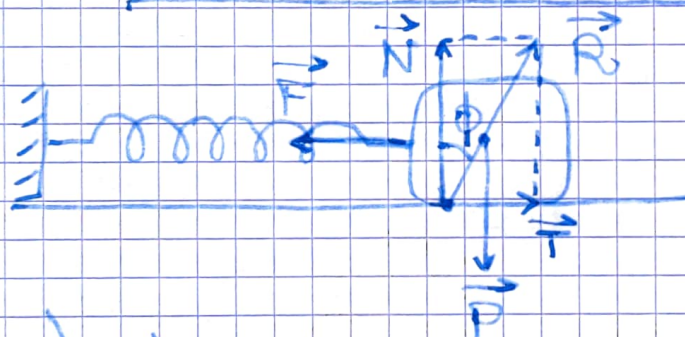
5. Il s'agit d'une équation d'oscillateur harmonique de pulsation propre $\boxed{\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}}$: $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$.

Alors :
$$\begin{cases} x(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t) \\ \dot{x}(t) = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t) + B\omega_0 \cos(\omega_0 t) \end{cases}$$

On : $\begin{cases} x(t=0) = x_0 = A \\ \dot{x}(t=0) = B\omega_0 = \dot{x}_0 \end{cases}$ d'où $\begin{cases} A = x_0 \\ B = \frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \end{cases}$

Ainsi : $\boxed{x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t)}$

6.



M se déplace ici vers la gauche

Il existe désormais une composante tangentielle qui s'oppose au mouvement. Par la loi de Coulomb du glissement, on a $\|\vec{T}\| = f \|\vec{N}\|$ donc $\tan \phi = \frac{\|\vec{T}\|}{\|\vec{N}\|} = f$

Ainsi : $\boxed{\phi = \arctan(f)}$

7. La masse démarrera si, en supposant l'équilibre, la condition d'adhérence $\|\vec{T}\| < f \|\vec{N}\|$ n'est pas vérifiée. Pour cela, on suppose l'équilibre, donc les forces appliquées à la masse se compensent :

$$\begin{cases} \|\vec{N}\| = \|\vec{P}\| = mg \\ \|\vec{T}\| = \|\vec{F}\| = k|x_0| \end{cases}$$

La masse démarre si $\|\vec{T}\| \geq f \|\vec{N}\| \Leftrightarrow \boxed{|x_0| \geq \frac{fmg}{k}} = x_{\max}$

La position finale d'équilibre vérifie donc $-\frac{fmg}{k} < x_0 < \frac{fmg}{k}$.

8. En cas de glissement : $\|\vec{T}\| = \|\vec{N}\| = \frac{1}{2}mg$

En effet $\|\vec{N}\| = mg$ par projection du PFD appliqué à la masse selon la verticale, dans R_T glisse.

Alors $\vec{T} = \pm \frac{1}{2}mg \vec{e}_x$

Le signe s'oppose au glissement : $\vec{T} = -\epsilon \frac{1}{2}mg \vec{e}_x$

où $\epsilon = \begin{cases} 1 & \text{si } \dot{x} > 0 \\ -1 & \text{si } \dot{x} < 0 \end{cases}$

Le PFD désormais projeté selon $\vec{e}_x$ donne :

$$\boxed{m\ddot{x} + kx = -\epsilon \frac{1}{2}mg}$$

Où encore : $\ddot{x} + \omega_0^2 x = -\epsilon \frac{1}{2}g$

9. On abandonne la masse sans vitesse. Posons $\xi = x + \frac{\epsilon \frac{1}{2}g}{\omega_0^2}$

avec $\frac{\frac{1}{2}g}{\omega_0^2} = \frac{\frac{1}{2}mg}{k} = x_{max}$: $\xi = x + \epsilon x_{max}$

Au cours de cette première phase, $\dot{x} < 0$ donc $\epsilon = -1$

On a $\ddot{\xi} + \omega_0^2 \xi = 0$ et $\begin{cases} \xi(t=0) = x_0 - x_{max} \\ \dot{\xi}(t=0) = 0 \end{cases}$

$$\text{D'où : } \boxed{\xi(t) = (x_0 - x_{max}) \cos(\omega_0 t)} = x(t) - x_{max}$$

La masse s'arrête pour la première fois au premier extrême du cosinus donc pour $\omega_0 t = \pi$ soit $\boxed{t_1 = \frac{\pi}{\omega_0}}$

$$\text{Alors } x_1 = x(t_1) = x_{max} + \underbrace{(x_0 - x_{max}) \times (-1)}_{\xi(t_1)}$$

$$\boxed{x_1 = -x_0 + 2x_{max}} \quad \text{où } x_{max} = \frac{1}{2}mg \Delta_k \text{ défini en Q7}$$

10. La masse atteint de nouveau une position maximale au bout de $2t_1$, ainsi : $T = 2t_1 = \frac{2\pi}{\omega_0}$

11. $W(\vec{F}_j) = \int_{x_1}^{x_2} \vec{F}_j \cdot d\vec{x} = \int_{x_1}^{x_2} -\epsilon \int mg dx = -\int mg(x_1 - x_2)$
 $\epsilon = +1$ car la masse avance

Par le théorème de l'énergie mécanique appliqué à la masse dans R_1 galiléen : $\Delta E_m = W(\vec{F}_j)$

Où $E_{m,1} = \frac{1}{2} m \underbrace{\dot{x}_1^2}_{=0 \text{ (position d'arrêt)}} + \frac{1}{2} k x_1^2$ et de même $E_{m,2} = \frac{1}{2} k x_2^2$

D'où : $\frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2) = -\int mg (x_2 - x_1) \quad \downarrow \div (x_2 - x_1)$
 $\Leftrightarrow \frac{1}{2} k (x_2 + x_1) = -\int mg$

$\Leftrightarrow x_2 = -x_1 - \frac{2 \int mg}{k} \quad \Leftrightarrow x_2 = -x_1 - 2x_{\max}$

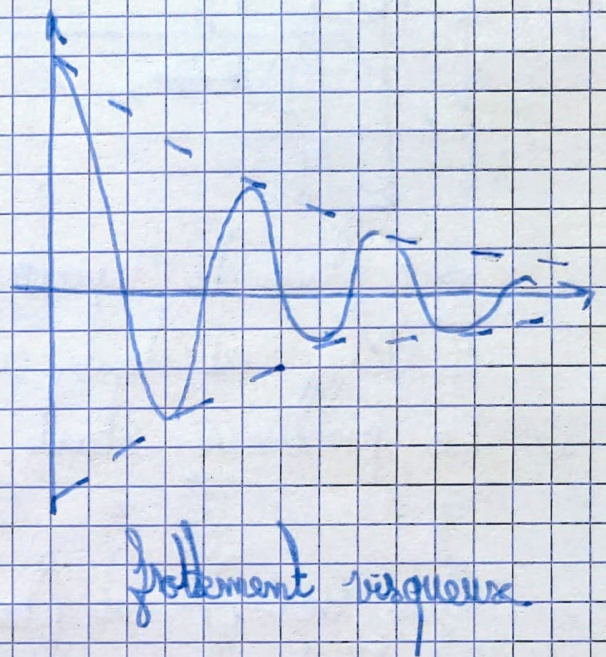
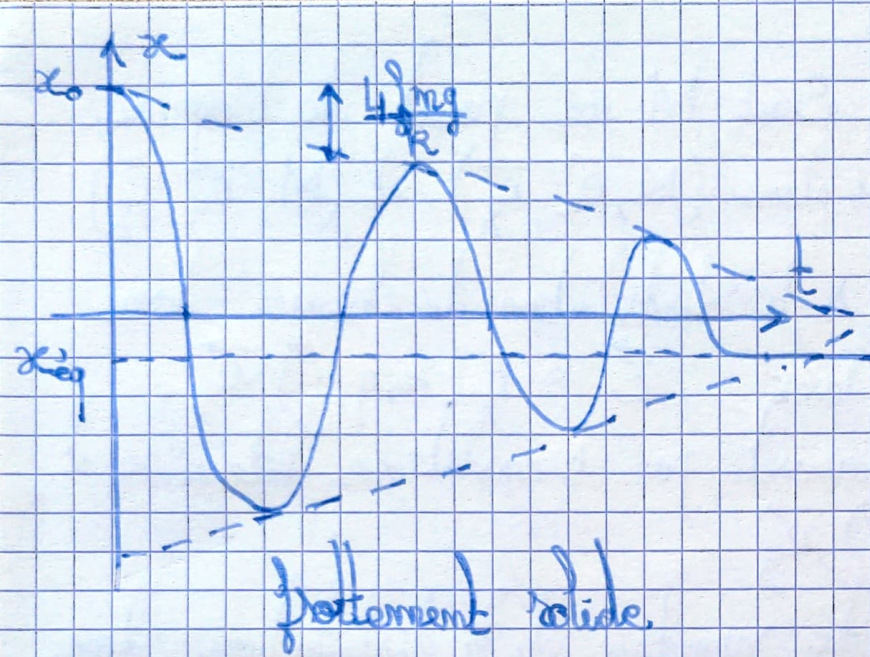
Où $x_1 = -x_0 + 2x_{\max}$ donc $x_2 = x_0 - 4x_{\max}$

12. On voit qu'à chaque demi-période $|x|$ décroît de $2x_{\max}$ on a une décroissance linéaire :

$x_{\max}(t_0) = x_0 \quad x_{\max}(T) = x_0 - 4 \cdot \frac{\int mg}{k}$

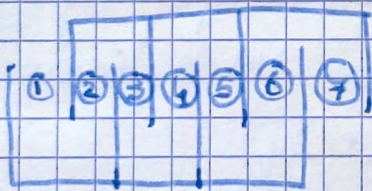
Donc puisque la courbe est linéaire : $x_{\max}(t) = x_0 - 4 \cdot \frac{\int mg}{k} \cdot \frac{t}{T}$

13. Dans le cas d'un frottement visqueux, la décroissance est exponentielle et non linéaire :



II - Détecteur de pluie capacitif

14.

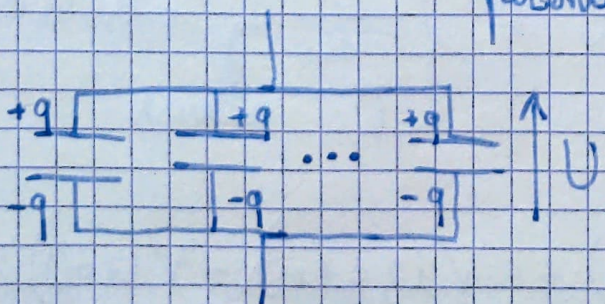


Dans ce schéma, on a 7 espaces qui délimitent chacun une armature

positive et une armature négative ; ceci est équivalent à avoir les 7 condensateurs en parallèle.

En effet :

- * les charges portées par les plaques s'ajoutent
- * la tension aux bornes de tous les condensateurs est la même car les armatures sont reliées électriquement donc au même potentiel.



Pour N condensateurs :

$$C_{\text{tot}} = \frac{q_{\text{tot}}}{U} = \frac{Nq}{U} = \boxed{N \times C}$$

où C est la capacité de chaque condensateur.

Soit M un point de l'espace,
les plans $(M, \vec{e}_x, \vec{e}_y)$ et $(M, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$

$\vec{E}(M)$ et dans ces plans: $\vec{E} = E(x, y, z) \vec{e}_z$

Enfin ($x=0$) est plan de symétrie de la distribution, donc également du champ électrique, et $E(-z) = -E(z)$.

La charge intérieure est $Q_{int} = \sigma \times S$

De flux: $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = E(y) \times S - E(-y) \times S = \underline{\underline{2SE(y)}}$

Par le théorème de Gauss: $\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \Rightarrow E(r) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

Par principe de superposition, on

a. $\vec{E} = \begin{cases} \frac{\rho}{\epsilon_0} \vec{e}_r & \text{entre les armatures} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$

La tension V est donnée par: $V = V(z=+e) - V(z=0)$

$$U = \int_{z=0}^{+e} \vec{\text{grad}}(V) \cdot d\vec{l} = \int_{z=0}^{+e} -\vec{E} \cdot \vec{e}_z dz = \int_{z=0}^{+e} \frac{\sigma}{\epsilon_0} dz = \frac{\sigma e}{\epsilon_0}$$

Or $q = \sigma \times S$ donc $C = \frac{q}{U} = \frac{\sigma S}{\frac{Q}{\epsilon_0}} = \boxed{\frac{\epsilon_0 S}{e}}$

18. On a vu en Q14 que $C_{\text{tot}} = N \times C = \frac{N \epsilon_0 S}{e}$

Donc : $e = \frac{N \epsilon_0 S}{C_{\text{tot}}} = \frac{40 \times 10^{-11} \times 5 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-12}} = \boxed{1 \mu\text{m}}$

19. On a $\epsilon_0 = \frac{C e}{S}$ avec $\begin{cases} C \text{ en F} \\ S \text{ en m}^2 \\ e \text{ en m} \end{cases}$

Donc ϵ_0 s'exprime en $\boxed{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$

20. On a $i = \frac{dq}{dt} = \frac{q_{\text{ref}}}{\Delta t}$ et $q_{\text{ref}} = C U_{\text{ref}}$

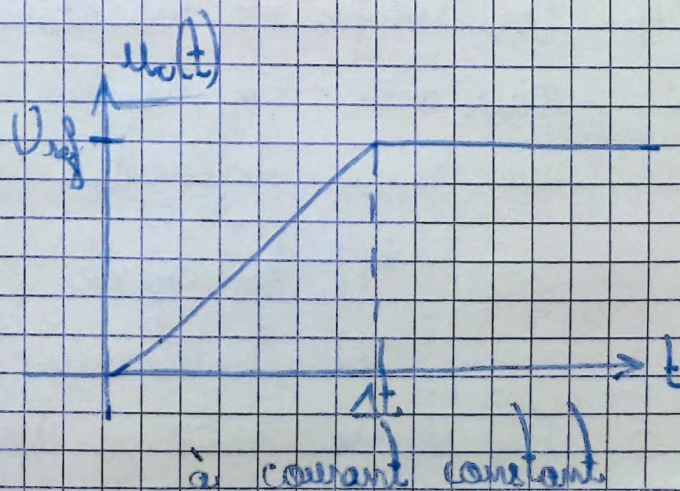
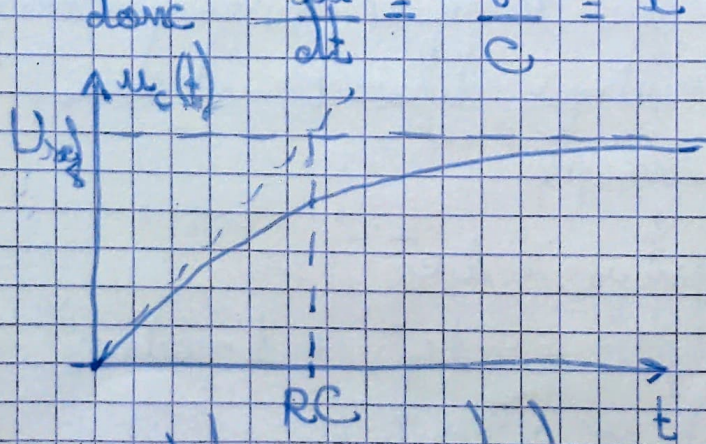
D'où : $i = \frac{C U_{\text{ref}}}{\Delta t} \Rightarrow \boxed{C = \frac{i \Delta t}{U_{\text{ref}}}}$

21. Lors d'une charge sous tension constante le condensateur se charge progressivement, la tension se vérifie :

$$RC \frac{du}{dt} + u = U_{\text{ref}}$$

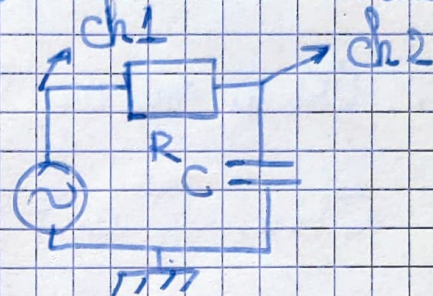
Lors d'une charge à courant constant : $i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$

Donc $\frac{du}{dt} = \frac{i}{C} = C^{-1} i$



La charge à tension constante, à travers une résistance, prend un temps infini contrairement à la charge à courant constant.

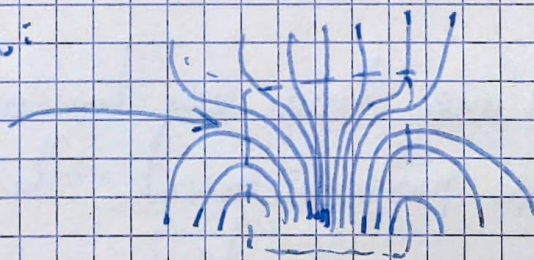
22. On peut réaliser un circuit RC :



En mesurant la fréquence de coupure $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ du filtre, on peut retrouver la valeur de C.

23. Le champ électrique est à flux conservatif dans les régions neutres électriquement ce qui est le cas ici, et on a donc un champ maximal là où les lignes de champ sont les plus rapprochées, c'est-à-dire dans le verre et dans la couche d'eau :

dans cette zone



III - Exfoliation du graphène

24. Un isotope est un atome ou ion de même numéro atomique mais avec un nombre de neutrons différent, et donc une masse différente. Par exemple :

^1_1H hydrogène

$1\text{ proton} + 1\text{e}^-$

^2_1H deutérium

$1\text{p}^+ + 1\text{e}^- + 1\text{ neutron}$

25. La masse molaire du carbone s'écrit :

$$M = x_{13} \times M_{13} + x_{12} \times M_{12}$$

$$M = x_{12} M_{12} + (1 - x_{12}) M_{13} \Rightarrow x_{12} = \frac{M_{13} - M}{M_{13} - M_{12}}$$

fraction molaire en ^{12}C .

Or la fraction massique w_{12} est telle que :

$$w_{12} = \frac{x_{12} M_{12}}{x_{12} M_{12} + x_{13} M_{13}} \left\{ \begin{array}{l} \text{masse de } ^{12}\text{C dans une mole} \\ \text{masse totale dans une mole} \end{array} \right.$$

$$= x_{12} \cdot \frac{M_{12}}{M}$$

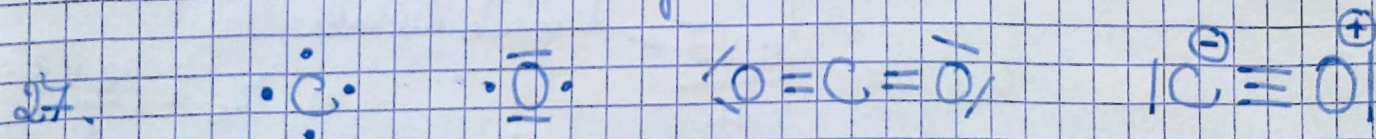
Ainsi : $w_{12} = \frac{M_{12}}{M} \times \frac{M_{13} - M}{M_{13} - M_{12}} = \frac{12}{12,011} \times \frac{0,989}{1} \approx \boxed{0,988}$

Et $w_{13} = 1 - w_{12} \approx \boxed{0,012}$

26. Il y a 2 éléments dans la 1^e période ainsi :

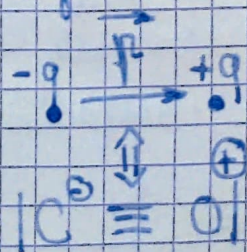
* C est à la 2^e ligne et 4^e colonne : 4 e⁻ de valence

* O est à la 2^e ligne et 6^e colonne : 6 e⁻ de valence



28. La molécule de CO_2 étant symétrique, les barycentres des charges positives et négatives sont confondus dans la molécule n'est pas polaire.

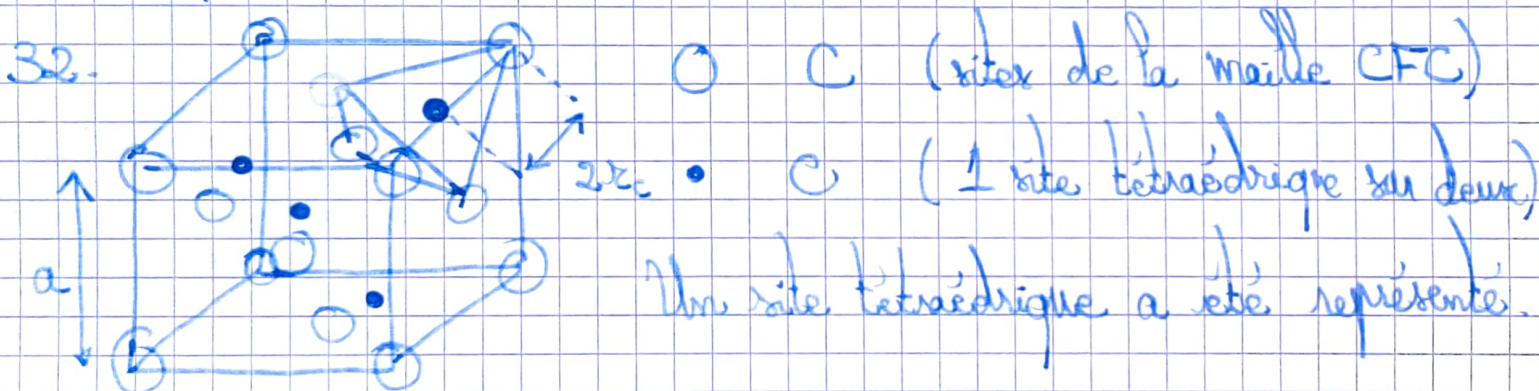
Celle de CO est polaire :



29. À 0°C, $T = 273\text{K}$ et $p = 10^5\text{Pa}$, on lit sur le graphique que la forme stable est le graphite.

30. Le graphite peut se transformer en diamant si $p \geq 10^9 \text{ Pa}$
 d'après le graphique : de telles pressions sont atteintes
 profondément dans la croûte terrestre.

31. Une fois remontés à la surface, ces diamants restent métastables
 ils devraient se métamorphoser en graphite mais la réaction
 est très lente ; on peut donc les conserver tels quels.
 (Rq : on peut accélérer la réaction en faisant chauffer le diamant)



33. Il y a tangence au niveau de la diagonale du cube
 dans le site tétraédrique :

$$2r_c = \frac{a\sqrt{3}}{4} \leftarrow \text{diagonale du cube} \Rightarrow r_c = \frac{a\sqrt{3}}{8}$$

Le nombre d'atomes en propre vaut :

$$N = \underbrace{8 \times \frac{1}{8}}_{\text{sommet}} + \underbrace{3 \times \frac{1}{2}}_{\text{faces}} + \underbrace{4}_{\text{sites T}} = 8$$

Alors la compacité vaut :

$$C = \frac{N \times \frac{4}{3}\pi r_c^3}{a^3} \left\{ \begin{array}{l} \text{volume des atomes} \\ \text{volume de la maille} \end{array} \right.$$

$$= 8 \times \frac{4\pi}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{8}\right)^3 = \frac{\pi\sqrt{3}}{16} \approx \frac{3 \times 1,5}{16} \approx \boxed{0,3}$$

34. On a: $\rho = \frac{M_c / N_A \times N}{a^3}$ avec $\frac{M_c}{N_A}$ la masse d'un atome

D'où: $a = \sqrt[3]{\frac{NM_c}{\rho N_A}} = \sqrt[3]{\frac{8 \times 12 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23} \cdot 3 \cdot 10^3}} = \sqrt[3]{5 \cdot 10^{-29}}$
 $\approx \sqrt[3]{50 \cdot 10^{-30}} \approx 4 \cdot 10^{-10} \text{ m} \approx \boxed{400 \text{ pm}}$

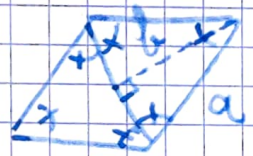
Alors: $2r_c = \frac{a\sqrt{3}}{4} \approx \frac{1,5 \times 400}{4} \approx \boxed{150 \text{ pm}}$ et la distance entre deux atomes.

35. À l'aide de la figure 5 on voit qu'on a:

$$N = \underbrace{1}_{\substack{\text{interne} \\ \text{(feuille B)}}} + \underbrace{2 \times \frac{1}{2}}_{\substack{\text{faces} \\ \text{(feuille A)}}} + \underbrace{8 \times \frac{1}{8}}_{\substack{\text{symmets} \\ \text{(feuille A)}}} + \underbrace{4 \times \frac{1}{4}}_{\substack{\text{arêtes} \\ \text{(feuille B)}}} = 4$$

36. La masse volumique du graphite est $\rho = \frac{NM_c}{N_A \cdot V_{\text{maille}}}$

où $V_{\text{maille}} = 2 \times \frac{ab}{2} \times d$
↑
surface d'un triangle ↑ distance entre feuillets



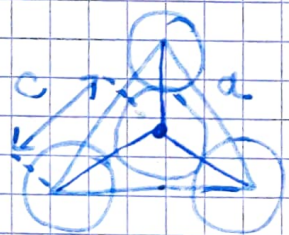
Or $b = a \cdot \cos \frac{\pi}{6} = a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$ donc $V_{\text{maille}} = da^2 \frac{\sqrt{3}}{2}$

La tangence se fait dans un feuillet:

$c = b - c \sin \frac{\pi}{6} = b - \frac{c}{2}$

$\Rightarrow c = \frac{2}{3}b = \frac{2}{3}a \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{a}{\sqrt{3}}$

Et $c = 2r_c = 150 \text{ pm}$ (condition de tangence)



Ainsi $\rho = \frac{8M_c}{N_A \cdot 3c^2\sqrt{3}d} \Rightarrow d = \frac{2NM_c}{3\sqrt{3} \cdot N_A \cdot c^2 \rho}$

Mais on sait que $\rho_{\text{diamant}} = \frac{4M_c}{N_A \cdot a^3} = \frac{4M_c}{3\sqrt{3}N_A c^3}$

Donc : $d = 2 \cdot c \cdot \frac{\rho_{\text{diamant}}}{\rho_{\text{graphite}}} = 2 \cdot 150 \cdot \frac{3,2}{2,1} \approx \boxed{460 \text{ nm}}$

37. On s'attend à avoir des liaisons covalentes à l'intérieur d'un même feuillet ($d \sim 1,5 \text{ \AA}$). Au contraire la distance entre deux feuillets de graphite est 3 fois plus grande : il s'agit probablement d'une liaison de type Van der Waals, beaucoup moins forte.

38. Les liaisons entre feuillets sont faibles (Van der Waals) alors qu'au sein d'un même feuillet on a des liaisons covalentes qui maintiennent la cohésion du feuillet. Il est donc possible d'extraire un unique feuillet.

39. Les électrons sont contraints de se déplacer le long des feuillets : ceci les empêche d'aller dans toutes les directions (par agitation thermique) et favorise un déplacement macroscopique correspondant à un courant électrique.

IV - Géophysique de la Terre

40. $\vec{G} = -G \frac{m}{r^2} \vec{e}_r$ $\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r$

On en déduit les analogies suivantes :

charge $q \leftrightarrow$ masse m

$\epsilon_0 \leftrightarrow -4\pi G$

L'analogie donne le théorème de Gauss gravitationnel.

Soit Σ une surface fermée contenant une masse M_{int} ,
 alors:
$$\oint_{\Sigma} \vec{G} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_{int}$$

où G est la constante de gravitation universelle

$$M_{int} = \iiint_V \mu \, d\tau$$

4.1. Soit M un point de l'espace, on se place en coordonnées
 sphériques de centre O .

$(M, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$ et $(M, \vec{e}_r, \vec{e}_\phi)$ sont plans de symétrie de
 la distribution de masse donc $\vec{G}$ est contenu dans ces
 plans, de plus le problème est invariant par rotation
 d'angle θ et ϕ donc $\vec{G} = G(r) \vec{e}_r$.

Soit Σ la sphère de centre O et de rayon r , alors:

$$M_{int} = \begin{cases} \int \frac{4\pi}{3} r^3 \mu_r & \text{si } r < R_T \\ M_T = \frac{4\pi}{3} R_T^3 \mu_T & \text{si } r > R_T \end{cases}$$

$$\text{Et } \oint_{\Sigma} \vec{G} \cdot d\vec{S} = 4\pi r^2 G(r).$$

Par le théorème de Gauss gravitationnel:

$$\vec{G}(r) = \begin{cases} -G \frac{M_T}{r^2} \vec{e}_r & \text{si } r > R_T \\ -G \cdot \frac{4\pi}{3} \mu_T r \vec{e}_r & \text{si } r < R_T \end{cases}$$

4.2. En l'absence de la poche de pétrole:

$$\vec{G}_T(M) = -G \frac{M_T}{R_T^2} \vec{e}_r = -G \frac{M_T}{R_T^2} \vec{u}_z.$$

$$\vec{G}_T(M) = -\frac{4}{3}\pi R_T \mu_T \vec{u}_z$$

De plus, la distribution de masse en présence de pétrole correspond à la somme de :

- * la distribution de masse de la Terre sans pétrole
- * une sphère homogène de masse volumique $\mu_p - \mu_T$ de centre C et de rayon R .

Cette sphère produit un champ :

$$\vec{G}_p(M) = -\frac{4}{3}\pi R^3 (\mu_p - \mu_T) \times \frac{G}{R^2} \vec{u}_z \quad \text{d'après Q 41}$$

Par principe de superposition :

$$\begin{aligned} \vec{G}_T(M) &= \vec{G}_T(M) + \vec{G}_p(M) \\ &= -\frac{4}{3}\pi \left[\mu_T R_T + (\mu_p - \mu_T) \frac{R^3}{R_T^2} \right] \vec{u}_z \end{aligned}$$

Alors :

$$E = \frac{-(\mu_p - \mu_T) \frac{R^3}{R_T^2}}{\mu_T R_T} = \boxed{\left(1 - \frac{\mu_p}{\mu_T}\right) \cdot \frac{R^3}{R_T^2}}$$

43. $E > 0$ ce qui indique que le champ est moins intense, ceci est cohérent avec le fait que la nappe de pétrole fait diminuer la masse totale de la Terre.

44. $E \sim \frac{5}{6} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{10^{-3}}{4} \sim \frac{5}{96} \cdot 10^{-3} \sim \boxed{5 \cdot 10^{-5}} \gg 10^{-8}$

Ceci est largement détectable par les gravimètres actuels.

45. La masse dm étant à la surface de la sphère, son énergie potentielle d'interaction avec m est :

$$dE_p = -\frac{Gm \cdot dm}{R}$$

puisque on a vu que le champ créé par la sphère à sa surface est le même que si toute la masse était concentrée au point O.
On a puis $dE_{pg}(r) = 0$ pour $r \rightarrow \infty$.

46. On a une énergie totale qui est la somme de l'énergie potentielle de chaque coquille sphérique:

$$E_{pg}(R) = \int_0^R dE_{pg} = \int_0^R -G \frac{m \, dm}{r}$$

$$\text{Or } m = \frac{4}{3}\pi r^3 \times \mu \quad \text{et} \quad dm = 4\pi r^2 dr \times \mu$$

$$\text{Donc } E_{pg}(R) = -G \times \frac{16\pi^2}{3} \mu^2 \int_0^R r^4 dr = -\frac{16\pi^2}{15} G \mu^2 R^5$$

$$\text{Mais } \mu = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \Rightarrow \mu^2 = \frac{9M^2}{16\pi^2 R^6}$$

$$\text{Ainsi } E_{pg}(R) = -\frac{9}{15} \cdot \frac{GM^2}{R} = \boxed{-\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}}$$

Cette énergie est négative ce qui est lié au fait que la force est attractive: la formation de la Terre libère de l'énergie.

47. On applique le 1^{er} principe à la Terre:

$$\Delta(E_p + E_c + U) = \underbrace{W_{\text{ext}}}_{=0 \text{ (on est dans le vide)}} + \underbrace{Q}_{=0 \text{ (système isolé)}}$$

$$\text{Avec } \Delta E_p = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$\Delta E_c = 0 \quad (\text{on suppose que l'énergie cinétique est négligeable})$$

$$\Delta U = mC \Delta T = mC T_{\text{eq}} \quad (\text{car } T_0 = 0K)$$

Alex: $MC T_{eq} = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \Rightarrow \boxed{T_{eq} = \frac{3}{5} \frac{GM}{Rc}}$

AN: $T_{eq} \approx \frac{3}{5} \frac{4 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{6 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^2} \sim 6 \cdot 10^4 \text{ K} \sim 60\,000 \text{ K}$

Ceci correspond à la température d'une étoile ! En réalité de l'énergie est dissipée pour réaliser des transformations chimiques, pour fondre de la roche, et aussi sous forme d'énergie cinétique (rotation de la Terre).