math 203 : Correct° feuille 1

1. Cinématique de tramway :

1. (E) : $\frac{d^2x}{dt^2} = a_0 - a_1 x$

se réécrit $\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 x = a_0$

C'est une équat° du 2nd ordre linéaire, à coeff constants, dont le second membre est a_0. L'équat° homogène associée est

(H) : $\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 x = 0$.

2. • On résout (H) : l'équat° caractéristique associée est $r^2 + a_1 = 0$ dont les deux racines sont $r_1 = i\sqrt{a_1}$ et $r_2 = -i\sqrt{a_1}$. Les solut° de (H) sont les fonctions $x(t) = A\cos(\sqrt{a_1}\,t + \varphi)$ avec φ et A des constantes arbitraires.

• On cherche une solution particulière, sous la forme $x(t) = \text{cste}$. Ce qui donne

$a_1 \cdot \text{cste} = a_0$, donc $\text{cste} = \frac{a_0}{a_1}$.

$x(t) = \frac{a_0}{a_1}$ est solut° particulière.

• L'ensemble des solut° de (H) est formé des fonctions de la forme $\boxed{x(t) = \frac{a_0}{a_1} + A\cos(\sqrt{a_1}\,t+\varphi)}$

avec $A \in \mathbb{R}$, $\varphi \in \mathbb{R}$.

3. Les conditions initiales portent sur la vitesse, qui est $\frac{dx}{dt} = -A\cdot\sqrt{a_1}\sin(\sqrt{a_1}\,t+\varphi)$. On a

$x(0)=0$ et $\frac{dx}{dt}(0)=0$ qui donnent

$\frac{a_0}{a_1} + A\cos(\varphi) = 0$ et $-A\sqrt{a_1}\sin(\varphi) = 0$.

De la deuxième, on tire $\varphi = 0\ [\pi]$, puis de la première : $\frac{a_0}{a_1} + A = 0$, i.e., $A = -\frac{a_0}{a_1}$.

En notant t_0 la durée du trajet, on doit avoir $\frac{dx}{dt}(t_0) = 0$,

C'est à dire $+\frac{a_0}{a_1}\sqrt{a_1}\sin(\sqrt{a_1}\,t_0) = 0$.

Autrement dit, $\sin(\sqrt{a_1}\,t_0)=0$

d'où $\sqrt{a_1}\,t_0 = \pi$

i.e. $\boxed{t_0 = \frac{\pi}{\sqrt{a_1}}}$

4. La vitesse maximale est atteinte lorsque sa dérivée s'annule, ou en les bords de l'intervalle $[0, t_0]$. Comme $\frac{dx}{dt}(0) = \frac{dx}{dt}(t_0) = 0$, la vitesse n'est clairement pas maximale aux bords de l'intervalle.

Comme $\frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right) = \frac{d^2x}{dt^2} = a_0 - a_1 x$, la dérivée de la vitesse s'annule en un unique point, correspondant à $a_0 - a_1 x = 0$ i.e. $x = \frac{a_0}{a_1}$.

Mais $x(t) = \frac{a_0}{a_1} \Rightarrow A\cos(\sqrt{a_1}\, t + \varphi) = 0$

c'est à dire $-\frac{a_0}{a_1}\cos(\sqrt{a_1}\, t) = 0$

donc $\sqrt{a_1}\, t = \frac{\pi}{2}$, donc $t = \frac{\pi}{2\sqrt{a_1}}$.

On a alors $\frac{dx}{dt}\left(\frac{\pi}{2\sqrt{a_1}}\right) = \sqrt{a_1}\,\frac{a_0}{a_1}\sin\left(\sqrt{a_1}\,\frac{\pi}{2\sqrt{a_1}}\right)$

$= \frac{a_0}{\sqrt{a_1}}$

$\boxed{\text{Ainsi, la vitesse du tramway maximale est } \frac{a_0}{\sqrt{a_1}}}$

3 Quelques équations hors contexte.

1. $2y'' + y' - y = 0$.

Équat° caractéristique : $2r^2 + r - 1 = 0$.

$\Delta = 1 + 8 = 9$.

$$\begin{cases} r_1 = \frac{-1+3}{4} = \frac{1}{2} \\ r_2 = \frac{-1-3}{4} = -\frac{2}{2} = -1 \end{cases}$$

Les solutions sont de la forme

$$\boxed{y(t) = A e^{\frac{1}{2}t} + B e^{-t}}, \ (A,B) \in \mathbb{R}^2$$

2. L'équation homogène a été résolue à la question précédente. On cherche une

solution particulière sous la forme d'une constante : $y(t) = A$.

En remplaçant, il vient :

$2 \times 0 + 0 - A = 5$ donc $A = -5$.

Les solut° sont le la forme

$$\boxed{y(t) = -5 + A e^{\frac{1}{2}t} + B e^{-t}}, \ A \in \mathbb{R}, \ B \in \mathbb{R}.$$

3. C'est encore la même équat° homogène. On cherche cette fois une solution particulière sous la forme $y(x) = (ax+b)e^x$

On a $y'(x) = (ax+b)e^x + ae^x$

$y''(x) = (ax+b)e^x + 2ae^x$

En remplaçant, il vient :

$2y'' + y' - y = (2x+7)e^x$

$\iff 2((ax+b)e^x + 2ae^x) + (ax+b)e^x + ae^x - (ax+b)e^x = (2x+7)e^x$

$\iff xe^x[2a + a - a] + e^x[2b + 4a + b + a - b] = 2xe^x + 7e^x$.

En identifiant les coeff. de xe^x et de e^x :

$$\begin{cases} 2a = 2 \\ 2b + 5a = 7 \end{cases} \iff \begin{cases} a = 1 \\ b = 1. \end{cases}$$

Ainsi, les solut° sont les

$$\boxed{y(x) = (x+1)e^{x} + A\, e^{\frac{1}{2}x} + B e^{-x}}, \quad A \in \mathbb{R},\ B \in \mathbb{R}.$$

4. Par superposition des solut° de 2. et 3. :

$$\boxed{y(x) = -5 + (x+1)e^{x} + A\, e^{\frac{1}{2}x} + B e^{-x}}, \quad (A,B) \in \mathbb{R}^2$$

5. Toujours la même équat° homogène. On cherche une sol. particulière de la forme

$$y(x) = A \sin(x) + B \cos(x).$$

On a
$$y'(x) = A \cos(x) - B \sin(x)$$
$$y''(x) = -A \sin(x) - B \cos(x)$$

et en remplaçant :

$$2y'' + y' - y = 2(-A \sin x - B \cos x) + A \cos x - B \sin x - A \sin x + B \cos x.$$

En identifiant les termes en $\sin x$ et $\cos x$ avec $\sin x + 3 \cos x$, on a :

$$\begin{cases} -2A - B - A = 1. \\ -2B + A - B = 3 \end{cases} \iff \begin{cases} -3A - B = 1 \\ A - 3B = 3. \end{cases}$$

$$\iff \begin{cases} 10\,A = 0 \\ -10\,B = 10. \end{cases} \iff \begin{cases} A = 0 \\ B = -1. \end{cases}$$

Les solut° sont les

$$\boxed{y(x) = -\cos x + A\, e^{\frac{1}{2}x} + B e^{-x}}, \quad A, B \in \mathbb{R}^2$$

6. ⊛ L'équat° homogène est

$$y'' - 2y' + 2y = 0.$$

et l'équation caractéristique est

$$r^2 - 2r + 2 = 0.$$

$$\Delta = 4 - 8 = -4. \qquad \begin{cases} r_1 = 1 + i \\ r_2 = 1 - i \end{cases}$$

Les solution de l'équation homogène sont les $y_h = A\, e^{x} \cos(x + \varphi)$, $(A, \varphi) \in \mathbb{R}^2$

⊛ On cherche une solut° particulière sous la forme $y_p = ax^2 + bx + c$.

On a $y_p' = 2ax + b$

et $y_p'' = 2a$

D'où, en remplaçant,

$$2a - 2(2ax + b) + 2(ax^2 + bx + c) = 2x^2 - 2.$$

$$\iff 2ax^2 + (-4a + 2b)x + 2a - 2b + 2c = 2x^2 - 2$$

$$\iff 2a = 2 \text{ et } -4a + 2b = 0 \text{ et } 2a - 2b + 2c = -2$$

$$\Longleftrightarrow \begin{cases} a = 1 \\ b = 2 \\ c = 0 \end{cases}$$

Ainsi, $y_p = x^2 + 2x$ est une solut° particulière.

⊛ Les solut° de l'équation complète sont les

$$y(x) = x^2 + 2x + Ae^{x}\cos(x+\varphi), \quad (A,\varphi) \in \mathbb{R}^2.$$

7. $4y'' - 4y' + 1 = 9e^{-x}$

⊛ Equat° homogène : $4y'' - 4y' + y = 0$ (H)

(C) : $4r^2 - 4r + 1 = 0$

$\Delta = 16 - 16 = 0$. $\quad r = \frac{1}{2}$.

Les solut° de l'équat° (H) sont les

$$y(x) = Ae^{\frac{1}{2}x} + Bte^{\frac{1}{2}x}$$

⊛ Solut° particulière cherchée sous la forme $y(x) = Ae^{-x}$.

$$y'(x) = -Ae^{-x}$$
$$y''(x) = Ae^{-x}.$$

En remplaçant :

$$4A + 4A + A = 9 \Rightarrow A = 1.$$

* $y(x) = e^{-x}$ est solut° particulière.

⊛. Les solut° sont les

$$\boxed{y(x) = e^{-x} + Ae^{\frac{x}{2}} + Bte^{\frac{x}{2}}, \quad (A,B) \in \mathbb{R}^2}$$

8. C'est la même équat° homogène qu'en 7.
Il s'agit de trouver une solution particulière, qu'on écrit sous la forme

$$y(x) = P(x)e^{\frac{x}{2}} \quad \text{avec } P \text{ un polynôme.}$$

On a

$$y'(x) = P'(x)e^{\frac{x}{2}} + \frac{1}{2}P(x)e^{\frac{x}{2}}$$

et

$$y''(x) = P''(x)e^{\frac{x}{2}} + \frac{1}{2}P'(x)e^{\frac{x}{2}} + \frac{1}{2}P'(x)e^{\frac{x}{2}} + \frac{1}{4}P(x)e^{\frac{x}{2}}$$

En remplaçant :

$$\begin{aligned} 4y'' - 4y' + y &= 4\left[P'' + P' + \frac{1}{4}P\right]e^{\frac{x}{2}} \\ &\quad - 4\left[P' + \frac{1}{2}P\right]e^{\frac{x}{2}} \\ &\quad + P\,e^{\frac{x}{2}} \\ &= 4P''e^{\frac{x}{2}} + \underbrace{[4-4]}_{0}P'e^{\frac{x}{2}} + \underbrace{\left[4\cdot\frac{1}{4} - 4\frac{1}{2} + 1\right]}_{0}Pe^{\frac{x}{2}} \\ &= 4P''e^{\frac{x}{2}}. \end{aligned}$$

Pour que y soit solution, il faut donc que $4P'' = x$
Autrement dit, $P'' = \frac{x}{4}$.
en intégrant deux fois :

$P' = \frac{x^2}{8}$, $P = \frac{x^3}{24}$ fait l'affaire.

$\boxed{y(x) = \frac{x^3}{24}e^{\frac{x}{2}}}$ est une solution part.

4. Fibre optique

1. remarque : $\frac{d}{dx}\left(\left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right) = 2 \times \frac{dz}{dx} \times \frac{d^2z}{dx^2}$

(Écrit autrement : $(z^2)' = 2 . z . z'$)

En dérivant l'équat°, on obtient donc :

$$2 \times \frac{dz}{dx} \times \frac{d^2z}{dx^2} = -\frac{\alpha}{\cos^2(\theta_0)} \times 2 \times z \times \frac{dz}{dx}$$

En simplifiant par $2\frac{dz}{dx}$:

$$\boxed{\frac{d^2z}{dx^2} = -\frac{\alpha}{\cos^2(\theta_0)}\, z}$$

2. C'est une équat° différentielle du second ordre à coefficients constants, linéaire, homogène :

$$\frac{d^2z}{dx^2} + \frac{\alpha}{\cos^2\theta_0}\, z = 0.$$

L'équat° caractéristique est $r^2 + \frac{\alpha}{\cos^2\theta_0} = 0$, dont les solut° sont

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= i\sqrt{\frac{\alpha}{\cos^2\theta_0}} \\ \text{et} \quad r_2 &= -i\sqrt{\frac{\alpha}{\cos^2\theta_0}} \end{aligned}\right\} \text{si } \alpha > 0$$

Les solut° de l'équation dans le cas $\alpha > 0$ sont donc les

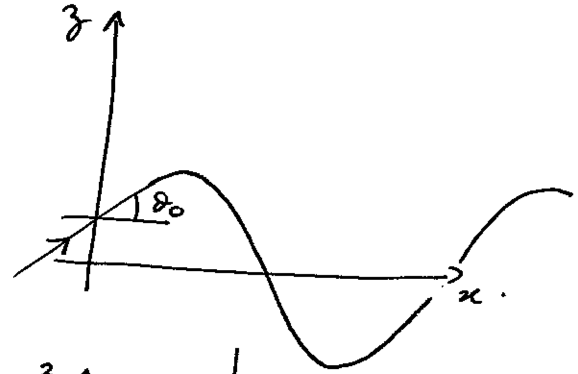
$$z(x) = A \cos\left(\frac{\sqrt{\alpha}}{\cos\theta_0}\, x + \varphi\right)$$

avec A et φ des constantes.

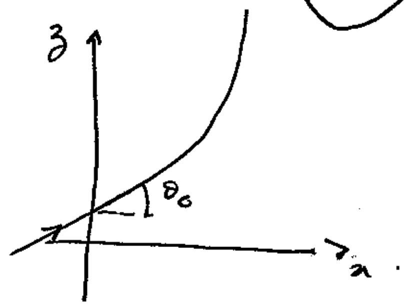
Si $\alpha < 0$, les solut° de l'équat° caractéristique sont $r_1 = \frac{\sqrt{-\alpha}}{\cos\theta_0}$ et $r_2 = -\frac{\sqrt{-\alpha}}{\cos\theta_0}$ et les solut° de l'équat° différentielle sont les

$$z(x) = A e^{\frac{\sqrt{-\alpha}}{\cos\theta_0}x} + B e^{-\frac{\sqrt{-\alpha}}{\cos\theta_0}x}.$$

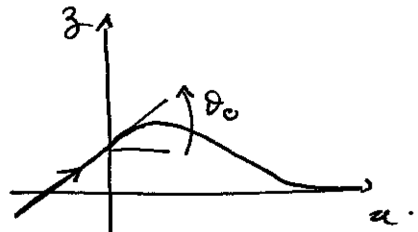
Allure des solut° :



cas $\alpha > 0$.
(le rayon lumineux oscille)

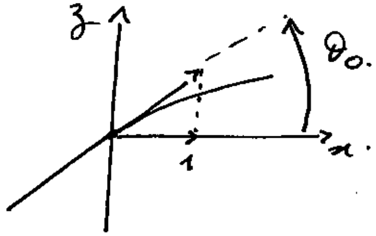


cas $\alpha < 0$ et $A \neq 0$
(le rayon diverge)



cas $\alpha < 0$ et $A = 0$.
(le rayon tend vers l'axe)

3. θ_0 est l'angle entre le vecteur $(1, z'(0))$ et l'horizontale $(1,0)$:



On a donc $z'(0) = \tan(\theta_0)$.

4. On a les conditions initiales

$$z(0) = 0 \quad \text{et} \quad z'(0) = \tan\theta_0.$$

Si $\alpha > 0$, on en tire

$$z(0) = A\cos(\varphi) = 0$$

et $z'(0) = -\dfrac{\sqrt{\alpha}}{\cos\theta_0} A \sin(\varphi) = \tan\theta_0$

D'où $\varphi = \frac{\pi}{2} \; [\pi]$

et $A = -\dfrac{\tan\theta_0 \cdot \cos\theta_0}{\sqrt{\alpha}} = -\dfrac{\sin\theta_0}{\sqrt{\alpha}}$.

Ainsi, si $\alpha = 0$,

$$z(x) = -\frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\alpha}} \cos\left(\frac{\sqrt{\alpha}}{\cos\theta_0}x + \frac{\pi}{2}\right).$$

Si $\alpha < 0$, on tire des conditions initiales :

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ \text{et } A\dfrac{\sqrt{-\alpha}}{\cos\theta_0} + B\left(-\dfrac{\sqrt{-\alpha}}{\cos\theta_0}\right) = \tan\theta_0. \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} A = -B \\ 2A = \dfrac{\tan\theta_0 \cos\theta_0}{\sqrt{-\alpha}} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \quad A = \frac{\sin\theta_0}{2\sqrt{-\alpha}} \quad \text{et} \quad B = -\frac{\sin\theta_0}{2\sqrt{-\alpha}}.$$

La solut° de l'équat° différentielle est,

si $\alpha < 0$:

$$z(x) = \frac{\sin\theta_0}{2\sqrt{-\alpha}} e^{\frac{\sqrt{-\alpha}}{\cos\theta_0}x} - \frac{\sin\theta_0}{2\sqrt{-\alpha}} e^{-\frac{\sqrt{-\alpha}}{\cos\theta_0}x}.$$

2. Oscillateur harmonique forcé

1. $\beta = \frac{\alpha}{m}$ et $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Si $\underline{x}(t)$ est solut° de (C), alors

$y(t) := \mathrm{Re}(\underline{x}(t))$ vérifie :

$\dot{y}(t) = \mathrm{Re}(\dot{\underline{x}}(t))$ et $\ddot{y}(t) = \mathrm{Re}(\ddot{x}(t))$.

Donc $m\ddot{y} + \alpha\dot{y} + ky = m\left[\mathrm{Re}\left(\ddot{x} + \beta\dot{x} + \omega_0^2 x\right)\right]$

$$= m\,\mathrm{Re}\left(\frac{F_0}{m} e^{i\omega t}\right) = m\frac{F_0}{m}\cos\omega t$$

$$= F_0 \cos\omega t.$$

C'est à dire que $\mathrm{Re}(\underline{x}(t))$ satisfait (R).

2. L'équation caractéristique associée est

$$r^2 + \beta r + \omega_0^2 = 0.$$

de discriminant $\Delta = \beta^2 - 4\omega_0^2$

- Si $\Delta > 0$, les solutions de (C) sont les

$$\underline{x}(t) = A e^{\frac{-\beta+\sqrt{\Delta}}{2}t} + B e^{\frac{-\beta-\sqrt{\Delta}}{2}t}, \quad A \in \mathbb{C}, B \in \mathbb{C}.$$

- Si $\Delta = 0$, les solut° sont les

$$\underline{x}(t) = A e^{-\frac{\beta}{2}t} + B t e^{-\frac{\beta}{2}t}$$

- Si $\Delta < 0$, les solut° sont les

$$\underline{x}(t) = A e^{\frac{-\beta+i\sqrt{-\Delta}}{2}t} + B e^{\frac{-\beta-i\sqrt{-\Delta}}{2}t}, \quad A \in \mathbb{C}, B \in \mathbb{C}.$$

3. $\underline{x}(t) = \underline{x}_0 e^{i\omega t}$

$\dot{\underline{x}} = \underline{x}_0 \cdot i\omega e^{i\omega t}$

$\ddot{\underline{x}} = \underline{x}_0 \cdot (i\omega)^2 e^{i\omega t} = -\underline{x}_0 \omega^2 e^{i\omega t}$

En remplaçant dans (C), il vient

$$\underline{x}_0 (i\omega)^2 e^{i\omega t} + \beta \underline{x}_0 i\omega e^{i\omega t} + \omega_0^2 \underline{x}_0 e^{i\omega t} = \frac{F_0}{m} e^{i\omega t}$$

$\iff -x_0\omega^2 + i\beta x_0 \omega + x_0\omega_0^2 = \frac{F}{m}$

$\iff x_0\left(\omega_0^2 - \omega^2 + i\beta\omega\right) = \frac{F}{m}$

$\iff x_0 = \frac{F}{m} \cdot \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\beta\omega}$

Une solut° particulière de (C) est donc

$$\boxed{\underline{x}(t) = \frac{F}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\beta\omega} e^{i\omega t}}$$

4. On remarque que, quel que soit le signe de Δ, les solutions de l'équation homogène tendent vers 0 :

- si $\Delta > 0$, $-\beta + \sqrt{\Delta} < 0$ car $\Delta > 0 \Rightarrow \beta^2 - 4\omega_0^2 < \beta^2$

$\Rightarrow \sqrt{\beta^2 - 4\omega_0^2} < \beta$

$\Rightarrow -\beta + \sqrt{\Delta} < -\beta + \beta = 0.$

de même, $-\beta - \sqrt{\Delta} < 0$. Donc

$$\lim_{t\to+\infty} A e^{\frac{-\beta+\sqrt{\Delta}}{2}t} + B e^{\frac{-\beta-\sqrt{\Delta}}{2}t} = 0.$$

- Si $\Delta = 0$, $-\frac{\beta}{2} < 0$ donc $e^{-\frac{\beta}{2}t}$ et $t e^{-\frac{\beta}{2}t}$ tendent vers 0 quand t tend vers $+\infty$.
- Si $\Delta < 0$, $\left|e^{\frac{-\beta \pm i\sqrt{-\Delta}}{2}t}\right| = e^{-\frac{\beta}{2}t} \xrightarrow[t\to+\infty]{} 0$ car $-\frac{\beta}{2} < 0$.

Ainsi, pour des temps longs, la différence entre les solut° de (C) et la solution particulière trouvée en (3) tend vers 0. Le comportement au long terme des solutions de (R) est donc proche de celui de la partie réelle de la solution particulière trouvée en (3) :

$$Re(\underline{x}(t)) = Re\left(\frac{F}{m}\,\frac{1}{\omega_0^2-\omega^2+i\beta\omega}\, e^{i\omega t}\right)$$

Cette fonction est une sinusoïde : en écrivant $\frac{F}{m}\,\frac{1}{\omega_0^2-\omega^2+i\beta\omega}$ sous forme $Ae^{i\varphi}$ (exponentielle) il vient $Re(\underline{x}(t)) = Re(Ae^{i\varphi}e^{i\omega t})$

$$= Re\left(A e^{i(\omega t+\varphi)}\right) = A\cos(\omega t+\varphi).$$

C'est bien un oscillateur, d'amplitude A, (et de déphasage φ) et de pulsation ω.

L'amplitude A est le module de

$$\frac{F}{m}\,\frac{1}{\omega_0^2-\omega^2+i\beta\omega}$$

Étudions cette amplitude. Il s'agit d'étudier, en fonction de ω, les variat° de

$$\left|\frac{\frac{F}{m}}{\omega_0^2-\omega^2+i\beta\omega}\right| = \frac{\frac{F}{m}}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+\beta^2\omega^2}}.$$

Pour alléger les notat°, on pose $x = \frac{\omega}{\omega_0}$ et $Q = \frac{\beta^2}{\omega_0^2}$, de sorte que l'amplitude devient

$$|A| = \frac{F}{m\,\omega_0^2}\,\frac{1}{\sqrt{(1-x^2)^2+\frac{x^2}{Q^2}}}$$; on étudie

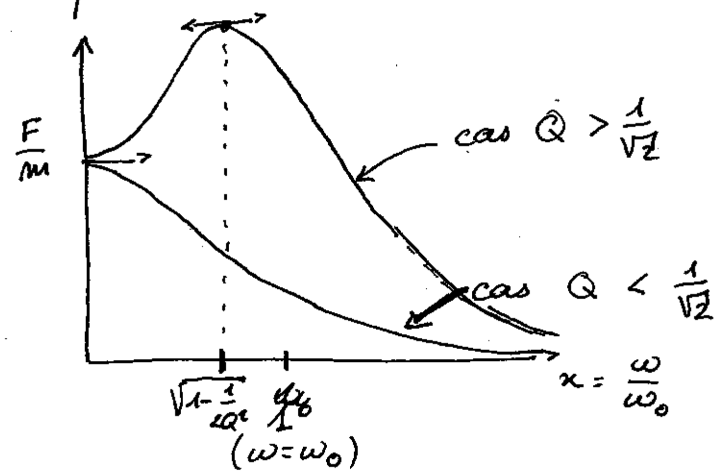
$$\frac{1}{\sqrt{(1-x^2)^2+\frac{x^2}{Q^2}}}$$, qui est $|A|$ à un facteur près.

En dérivant par rapport à x, il vient,

$$\frac{d|A|}{dx} = 0 \iff x\left(-2x^2+2-\frac{1}{Q^2}\right) = 0.$$

$$\iff \begin{cases} x = 0 \\ \text{ou} \\ x^2 = 1-\frac{1}{2Q^2} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \text{qui n'arrive que} \\ \text{pour } Q > \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ auquel} \\ \text{cas } x = \sqrt{1-\frac{1}{2Q^2}} \end{array} \right.$$

Graphe de A :

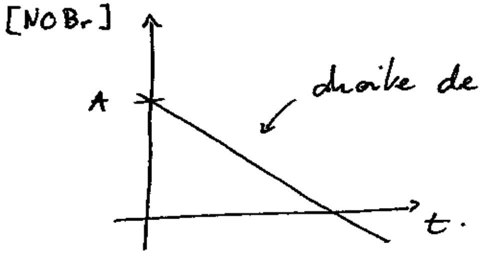


5. Cinétique d'une réaction

1. L'équat° s'écrit $\dfrac{d[NOBr](t)}{dt} = -k$

qui donne $[NOBr](t) = -kt + A$, $A \in \mathbb{R}$.

L'allure de cette solution est la suivante :



2. L'équation devient,

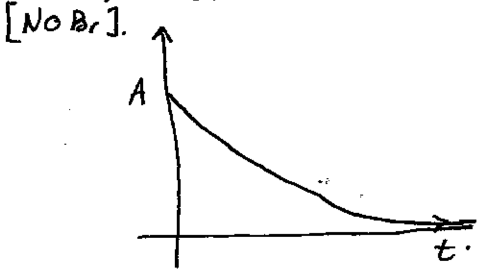
$$\frac{d[NOBr](t)}{dt} = -k[NOBr](t)$$

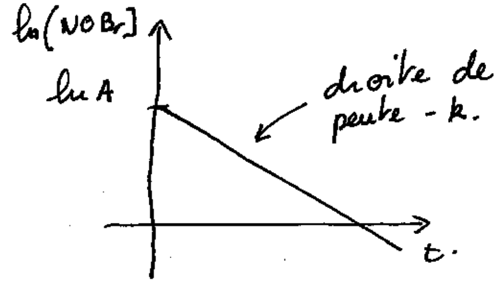
qui est linéaire, du premier ordre homogène.

Les solut° sont les

$$[NOBr](t) = A e^{-kt} \qquad A \in \mathbb{R}$$

Les allures de ces solut° et leurs logarithmes :





3. L'équation devient $\dfrac{d[NOBr]}{dt} = -k[NOBr]^2$.

Dérivons $\dfrac{1}{[NOBr]}$:

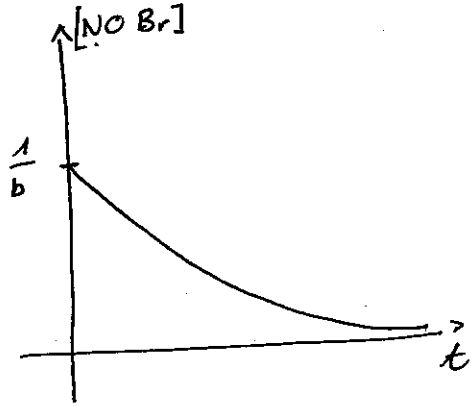
$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{[NOBr]}\right) = -\frac{\frac{d[NOBr]}{dt}}{[NOBr]^2} = k$$ d'après l'équation différentielle.

Comme $\dfrac{1}{[NOBr]}$ a une dérivée constante, c'est une fonction de la forme $t \mapsto kt + b$ avec ~~k~~ et b des constantes :

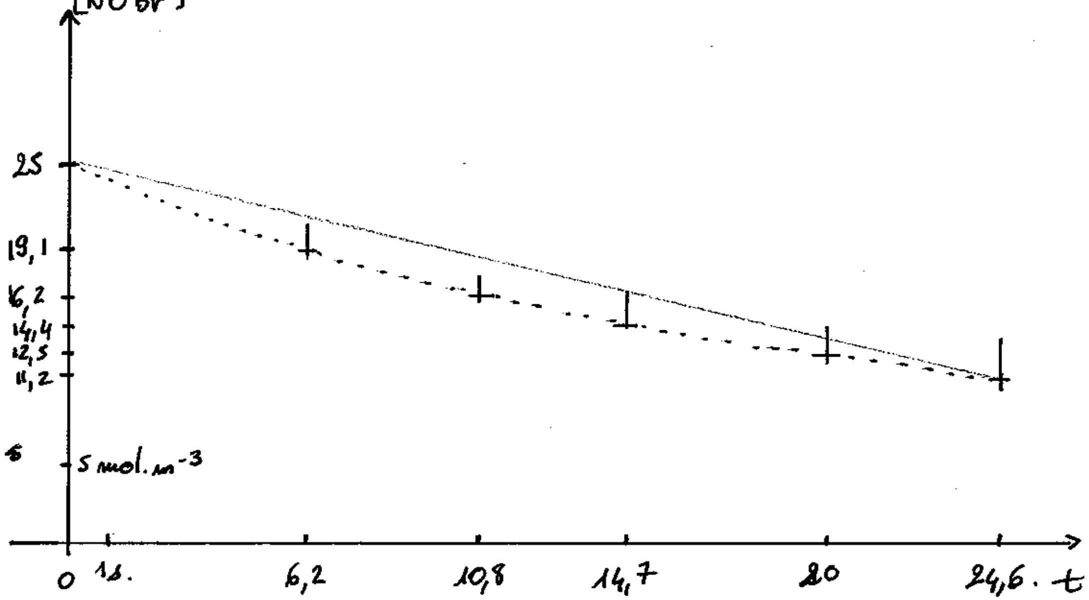
$$\frac{1}{[NOBr]} = kt + b$$

donc $[NOBr] = \dfrac{1}{kt+b}$. (Remarque : $b > 0$ pour que $[NOBr](0)$ ait un sens physique).

Allure :

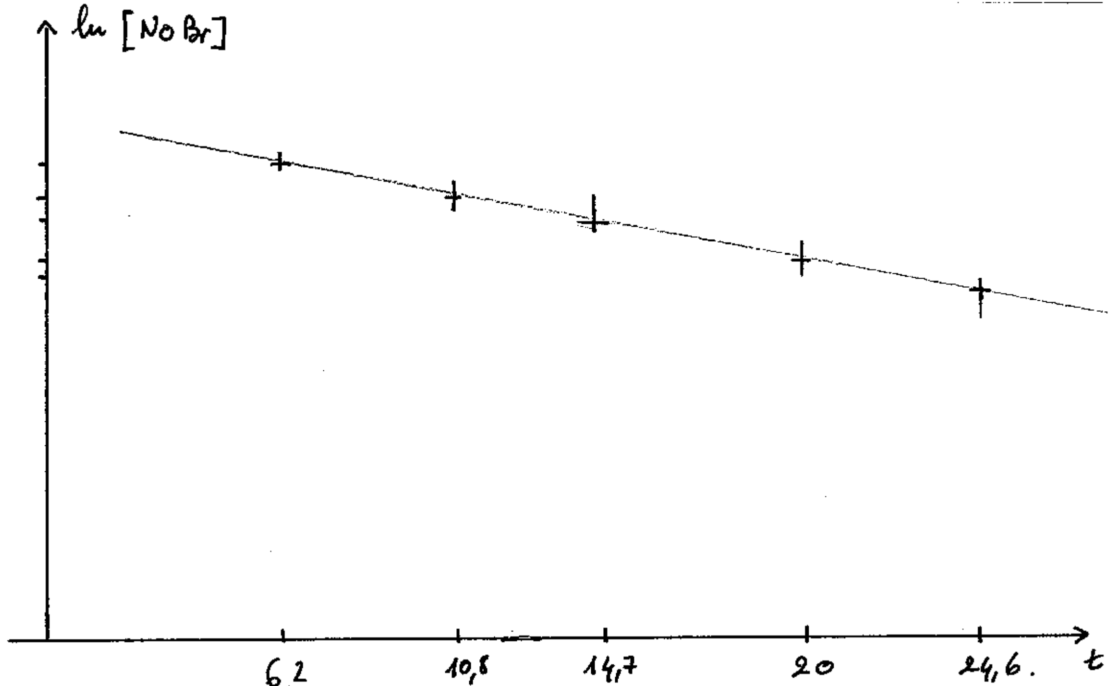


Traçons le graphe issu des mesures :



- L'allure est clairement décroissante, et peu probablement linéaire, ce qui élimine le cas $\alpha = 0$.
- Pour distinguer les cas $\alpha = 1$ et $\alpha = 2$, on trace $\ln[NOBr]$, linéaire pour $\alpha = 1$ et non linéaire pour $\alpha = 2$.

temps	0	6,2	10,8	14,7	20	24,6
$\ln[NOBr]$	3,22	2,94	2,79	2,69	2,53	2,42



L'allure semble bien linéaire. La réaction est sans doute d'ordre 1.