

CB1 du 14/01 : Physique (4h)

Solution de l'exercice 1 : Modélisation du mouvement d'une plateforme en mer :

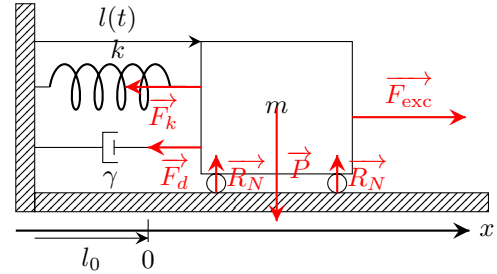
Q.1 Système : $\{M(m)\}$ plateforme en mer assimilé à un point matériel.

Référentiel : Le référentiel terrestre supposé galiléen noté.

Repérage : cartésien unidimensionnel selon l'axe (Ox) .

Bilan des forces :

- le poids : $\vec{P} = -mg\vec{u}_y$;
- la réaction normale : $\vec{R}_N = R_N\vec{u}_y$;
- la force de rappel : $\vec{F}_k = -k(l(t) - l_0)\vec{u}_x$;
- force de frottements fluides :
 $\vec{F}_d = -\gamma\vec{v}(M)_{/\mathcal{R}} = -\gamma\dot{x}\vec{u}_x$ avec $\gamma > 0$;
- force excitatrice sinusoïdale :
 $\vec{F}_{exc} = F_0 \cos(\omega t)\vec{u}_x$;



Il apparaît sur le schéma : $l(t) = l_0 + x(t)$ puisque la position d'équilibre de la masse est prise en $x = 0$.

Principe fondamental de la dynamique : $\vec{P} + \vec{R}_N + \vec{F}_k + \vec{F}_d + \vec{F}_{exc} = m\vec{a}(M)_{/\mathcal{R}}$

Par projection selon (Ox) : $-k(l(t) - l_0) - \gamma\dot{x} + F_0 \cos(\omega t) = m\ddot{x}$ (10)

\vec{P} et \vec{R}_N n'interviennent pas dans l'équation du mouvement (elles se compensent).

Q.2 Dans ce cas $\vec{F}_d = \vec{0}$ et $\vec{F}_{exc} = \vec{0}$ et l'équation du mouvement (10) se réécrit alors : $m\ddot{x} = -k(l(t) - l_0)$ soit avec $l(t) = l_0 + x(t)$:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{11}$$

Q.3 En posant $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ soit $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ la pulsation propre du système ($[\omega_0] = T^{-1}$), on réécrit l'EDL₂ précédente : $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ caractéristique de l'oscillateur harmonique.

Soit $x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t) + B_0 \sin(\omega_0 t)$ puis on applique les conditions initiales :

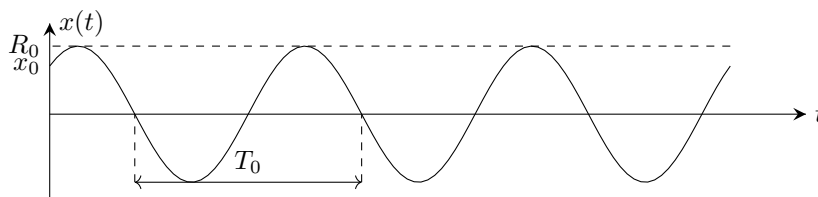
$$\begin{cases} x(t=0) = x_0 \\ \dot{x}(t=0) = \dot{x}_0 \text{ avec } \dot{x}(t) = -A_0\omega_0 \sin(\omega_0 t) + B_0\omega_0 \cos(\omega_0 t) \end{cases} \iff \begin{cases} A \times 1 + B \times 0 = x_0 \\ -A\omega_0 \times 0 + B\omega_0 = \dot{x}_0 \end{cases} \iff \begin{cases} A = x_0 \\ B = \dot{x}_0/\omega_0 \end{cases}$$

Finalement : $x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t)$ est la solution de l'EDL₂.

Q.4 On donne $x(t) = R_0 \cos(\omega_0 t - \phi_0) = R_0 \cos(\phi_0) \cos(\omega_0 t) + R_0 \sin(\phi_0) \sin(\omega_0 t)$.

Par identification avec $x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t) + B_0 \sin(\omega_0 t)$, on obtient :

$$\begin{cases} R_0 \cos(\phi_0) = A_0 \\ R_0 \sin(\phi_0) = B_0 \end{cases} \implies \begin{cases} R_0 = \sqrt{A_0^2 + B_0^2} \\ \tan(\phi_0) = \frac{B_0}{A_0} \end{cases} \implies \begin{cases} R_0 = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_0}\right)^2} \\ \tan(\phi_0) = \frac{\dot{x}_0}{x_0\omega_0} \end{cases}$$



Q.5 Allure de $x(t)$:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

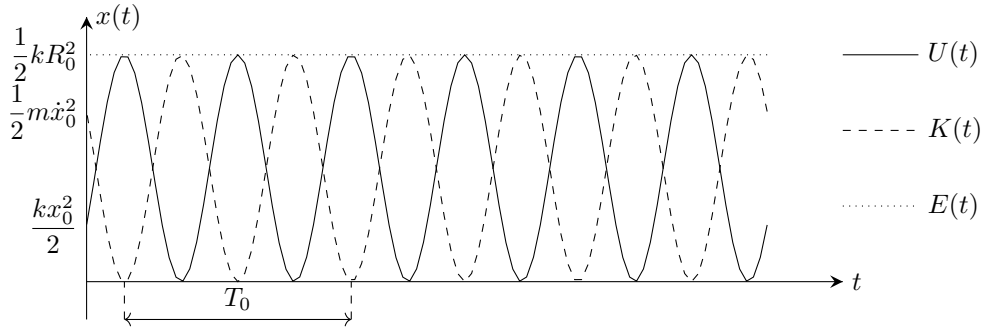
avec la période propre

Q.6 Par définition :
$$\begin{cases} K(t) = \frac{1}{2}m\dot{x}^2(t) = \frac{1}{2}m(-R_0\omega_0 \sin(\omega_0 t - \phi_0))^2 \text{ soit } K(t) = \frac{1}{2}mR_0^2\omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t - \phi_0) \\ U(t) = \mathcal{E}_{p,el}(M)_{/\mathcal{R}} + \mathcal{E}_{p,p}(M)_{/\mathcal{R}} = \frac{1}{2}kx^2(t) \text{ soit } U(t) = \frac{1}{2}kR_0^2 \cos^2(\omega_0 t - \phi_0) \end{cases}$$

D'où l'énergie mécanique du système :
$$E(t) = K(t) + U(t) = \frac{1}{2}kR_0^2 \underbrace{(\sin^2(\omega_0 t - \phi_0) + \cos^2(\omega_0 t - \phi_0))}_{=1}$$

soit
$$E(t) = \frac{R_0^2}{2}k = C^{te}$$
 en accord avec le modèle sans frottements de l'oscillateur harmonique.

Q.7 Soit :



Q.8 Avec ici $\vec{F}_{exc} = \vec{0}$, l'équation du mouvement (10) se réécrit alors :

$$m\ddot{x} = -kx - \gamma\dot{x} \iff \ddot{x} + \frac{\gamma}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \text{ on pose alors : } \begin{cases} \omega_0^2 = \frac{k}{m} \\ 2\zeta\omega_0 = \frac{\gamma}{m} \end{cases} \quad (12)$$

Pour réécrire : $\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0$ caractéristique de l'oscillateur mécanique amorti.

on a alors : $\zeta = \frac{\gamma}{2m\omega_0} = \frac{\gamma}{2m}\sqrt{\frac{m}{k}}$ soit $\zeta = \frac{\gamma}{2\sqrt{mk}}$ coefficient d'amortissement (proportionnel à γ).

Q.9 Dans le cas où $\zeta < 1$, on pose l'équation caractéristique associée à l'équation différentielle homogène :

$$r^2 + 2\zeta\omega_0 r + \omega_0^2 = 0 \text{ de discriminant } \Delta = 4\zeta^2\omega_0^2 - 4\omega_0^2 = 4\omega_0^2(\zeta^2 - 1)$$

Avec $\zeta < 1$ on a nécessairement $\Delta < 0 \implies$ régime transitoire pseudo-périodique.

Les solutions de l'équation caractéristique sont complexes conjuguées telles que :

$$r_{1,2} = -\zeta\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2} = -\frac{1}{\tau} \pm j\omega_d \quad \text{où } \begin{cases} \tau = \frac{1}{\zeta\omega_0} \text{ temps caractéristique du régime transitoire} \\ \omega_d = \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2} \text{ pseudo pulsation} \end{cases}$$

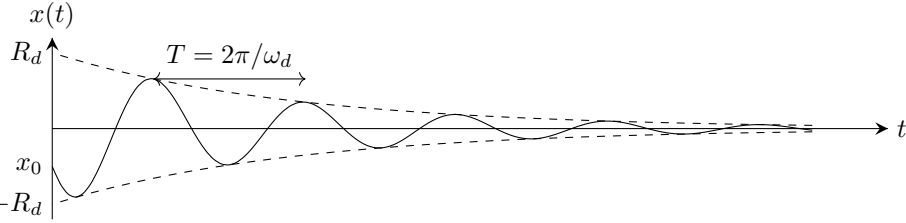
On admet la solution de l'équation différentielle homogène : $x_H(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} (A_d \cos(\omega_d t) + B_d \sin(\omega_d t))$ Par linéarité de l'EDL₂, $x(t) = x_p + x_H(t)$ avec ici $x_p = 0$ d'où la solution générale : soit $x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} (A_d \cos(\omega_d t) + B_d \sin(\omega_d t))$ et $\dot{x}(t) = -\zeta\omega_0 e^{-\zeta\omega_0 t} (A_d \cos(\omega_d t) + B_d \sin(\omega_d t)) + e^{-\zeta\omega_0 t} (-A_d\omega_d \sin(\omega_d t) + B_d\omega_d \cos(\omega_d t))$ on applique les conditions initiales du problème :

$$\begin{cases} x(t=0) = x_0 \\ \dot{x}(t=0) = \dot{x}_0 \end{cases} \iff \begin{cases} A_d \times 1 + B_d \times 0 = x_0 \\ -\zeta\omega_0(A_d + 0) + 1 \times (0 + B_d\omega_d) = \dot{x}_0 \end{cases} \iff \begin{cases} A_d = x_0 \\ B_d = \frac{1}{\omega_d} \left(\dot{x}_0 + \frac{x_0}{\zeta\omega_0} \right) \end{cases}$$

Q.10 On donne : $x(t) = R_d e^{-\zeta\omega_0 t} \cos(\omega_d t - \phi_d) = R_d e^{-\zeta\omega_0 t} (\cos(\phi_d) \cos(\omega_d t) + \sin(\phi_d) \sin(\omega_d t))$

Par identification avec $x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} (A_d \cos(\omega_d t) + B_d \sin(\omega_d t))$ on obtient :

$$\begin{cases} R_d \cos(\phi_d) = A_d \\ R_d \sin(\phi_d) = B_d \end{cases} \implies \begin{cases} R_d = \sqrt{A_d^2 + B_d^2} \\ \tan(\phi_d) = \frac{B_d}{A_d} \end{cases} \implies \boxed{\begin{cases} R_d = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0 + x_0 \zeta \omega_0}{\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}}\right)^2} \\ \tan(\phi_d) = \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \left(\frac{\dot{x}_0}{x_0 \omega_0} + \zeta\right) \end{cases}}$$



Q.11 Allure de $x(t)$:

Q.12 Par définition : $K(t) = \frac{1}{2} m \dot{x}^2(t) = \frac{1}{2} m (-\zeta R_d \omega_0 \cos(\omega_d t - \phi_d) e^{-\zeta\omega_0 t} - R_d \omega_d e^{-\zeta\omega_0 t} \sin(\omega_d t - \phi_d))^2$

$$K(t) = \frac{1}{2} m R_d^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} (\zeta \omega_0 \cos(\omega_d t - \phi_d) + \omega_d \sin(\omega_d t - \phi_d))^2$$

$$K(t) = \frac{1}{2} m R_d^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} (\zeta^2 \omega_0^2 \cos^2(\omega_d t - \phi_d) + \omega_d^2 \sin^2(\omega_d t - \phi_d) + 2\zeta \omega_0 \omega_d \cos(\omega_d t - \phi_d) \sin(\omega_d t - \phi_d))$$

$$K(t) = \frac{1}{2} m R_d^2 \omega_0^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} (\zeta^2 \cos^2(\omega_d t - \phi_d) + (1 - \zeta^2) \sin^2(\omega_d t - \phi_d) + 2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \cos(\omega_d t - \phi_d) \sin(\omega_d t - \phi_d))$$

$$U(t) = \frac{1}{2} k x^2(t) = \frac{1}{2} k R_D^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} \cos^2(\omega_d t - \phi_d)$$

$$U(t) = \frac{1}{2} m R_D^2 \omega_0^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} \cos^2(\omega_d t - \phi_d)$$

D'où l'énergie mécanique du système : $E(t) = K(t) + U(t)$

$$E(t) = \frac{1}{2} k R_d^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} (\zeta^2 \cos^2(\omega_d t - \phi_d) + (1 - \zeta^2) \sin^2(\omega_d t - \phi_d) + 2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \cos(\omega_d t - \phi_d) \sin(\omega_d t - \phi_d) + \cos^2(\omega_0 t - \phi_0))$$

$$E(t) = \frac{1}{2} k R_d^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} (1 + \zeta^2 (\cos^2(\omega_d t - \phi_d) - \sin^2(\omega_d t - \phi_d)) + 2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \cos(\omega_d t - \phi_d) \sin(\omega_d t - \phi_d))$$

$$E(t) = \frac{1}{2} k R_d^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} (1 + \zeta^2 (\cos^2(\omega_d t - \phi_d) - \sin^2(\omega_d t - \phi_d)) + \zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \sin(2\omega_d t - 2\phi_d))$$

$$\boxed{E(t) = \frac{1}{2} k R_d^2 e^{-2\zeta\omega_0 t} (1 + \zeta^2 \cos(2\omega_d t - 2\phi_d) + \zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \sin(2\omega_d t - 2\phi_d))}$$

On retrouve le modèle de l'oscillateur harmonique pour $\zeta = 0$: $E(t) = \frac{1}{2} k R_d^2 = C^{te}$

Pour $\zeta = 1$ on se trouve en régime transitoire critique (retour à l'équilibre mécanique le plus rapide) dans ce cas $\omega_d = 0$ et $E(t) \simeq C^{te} \times e^{-2\omega_0 t}$ décroissance exponentielle de l'énergie.

Q.13 Par application du théorème de la puissance mécanique dans \mathcal{R} galiléen :

$$\frac{dE}{dt} = -\gamma \vec{v} \cdot \vec{v} = -\gamma \dot{x}^2 < 0$$

L'énergie totale est bien une fonction décroissante du temps (influence des frottements).

Q.14 Les instants t_1 et t_2 étant séparés d'une pseudo période T , on a alors :

$$\ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) = \ln\left(\frac{R_d e^{-\zeta\omega_0 t_1}}{R_d e^{-\zeta\omega_0 t_2}}\right) = \zeta\omega_0(t_2 - t_1) = \zeta\omega_0 \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

Dans le cas limite où $\zeta \ll 1$: $\sqrt{1 - \zeta^2} \simeq 1$, on a alors : $\ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \simeq 2\pi\zeta$

Q.15 Relevés graphiques : $x_1 \simeq 1,4602$ cm et $x_2 \simeq 1,0661$ cm on a alors AN : $\zeta = 5 \times 10^{-2}$

Dans ce cas on a également $\omega_d \simeq \omega_0$ soit $\omega_0 \simeq \frac{2\pi}{t_2 - t_1}$, d'où : $\left| \begin{array}{l} k = 2,7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \\ \gamma \simeq 1,7 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \end{array} \right.$ Lorsque η augmente, la décroissance est plus rapide et on observe moins d'oscillations.

Q.16 On réécrit l'équation du mouvement (10) : $m\ddot{x} = -kx(t) - \gamma\dot{x}(t) + F_0 \cos(\omega t)$

On pose de même $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ et $2\zeta\omega_0 = \frac{\gamma}{m}$ pour réécrire :

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \frac{F_0}{m} \cos(\omega t)$$

Q.17 Au signal réel $x(t) = X \cos(\omega t - \phi)$ est associé le signal complexe : $\underline{x}(t) = X e^{j(\omega t - \phi)}$ on réécrit l'EDL₂ en notations complexes :

$$\ddot{\underline{x}} + 2\zeta\omega_0\dot{\underline{x}} + \omega_0^2\underline{x} = \frac{F_0}{m} e^{j\omega t} \iff X e^{-j\phi} e^{j\omega t} (-\omega^2 + 2\zeta\omega_0 j\omega + \omega_0^2) = \frac{F_0}{m} e^{j\omega t}$$

d'où $X = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega^2\omega_0^2}}$ et $\tan(\phi) = \frac{2\zeta\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$

Q.18 On exprime $M = \frac{X}{F_0/m} = \frac{k/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega^2\omega_0^2}}$ avec $r = \omega/\omega_0$ pulsation réduite :

$$M = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\zeta^2\frac{\omega^2\omega_0^2}{\omega_0^4}}} \iff M = \frac{1}{(1 - r^2)^2 + 4\zeta^2r^2}$$

sans dimension et est analogue à une fonction de transfert \underline{H} .

Q.19 À la résonance, l'amplitude réelle de la réponse passe par un maximum, soit si $g(r) = (1 - r^2)^2 + 4\zeta^2r^2$ passe par un minimum. On résout alors $g'(r_{\text{res}}) = 0$:

$$2 \times (-2r_{\text{res}}) \times (1 - r_{\text{res}}^2) + 4\zeta^2 \times 2r_{\text{res}} = 0 \iff 2r_{\text{res}}(4\zeta^2 - 2(1 - r_{\text{res}}^2)) = 0 \iff 4\zeta^2 - 2 + 2r_{\text{res}}^2 = 0$$

Comme $r_{\text{res}} \neq 0$: $r_{\text{res}}^2 = 1 - 2\zeta^2 > 0$ si $\zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}$ alors $\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 2\zeta^2}$.

Q.20 Exploitation de la figure : dans le cas où $\zeta \ll 1$, on relève $T_0 \simeq 4\text{s}$.

Sachant que $\omega_r \simeq \omega_0$, avec une période d'excitation de 8s, on est suffisamment loin de la résonance et permet d'éviter des amplitudes de mouvement et de déformation trop importantes.

Solution de l'exercice 2 : Camera de contrôle des plaques d'immatriculation

Q.1 Pour former l'image réelle ($\overline{OA'} > 0$) d'un objet réel ($\overline{OA} < 0$) il faut nécessairement utiliser une lentille convergente ($f' > 0$).

On cherche à établir la **condition de projection** :

On cherche $x = \overline{PO}$ à l'aide de la relation de conjugaison $\frac{1}{\overline{OC}} - \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{1}{f'}$

avec $\overline{PC} = D$ et $\overline{OC} = D - x \implies \frac{1}{D - x} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f'} \iff x^2 - Dx + Df' = 0$

de discriminant $\Delta = D^2 - 4DF' = D(D - 4f')$ on ne cherche que des solutions réelles à conditions que $\Delta \geq 0 \implies D \geq 4f'$

Q.2 On applique la relation de conjugaison avec origine au centre O :

$$\frac{1}{\overline{OC}} - \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{1}{f'} \implies \frac{1}{\overline{OC}} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{\overline{OP}} \implies \overline{OC} = \frac{f'L}{L - f'}$$

Pour que $\overline{OC} > 0$ on doit forcément avoir $f' > 0$ et $L > f'$.

Q.3 Le grandissement γ est défini par : $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OC}}{\overline{OP}}$ soit $\gamma = \frac{f'}{f' - L} < 0$

Q.4 On voit que dans tous les cas $L \gg f'$ d'où $\overline{OC} \simeq f'$ l'image se situe dans le plan focal image de la lentille où l'on placera le capteur CCD.

Q.5 De même $\gamma \simeq -\frac{f'}{L}$.

Modèle de caméra	1	2	3	4	5
$\gamma(10^{-3})$	-1,75	-1,72	-1,78	-1,71	-1,78

D'où la valeur moyenne : $\gamma_{\text{moy}} = 1,75 \times 10^{-3}$.

Q.6 L'énoncé nous indique que le capteur CCD est un rectangle de $\left\{ \begin{array}{l} \text{longueur} \quad 752a \\ \text{largeur} \quad 582a \end{array} \right.$ On nous indique la

diagonale $d = a\sqrt{752^2 + 582^2}$ soit $d = 951a = 0,635 \text{ cm}$

On en déduit la longueur a du côté d'un pixel : $a = 6,68 \mu\text{m}$

D'où les dimension du capteur CCD : $\left\{ \begin{array}{l} \text{longueur} \quad 5,02 \text{ mm} \\ \text{largeur} \quad 3,89 \text{ mm} \end{array} \right.$

Q.7 La "largeur" du champ de vue vaut $\frac{5,02 \times 10^{-3}}{1,75 \times 10^{-3}} = 2,87 \text{ m}$.

La "hauteur" du champ de vue vaut $\frac{3,89 \times 10^{-3}}{1,75 \times 10^{-3}} = 2,22 \text{ m}$

D'où les dimensions du champ de vue : $2,87 \times 2,22 \text{ m}^2$

Pour la hauteur il n'y a aucun problème car les plaques d'immatriculation sont installées en bas des véhicules. Pour la largeur : 2,87 m est suffisant pour une route à sens unique. Il faut 1 caméra par voie pour des routes plus larges.

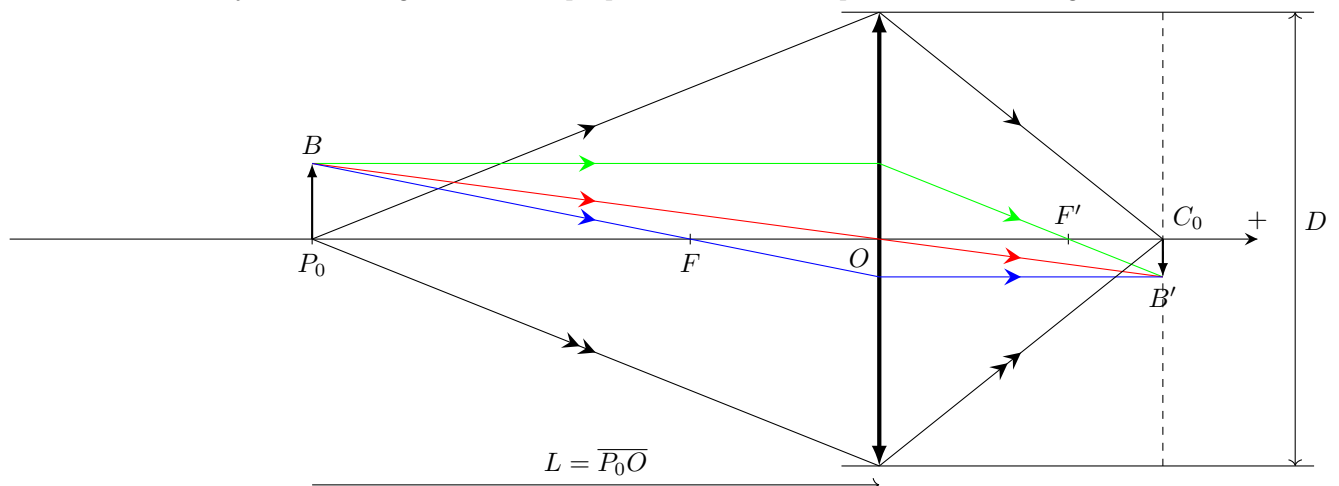
Q.8 Un caractère de la plaque fait 79 mm de haut et 50 mm de large, que l'on multiplie par la grandissement transversal (en valeur absolue) et on obtient :

$$138 \times 87,5 \mu\text{m}^2 \text{ soit en pixels : } 21 \times 13$$

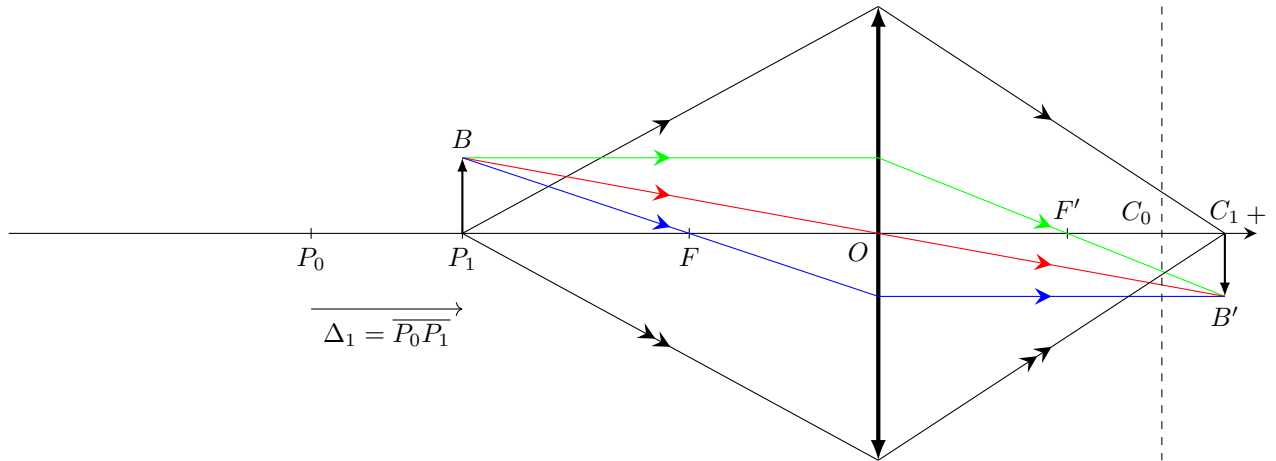
Q.9 γ trop grand \implies zone observée beaucoup plus γ trop petit \implies L'image des lettres sur trop peu de pixels pour être reconnu.

Q.10 De jour comme de nuit, il y a beaucoup trop de sources de lumière visible. Effectuer des mesures IR permet d'effectuer des recouvrements entre les résultats et minimiser les erreurs.

Q.11 On considère un objet P_0B orthogonal à l'axe optique et on cherche la position de son image.



Q.12 On a la figure suivante :



Q.13 On applique le théorème de Thalès aux triangles formés par les rayons passant par les bords de la lentille et l'axe optique :

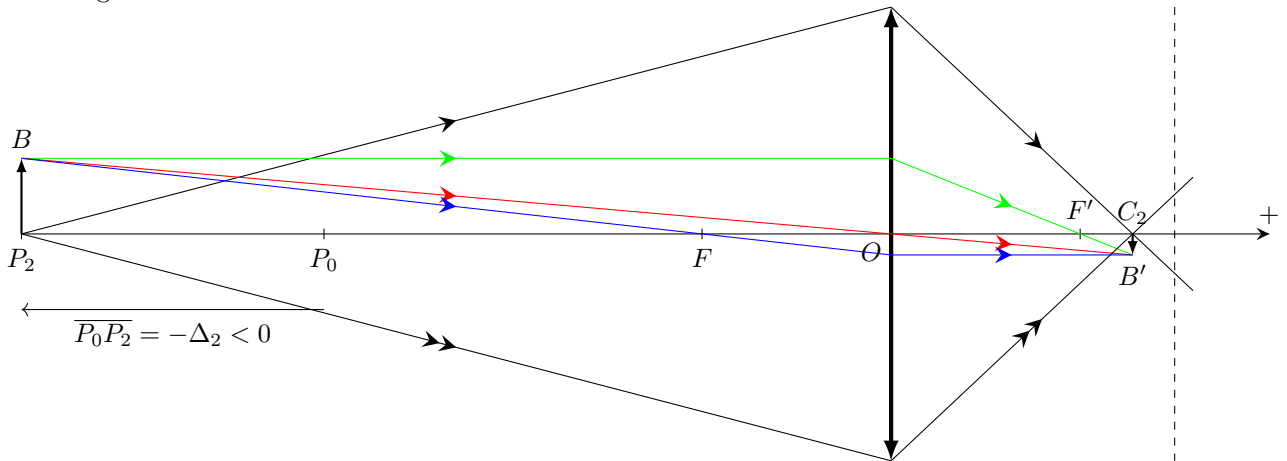
$$\frac{\overline{C_1C_0}}{\overline{C_1O}} = \frac{d_1}{D} \implies d_1 = D \left(1 - \frac{\overline{OC_0}}{\overline{OC_1}} \right)$$

On a vu que $\overline{OC_0} = \frac{f'L}{L-f'}$ donc en remplaçant L par $L - \Delta_1$ on a $\overline{OC_1} = \frac{f'(L - \Delta_1)}{L - \Delta_1 - f'}$ soit :

$$d_1 = D \left(1 - \frac{\overline{OC_0}}{\overline{OC_1}} \right) \iff d_1 = D \left(1 - \frac{(L - \Delta_1 - f')L}{(L - \Delta_1)(L - f')} \right) \iff d_1 = D \left(\frac{(L - \Delta_1)(L - f') - (L - \Delta_1 - f')L}{(L - f')(L - \Delta_1)} \right)$$

$$d_1 = D \frac{f' \Delta_1}{(L - f')(L - \Delta_1)}$$

Q.14 Soit la figure suivante :



Q.15 Sachant que $L \ll f'$: $d_1 \simeq D \frac{f' \Delta_1}{L(L - \Delta_1)}$ et $d_2 \simeq D \frac{f' \Delta_2}{L(L + \Delta_2)}$.

Q.16 On considère $a = D \frac{f' \Delta_{1\text{lim}}}{L(L - \Delta_{1\text{lim}})} \implies \Delta_{1\text{lim}} = \frac{L^2 a}{Df' + aL}$

On considère $a = D \frac{f' \Delta_{2\text{lim}}}{L(L + \Delta_{2\text{lim}})} \implies \Delta_{2\text{lim}} = \frac{L^2 a}{Df' - aL}$

Q.17 AN : $\Delta_{1\text{lim}} = 2,54 \text{ m}$ et $\Delta_{2\text{lim}} = 5,84 \text{ m}$

Q.18 Soit $Z = \Delta_{1\text{lim}} + \Delta_{2\text{lim}}$:

$$Z = L^2 a \left(\frac{1}{Df' + aL} + \frac{1}{Df' - aL} \right) \iff Z = L^2 a \left(\frac{Df' - aL + Df' + aL}{(Df' + aL)(Df' - aL)} \right) \implies Z = \frac{2Df' L^2 a}{(Df')^2 - (aL)^2}$$

Q.19 AN : $Df' = 1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ et $aL = 6,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ on peut donc conclure que $(Df)^2 \gg (aL)^2$ soit :

$$Z \simeq \frac{2L^2 a}{Df'}$$

Q.20 Avec une valeur de D faible, on obtient une profondeur de champ du même ordre de grandeur que L . Ça permet d'éviter d'installer un système de mise au point et de prendre de faire des acquisition rapidement.

... **FIN** ...