

Contrôle continu n° 2

Durée : 1 heure. Documents et calculatrice interdits. Une attention particulière sera apportée à la rédaction. Le barème est indicatif et susceptible de changer.

Exercice 1. Soit C une courbe dans \mathbb{R}^2 définie par une équation polaire $\rho = \rho(\theta)$, avec ρ une fonction C^1 sur un intervalle $I = [a, b] \subset \mathbb{R}$. Autrement dit, le paramétrage cartésien de C est donné par $(x(\theta), y(\theta)) = (\rho(\theta) \cos(\theta), \rho(\theta) \sin(\theta))$, pour $\theta \in I$.

1. Calculer la longueur de la courbe en fonction de ρ . (3 points)
2. Application : montrer que la spirale d'équation polaire $\rho(\theta) = ae^{-b\theta}$ avec $a, b > 0$, définie pour $\theta \in [0, \infty[$, a une longueur finie et calculer celle-ci. (3 point)

Solution.

1. On part du paramétrage $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^2$ donné par

$$\gamma(\theta) = (\rho(\theta) \cos \theta, \rho(\theta) \sin \theta).$$

On calcule $\gamma'(\theta)$:

$$\gamma'(\theta) = (\rho'(\theta) \cos \theta - \rho(\theta) \sin \theta, \rho'(\theta) \sin \theta + \rho(\theta) \cos \theta),$$

et on en déduit

$$\|\gamma'(\theta)\|^2 = \rho'(\theta)^2 + \rho(\theta)^2.$$

Ainsi, en utilisant la formule de la longueur d'un arc paramétré, si $I = [a, b]$, on a

$$\ell(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(\theta)\| d\theta = \int_a^b \sqrt{\rho'(\theta)^2 + \rho(\theta)^2} d\theta.$$

2. Soit $T \geq 0$. Pour calculer la longueur de la courbe sur $[0, T]$, on applique la formule de la question 1 (on peut aussi recalculer directement) :

$$\ell(\gamma|_{[0,T]}) = \int_0^T a\sqrt{b^2 + 1}e^{-b\theta} d\theta = a\sqrt{b^2 + 1} \int_0^T e^{-b\theta} d\theta.$$

On calcule l'intégrale, ce qui donne

$$\ell(\gamma|_{[0,T]}) = a\sqrt{1 + \frac{1}{b^2}}(e^0 - e^{-bT}) = a\sqrt{1 + \frac{1}{b^2}}(1 - e^{-bT}).$$

Pour obtenir la longueur totale, il suffit de faire tendre T vers l'infini. D'après la formule précédente, il vient que

$$\ell(\gamma) = \lim_{T \rightarrow \infty} \ell(\gamma|_{[0,T]}) = a\sqrt{1 + \frac{1}{b^2}} < \infty.$$

Exercice 2. Soit C la courbe de paramétrage $\gamma : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^3, t \mapsto (\cos(t), -\sin(t), 2t)$, pour un certain $T > 0$.

1. Calculer le vecteur tangent unitaire $T(t)$ et la courbure $k(t)$ en tout point de la courbe. (2 points)
2. Montrer que l'angle entre $T(t)$ et le vecteur $\vec{u} = (0, 0, 1)$ est constant. On dit que γ est une hélice. (2 points)

Solution.

1. On applique les formules du cours :

$$T(t) = \frac{1}{\|\gamma'(t)\|} \gamma'(t), \quad k(t) = \frac{\|\gamma'(t) \times \gamma''(t)\|}{\|\gamma'(t)\|^3}.$$

On a en l'occurrence

$$\gamma'(t) = (-\sin(t), -\cos(t), 2), \quad \|\gamma'(t)\|^2 = 5,$$

de sorte que

$$T(t) = \frac{1}{\sqrt{5}}(-\sin(t), -\cos(t), 2).$$

D'autre part,

$$\gamma''(t) = (-\cos(t), \sin(t), 0),$$

donc

$$\gamma'(t) \times \gamma''(t) = -(2\sin(t), 2\cos(t), 1).$$

Il vient que $\|\gamma'(t) \times \gamma''(t)\| = \sqrt{5}$, et que $k(t) = \frac{\sqrt{5}}{5\sqrt{5}} = \frac{1}{5}$. En particulier la courbure est constante.

2. On calcule le produit scalaire $\langle T(t), \vec{u} \rangle$ pour $\vec{u} = (0, 0, 1)$:

$$\langle T(t), \vec{u} \rangle = \frac{2}{\sqrt{5}},$$

donc il ne dépend pas de t . Or, si l'on note $\theta(t)$ l'angle entre $T(t)$ et \vec{u} on a

$$\langle T(t), \vec{u} \rangle = \|T(t)\| \|\vec{u}\| \cos(\theta(t)) = \cos(\theta(t)) = \frac{2}{\sqrt{5}},$$

ce qui montre que l'angle $\theta(t)$ est constant lorsque t varie.

Exercice 3. Soit C le graphe de la fonction $f : x \mapsto x \sin(\frac{1}{x})$ sur $]0, 1[$.

1. Montrer que $\gamma : (t) = (t, f(t))$ est un paramétrage régulier de C . Peut-on étendre ce paramétrage à $[0, 1]$? (1 point)
2. On note L la longueur de C .
 - (a) Montrer que $L \geq \int_0^1 |f'(t)| dt$. (1 point)
 - (b) On pose $\delta = \frac{\pi}{6}$. Montrer, pour tout k assez grand et tout $t \in [\frac{1}{2k\pi+\delta}, \frac{1}{2k\pi-\delta}]$, $|f'(t)| \geq \frac{1}{2t}$. (2 points)
 - (c) En déduire l'inégalité suivante pour un entier $K \geq 0$ assez grand (2 points)

$$L \geq \frac{1}{2} \sum_{k \geq K} \ln \left(\frac{2k\pi + \delta}{2k\pi - \delta} \right).$$

- (d) (*Question bonus*) En conclure que $L = +\infty$. On pourra admettre que la série harmonique $\sum_{k \geq 1} \frac{1}{k}$ diverge. (2 points)

Solution.

- Le fait que γ soit un paramétrage de C est une conséquence de la définition du graphe d'une fonction. Il s'agit surtout de montrer qu'il est régulier. Cela découle du fait que f est de classe \mathcal{C}^1 sur $]0, 1[$, et que $\gamma'(t) = (1, f'(t)) \neq (0, 0)$ pour tout $t \in]0, 1[$. En revanche on ne peut pas étendre le paramétrage à $t = 0$ car f n'est pas dérivable en 0 (elle reste néanmoins continue).
- (a) Par définition,

$$L = \int_0^1 \sqrt{t^2 + f'(t)^2} dt,$$

or pour tout $t \in]0, 1[$, $t^2 \geq 0$ donc

$$L \geq \int_0^1 |f'(t)| dt.$$

- (b) Calculons $f'(t)$ pour tout $0 < t < 1$:

$$f'(t) = \sin\left(\frac{1}{t}\right) - \frac{1}{t} \cos\left(\frac{1}{t}\right),$$

et lorsque $\frac{1}{2k\pi + \delta} \leq t \leq \frac{1}{2k\pi - \delta}$, on a $2k\pi - \delta \leq \frac{1}{t} \leq 2k\pi + \delta$. Or, pour $k \geq 1$ on a donc $\frac{1}{t} \geq 2\pi - \delta > 1$, donc

$$|f'(t)| = |\sin(1/t) - 1/t \cos(1/t)| \geq 1/t \cos(1/t) - |\sin(1/t)|.$$

Or pour tout $x \in]2k\pi - \delta, 2k\pi + \delta[$, on a $|x \cos x| = x \cos x \geq x \cos(\delta) = \frac{\sqrt{3}}{2}x$, et $|\sin x| \geq \sin \delta = \frac{1}{2}$, donc

$$|f'(t)| \geq \frac{\sqrt{3}}{2t} - \frac{1}{2} = \frac{\sqrt{3} - t}{2t} \geq \frac{1}{2t},$$

en utilisant le fait que t est très petit pour k assez grand.

- (c) Soit K assez grand pour que l'inégalité de la question (b) soit vraie, et tel que pour tout $k \geq K$ on ait $[\frac{1}{2k\pi + \delta}, \frac{1}{2k\pi - \delta}] \subset]0, 1[$. On a

$$\int_0^1 |f'(t)| dt \geq \sum_{k \geq K} \int_{\frac{1}{2k\pi + \delta}}^{\frac{1}{2k\pi - \delta}} |f'(t)| dt \geq \sum_{k \geq K} \int_{\frac{1}{2k\pi + \delta}}^{\frac{1}{2k\pi - \delta}} \frac{1}{2t} dt,$$

et on peut calculer explicitement le terme de droite :

$$\sum_{k \geq K} \int_{\frac{1}{2k\pi + \delta}}^{\frac{1}{2k\pi - \delta}} \frac{1}{2t} dt = \frac{1}{2} \sum_{k \geq K} [\ln(t)]_{\frac{1}{2k\pi + \delta}}^{\frac{1}{2k\pi - \delta}} = \frac{1}{2} \sum_{k \geq K} \ln\left(\frac{2k\pi + \delta}{2k\pi - \delta}\right).$$

- (d) Il reste à comparer deux séries terme à terme. Pour tout $k \geq K$,

$$\ln\left(\frac{2k\pi + \delta}{2k\pi - \delta}\right) = \ln\left(1 + \frac{2\delta}{2k\pi - \delta}\right) \sim \frac{2\delta}{2k\pi} = \frac{\delta}{k\pi}.$$

Le terme général de la série qu'on veut calculer est donc équivalent à celui de la série harmonique (à une constante près), qui diverge, donc la série de terme général

$$\ln \left(\frac{2k\pi + \delta}{2k\pi - \delta} \right)$$

diverge, et on en déduit bien que $L = +\infty$.

Exercice 4. Soit \mathbb{T} la surface décrite par l'équation implicite suivante (il s'agit d'un tore de révolution), pour $0 < r < R$:

$$\left(\sqrt{x^2 + y^2} - R \right)^2 + z^2 = r^2.$$

1. Montrer que $\sigma : [0, 2\pi] \times [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}^3$ défini par

$$\sigma(\theta, \phi) = ((R + r \cos \theta) \cos \phi, (R + r \cos \theta) \sin \phi, r \sin \theta)$$

est un paramétrage régulier de \mathbb{T} . (2 points)

2. Donner un paramétrage du plan tangent à \mathbb{T} au point $(r + R, 0, 0)$. (2 points)

Solution.

1. On pose $x(\theta, \phi), y(\theta, \phi), z(\theta, \phi)$ les coordonnées de σ . On vérifie que ces coordonnées satisfont l'équation du tore :

$$x(\theta, \phi)^2 + y(\theta, \phi)^2 = (R + r \cos \theta)^2,$$

donc

$$\begin{aligned} \left(\sqrt{x(\theta, \phi)^2 + y(\theta, \phi)^2} - R \right)^2 + z(\theta, \phi)^2 &= (R + r \cos \theta - R)^2 + r^2 \sin^2 \theta \\ &= r^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \\ &= r^2, \end{aligned}$$

donc c'est bien un paramétrage. Montrons qu'il est régulier :

$$D\sigma(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} -r \sin \theta \cos \phi & -(R + r \cos \theta) \sin \phi \\ -r \sin \theta \sin \phi & (R + r \cos \theta) \cos \phi \\ r \cos \theta & 0 \end{pmatrix}.$$

Pour montrer que $D\sigma(\theta, \phi)$ est de rang 2, il suffit de montrer qu'un déterminant 2×2 d'une de ses sous-matrices est non nul, et c'est le cas : les différents déterminants sont

$$\begin{vmatrix} -r \sin \theta \cos \phi & -(R + r \cos \theta) \sin \phi \\ -r \sin \theta \sin \phi & (R + r \cos \theta) \cos \phi \end{vmatrix} = -r(R + r \cos \theta) \sin \theta,$$

qui s'annule uniquement si $\theta = k\pi$ pour $k \in \mathbb{Z}$,

$$\begin{vmatrix} -r \sin \theta \cos \phi & -(R + r \cos \theta) \sin \phi \\ r \cos \theta & 0 \end{vmatrix} = -r(R + r \cos \theta) \cos \theta \sin \phi,$$

qui s'annule uniquement si $\theta = \pi/2 + k\pi$ ou $\phi = k\pi$ pour $k \in \mathbb{Z}$, ou encore

$$\begin{vmatrix} -r \sin \theta \sin \phi & (R + r \cos \theta) \cos \phi \\ r \cos \theta & 0 \end{vmatrix} = -r(R + r \cos \theta) \cos \theta \sin \phi,$$

qui s'annule uniquement si $\theta = \pi/2 + k\pi$ ou $\phi = \pi/2 + k\pi$, pour $k \in \mathbb{Z}$. Il vient que pour tout couple (θ, ϕ) , au moins un de ces déterminants est non nul.

2. Un paramétrage du plan tangent $T_{(R+r,0,0)}\mathbb{T}$ est donné par

$$\eta : (s, t) \mapsto \sigma(\theta_0, \phi_0) + s\psi'_1(\theta_0) + \psi'_2(\phi_0),$$

où

$$\psi_1 : \theta \mapsto \sigma(\theta, \phi_0), \quad \psi_2 : \phi \mapsto \sigma(\theta_0, \phi).$$

Il s'agit donc d'abord de déterminer (θ_0, ϕ_0) tel que $\sigma(\theta_0, \phi_0) = (r + R, 0, 0)$. Il s'agit clairement de $\theta_0 = 0$ et $\phi_0 = 0$. Ensuite, on peut calculer ψ_1 et ψ_2 :

$$\psi_1(\theta) = (R + r \cos \theta, 0, r \sin \theta), \quad \psi_2(\phi) = ((R + r) \cos \phi, (R + r) \sin \phi, 0).$$

Leurs dérivées respectives sont les suivantes :

$$\psi'_1(\theta) = (-r \sin \theta, 0, r \cos \theta), \quad \psi'_2(\phi) = (-(R + r) \sin \phi, (R + r) \cos \phi, 0).$$

Finalement, on obtient que

$$\eta(s, t) = (R + r, (R + r)t, rs), \quad \forall s, t \in \mathbb{R}.$$

Remarque : à partir du paramétrage on peut noter que le plan correspond au plan d'équation

$$T_{(R+r,0,0)}\mathbb{T} = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x = R + r\}.$$