

ANNÉE SCOLAIRE 2025-2026 – BMC 2 Semestre 3	
Nom de l'enseignant	Maxime Berger, Rémi Blanquet & Karine Serier
Matière	Mathématiques
Durée de l'examen	2h00
Consignes	<ul style="list-style-type: none"> — Calculatrice NON autorisée — Aucun document n'est autorisé

■ Exercice 1 : Limites (6 points)

Calculer les limites suivantes :

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{e^x - (1 + x)}{x^2} \right) \quad \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{x^2}{\cos(x) - 1} \right) \quad \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{(e^x - 1) \sin(x)}{x^2} \right)$$

Solution.

Rappelons les DL dont nous aurons besoin, au voisinage de 0 :

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3!} + o(x^3) \quad \cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2} + o(x^3) \quad \sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + o(x^3)$$

Ainsi, pour la première limite :

$$\frac{e^x - (1 + x)}{x^2} = \frac{\frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3!} + o(x^3)}{x^2} = \frac{1}{2} + \frac{x}{6} + o(x) \text{ Donc } \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{e^x - (1 + x)}{x^2} \right) = \frac{1}{2}$$

Pour la deuxième limite :

$$\frac{x^2}{\cos(x) - 1} = \frac{x^2}{-\frac{x^2}{2} + o(x^3)} = \frac{-2}{1 + o(x)} \text{ donc } \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{x^2}{\cos(x) - 1} \right) = -2$$

Enfin, pour la troisième,

$$\frac{(e^x - 1) \sin(x)}{x^2} = \frac{\left(x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3!} + o(x^3) \right) \left(x - \frac{x^3}{3!} + o(x^3) \right)}{x^2} = \frac{x^2 + \frac{x^3}{2} + o(x^3)}{x^2} = 1 + \frac{x}{2} + o(x)$$

donc

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{(e^x - 1) \sin(x)}{x^2} \right) = 0$$

■ Exercice 2 : Inversibilité et expression de l'inverse via un polynôme annulateur (5 points)

Soit la matrice $P = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$.

1. Calculer P^2 .
2. Vérifier que $P^2 - 3P + 2I_2 = 0_2$, où I_2 est la matrice identité d'ordre 2 et 0_2 la matrice nulle d'ordre 2.
3. À partir de cette relation, déduisez que la matrice P est inversible et exprimez son inverse P^{-1} en fonction de P et I_2 .
4. Utiliser cette expression pour calculer P^{-1} .

Solution.

1. Calcul de P^2 :

$$P^2 = P \times P = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \times 1 + 1 \times 0 & 1 \times 1 + 1 \times 2 \\ 0 \times 1 + 2 \times 0 & 0 \times 1 + 2 \times 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}$$

2. Vérification :

$$P^2 - 3P + 2I_2 = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \end{pmatrix} - 3 \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} + 2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Calculons les termes intermédiaires :

$$-3P = \begin{pmatrix} -3 & -3 \\ 0 & -6 \end{pmatrix}, \quad 2I_2 = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -3 & -3 \\ 0 & -6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 3 + 2 & 3 - 3 + 0 \\ 0 + 0 + 0 & 4 - 6 + 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

L'égalité est donc bien vérifiée.

3. Déduire que P est inversible et exprimer P^{-1} :

On a $P^2 - 3P + 2I_2 = 0_2$ donc $P^2 - 3P = -2I_2$

Donc $P(P - 3I_2) = -2I_2$,

donc en multipliant chaque membre par $-1/2$:

$$-\frac{1}{2}P(P - 3I_2) = I_2$$

Donc P est inversible, avec :

$$P^{-1} = -\frac{1}{2}(P - 3I_2)$$

c'est-à-dire

$$P^{-1} = -\frac{1}{2}P + \frac{3}{2}I_2$$

4. Calcul de P^{-1} numériquement :

$$-\frac{1}{2}P = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \frac{3}{2}I_2 = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} \end{pmatrix}$$

Donc

$$P^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} + \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} + 0 \\ 0 + 0 & -1 + \frac{3}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

■ Exercice 3 : Déterminant et condition d'inversibilité (3 points)

Sans effectuer de calculs explicites, expliquer pourquoi les déterminants suivants sont nuls.
Préciser la propriété utilisée.

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 2 & 4 & 8 \\ 3 & 5 & 7 \end{vmatrix} \quad C = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 4 & 5 & 6 \end{vmatrix}$$

Solution.

A est nul car la matrice possède deux lignes identiques. B est nul car la matrice possède deux lignes proportionnelles. C est nul car la matrice possède une ligne nulle.

■ Exercice 4 : Combinaisons linéaires (6 points)

On se place dans \mathbb{R}^3 , on note $e_1 = (1, 3, 2)$ et $e_2 = (1, -1, 4)$.

1. Dans \mathbb{R}^3 , $u = (2, 5, 3)$ est-il combinaison linéaire de e_1 et e_2 ?

Solution.

u est combinaison linéaire de e_1 et e_2 si et seulement si il existe $a, b \in \mathbb{R}$ tels que $u = ae_1 + be_2$.

Trouver a et b nous conduit à un système linéaire :

$$\begin{aligned} a + b &= 2 \\ 3a - b &= 5 \\ 2a + 4b &= 3 \end{aligned}$$

Les premières étapes du pivot de Gauss nous donnent :

$$\begin{aligned} a + b &= 2 \\ 0 - 4b &= 1 \\ 0 + 2b &= -1 \end{aligned}$$

Le système est donc incompatible et u n'est pas combinaison linéaire de e_1 et e_2 .

2. Comment choisir le paramètre m pour que le vecteur $v = (3, 1, m)$ soit combinaison linéaire de e_1 et e_2 ?

Solution.

u est combinaison linéaire de e_1 et e_2 si et seulement si il existe $a, b \in \mathbb{R}$ tels que $u = ae_1 + be_2$.

Trouver a et b nous conduit à un système linéaire :

$$\begin{aligned} a + b &= 3 \\ 3a - b &= 1 \\ 2a + 4b &= m \end{aligned}$$

Les premières étapes du pivot de Gauss nous donnent :

$$\begin{aligned} a + b &= 3 \\ 0 - 4b &= -8 \\ 0 + 2b &= m - 6 \end{aligned}$$

Le système est compatible si et seulement si $m = 10$, dans ce cas, u est combinaison linéaire de e_1 et e_2 .

Si $m \neq 10$, le système est incompatible et u n'est pas combinaison linéaire de e_1 et e_2 .

3. Ecrire sous forme échelonnée les systèmes suivants, en déduire le nombre de solutions.

$$\left\{ \begin{array}{l} -x - y = 1 \\ -3x - 3y = 2 \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} 4y + z = 20 \\ 2x - 2y + z = 0 \\ x + z = 5 \\ x + y - z = 10 \end{array} \right.$$

Solution.

Pour le premier, On peut effectuer l'opération $L_2 \leftarrow L_2 + 3L_1$, cela conduit à l'équation $0 = 5$, qui est incompatible. Le système n'admet pas de solution.

Pour échelonner le deuxième système, il faut commencer par échanger les équations pour avoir un x dans la première équation. On échange par exemple L_1 et L_3 . On obtient

$$\left\{ \begin{array}{l} x + z = 5 \\ 4y + z = 20 \\ 2x - 2y + z = 0 \\ x + y - z = 10 \end{array} \right.$$

Ensuite, on élimine les x des autres équations à l'aide de la première équation : $L_3 \leftarrow L_3 - 2L_1$ et $L_4 \leftarrow L_4 - L_1$. On obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} x + z = 5 \\ 4y + z = 20 \\ -2y - z = -10 \\ y - 2z = 5 \end{array} \right.$$

Ensuite, on utilise L_2 pour éliminer les y : $L_3 \leftarrow 2L_3 + L_2$ et $L_4 \leftarrow 4L_4 - L_2$. On obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} x + z = 5 \\ 4y + z = 20 \\ -z = 0 \\ -9z = 0 \end{array} \right.$$

Les 2 dernières équations apportent la même information, on peut en garder seulement une des deux. On obtient un système échelonné avec une unique solution.

■ Exercice 5 : Étude de la Conchoïde de Nicomède (20 points)

Partie 1 : Forme Paramétrique

La conchoïde de Nicomède est définie par les équations paramétriques :

$$\begin{cases} x(t) = \frac{2}{\cos(t)} + \cos(t) \\ y(t) = 2 \tan(t) + \sin(t) \end{cases}$$

1. (a) Déterminer le domaine de définition de t .
(b) Étudier les symétries de la courbe.
2. (a) Calculer les dérivées $x'(t)$ et $y'(t)$.
(b) En déduire les coordonnées d'un vecteur tangent $\vec{V}(t)$ à la courbe à un point régulier M_t de coordonnées $(x(t), y(t))$.
3. (a) Déterminer les points où la tangente est horizontale ou verticale.
(b) Donner les coordonnées cartésiennes de ces points.
4. Effectuer un développement limité de $x(t)$ et $y(t)$ au voisinage de $t = 0$ à l'ordre 3.
5. (a) Étudier les limites de $x(t)$ et $y(t)$ lorsque t approche $\frac{\pi}{2}$ et $-\frac{\pi}{2}$.
(b) Que pouvez-vous en déduire ?

Partie 2 : Forme Polaire

La conchoïde de Nicomède est définie en coordonnées polaires par l'équation :

$$r(\theta) = \frac{2}{\cos \theta} + 1$$

1. Déterminer le domaine de définition de θ et étudier les symétries de la courbe.
2. Convertir l'équation polaire en coordonnées cartésiennes $x(\theta)$ et $y(\theta)$.
3. (a) Étudier les limites de $x(\theta)$ et $y(\theta)$ lorsque θ approche $\frac{\pi}{2}$ et $-\frac{\pi}{2}$.
(b) Donner l'équation des asymptotes.
4. Calculer la dérivée $\frac{dr}{d\theta}$.
5. Déterminer l'angle α de la tangente à la courbe en un point de coordonnées (r, θ) .
6. (a) Effectuer un développement limité de $r(\theta)$ au voisinage de $\theta = 0$ à l'ordre 2.
(b) En déduire la nature du point correspondant à $\theta = 0$.

Solution.

Partie 1 : Forme Paramétrique

1. (a) Domaine de définition de x et y :

$\cos(t) \neq 0$ si et seulement si $t \neq \frac{\pi}{2} + k\pi$, $k \in \mathbb{Z}$.

Donc, le domaine de définition est $D_f = \mathbb{R} \setminus \{\frac{\pi}{2} + k\pi \mid k \in \mathbb{Z}\}$.

- (b) L'ensemble de définition est symétrique par rapport à 0.

On a :

$$\forall t \in D_f, \quad x(-t) = \frac{2}{\cos(-t)} + \cos(-t) = \frac{2}{\cos t} + \cos t = x(t)$$

donc x est paire.

De même :

$$\forall t \in D_f, \quad y(-t) = 2 \tan(-t) + \sin(-t) = -2 \tan t - \sin t = -y(t)$$

donc y est impaire.

Par conséquent, la courbe est symétrique par rapport à l'axe des abscisses.

2. (a) Les fonctions x et y sont dérivables sur l'ensemble de définition comme somme de fonctions dérivables. :

$$x'(t) = \frac{2 \sin t}{\cos^2 t} - \sin t = \sin t \left(\frac{2}{\cos^2 t} - 1 \right) \quad y'(t) = \frac{2}{\cos^2 t} + \cos t$$

- (b) Un vecteur tangent à la courbe au point régulier $M_t = (x(t), y(t))$ est donné par :

$$\vec{V}(t) = (x'(t), y'(t)) = \left(\sin t \left(\frac{2}{\cos^2 t} - 1 \right), \frac{2}{\cos^2 t} + \cos t \right)$$

3. (a) La tangente est horizontale lorsque $y'(t) = 0$:

$$y'(t) = \frac{2}{\cos^2 t} + \cos t = 0 \iff \cos t = -2^{\frac{1}{3}}$$

Or $-2^{\frac{1}{3}} < -1$. Il n'y a pas de tangente horizontale.

La tangente est verticale lorsque $x'(t) = 0$, soit :

$$\sin t \left(\frac{2}{\cos^2 t} - 1 \right) = 0$$

Deux cas sont possibles :

— $\sin t = 0$ si et seulement si $t = k\pi$ avec $k \in \mathbb{Z}$.

— $\frac{2}{\cos^2 t} - 1 = 0$ si et seulement si $\cos^2 t = 2$, ce qui est impossible.

Les tangentes sont donc verticales pour $t = k\pi$ avec $k \in \mathbb{Z}$.

- (b) Pour $t = 0$:

$$x(0) = \frac{2}{1} + 1 = 3, \quad y(0) = 0 + 0 = 0$$

Pour $t = \pi$:

$$x(\pi) = \frac{2}{-1} - 1 = -3, \quad y(\pi) = 2 \cdot 0 + \sin(\pi) = 0$$

Les coordonnées des points où la tangente est verticale sont $(3, 0)$ et $(-3, 0)$

4.

$$\begin{aligned} \cos t &= 1 - \frac{t^2}{2} + \frac{t^4}{24} + o(t^4), \quad \frac{1}{\cos t} = 1 + \frac{t^2}{2} + \frac{5t^4}{24} + o(t^4) \\ x(t) &= 2 \left(1 + \frac{t^2}{2} \right) + \left(1 - \frac{t^2}{2} \right) + o(t^2) = 3 + t^2 + o(t^2) \\ \tan t &= t + \frac{t^3}{3} + o(t^3), \quad \sin t = t - \frac{t^3}{6} + o(t^3) \\ y(t) &= 2t + \frac{2t^3}{3} + t - \frac{t^3}{6} + o(t^3) = 3t + \frac{t^3}{2} + o(t^3) \end{aligned}$$

On obtient :

$$x(t) = 3 + t^2 + o(t^2), \quad y(t) = 3t + \frac{t^3}{2} + o(t^3)$$

5. (a) Étude des limites quand $t \rightarrow \pm \frac{\pi}{2}$:

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \cos t = 0^+, \quad \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \frac{1}{\cos t} = +\infty, \quad \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \tan t = +\infty$$

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} x(t) = \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \left(\frac{2}{\cos t} + \cos t \right) = +\infty$$

$$\lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^-} y(t) = \lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^-} (2 \tan t + \sin t) = +\infty$$

$$\lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^+} \cos t = 0^+, \quad \lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^+} \frac{1}{\cos t} = +\infty, \quad \lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^+} \tan t = -\infty$$

$$\lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^+} x(t) = \lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^+} \left(\frac{2}{\cos t} + \cos t \right) = +\infty$$

$$\lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^+} y(t) = \lim_{t \rightarrow -\frac{\pi}{2}^+} (2 \tan t + \sin t) = -\infty$$

(b) Les deux coordonnées tendent vers l'infini donc la courbe admet des branches infinies.

Partie 2 : Forme Polaire

1. Domaine : $\cos \theta \neq 0$ D'où $\theta \in \mathbb{R} \setminus \{\frac{\pi}{2} + k\pi \mid k \in \mathbb{Z}\}$.

Symétrie : $\cos(-\theta) = \cos \theta$ donc $r(-\theta) = r(\theta)$: la courbe est symétrique par rapport à l'axe des abscisses.

2. On utilise :

$$x(\theta) = r(\theta) \cos \theta = \left(\frac{2}{\cos \theta} + 1 \right) \cos \theta = 2 + \cos \theta$$

$$y(\theta) = r(\theta) \sin \theta = \left(\frac{2}{\cos \theta} + 1 \right) \sin \theta$$

3. (a)

$$\lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \cos \theta = 0^+, \quad \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} r(\theta) = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \left(\frac{2}{\cos \theta} + 1 \right) = +\infty$$

$$\lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} x(\theta) = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} (r(\theta) \cos \theta) = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \left(\left(\frac{2}{\cos \theta} + 1 \right) \cos \theta \right) = 2$$

$$\lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} y(\theta) = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} (r(\theta) \sin \theta) = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \left(\left(\frac{2}{\cos \theta} + 1 \right) \sin \theta \right) = +\infty$$

(b) Asymptote verticale d'équation $x = 2$.

4.

$$r'(\theta) = \frac{2 \sin \theta}{\cos^2 \theta}$$

5. En coordonnées polaires, l'angle α entre la tangente et le rayon vecteur est donné par :

$$\tan \alpha = \frac{r'(\theta)}{r(\theta)}$$

6. (a) Développement limité en $\theta = 0$:

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2} + o(\theta^2) \quad (\text{développement limité en } 0 \text{ à l'ordre 2})$$

$$\frac{1}{1-u} = 1 + u + u^2 + o(u^2) \text{ si } u \rightarrow 0 \text{ avec } u = \frac{\theta^2}{2}$$

$$\frac{1}{\cos \theta} = \frac{1}{1 - \frac{\theta^2}{2} + o(\theta^2)} = 1 + \frac{\theta^2}{2} + o(\theta^2)$$

$$r(\theta) = \frac{2}{\cos \theta} + 1 = 2 \left(1 + \frac{\theta^2}{2} + o(\theta^2) \right) + 1 = 2 + \theta^2 + o(\theta^2) + 1 = 3 + \theta^2 + o(\theta^2)$$

(b) Le point correspondant à $\theta = 0$ est à distance $r = 3$ sur l'axe des abscisses. La courbe présente ici un point régulier non singulier avec une tangente d'angle nul.