



Topologie

Exercices de Jean-Louis Rouget. Retrouver aussi cette fiche sur www.maths-france.fr

* très facile ** facile *** difficulté moyenne **** difficile ***** très difficile
I : Incontournable

Exercice 1 **

Montrer que la boule unité d'un espace vectoriel normé est un convexe de cet espace.

[Correction ▼](#)

[005839]

Exercice 2 *** I

- Inégalités de HÖLDER et de MINKOWSKI. Soit $(p, q) \in]0, +\infty[^2$ tel que $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$.
 - Montrer que pour $(x, y) \in [0, +\infty[^2$, $xy \leq \frac{x^p}{p} + \frac{y^q}{q}$.
 - En déduire que $\forall ((a_1, \dots, a_n), (b_1, \dots, b_n)) \in (\mathbb{R}^n)^2$, $|\sum_{k=1}^n a_k b_k| \leq (\sum_{k=1}^n |a_k|^p)^{1/p} (\sum_{k=1}^n |b_k|^q)^{1/q}$.
 - En déduire que $\forall ((a_1, \dots, a_n), (b_1, \dots, b_n)) \in (\mathbb{R}^n)^2$, $(\sum_{k=1}^n |a_k + b_k|^p)^{1/p} \leq (\sum_{k=1}^n |a_k|^p)^{1/p} + (\sum_{k=1}^n |b_k|^p)^{1/p}$.
- Soit α un réel strictement positif. Pour $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, on définit $N_\alpha(x) = (\sum_{k=1}^n |x_k|^\alpha)^{1/\alpha}$.
 - Montrer que $\forall \alpha \geq 1$, N_α est une norme sur \mathbb{R}^n .
 - Dessiner les « boules unités » de \mathbb{R}^2 dans le cas où $\alpha \in \{\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}, 2, +\infty\}$.
 - Montrer que, pour $x = (x_k)_{1 \leq k \leq n}$ fixé, $\lim_{\alpha \rightarrow +\infty} N_\alpha(x) = \text{Max}\{|x_k|, 1 \leq k \leq n\} = N_\infty(x)$.
 - Montrer que si $0 < \alpha < 1$, N_α n'est pas une norme sur \mathbb{R}^n (si $n \geq 2$).

[Correction ▼](#)

[005840]

Exercice 3 ** I

Soit $E = C^2([0, 1], \mathbb{R})$. Pour f élément de E , on pose $N(f) = \int_0^1 |f(t)| dt$, $N'(f) = |f(0)| + \int_0^1 |f'(t)| dt$ et $N''(f) = |f(0)| + |f'(0)| + \int_0^1 |f''(t)| dt$. Montrer que N, N' et N'' sont des normes et les comparer.

[Correction ▼](#)

[005841]

Exercice 4 *** I Topologie dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$

- Montrer que $GL_n(\mathbb{R})$ est un ouvert de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.
- Montrer que $\mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \setminus GL_n(\mathbb{R})$ est fermé mais non compact (pour $n \geq 2$).
- Montrer que $O_n(\mathbb{R})$ est compact. $O_n(\mathbb{R})$ est-il convexe ?
- Montrer que $S_n(\mathbb{R})$ est fermé.
- Soit $p \in [0, n]$. Montrer que l'ensemble des matrices de rang inférieur ou égal à p est un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.
- Montrer que l'ensemble des matrices diagonalisables dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ est dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Peut-on remplacer $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ par $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$?
- Propriétés topologiques de l'ensemble des triplets de réels (a, b, c) tels que la forme quadratique $(x, y) \mapsto ax^2 + 2bxy + cy^2$ soit définie positive ?

8. Montrer que l'ensemble des matrices stochastiques (matrices $(a_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telles que $\forall (i,j) \in \llbracket 1,n \rrbracket^2$, $a_{i,j} \geq 0$ et $\forall i \in \llbracket 1,n \rrbracket$, $\sum_{j=1}^n a_{i,j} = 1$) est un compact convexe de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.
9. Montrer que l'ensemble des matrices diagonalisables de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est connexe par arcs.

Correction ▼

[005842]

Exercice 5 **

Montrer qu'entre deux réels distincts, il existe un rationnel (ou encore montrer que \mathbb{Q} est dense dans \mathbb{R}).

Correction ▼

[005843]

Exercice 6 **

Soient A et B des parties d'un espace vectoriel normé E . Montrer que

1. $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$ et $\overset{\circ}{\overset{\circ}{A}} = \overset{\circ}{A}$.
2. $A \subset B \Rightarrow \overline{A} \subset \overline{B}$ et $A \subset B \Rightarrow \overset{\circ}{A} \subset \overset{\circ}{B}$.
3. $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cup \overline{B}$ et $\overset{\circ}{A \cap B} = \overset{\circ}{A} \cap \overset{\circ}{B}$.
4. $\overline{A \cap B} \subset \overline{A} \cap \overline{B}$ et $\overset{\circ}{A \cup B} \subset \overset{\circ}{A} \cup \overset{\circ}{B}$. Trouver un exemple où l'inclusion est stricte.
5. $A \setminus B = \overset{\circ}{A} \setminus \overline{B}$.
6. $\overline{\overset{\circ}{A}} = \overline{A}$ et $\overset{\circ}{\overline{A}} = \overset{\circ}{A}$.

Correction ▼

[005844]

Exercice 7 **

Trouver une partie A de \mathbb{R} telle que les sept ensembles $A, \overline{A}, \overset{\circ}{A}, \overline{\overset{\circ}{A}}, \overset{\circ}{\overline{A}}, \overline{\overset{\circ}{\overline{A}}}$ et $\overset{\circ}{\overline{\overset{\circ}{\overline{A}}}}$ soient deux à deux distincts.

Correction ▼

[005845]

Exercice 8 **

Soit E le \mathbb{R} -espace vectoriel des fonctions continues sur $[0,1]$ à valeurs dans \mathbb{R} . On munit E de $\|\cdot\|_\infty$. D est la partie de E constituée des applications dérivables et P est la partie de E constituée des fonctions polynomiales. Déterminer l'intérieur de D et l'intérieur de P .

Correction ▼

[005846]

Exercice 9 ** I Distance d'un point à une partie

Soit A une partie non vide d'un espace vectoriel normé $(E, \|\cdot\|)$.

Pour $x \in E$, on pose $d_A(x) = d(x,A)$ où $d(x,A) = \inf\{\|x-a\|, a \in A\}$.

1. Justifier l'existence de $d_A(x)$ pour chaque x de E .
2. (a) Montrer que si A est fermée, $\forall x \in E$, $d_A(x) = 0 \Leftrightarrow x \in A$.
(b) Montrer que si A est fermée et E est de dimension finie, $\forall x \in E$, $\exists a \in A / d_A(x) = \|x-a\|$.
3. Si A est quelconque, comparer $d_A(x)$ et $d_{\overline{A}}(x)$.
4. Montrer d_A est continue sur E .
5. A chaque partie fermée non vide A , on associe l'application d_A définie ci-dessus. Montrer que l'application $A \mapsto d_A$ est injective.
6. Dans l'espace des applications continues sur $[0,1]$ à valeurs dans \mathbb{R} muni de la norme de la convergence uniforme, on considère $A = \left\{ f \in E / f(0) = 0 \text{ et } \int_0^1 f(t) dt \geq 1 \right\}$. Calculer $d_A(0)$.

Exercice 10 **

1. Soient (E, N_E) et (F, N_F) deux espaces vectoriels normés. Soient f et g deux applications continues sur E à valeurs dans F . Soit D une partie de E dense dans E . Montrer que si $f|_D = g|_D$ alors $f = g$.
2. Déterminer tous les morphismes continus de $(\mathbb{R}, +)$ dans lui-même.

Correction ▼

[005848]

Exercice 11 ***

Soit u une suite bornée d'un espace vectoriel normé de dimension finie ayant une unique valeur d'adhérence. Montrer que la suite u converge.

Correction ▼

[005849]

Exercice 12 ***

Calculer $\inf_{\alpha \in]0, \pi[} \left\{ \sup_{n \in \mathbb{Z}} |\sin(n\alpha)| \right\}$.

Correction ▼

[005850]

Exercice 13 *** I

Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une application uniformément continue sur \mathbb{R} . Montrer qu'il existe deux réels a et b tels que $\forall x \in \mathbb{R}, |f(x)| \leq a|x| + b$.

Correction ▼

[005851]

Exercice 14 *** I

Donner un développement à la précision $\frac{1}{n^2}$ de la n -ième racine positive x_n de l'équation $\tan x = x$.

Correction ▼

[005852]

Exercice 15 *** I

Soit z un nombre complexe. Déterminer $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n$.

Correction ▼

[005853]

Correction de l'exercice 1 ▲

Cas de la boule fermée. Soit $B = \{u \in E / \|u\| \leq 1\}$. Soient $(x, y) \in B^2$ et $\lambda \in [0, 1]$.

$$\|\lambda x + (1 - \lambda)y\| \leq \lambda \|x\| + (1 - \lambda)\|y\| \leq \lambda + 1 - \lambda = 1.$$

Ainsi, $\forall (x, y) \in B^2, \forall \lambda \in [0, 1], \lambda x + (1 - \lambda)y \in B$ et donc B est convexe.

Cas de la boule ouverte. Soit $B = \{u \in E / \|u\| < 1\}$. Soient $(x, y) \in B^2$ et $\lambda \in [0, 1]$.

Puisque $0 \leq \lambda \leq 1$ et $0 \leq \|x\| < 1$, on en déduit que $\lambda \|x\| < 1$. Comme $(1 - \lambda)\|y\| \leq 1$ (et même < 1) et donc

$$\|\lambda x + (1 - \lambda)y\| \leq \lambda \|x\| + (1 - \lambda)\|y\| < 1.$$

La boule unité fermée (ou ouverte) de l'espace vectoriel normé $(E, \|\cdot\|)$ est un convexe de l'espace vectoriel E .

Correction de l'exercice 2 ▲

1. Puisque $p > 0$ et $q > 0$, $1 = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} > \frac{1}{p}$ et donc $p > 1$. De même, $q > 1$. D'autre part, $q = \frac{p}{p-1}$.

(a) L'inégalité est immédiate quand $y = 0$. Soit $y > 0$ fixé.

Pour $x \geq 0$, on pose $f(x) = \frac{x^p}{p} + \frac{y^q}{q} - xy$. Puisque $p > 1$, la fonction f est dérivable sur $[0, +\infty[$ et $\forall x \geq 0, f'(x) = x^{p-1} - y$. f admet donc un minimum en $x_0 = y^{1/(p-1)}$ égal à

$$f(y^{1/(p-1)}) = \frac{y^{p/(p-1)}}{p} + \frac{y^{p/(p-1)}}{q} - y^{1/(p-1)}y = y^{p/(p-1)} \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} - 1 \right) = 0.$$

Finalement, f est positive sur $[0, +\infty[$ et donc

$$\forall x \geq 0, \forall y \geq 0, xy \leq \frac{x^p}{p} + \frac{y^q}{q}.$$

(b) Posons $A = \sum_{k=1}^n |a_k|^p$ et $B = \sum_{k=1}^n |b_k|^q$.

Si A (ou B) est nul, tous les a_k (ou tous les b_k) sont nuls et l'inégalité est vraie.

On suppose dorénavant que $A > 0$ et $B > 0$. D'après la question a),

$$\sum_{k=1}^n \frac{|a_k|}{A^{1/p}} \times \frac{|b_k|}{B^{1/q}} \leq \sum_{k=1}^n \left(\frac{|a_k|^p}{pA} + \frac{|b_k|^q}{qB} \right) = \frac{1}{pA} \sum_{k=1}^n |a_k|^p + \frac{1}{qB} \sum_{k=1}^n |b_k|^q = \frac{1}{pA} \times A + \frac{1}{qB} \times B = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1,$$

et donc $\sum_{k=1}^n |a_k| |b_k| \leq A^{1/p} B^{1/q} = (\sum_{k=1}^n |a_k|^p)^{1/p} (\sum_{k=1}^n |b_k|^q)^{1/q}$. Comme $|\sum_{k=1}^n a_k b_k| \leq \sum_{k=1}^n |a_k| |b_k|$, on a montré que

$\forall ((a_k)_{1 \leq k \leq n}, (b_k)_{1 \leq k \leq n}) \in (\mathbb{R}^n)^2, \sum_{k=1}^n |a_k b_k| \leq (\sum_{k=1}^n |a_k|^p)^{1/p} (\sum_{k=1}^n |b_k|^q)^{1/q}$ (Inégalité de HÖLDER).

Remarque. Quand $p = q = 2$, on a bien $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ et l'inégalité de HÖLDER s'écrit

$$\sum_{k=1}^n |a_k b_k| \leq (\sum_{k=1}^n |a_k|^2)^{1/2} (\sum_{k=1}^n |b_k|^2)^{1/2} \text{ (inégalité de CAUCHY-SCHWARZ).}$$

(c) Soit $((a_k)_{1 \leq k \leq n}, (b_k)_{1 \leq k \leq n}) \in (\mathbb{R}^n)^2$. D'après l'inégalité de HÖLDER, on a

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n (|a_k| + |b_k|)^p &= \sum_{k=1}^n |a_k| (|a_k| + |b_k|)^{p-1} + \sum_{k=1}^n |b_k| (|a_k| + |b_k|)^{p-1} \\ &\Leftrightarrow \left(\sum_{k=1}^n |a_k|^p \right)^{1/p} \left(\sum_{k=1}^n (|a_k| + |b_k|)^{(p-1)q} \right)^{1/q} \left(\sum_{k=1}^n |b_k|^p \right)^{1/p} \left(\sum_{k=1}^n (|a_k| + |b_k|)^{(p-1)q} \right)^{1/q} \\ &= \left(\left(\sum_{k=1}^n |a_k|^p \right)^{1/p} + \left(\sum_{k=1}^n |b_k|^p \right)^{1/p} \right) \left(\sum_{k=1}^n (|a_k| + |b_k|)^p \right)^{1 - \frac{1}{p}}. \end{aligned}$$

Si $\sum_{k=1}^n (|a_k| + |b_k|)^p = 0$, tous les a_k et les b_k sont nuls et l'inégalité est claire.

Sinon $\sum_{k=1}^n (|a_k| + |b_k|)^p > 0$ et après simplification des deux membres de l'inégalité précédente par le réel strictement positif $\sum_{k=1}^n (|a_k| + |b_k|)^p$, on obtient $(\sum_{k=1}^n |a_k + b_k|^p)^{1/p} \leq (\sum_{k=1}^n |a_k|^p)^{1/p} + (\sum_{k=1}^n |b_k|^p)^{1/p}$

$$\forall ((a_k)_{1 \leq k \leq n}, (b_k)_{1 \leq k \leq n}) \in (\mathbb{R}^n)^2, (\sum_{k=1}^n |a_k + b_k|^p)^{1/p} \leq (\sum_{k=1}^n |a_k|^p)^{1/p} + (\sum_{k=1}^n |b_k|^p)^{1/p} \text{ (Inégalité de MINKO)}$$

2. (a) On sait déjà que N_1 est une norme sur \mathbb{R}^n . Soit $\alpha > 1$.

(1) N_α est bien une application de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^+ .

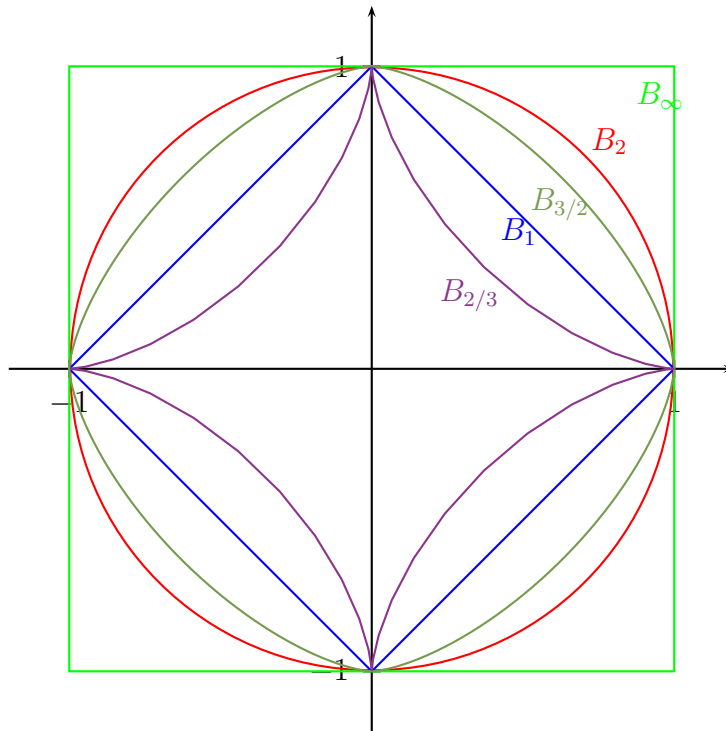
(2) Soit $x = (x_k)_{1 \leq k \leq n} \in \mathbb{R}^n$. $N_\alpha(x) = 0 \Rightarrow \forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket, |x_k| = 0 \Rightarrow x = 0$.

(3) Soient $\lambda \in \mathbb{R}$ et $x = (x_k)_{1 \leq k \leq n} \in \mathbb{R}^n$. $N_\alpha(\lambda x) = (\sum_{k=1}^n |\lambda x_k|^\alpha)^{1/\alpha} = (|\lambda|^\alpha)^{1/\alpha} N_\alpha(x) = |\lambda| N_\alpha(x)$.

(4) L'inégalité triangulaire est l'inégalité de MINKOWSKI.

$$\forall \alpha \in \mathbb{R}^n, N_\alpha \text{ est une norme sur } \mathbb{R}^n.$$

(b) Quelques « boules unités » dans \mathbb{R}^2 .



Remarque. Toute boule unité est symétrique par rapport à O puisque $\forall x \in E, N(x) = N(-x)$ et donc

$$\forall x \in E, N(x) \leq 1 \Leftrightarrow N(-x) \leq 1.$$

(c) Soient $\alpha > 0$ et $x \in E$. On a

$$N_\infty(x) \leq N_\alpha(x) \leq n^{1/\alpha} N_\infty(x),$$

et le théorème des gendarmes fournit $\lim_{\alpha \rightarrow +\infty} N_\alpha(x) = N_\infty(x)$.

$$\forall x \in E, \lim_{\alpha \rightarrow +\infty} N_\alpha(x) = N_\infty(x).$$

(d) Soient $\alpha \in]0, 1[$ puis $B = \{x \in \mathbb{R}^n / N_\alpha(x) \leq 1\}$. Les vecteurs $x = (1, 0, 0, \dots, 0)$ et $y = (0, 1, 0, \dots, 0)$ sont des éléments de B . Le milieu du segment $[xy]$ est $z = \frac{1}{2}(1, 1, 0, \dots, 0)$.

$$N_\alpha(z) = \frac{1}{2}(1^\alpha + 1^\alpha)^{1/\alpha} = 2^{\frac{1}{\alpha}-1} > 1 \text{ car } \frac{1}{\alpha} - 1 > 0$$

et donc $z \notin B$. Ainsi, B n'est pas convexe et donc N_α n'est pas une norme d'après l'exercice 1.
On peut remarquer que pour $n = 1$, les N_α coïncident toutes avec la valeur absolue.

Correction de l'exercice 3 ▲

• Il est connu que N est une norme sur E .

• Montrons que N' est une norme sur E .

(1) N' est une application de E dans \mathbb{R}^+ car pour f dans E , f' est continue sur le segment $[0, 1]$ et donc f' est intégrable

sur le segment $[0, 1]$.

(2) Soit $f \in E$. Si $N'(f) = 0$ alors $f(0) = 0$ et $f' = 0$ (fonction continue positive d'intégrale nulle). Par suite, f est un

polynôme de degré inférieur ou égal à 0 tel que $f(0) = 0$ et on en déduit que $f = 0$.

(3) $\forall f \in E, \forall \lambda \in \mathbb{R}, N'(\lambda f) = |\lambda f(0)| + \int_0^1 |\lambda f'(t)| dt = |\lambda| \left(|f(0)| + \int_0^1 |f'(t)| dt \right) = |\lambda| N'(f)$.

(4) Soit $(f, g) \in E^2$.

$$N'(f+g) \leq |f(0)| + |g(0)| + \int_0^1 |f'(t)| dt + \int_0^1 |g'(t)| dt = N'(f) + N'(g).$$

Donc N' est une norme sur E .

• Montrons que N'' est une norme sur E . On note que $\forall f \in E, N''(f) = |f(0)| + N'(f')$ et tout est immédiat.

N, N' et N'' sont des normes sur E .

• Soit $f \in E$ et $t \in [0, 1]$. Puisque la fonction f' est continue sur $[0, 1]$

$$|f(t)| = |f(0) + \int_0^t f'(u) du| \leq |f(0)| + \int_0^t |f'(u)| du \leq |f(0)| + \int_0^1 |f'(u)| du = N'(f),$$

et donc $N(f) = \int_0^1 |f(t)| dt \leq \int_0^1 N'(f) dt = N'(f)$.

Ensuite en appliquant le résultat précédent à f' , on obtient

$$N'(f) = |f(0)| + N(f') \leq |f(0)| + N'(f') = N''(f).$$

Finalement

$\forall f \in E, N(f) \leq N'(f) \leq N''(f)$.

Pour $n \in \mathbb{N}$ et $t \in [0, 1]$, on pose $f_n(t) = t^n$.

$N(f_n) = \int_0^1 t^n dt = \frac{1}{n+1}$ et donc la suite $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ tend vers 0 dans l'espace vectoriel normé (E, N) .

Par contre, pour $n \geq 1$, $N'(f_n) = n \int_0^1 t^{n-1} dt = 1$ et la suite $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ne tend pas vers 0 dans l'espace vectoriel normé (E, N') . On en déduit que

les normes N et N' ne sont pas des normes équivalentes.

De même en utilisant $f_n(t) = \frac{t^n}{n}$, on montre que les normes N' et N'' ne sont pas équivalentes.

Correction de l'exercice 4 ▲

1. Soit $d : \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$. On sait que l'application d est continue sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ (muni de n'importe quelle norme) et que \mathbb{R}^* est un ouvert de \mathbb{R} en tant que réunion de deux intervalles ouverts.

Par suite, $GL_n(\mathbb{R}) = d^{-1}(\mathbb{R}^*)$ est un ouvert de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ en tant qu'image réciproque d'un ouvert par une application continue.

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Le polynôme $\det(A - xI)$ n'a qu'un nombre fini de racines (éventuellement nul) donc pour p entier naturel supérieur ou égal à un certain p_0 , $\det\left(A - \frac{1}{p}I\right) \neq 0$. La suite $\left(A - \frac{1}{p}I\right)_{p \geq p_0}$ est

une suite d'éléments de $GL_n(\mathbb{R})$ convergente de limite A . Ceci montre que l'adhérence de $GL_n(\mathbb{R})$ est $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ ou encore $GL_n(\mathbb{R})$ est dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

$GL_n(\mathbb{R})$ est un ouvert de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

2. $\mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \setminus GL_n(\mathbb{R})$ est fermé en tant que complémentaire d'un ouvert.

Soit $n \geq 2$. Les matrices $A_p = pE_{1,1}$, $p \in \mathbb{N}$, sont non inversibles et la suite $(A_p)_{p \in \mathbb{N}}$ est non bornée. Par suite $M_n(\mathbb{R}) \setminus GL_n(\mathbb{R})$ est non borné et donc non compact.

$\forall n \geq 2, M_n(\mathbb{R}) \setminus GL_n(\mathbb{R})$ est fermé mais non compact.

3. • Montrons que $O_n(\mathbb{R})$ est fermé. Posons $g : \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow (\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))^2$, $h : (\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))^2 \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ puis

$$M \mapsto (M, {}^tM) \quad (M, N) \mapsto MN$$

$$f : \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) .$$

$$M \mapsto M^t M$$

g est continue sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ car linéaire sur un espace de dimension finie. h est continue sur $(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))^2$ car bilinéaire sur un espace de dimension finie. On en déduit que $f = h \circ g$ est continue sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

Enfin $O_n(\mathbb{R}) = f^{-1}(I_n)$ est fermé en tant qu'image réciproque d'un fermé par une application continue.

• Montrons que $O_n(\mathbb{R})$ est borné. $\forall A \in O_n(\mathbb{R})$, $\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$, $|a_{i,j}| \leq 1$ et donc $\forall A \in O_n(\mathbb{R})$, $\|A\|_\infty \leq 1$. D'après le théorème de BOREL-Lebesgue, puisque $O_n(\mathbb{R})$ est un fermé borné de l'espace de dimension finie $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $O_n(\mathbb{R})$ est un compact de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

$O_n(\mathbb{R})$ n'est pas convexe. En effet, les deux matrices I_n et $-I_n$ sont orthogonales mais le milieu du segment joignant ces deux matrices est 0 qui n'est pas une matrice orthogonale.

$O_n(\mathbb{R})$ est compact mais non convexe.

4. $S_n(\mathbb{R})$ est un sous espace vectoriel de l'espace de dimension finie $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et est donc un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

$S_n(\mathbb{R})$ est fermé.

5. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et p un élément fixé de $\llbracket 1, n-1 \rrbracket$ (le résultat est clair si $p = 0$ ou $p = n$).

A est de rang inférieur ou égal à p si et seulement si tous ses mineurs de format $p+1$ sont nuls (hors programme).

Soient I et J deux sous-ensembles donnés de $\llbracket 1, n \rrbracket$ de cardinal $p+1$ et $A_{I,J}$ la matrice extraite de A de format $p+1$ dont les numéros de lignes sont dans I et les numéros de colonnes sont dans J .

Pour I et J donnés, l'application $A \mapsto A_{I,J}$ est continue car linéaire de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ dans $\mathcal{M}_{p+1}(\mathbb{R})$. Par suite, l'application

$f_{I,J} : A \mapsto \det(A_{I,J})$ est continue sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. L'ensemble des matrices A telles que $\det(A_{I,J}) = 0$ est donc un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ (image réciproque du fermé $\{0\}$ de \mathbb{R} par l'application continue $f_{I,J}$) et l'ensemble des matrices de rang inférieur ou égal à p est un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ en tant qu'intersection de fermés.

6. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Posons $\text{Sp}(A) = (\lambda_i)_{1 \leq i \leq n}$. On sait que toute matrice est triangulable dans \mathbb{C} et donc il existe $P \in GL_n(\mathbb{C})$ et $T \in \mathcal{T}_n(\mathbb{C})$ avec $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $t_{i,i} = \lambda_i$ telle que $A = PTP^{-1}$.

On munit dorénavant $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ d'une norme multiplicative notée $\| \cdot \|$. Puisque toutes les normes sont équivalentes en dimension finie, il existe un réel strictement positif K telle que pour toute matrice M , $\|M\| \leq K \|M\|_\infty$.

Soit $\varepsilon > 0$. Il existe un n -uplet de réels $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ tels que $\forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $0 \leq \varepsilon_k < \frac{\varepsilon}{K \|P\| \|P^{-1}\|}$ et les $\lambda_k + \varepsilon_k$ sont deux à deux distincts. (On prend $\varepsilon_1 = 0$ puis ε_2 dans $\left[0, \frac{\varepsilon}{K \|P\| \|P^{-1}\|}\right]$ tel que $\lambda_2 + \varepsilon_2 \neq \lambda_1 + \varepsilon_1$ ce qui est possible puisque $\left[0, \frac{\varepsilon}{K \|P\| \|P^{-1}\|}\right]$ est infini puis ε_3 dans $\left[0, \frac{\varepsilon}{K \|P\| \|P^{-1}\|}\right]$ tel que $\lambda_3 + \varepsilon_3$ soit différent de $\lambda_1 + \varepsilon_1$ et $\lambda_2 + \varepsilon_2$ ce qui est possible puisque $\left[0, \frac{\varepsilon}{K \|P\| \|P^{-1}\|}\right]$ est infini ...)

On pose $D = \text{diag}(\lambda_i)_{1 \leq i \leq n}$ puis $T' = T + D$ et enfin $A' = PT'P^{-1}$. Tout d'abord les valeurs propres de A' sont deux à deux distinctes (ce sont les $\lambda_i + \varepsilon_i$, $1 \leq i \leq n$) et donc A' est diagonalisable. Ensuite

$$\|A' - A\| = \|PDP^{-1}\| \leq \|P\| \|D\| \|P^{-1}\| \leq K \|P\| \|P^{-1}\| \|D\|_\infty < \varepsilon.$$

En résumé, $\forall A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}), \forall \varepsilon > 0, \exists A' \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) / \|A' - A\| < \varepsilon$ et A' diagonalisable. On a montré que

L'ensemble des matrices complexes diagonalisables dans \mathbb{C} est dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$.

On ne peut remplacer $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ par $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

Soient $A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ et $E = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$.

$$\chi_{A+E} = \begin{vmatrix} a-X & c-1 \\ b+1 & d-X \end{vmatrix} = X^2 - (a+d)X + (ad-bc) + (b-c) + 1.$$

Le discriminant de χ_{A+E} est $\Delta = (a+d)^2 - 4(ad-bc) - 4(b-c) - 4$. Supposons de plus que $\|E\|_\infty \leq \frac{1}{4}$. Alors

$$\Delta = (a+d)^2 - 4(ad-bc) - 4(b-c) - 4 \leq \frac{1}{4} + 4\left(\frac{1}{16} + \frac{1}{16}\right) + 4\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) - 4 = -\frac{5}{4} < 0.$$

Par suite, aucune des matrices $A+E$ avec $\|E\|_\infty \leq \frac{1}{4}$ n'a de valeurs propres réelles et donc aucun donc diagonalisable dans \mathbb{R} . On a montré que l'ensemble des matrices réelles diagonalisables dans \mathbb{R} n'est pas dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

7. La matrice de la forme quadratique $Q : (x, y) \mapsto ax^2 + 2bxy + cy^2$ dans la base canonique est $\begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix}$.

Les valeurs propres de cette matrice sont strictement positives si et seulement si $a+c > 0$ et $ac - b^2 > 0$. L'application $(a, b, c) \mapsto a+c$ est continue sur \mathbb{R}^3 car linéaire sur \mathbb{R}^3 qui est de dimension finie et l'application $(a, b, c) \mapsto ac - b^2$ est continue sur \mathbb{R}^3 en tant que polynôme.

L'ensemble des triplets considéré est l'intersection des images réciproques par ces applications de l'ouvert $]0, +\infty[$ de \mathbb{R} et est donc un ouvert de \mathbb{R}^3 .

8. Notons \mathcal{S} l'ensemble des matrices stochastiques.

- Vérifions que \mathcal{S} est borné. Soit $A = (a_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n} \in \mathcal{S}$. $\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, 0 \leq a_{i,j} \leq 1$ et donc $\|A\|_\infty \leq 1$. Ainsi, $\forall A \in \mathcal{S}, \|A\|_\infty \leq 1$ et donc \mathcal{S} est borné.

- Vérifions que \mathcal{S} est fermé.

Soit $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$. L'application $f_{i,j} : A \mapsto a_{i,j}$ est continue sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ à valeurs dans \mathbb{R} car linéaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ qui est de dimension finie. $]0, +\infty[$ est un fermé de \mathbb{R} car son complémentaire $]-\infty, 0[$ est un ouvert de \mathbb{R} . Par suite, $\{A = (a_{k,l})_{1 \leq k,l \leq n} / a_{i,j} \geq 0\} = f_{i,j}^{-1}(]0, +\infty[)$ est un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ en tant qu'image réciproque d'un fermé par une application continue.

Soit $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$. L'application $g_i : A \mapsto \sum_{j=1}^n a_{i,j}$ est continue sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ à valeurs dans \mathbb{R} car linéaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ qui est de dimension finie. Le singleton $\{1\}$ est un fermé de \mathbb{R} . Par suite, $\{A = (a_{k,l})_{1 \leq k,l \leq n} / \sum_{j=1}^n a_{i,j} = 1\} = g_i^{-1}(\{1\})$ est un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ en tant qu'image réciproque d'un fermé par une application continue. \mathcal{S} est donc un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ en tant qu'intersection de fermés de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

En résumé, \mathcal{S} est un fermé borné de l'espace $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ qui est de dimension finie et donc \mathcal{S} est un compact de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ d'après le théorème de BOREL-LEBESGUE.

- Vérifions que \mathcal{S} est convexe. Soient $(A, B) \in (\mathcal{S})^2$ et $\lambda \in [0, 1]$. D'une part, $\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, (1-\lambda)a_{i,j} + \lambda b_{i,j} \geq 0$ et d'autre part, pour $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$

$$\sum_{j=1}^n ((1-\lambda)a_{i,j} + \lambda b_{i,j}) = (1-\lambda) \sum_{j=1}^n a_{i,j} + \lambda \sum_{j=1}^n b_{i,j} = (1-\lambda) + \lambda = 1,$$

ce qui montre que $(1-\lambda)A + \lambda B \in \mathcal{S}$. On a montré que $\forall (A, B) \in \mathcal{S}^2, \forall \lambda \in [0, 1], (1-\lambda)A + \lambda B \in \mathcal{S}$ et donc \mathcal{S} est convexe.

L'ensemble des matrices stochastiques est un compact convexe de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

9. Soient A et B deux matrices réelles diagonalisables. Soient $\gamma_1 : [0, 1] \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$
 $t \mapsto (1-t)A + t \cdot 0 = (1-t)A$

et

$$\gamma_2 : [0, 1] \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \text{ . Soit enfin } \gamma : [0, 1] \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \text{ .}$$

$$t \mapsto tB$$

$$t \mapsto \begin{cases} \gamma_1(2t) \text{ si } t \in [0, \frac{1}{2}] \\ \gamma_2(2t-1) \text{ si } t \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases}$$

γ_1 est un chemin continu joignant la matrice A à la matrice nulle et γ_2 est un chemin continu joignant la matrice nulle à la matrice B . Donc γ est un chemin continu joignant la matrice A à la matrice B . De plus, pour tout réel $t \in [0, 1]$, la matrice $\gamma_1(t) = (1-t)A$ est diagonalisable (par exemple, si $A = P \text{diag}(\lambda_i)_{1 \leq i \leq n} P^{-1}$ alors $(1-t)A = P \text{diag}((1-t)\lambda_i)_{1 \leq i \leq n} P^{-1}$) et de même, pour tout réel $t \in [0, 1]$, la matrice $\gamma_2(t) = tB$ est diagonalisable. Finalement γ est un chemin continu joignant les deux matrices A et B diagonalisables dans \mathbb{R} , contenu dans l'ensemble des matrices diagonalisables dans \mathbb{R} . On a montré que

l'ensemble des matrices diagonalisables dans \mathbb{R} est connexe par arcs.

Correction de l'exercice 5 ▲

1ère solution. • Montrons qu'entre deux réels distincts, il existe un rationnel.

Soient x et y deux réels tels que $x < y$. Soient $d = y - x$ puis n un entier naturel non nul tel que $\frac{1}{n} < d$ (par exemple, $n = E(\frac{1}{d}) + 1$). Soient enfin $k = E(nx)$ et $r = \frac{k+1}{n}$. r est un rationnel et de plus

$$x = \frac{nx}{n} < \frac{k+1}{n} = r \leq \frac{nx+1}{n} = x + \frac{1}{n} < x + d = x + y - x = y.$$

En résumé, $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, (x < y \Rightarrow \exists r \in \mathbb{Q} / x < r < y)$. Ceci montre que \mathbb{Q} est dense dans \mathbb{R} .

2ème solution. On sait que tout réel est limite d'une suite de décimaux et en particulier tout réel est limite d'une suite de rationnels. Donc \mathbb{Q} est dense dans \mathbb{R} .

\mathbb{Q} est dense dans \mathbb{R} .

Correction de l'exercice 6 ▲

1. Soit A une partie de E . \bar{A} est fermé et donc $\overline{(\bar{A})} = \bar{A}$. $\overset{\circ}{A}$ est ouvert et donc $\overset{\circ}{(\bar{A})} = \overset{\circ}{A}$.
2. Soient A et B deux parties de E telles que $A \subset B$.
 - Pour tout $x \in E, x \in \bar{A} \Rightarrow \forall V \in \mathcal{V}(x), V \cap A \neq \emptyset \Rightarrow \forall V \in \mathcal{V}(x), V \cap B \neq \emptyset \Rightarrow x \in \bar{B}$. Donc $\bar{A} \subset \bar{B}$.
 - Pour tout $x \in E, x \in \overset{\circ}{A} \Rightarrow A \in \mathcal{V}(x) \Rightarrow B \in \mathcal{V}(x) \Rightarrow x \in \overset{\circ}{B}$. Donc $\overset{\circ}{A} \subset \overset{\circ}{B}$.
3. Soient A et B deux parties de E .
 $\bar{A} \cup \bar{B}$ est une partie fermée de E contenant $A \cup B$. Donc $\overline{A \cup B} \subset \bar{A} \cup \bar{B}$ (puisque $\bar{A} \cup \bar{B}$ est le plus petit fermé de E au sens de l'inclusion contenant $A \cup B$).
 Réciproquement, $A \subset A \cup B$ et $B \subset A \cup B \Rightarrow \bar{A} \subset \overline{A \cup B}$ et $\bar{B} \subset \overline{A \cup B} \Rightarrow \bar{A} \cup \bar{B} \subset \overline{A \cup B}$.
 Finalement $\bar{A} \cup \bar{B} = \overline{A \cup B}$.
 $\overset{\circ}{A} \cap \overset{\circ}{B}$ est un ouvert contenu dans $A \cap B$ et donc $\overset{\circ}{A} \cap \overset{\circ}{B} \subset \overset{\circ}{A \cap B}$.
 Réciproquement, $A \cap B \subset A$ et $A \cap B \subset B \Rightarrow \overset{\circ}{A \cap B} \subset \overset{\circ}{A}$ et $\overset{\circ}{A \cap B} \subset \overset{\circ}{B} \Rightarrow \overset{\circ}{A \cap B} \subset \overset{\circ}{A} \cap \overset{\circ}{B}$.
 Finalement, $\overset{\circ}{A \cap B} = \overset{\circ}{A} \cap \overset{\circ}{B}$.
4. $\bar{A} \cap \bar{B}$ est un fermé contenant $A \cap B$ et donc $\overline{A \cap B} \subset \bar{A} \cap \bar{B}$.
 On n'a pas nécessairement l'égalité. Si $A = [0, 1[$ et $B =]1, 2]$, $A \cap B = \emptyset$ puis $\overline{A \cap B} = \emptyset$ mais $\bar{A} \cap \bar{B} = [0, 1] \cap [1, 2] = \{1\} \neq \emptyset$.

$\overset{\circ}{A} \cup \overset{\circ}{B}$ est un ouvert contenu dans $A \cup B$ et donc $\overset{\circ}{A} \cup \overset{\circ}{B} \subset \overset{\circ}{A \cup B}$.

On n'a pas nécessairement l'égalité. Si $A = [0, 1]$ et $B = [1, 2]$, $A \cup B = [0, 2]$ puis $\overset{\circ}{A \cup B} =]0, 2[$ mais $\overset{\circ}{A} \cup \overset{\circ}{B} =]0, 1[\cup]1, 2[\neq]0, 2[$.

5. Soient A et B deux parties de E . Soit $x \in E$.

$$\begin{aligned} x \in \overset{\circ}{A \setminus B} &\Leftrightarrow A \setminus B \in \mathcal{V}(x) \Leftrightarrow \exists \mathcal{B} \text{ boule ouverte de centre } x \text{ telle que } \mathcal{B} \subset A \setminus B \\ &\Leftrightarrow \exists \mathcal{B} \text{ boule ouverte de centre } x \text{ telle que } \mathcal{B} \subset A \text{ et } \mathcal{B} \subset {}^c B \Leftrightarrow A \in \mathcal{V}(x) \text{ et } {}^c B \in \mathcal{V}(x) \\ &\Leftrightarrow x \in \overset{\circ}{A} \text{ et } x \in ({}^c B) \Leftrightarrow x \in \overset{\circ}{A} \text{ et } x \in {}^c(\overline{B}) \Leftrightarrow x \in \overset{\circ}{A} \cap {}^c(\overline{B}) \Leftrightarrow x \in \overset{\circ}{A \setminus \overline{B}}. \end{aligned}$$

Donc $\overset{\circ}{A \setminus B} = \overset{\circ}{A \setminus \overline{B}}$.

6. Soit A une partie de E . $\overset{\circ}{A} \subset \overline{\overset{\circ}{A}} \Rightarrow \overline{\overset{\circ}{A}} \subset \overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} = \overline{\overline{A}}$. D'autre part $\overline{\overset{\circ}{A}} \subset \overline{A} \Rightarrow \overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} = \overline{\overline{A}} \Rightarrow \overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} \subset \overline{\overline{A}}$. Finalement, $\overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} = \overline{\overline{A}}$.

$\overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} \subset \overline{\overline{A}} \Rightarrow \overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} = \overline{\overline{A}} \subset \overline{\overline{A}}$. D'autre part $\overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} \subset \overline{\overline{A}} \Rightarrow \overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} = \overline{\overline{A}} \Rightarrow \overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} \subset \overline{\overline{A}}$. Finalement, $\overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} = \overline{\overline{A}}$.

Correction de l'exercice 7 ▲

L'exercice 6 montre que l'on ne peut pas faire mieux.

Soit $A = ([0, 1[\cup]1, 2]) \cup \{3\} \cup (\mathbb{Q} \cap [4, 5])$.

- $\overset{\circ}{A} =]0, 1[\cup]1, 2[$.
- $\overline{\overset{\circ}{A}} = [0, 2]$.
- $\overline{\overline{\overset{\circ}{A}}} =]0, 2[$.
- $\overline{\overline{\overline{\overset{\circ}{A}}}} = [0, 2] \cup \{3\} \cup [4, 5]$
- $\overline{\overline{\overline{\overline{\overset{\circ}{A}}}}} =]0, 2[\cup]4, 5[$.
- $\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overset{\circ}{A}}}}} = [0, 2] \cup [4, 5]$.

Les 7 ensembles considérés sont deux à deux distincts.

Correction de l'exercice 8 ▲

Soit $f \in E$. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, soit g_n l'application définie par $\forall x \in [0, 1], g_n(x) = f(x) + \frac{1}{n} |x - \frac{1}{2}|$.

Chaque fonction g_n est continue sur $[0, 1]$ mais non dérivable en $\frac{1}{2}$ ou encore $\forall n \in \mathbb{N}^*, g_n \in E \setminus D$. De plus, $\forall n \in \mathbb{N}^* \|f - g_n\|_{\infty} = \frac{1}{2n}$. On en déduit que la suite $(g_n)_{n \geq 1}$ tend vers f dans l'espace vectoriel normé $(E, \|\cdot\|_{\infty})$. f est donc limite d'une suite d'éléments de ${}^c D$ et donc est dans l'adhérence de ${}^c D$. Ceci montre que $\overline{{}^c D} = E$ ou encore ${}^c(\overset{\circ}{D}) = E$ ou enfin $\overset{\circ}{D} = \emptyset$.

Enfin, puisque $P \subset D$, on a aussi $\overset{\circ}{P} = \emptyset$.

Correction de l'exercice 9 ▲

1. Soit $x \in E$. $\{\|x - a\|, a \in A\}$ est une partie non vide et minorée (par 0) de \mathbb{R} . $\{\|x - a\|, a \in A\}$ admet donc une borne inférieure dans \mathbb{R} . On en déduit l'existence de $d_A(x)$.
2. (a) Soit A une partie fermée et non vide de E . Soit $x \in E$.
 - Supposons que $x \in A$. Alors $0 \leq f(x) = \inf\{\|x - a\|, a \in A\} \leq \|x - x\| = 0$ et donc $d_A(x) = 0$.
 - Supposons que $d_A(x) = 0$. Par définition d'une borne inférieure, $\forall \varepsilon > 0 \exists a_{\varepsilon} \in A / \|x - a_{\varepsilon}\| < \varepsilon$. Soit V un voisinage de x . V contient une boule ouverte de centre x et de rayon $\varepsilon > 0$ puis d'après ce qui précède, V contient un élément de A . Finalement, $\forall V \in \mathcal{V}(x), V \cap A \neq \emptyset$ et donc $x \in \overline{A} = A$.

Si A est fermée, $\forall x \in E, (d_A(x) = 0 \Leftrightarrow x \in A)$.

(b) Posons $d = d_A(x)$. Pour chaque entier naturel n , il existe $a_n \in A$ tel que $d \leq \|x - a_n\| \leq d + \frac{1}{n}$.

La suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est bornée. En effet, $\forall n \in \mathbb{N}^* \|a_n\| \leq \|a_n - x\| + \|x\| \leq d + \frac{1}{n} + \|x\| \leq d + \|x\| + 1$.

Puisque E est de dimension finie, d'après le théorème de BOLZANO-WEIERSTRASS, on peut extraire de la suite $(a_n)_{n \geq 1}$ une suite $(a_{\varphi(n)})_{n \geq 1}$ convergeant vers un certain élément a de E .

Ensuite, puisque A est fermée, on en déduit que $a \in A$. Puis, comme

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, d \leq \|x - a_{\varphi(n)}\| \leq d + \frac{1}{\varphi(n)},$$

et puisque $\varphi(n)$ tend vers l'infini quand n tend vers $+\infty$, on obtient quand n tend vers l'infini, $d = \lim_{n \rightarrow +\infty} \|x - a_{\varphi(n)}\|$. Maintenant on sait que l'application $y \mapsto \|y\|$ est continue sur l'espace normé $(E, \|\cdot\|)$ et donc

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \|x - a_{\varphi(n)}\| = \|x - \lim_{n \rightarrow +\infty} a_{\varphi(n)}\| = \|x - a\|.$$

On a montré qu'il existe $a \in A$ tel que $d_A(x) = \|x - a\|$.

3. Soit $x \in E$.

Puisque $A \subset \bar{A}$, $d_{\bar{A}}(x)$ est un minorant de $\{\|x - a\|, a \in A\}$. Comme $d_A(x)$ est le plus grand des minorants de $\{\|x - a\|, a \in A\}$, on a donc $d_{\bar{A}}(x) \leq d_A(x)$.

Soit alors $\varepsilon > 0$. Il existe $y \in \bar{A}$ tel que $\|x - y\| < d(x, \bar{A}) + \frac{\varepsilon}{2}$ et puis il existe $a \in A$ tel que $\|y - a\| < \frac{\varepsilon}{2}$. On en déduit que

$$d_A(x) \leq \|x - a\| \leq \|x - y\| + \|y - a\| < d_{\bar{A}}(x) + \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = d_{\bar{A}}(x) + \varepsilon.$$

Ainsi, $\forall \varepsilon > 0, d_A(x) < d_{\bar{A}}(x) + \varepsilon$. Quand ε tend vers 0, on obtient $d_A(x) \leq d_{\bar{A}}(x)$.

Finalement

$$\forall x \in E, d_A(x) = d_{\bar{A}}(x).$$

4. Montrons que l'application d_A est Lipschitzienne. Soit $(x, y) \in E^2$

Soit $a \in A$. $d_A(x) \leq \|x - a\| \leq \|x - y\| + \|y - a\|$. Donc, $\forall a \in A, d_A(x) - \|x - y\| \leq \|y - a\|$ ou encore $d_A(x) - \|x - y\|$ est un minorant de $\{\|y - a\|, a \in A\}$. Puisque $d_A(y)$ est le plus grand des minorants de $\{\|y - a\|, a \in A\}$, on a donc $d_A(x) - \|x - y\| \leq d_A(y)$.

En résumé, $\forall (x, y) \in E^2, d_A(x) - d_A(y) \leq \|x - y\|$. En échangeant les rôles de x et y , on obtient $\forall (x, y) \in E^2, d_A(y) - d_A(x) \leq \|x - y\|$ et finalement

$$\forall (x, y) \in E^2, |d_A(x) - d_A(y)| \leq \|x - y\|.$$

Ainsi l'application $d_A : (E, \|\cdot\|) \rightarrow (\mathbb{R}, |\cdot|)$ est 1-Lipschitzienne et en particulier d_A est continue sur l'espace vectoriel normé $(E, \|\cdot\|)$.

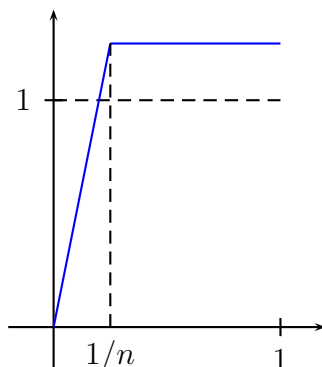
5. Soient A et B deux parties fermées et non vides de E telles que $d_A = d_B$.

Soit $a \in A$. $d_B(a) = d_A(a) = 0$ (d'après 2)) et donc $a \in B$ (d'après 2)). Ainsi $A \subset B$ puis, par symétrie des rôles, $B \subset A$ et finalement $A = B$.

6. (A n'est pas un sous espace vectoriel de E .)

Soit $f \in A$. $1 \leq \int_0^1 f(t) dt \leq \int_0^1 |f(t)| dt \leq \|f\|_\infty$. Ainsi, $\forall f \in A, \|f\|_\infty \geq 1$ et donc $d_A(0) \geq 1$.

Pour $n \in \mathbb{N}^*$ et $x \in [0, 1]$, on pose $f_n(x) = \begin{cases} (n+1)x & \text{si } x \in [0, \frac{1}{n}] \\ 1 + \frac{1}{n}x & \text{si } x \in [\frac{1}{n}, 1] \end{cases}$.



Pour chaque entier naturel non nul n , la fonction f_n est continue sur $[0, 1]$ et

$$\int_0^1 f_n(x) dx = \frac{1}{2n} \left(1 + \frac{1}{n}\right) + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 + \frac{1}{n}\right) = 1 + \frac{1}{2n} - \frac{1}{2n^2} \geq 1.$$

Donc, la suite $(f_n)_{n \geq 1}$ est une suite d'éléments de A . On en déduit que $\forall n \in \mathbb{N}^*$, $d_A(0) \leq \|f_n\|_\infty = 1 + \frac{1}{n}$. En résumé, $\forall n \in \mathbb{N}^*$, $1 \leq d_A(0) \leq 1 + \frac{1}{n}$ et finalement

$$d_A(0) = 1.$$

Remarque. A est fermée mais la distance à A n'est malgré tout pas atteinte. En effet

- Soit $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite d'éléments de A convergeant dans l'espace vectoriel normé $(E, \|\cdot\|_\infty)$ vers un certain élément f de E . La suite de fonctions $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge uniformément vers f sur $[0, 1]$ et donc d'une part, $f(0) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(0) = 0$ et d'autre part $\int_0^1 f(x) dx = \int_0^1 \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^1 f_n(x) dx \geq 1$. Donc $f \in A$ et on a montré que A est fermée.

- Supposons qu'il existe $f \in A$ telle que $\|f\|_\infty = 1$. Alors l'encadrement $1 \leq \int_0^1 f(x) dx \leq \|f\|_\infty = 1$ fournit $\int_0^1 f(x) dx = \|f\|_\infty = 1$ puis $\int_0^1 (\|f\|_\infty - f(x)) dx = 0$ et donc $\|f\|_\infty - f = 0$ (fonction continue positive d'intégrale nulle) ou encore $f = 1$ ce qui contredit $f(0) = 0$. On ne peut donc pas trouver $f \in A$ tel que $d_A(0) = d(0, f)$.

Correction de l'exercice 10 ▲

1. Soit $x \in E$. Puisque D est dense dans E , il existe une suite $(d_n)_{n \in \mathbb{N}}$ d'éléments de D convergeant vers x et puisque f et g sont continues et coïncident sur D et donc en x

$$f(x) = f(\lim_{n \rightarrow +\infty} d_n) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f(d_n) = \lim_{n \rightarrow +\infty} g(d_n) = g(\lim_{n \rightarrow +\infty} d_n) = g(x).$$

On a montré que $f = g$.

2. Soit $f \in \mathbb{R}^{\mathbb{R}}$. On suppose que $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2$ $f(x+y) = f(x) + f(y)$. Soit $a = f(1)$.

- $x = y = 0$ fournit $f(0) = 0 = a \times 0$.
- Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et $x \in \mathbb{R}$. $f(nx) = f(x + \dots + x) = f(x) + \dots + f(x) = nf(x)$. Ceci reste vrai pour $n = 0$.
- En particulier $x = 1$ fournit pour tout entier naturel non nul n , $f(n) = nf(1) = an$ puis $x = \frac{1}{n}$ fournit $nf\left(\frac{1}{n}\right) = f(1) = a$ et donc $f\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{a}{n}$.
- Ensuite, $\forall (p, q) \in (\mathbb{N} \times \mathbb{N}^*)^2$, $f\left(\frac{p}{q}\right) = pf\left(\frac{1}{q}\right) = a\frac{p}{q}$.
- Soit $x \in \mathbb{R}$. L'égalité $f(x) + f(-x) = f(0) = 0$ fournit $f(-x) = -f(x)$.
- En particulier, $\forall (p, q) \in (\mathbb{N}^*)^2$, $f\left(-\frac{p}{q}\right) = -f\left(\frac{p}{q}\right) = -a\frac{p}{q}$.

En résumé, si f est morphisme du groupe $(\mathbb{R}, +)$ dans lui-même, $\forall r \in \mathbb{Q}$, $f(r) = ar$ où $a = f(1)$.

Si de plus f est continue sur \mathbb{R} , les deux applications $f : x \mapsto f(x)$ et $g : x \mapsto ax$ sont continues sur \mathbb{R} et coïncident sur \mathbb{Q} qui est dense dans \mathbb{R} . D'après le 1), $f = g$ ou encore $\forall x \in \mathbb{R}$, $f(x) = ax$ où $a = f(1)$. Réciproquement, toute application linéaire $x \mapsto ax$ est en particulier un morphisme du groupe $(\mathbb{R}, +)$ dans lui-même, continu sur \mathbb{R} .

Correction de l'exercice 11 ▲

Soit $u = (u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite bornée de l'espace normé $(E, \| \cdot \|)$ ayant une unique valeur d'adhérence que l'on note ℓ . Montrons que la suite u converge vers ℓ .

Supposons par l'absurde que la suite u ne converge pas vers ℓ . Donc

$$\exists \varepsilon > 0 / \forall n_0 \in \mathbb{N}, \exists n \geq n_0 / \|u_n - \ell\| \geq \varepsilon \quad (*).$$

ε est ainsi dorénavant fixé.

En appliquant (*) à $n_0 = 0$, il existe un rang $\varphi(0) \geq n_0 = 0$ tel que $\|u_{\varphi(0)} - \ell\| \geq \varepsilon$.

Puis en prenant $n_0 = \varphi(0) + 1$, il existe un rang $\varphi(1) > \varphi(0)$ tel que $\|u_{\varphi(1)} - \ell\| \geq \varepsilon \dots$ et on construit ainsi par récurrence une suite extraite $(u_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$ telle que $\forall n \in \mathbb{N}, \|u_{\varphi(n)} - \ell\| \geq \varepsilon$.

Maintenant, la suite u est bornée et il en est de même de la suite $(u_{\varphi(n)})$. Puisque E est de dimension finie, le théorème de BOLZANO-WEIERSTRASS permet d'affirmer qu'il existe une suite $(u_{\psi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$ extraite de $(u_{\varphi(n)})$ et donc de u convergeant vers un certain $\ell' \in E$. ℓ' est donc une valeur d'adhérence de la suite u . Mais quand n tend vers $+\infty$ dans l'inégalité $\|u_{\psi(n)} - \ell\| \geq \varepsilon$, on obtient $\|\ell' - \ell\| \geq \varepsilon$ et donc $\ell \neq \ell'$. Ceci constitue une contradiction et donc u converge vers ℓ .

Correction de l'exercice 12 ▲

Pour $\alpha \in]0, \pi[$, posons $f(\alpha) = \sup_{n \in \mathbb{Z}} |\sin(n\alpha)| = \sup_{n \in \mathbb{N}} |\sin(n\alpha)|$.

• Tout d'abord $\forall \alpha \in]0, \pi[, \forall n \in \mathbb{N}, |\sin(n(\pi - \alpha))| = |\sin(n\alpha)|$ et donc $\forall \alpha \in]0, \pi[, f(\pi - \alpha) = f(\alpha)$.

On en déduit que $\inf_{\alpha \in]0, \pi[} f(\alpha) = \inf_{\alpha \in]0, \frac{\pi}{2}] } f(\alpha)$.

• $f\left(\frac{\pi}{3}\right) = \sup \left\{ 0, \frac{\sqrt{3}}{2} \right\} = \frac{\sqrt{3}}{2}$.

• Ensuite, si $\alpha \in \left[\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2}\right]$, $f(\alpha) \geq \sin(\alpha) \geq \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} = f\left(\frac{\pi}{3}\right)$. Par suite $\inf_{\alpha \in]0, \frac{\pi}{2}] } f(\alpha) = \inf_{\alpha \in]0, \frac{\pi}{3}] } f(\alpha)$.

• Soit alors $\alpha \in]0, \frac{\pi}{3}[$. Montrons qu'il existe un entier naturel non nul n_0 tel que $n_0\alpha \in \left[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right]$.

Il existe un unique entier naturel n_1 tel que $n_1\alpha \leq \frac{\pi}{3} < (n_1 + 1)\alpha$ à savoir $n_1 = E\left(\frac{\pi}{3\alpha}\right)$.

Mais alors, $\frac{\pi}{3} < (n_1 + 1)\alpha = n\alpha + \alpha \leq \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{3} = \frac{2\pi}{3}$ et l'entier $n_0 = n_1 + 1$ convient.

Ceci montre que $f(\alpha) \geq \sin\frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2} = f\left(\frac{\pi}{3}\right)$.

Finalement $\forall \alpha \in]0, \pi[, f(\alpha) \geq f\left(\frac{\pi}{3}\right)$ et donc $\inf_{\alpha \in]0, \pi[} \left\{ \sup_{n \in \mathbb{Z}} |\sin(n\alpha)| \right\} = \min_{\alpha \in]0, \pi[} \left\{ \sup_{n \in \mathbb{Z}} |\sin(n\alpha)| \right\} = f\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}$.

$$\inf_{\alpha \in]0, \pi[} \left\{ \sup_{n \in \mathbb{Z}} |\sin(n\alpha)| \right\} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Correction de l'exercice 13 ▲

Soit f une application uniformément continue sur \mathbb{R} . $\exists \alpha > 0 / \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, (|x - y| \leq \alpha \Rightarrow |f(x) - f(y)| \leq 1)$.

Soit $x \in \mathbb{R}^+$ (le travail est analogue si $x \in \mathbb{R}^-$).

Pour $n \in \mathbb{N}$

$$|x - n\alpha| \leq \alpha \Leftrightarrow -\alpha \leq x - n\alpha \leq \alpha \Leftrightarrow \frac{x}{\alpha} - 1 \leq n \leq \frac{x}{\alpha} + 1 \Leftrightarrow n = E\left(\frac{x}{\alpha}\right).$$

On pose $n_0 = E\left(\frac{x}{\alpha}\right)$.

$$\begin{aligned}
|f(x)| &\leq |f(x) - f(x - \alpha)| + |f(x - \alpha) - f(x - 2\alpha)| + \dots + |f(x - (n_0 - 1)\alpha) - f(x - n_0\alpha)| + |f(x - n_0\alpha) - f(0)| + |f(0)| \\
&\leq n_0 + 1 + |f(0)| \quad (\text{car } |x - n_0\alpha - 0| \leq \alpha) \\
&\leq \frac{x}{\alpha} + 2 + |f(0)|.
\end{aligned}$$

Ainsi, $\forall x \in \mathbb{R}^+$, $|f(x)| \leq \frac{x}{\alpha} + 2 + |f(0)|$. Par symétrie des calculs, $\forall x \in \mathbb{R}^-$, $|f(x)| \leq \frac{-x}{\alpha} + 2 + |f(0)|$ et donc $\forall x \in \mathbb{R}$, $|f(x)| \leq \frac{|x|}{\alpha} + 2 + |f(0)|$.

f uniformément continue sur $\mathbb{R} \Rightarrow \exists(a, b) \in \mathbb{R}^2 / \forall x \in \mathbb{R}, |f(x)| \leq a|x| + b$.

Correction de l'exercice 14 ▲

Posons $I_0 = [0, \frac{\pi}{2}[$ puis pour $n \in \mathbb{N}^*$, $I_n =]-\frac{\pi}{2} + n\pi, \frac{\pi}{2} + n\pi[$ et enfin $D = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_n$.

Pour $x \in D$, posons $f(x) = \tan x - x$. La fonction f est dérivable sur D et pour $x \in D$, $f'(x) = \tan^2 x$. La fonction f est ainsi strictement croissante sur chaque I_n et s'annule donc au plus une fois dans chaque I_n .

$f(0) = 0$ et donc f s'annule exactement une fois dans I_0 en $x_0 = 0$.

Pour $n \in \mathbb{N}^*$, f est continue sur I_n et de plus $f\left(-\frac{\pi}{2} + n\pi\right)^+ \times f\left(\frac{\pi}{2} + n\pi\right)^- = -\infty \times +\infty < 0$. D'après le théorème des valeurs intermédiaires, f s'annule au moins une fois dans I_n et donc exactement une fois dans I_n .

L'équation $\tan x = x$ admet donc dans chaque intervalle I_n , $n \in \mathbb{N}$, une et une seule solution notée x_n . De plus, $\forall n \geq 1$, $f(n\pi) = -n\pi < 0$ et donc $x_n \in]n\pi, \frac{\pi}{2} + n\pi[$.

Pour $n \geq 1$, $n\pi < x_n < \frac{\pi}{2} + n\pi$ et donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = +\infty$ puis $x_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n\pi$ et même

$$x_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} n\pi + O(1).$$

Ensuite, puisque $x_n - n\pi \in]0, \frac{\pi}{2}[$ et que $x_n = \tan(x_n) = \tan(x_n - n\pi)$, $x_n - n\pi = \arctan(x_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{\rightarrow} \frac{\pi}{2}$. Donc

$$x_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} n\pi + \frac{\pi}{2} + o(1).$$

Posons $y_n = x_n - n\pi - \frac{\pi}{2}$. Alors d'après ce qui précède, $y_n \in]-\frac{\pi}{2}, 0[$ et $y_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(1)$. De plus, l'égalité $\tan(x_n) = x_n$ fournit $\tan(n\pi + \frac{\pi}{2} + y_n) = n\pi + \frac{\pi}{2} + y_n$ ou encore

$$n\pi + \frac{\pi}{2} + y_n = -\cotan(y_n).$$

Puisque $y_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(1)$, on obtient $n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{1}{y_n}$ ou encore $y_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} -\frac{1}{n\pi} + o\left(\frac{1}{n}\right)$. Donc

$$x_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} n\pi + \frac{\pi}{2} - \frac{1}{n\pi} + o\left(\frac{1}{n}\right).$$

Posons $z_n = y_n + \frac{1}{n\pi} = x_n - n\pi - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{n\pi}$. D'après ce qui précède, $\tan\left(-\frac{1}{n\pi} + z_n\right) = -\frac{1}{n\pi + \frac{\pi}{2} - \frac{1}{n\pi} + z_n}$ et aussi $z_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o\left(\frac{1}{n}\right)$. On en déduit que

$$z_n = \frac{1}{n\pi} - \arctan\left(\frac{1}{n\pi + \frac{\pi}{2} - \frac{1}{n\pi} + z_n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{n\pi} - \arctan\left(\frac{1}{n\pi} - \frac{1}{2\pi n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{1}{2\pi n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right).$$

Finalement

$$x_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} n\pi + \frac{\pi}{2} - \frac{1}{n\pi} + \frac{1}{2\pi n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right).$$

Correction de l'exercice 15 ▲

1ère solution. Soit $z \in \mathbb{C}$. Posons $z = x + iy$ où $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ et $1 + \frac{z}{n} = r_n e^{i\theta}$ où $r_n \geq 0$ et $\theta_n \in]-\pi, \pi]$ de sorte que

$$\left(1 + \frac{z}{n}\right)^n = r_n^n e^{in\theta_n}.$$

Puisque $1 + \frac{z}{n}$ tend vers 1 quand n tend vers $+\infty$, pour n assez grand on a $r_n > 0$ et $\theta_n \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$. Mais alors pour n assez grand

$$r_n = \sqrt{\left(1 + \frac{x}{n}\right)^2 + \left(\frac{y}{n}\right)^2} \text{ et } \theta_n = \arctan\left(\frac{\frac{y}{n}}{1 + \frac{x}{n}}\right).$$

Maintenant, $r_n^n = \exp\left(\frac{n}{2} \ln\left(\left(1 + \frac{x}{n}\right)^2 + \left(\frac{y}{n}\right)^2\right)\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \exp\left(\frac{n}{2} \ln\left(1 + \frac{2x}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)\right)\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \exp(x + o(1))$ et donc r_n^n tend vers e^x quand n tend vers $+\infty$.

Ensuite $n\theta_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} n \arctan\left(\frac{\frac{y}{n}}{1 + \frac{x}{n}}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} n \arctan\left(\frac{y}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} y + o(1)$ et donc $n\theta_n$ tend vers y quand n tend vers $+\infty$.

Finalement, $\left(1 + \frac{z}{n}\right)^n = r_n^n e^{in\theta_n}$ tend vers $e^x \times e^{iy} = e^z$.

$\forall z \in \mathbb{C}, \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n = e^z.$

2ème solution. Le résultat est connu quand z est réel. Soit $z \in \mathbb{C}$. Soit $n \in \mathbb{N}^*$.

$$\left|\sum_{k=0}^n \frac{z^k}{k!} - \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n\right| = \left|\sum_{k=0}^n \left(\frac{1}{k!} - \frac{C_n^k}{n^k}\right) z^k\right| \leq \sum_{k=0}^n \left|\frac{1}{k!} - \frac{C_n^k}{n^k}\right| |z|^k.$$

Maintenant, $\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $\frac{1}{k!} - \frac{C_n^k}{n^k} = \frac{1}{k!} \left(1 - \frac{n \times (n-1) \times \dots \times (n-k+1)}{\underbrace{n \times n \times \dots \times n}_k}\right) \geq 0$. Donc,

$$\sum_{k=0}^n \left|\frac{1}{k!} - \frac{C_n^k}{n^k}\right| |z|^k = \sum_{k=0}^n \frac{|z|^k}{k!} - \left(1 + \frac{|z|}{n}\right)^n \underset{n \rightarrow +\infty}{\rightarrow} e^{|z|} - e^{|z|} = 0.$$

On en déduit que $\sum_{k=0}^n \frac{z^k}{k!} - \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n$ tend vers 0 quand n tend vers $+\infty$ et puisque $\sum_{k=0}^n \frac{z^k}{k!}$ tend vers e^z quand n tend vers $+\infty$, il en est de même de $\left(1 + \frac{z}{n}\right)^n$.
