Solutions Exercices MP/MP*

Table des matières

1 Algèbre Générale

2 Séries numériques et familles sommables

3 Probabilités sur un univers dénombrable

4 Calcul matriciel

5 Réduction des endomorphismes

Solution 5.1. *Pour le sens indirect, soit* $\lambda \in \mathrm{Sp}_{\mathbb{C}}(M)$*. Pour tout* $p \in \mathbb{N}$*,* $\lambda \in \mathrm{Sp}_{\mathbb{C}}(M_p)$ *donc* $\det(M_p - \lambda I_n) = 0$*. Par continuité du déterminant, on a* $0 = \det(M_p - \lambda I_n) \xrightarrow[p \to +\infty]{} \det(-\lambda I_n)$*. Donc* $\lambda = 0$ *et* $\mathrm{Sp}_{\mathbb{C}}(M) = \{0\}$ *donc* M *est nilpotente.*

Pour le sens direct, soit $u \in \mathcal{L}(\mathbb{C}^n)$ *canoniquement associée à* M*. On trigonalise* u *sur une base* $\mathcal{B} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ *avec* $u(\varepsilon_1) = 0, u(\varepsilon_2) = a_{1,2}\varepsilon_1, \dots, u(\varepsilon_n) = a_{1,n}\varepsilon_1 + \dots + a_{n-1,n}\varepsilon_{n-1}$*. Posons pour* $i \in \{1, \dots, n\}$*,* $\varepsilon_{i,p} = \frac{\varepsilon_i}{p^{i-1}}$*. On pose* $\mathcal{B}_p = (\varepsilon_{1,p}, \dots, \varepsilon_{n,p})$ *et* $M_p = \mathrm{mat}_{B_p}(u)$*, semblable à* M *et* $M_p \xrightarrow[p \to +\infty]{} 0$ *car* $\|M_p\| \leqslant \frac{1}{p}\|M_1\|$*.*

Solution 5.2. *On pose* $u \in \mathcal{L}(\mathbb{C}^n)$ *canoniquement associée à* M*.*

Pour le sens indirect, si M *n'est pas diagonalisable, il existe une base* $B = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ *de* $\mathbb{C}^n$ *telle que*

$$\mathrm{mat}_{\mathcal{B}}(u) = D + N$$

où D *est diagonale et* N *est nilpotente (décomposition de Dunford). En reprenant les bases* $\mathcal{B}_p$ *définies à l'exercice précédent, on a*

$$\mathrm{mat}_{\mathcal{B}_p}(u) = D + N_p \xrightarrow[p \to +\infty]{} D$$

Si $D \in S_M$*, alors* M *est diagonalisable ce qui est exclu par hypothèse. Donc* S_M *n'est pas fermé.*

Pour le sens direct, si M *est diagonalisable, soit* $(M_p)_{p \in \mathbb{N}} \in (S_M)^{\mathbb{N}}$ *avec* $M_p \xrightarrow[p \to +\infty]{} M'$*. Soit* $\lambda \in \mathbb{C}$*. On a* $\chi_{M_p}(\lambda) = \det(\lambda I_n - M_p) = \chi_M(\lambda)$ *car* M *et* M_p *sont semblables. Par continuité du déterminant, on a* $\chi_{M'}(\lambda) = \chi_M(\lambda)$*, donc* $\chi_{M'} = \chi_M$*. De plus,* $A \mapsto \Pi_M(A)$ *(polynôme minimal) est continue sur* $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ *et pour tout* $p \in \mathbb{N}$*, on a* $\Pi_M(M_p) = 0$ *donc* $\Pi_M(M') = 0$*.* M' *est donc annulée par* Π_M*, donc* M' *est diagonalisable et comme* $\chi_M = \chi_{M'}$*,* M *et* M' *ont les mêmes valeurs propres avec les mêmes multiplicités. Donc* $M' \in S_M$*.*

Remarque 5.1. Le polynôme caractéristique est une fonction continue de la matrice, mais c'est faux pour le polynôme minimal, par exemple pour

$$M_p = \begin{pmatrix} \frac{1}{p} & 0 \\ 0 & \frac{2}{p} \end{pmatrix}$$

On a $M_p \xrightarrow[p \to +\infty]{} 0$ et $\Pi_{M_p} = (X - \frac{1}{p})(X - \frac{2}{p}) \xrightarrow[p \to +\infty]{} X^2 \neq X = \Pi_{M_\infty}$ donc $\lim\limits_{p \to +\infty} \Pi_{M_p} \neq \Pi_{\lim\limits_{p \to +\infty} M_p}$.

6 Espaces vectoriels normés

Solution 6.1.

1. *A $(x,y)\in\mathbb{R}^2$ fixé, la fonction*

$$\begin{array}{rccl}\varphi: & \mathbb{R} & \to & \mathbb{R}\\ & t & \mapsto & x\cos(t)+y\sin(2t)\end{array}$$

est bornée, donc le sup *sur* $\mathbb{R}$ *existe. Pour la séparation, prendre* $t=0$ *et* $t=\frac{\pi}{4}$*. Pour l'inégalité triangulaire, montrer l'inégalité à* t *fixé puis passer au* sup *sur* $\mathbb{R}$*.*

2. *Si* $|x|+|y|\leqslant 1$*, alors* $N(x,y)\leqslant 1$ *donc on a la première inclusion.*
Si $N(x,y)\leqslant 1$*, utiliser* $t=0$ *pour avoir* $|x|\leqslant 1$ *et* $t=\frac{\pi}{4}$ *puis* $t=-\frac{\pi}{4}$ *pour pouvoir justifier*

$$|2y|\leqslant\left|x\frac{\sqrt{2}}{2}+y\right|+\left|y-x\frac{\sqrt{2}}{2}\right|\leqslant 2$$

et donc $|y|\leqslant 1$*. D'où la deuxième inclusion.*

3. *On fixe* $(x,y)\in S_N(0,1)\cap(\mathbb{R}_+)^2$*.* φ *est* 2π*-périodique,* $\varphi(\pi-t)=\varphi(t)$ *et* $\sup\limits_{t\in\mathbb{R}}|\varphi(t)|=1$*. On peut donc se limite à un intervalle de longueur* 2π *pour l'étude de* φ*.*
On note que si $t\in[-\pi,0]$*,* $\cos(t)$ *et* $\sin(2t)$ *sont de signes opposés. Donc*

$$|\varphi(t)|\leqslant x|\cos(t)|+y|\sin(2t)|=|\varphi(-t)|$$

et $-t\in[0,\pi]$*. Donc le* sup *est atteint sur* $[0,\pi]$*.*
On note maintenant, comme $|\varphi(\pi-t)|=|\varphi(t)|$ *sur* $[0,\frac{\pi}{2}]$*, que si* $t\in[\frac{\pi}{4},\frac{\pi}{2}]$*,*

$$0\leqslant\varphi(t)=x\underbrace{\cos(t)}_{\in[0,\frac{\sqrt{2}}{2}]}+y\sin(2t)\leqslant x\underbrace{\cos(\frac{\pi}{2}-t)}_{\in[\frac{\sqrt{2}}{2},1]}+y\sin(2\times(\frac{\pi}{2}-t))=\varphi(\frac{\pi}{2}-t)$$

Donc le sup *est atteint sur* $[0,\frac{\pi}{4}]$*. Soit maintenant* $t_0\in[0,\frac{\pi}{4}]$ *tel que* $\varphi(t_0)$ *réalise le* sup *(existe car* φ *est continue sur un compact). Comme c'est aussi le* sup *sur* $\mathbb{R}$ *qui est ouvert, on a la condition d'Euler du premier ordre :* $\varphi'(t_0)=0$*.*
On a donc $x\cos(t_0)+y\sin(2t_0)=1$ *et* $-x\sin(t_0)+2y\cos(2t_0)=0$*. On en déduit les valeurs de* x *et* y *en fonction de* t_0*, en faisant attention que* $\cos(t_0)\neq 0$ *sinon* $\sin(t_0)=0$ *aussi ce qui n'est pas le cas, et au cas où* $t_0=0$*.*
Réciproquement, s'il existe $t_0\in[0,\frac{\pi}{4}]$ *tel que* x *et* y *s'écrivent de la façon demandée, alors* t_0 *est l'unique point satisfaisant* $\varphi(t_0)=1$ *et* $\varphi'(t_0)=0$*. Mais alors le* sup *de* φ *sur* $[0,\frac{\pi}{4}]$ *est atteint en un point* t_1 *qui vérifie les mêmes choses, donc* $t_1=t_0$ *d'où* $N(x,y)=1$*.*

Solution 6.2.

1. *Pour l'inégalité triangulaire, introduire la forme bilinéaire symétrique positive sur* E

$$\begin{array}{rccl}\varphi: & E\times E & \to & \mathbb{R}\\ & (f,g) & \mapsto & f(0)g(0)+\int_0^1 f'(t)g'(t)dt\end{array}$$

Alors $N(f)=\sqrt{\varphi(f,f)}$ *et on utilise l'inégalité de Minkowski.*

2. *Pour $x \in [0,1]$, écrire $|f(x)| = |f(0) + f(x) - f(0)|$, $f(x) - f(0) = \int_0^x f'(t)dt$, utiliser Cauchy-Schwarz avec f' et 1 puis que $\sqrt{a} + \sqrt{b} \leqslant \sqrt{2}\sqrt{a+b}$, pour enfin passer au $\sup$ sur x.*

3. *Utiliser, pour $n \in \mathbb{N}^*$, la fonction*

$$f_n : \begin{array}{ccc} [0,1] & \to & \mathbb{R} \\ t & \mapsto & t^n \end{array}$$

Solution 6.3. *Si f est ouverte, $f(\mathbb{R}^n)$ est un sous-espace vectoriel ouvert de R^p. Donc f est surjective.*

Si f est surjective, on prend F un supplémentaire de $\ker(f)$ dans $\mathbb{R}^n$ avec $\dim(\ker(f)) = n - p$ et $\dim(F) = p$. Soit $(e_1, \ldots, e_p)$ une base de F et $(e_{p+1}, \ldots, e_n)$ une base de $\ker(f)$. On vérifie que $(f(e_1, \ldots, f(e_p))$ est une base de $\mathbb{R}^p$. On définit

$$N_1 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^n & \to & \mathbb{R} \\ \sum_i^n x_i e_i & \mapsto & \max\limits_{1 \leqslant i \leqslant n} |x_i| \end{array}$$

norme sur $\mathbb{R}^n$ et

$$N_2 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^p & \to & \mathbb{R} \\ \sum_i^p y_i f(e_i) & \mapsto & \max\limits_{1 \leqslant i \leqslant p} |y_i| \end{array}$$

norme sur $\mathbb{R}^p$.

Soit Θ un ouvert de $\mathbb{R}^n$, soit $y_0 \in f(\Theta)$, il existe $x_0 \in \Theta$: $y_0 = f(x_0)$. Si $x_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i$, alors $y_0 = \sum_{i=1}^p \alpha_i f(e_i)$. Comme Θ est un ouvert, il existe $r_0 > 0$ tel que

$$B_{N_1}(x_0, r_0) \subset \Theta$$

Soit $y = \sum_{i=}^p \beta_i f(e_i) \in \mathbb{R}^p$, si $N_2(y - y_0) < r_0$, pour tout $i \in \{1, \ldots, p\}$, $|\beta_i - \alpha_i| < r_0$ et

$$y = f\left(\sum_{i=1}^p \beta_i e_i + \sum_{i=p+1}^n \alpha_i e_i\right) \stackrel{def}{=} f(x)$$

avec $N_1(x - x_0) = \max\limits_{1 \leqslant i \leqslant p} |\beta_i - \alpha_i| < r_0$. Ainsi $x \in \Theta$ et $y \in f(\Theta)$, donc $B_{N_2}(y_0, r_0) \subset f(\Theta)$ et $f(\Theta)$ est un ouvert.

Solution 6.4.

1. *Classique.*

2. $$|f(x)| \leqslant |f(0)| + |f(x) - f(0)| \leqslant |f(0)| + \kappa(f)x \leqslant N(f)$$

   car $x \leqslant 1$, donc $N_\infty \leqslant N$. Pour la non-équivalence, prendre

$$f_n : \begin{array}{ccc} [0,1] & \to & \mathbb{R} \\ t & \mapsto & t^n \end{array}$$

3. *On a $|f(0)| \leqslant N_\infty(f)$ donc $N(f) \leqslant N'(f)$. Ensuite, $N_\infty \leqslant N$ donne $N' \leqslant N + \kappa \leqslant 2N$. Donc N est N' sont équivalentes.*

Remarque 6.1. Exemple de normes qui, en dimension infinie, ne se dominent pas mutuellement. On prend $(e_i)_{i\in I}$ une base (de Hamel), $J=(i_n)_{n\in\mathbb{N}}\subset I$ dénombrable. Si $x=\sum_{i\in I} x_i e_i$, on peut vérifier que

$$N_1(x)=\sum_{n\in\mathbb{N}}|x_{i_n}|+\sum_{i\in I\setminus J}|x_i|$$

et

$$N_2(x)=\sum_{n\in\mathbb{N}} n|x_{i_{2n}}|+\sum_{n\in\mathbb{N}}\frac{1}{n+1}|x_{i_{2n+1}}|+\sum_{i\in I\setminus J}|x_i|$$

ne se dominent pas.

Solution 6.5. *Il existe $\alpha>0$ tel que $B_{\|\cdot\|_\infty}(I_n,\alpha)\subset G$. Soient $i\neq j$ et $\lambda\in\mathbb{C}$. Il existe $p\in\mathbb{N}^*$ tel que $\frac{|\lambda|}{p}<\alpha$. Alors*

$$\left\|T_{i,j}\left(\frac{\lambda}{p}\right)-I_n\right\|_\infty=\left|\frac{\lambda}{p}\right|<\alpha$$

donc $T_{i,j}(\lambda)\in G$ ($T_{i,j}$ est la matrice de transvection : $T_{i,j}(\lambda)=I_n+\lambda E_{i,j}$).

Ainsi,

$$T_{i,j}(\lambda)=\left(T_{i,j}\left(\frac{\lambda}{p}\right)\right)^p\in G$$

Soit $\delta=\rho e^{i\theta}\in\mathbb{C}^*$. On a $\lim_{n\to+\infty}\rho^{\frac{1}{p}}e^{i\frac{\theta}{p}}=1$ donc il existe $p\in\mathbb{N}^*$ tel que $|\rho^{\frac{1}{p}}e^{i\frac{\theta}{p}}-1|<\alpha$.

On a alors

$$\left\|D_n\left(\rho^{\frac{1}{p}}e^{i\frac{\theta}{p}}\right)-I_n\right\|_\infty<\alpha$$

donc $D_n(\delta)=D_n(\rho^{\frac{1}{p}}e^{i\frac{\theta}{p}})^p\in G$ (matrice de dilatation).

Comme les matrices de transvection et de dilatation engendrent $GL_n(\mathbb{C})$, on a bien $G=GL_n(\mathbb{C})$.

Remarque 6.2. C'est faux sur $\mathbb{R}$. Contre-exemple : matrices de déterminant positif.

Solution 6.6. *Si f n'est pas continue en 0, il existe $\varepsilon_0>0$ tel que pour tout $\alpha>0$, il existe $h\in E$ avec $\|h\|\leqslant\alpha$ et $\|f(h)\|>\varepsilon_0$. On prends $\alpha_n=\frac{1}{n+1}$, d'où $\|nh_n\|\leqslant 1$ mais $\underbrace{\|f(nh_n)\|}_{\leqslant M}>n\varepsilon_0\xrightarrow[n\to+\infty]{}+\infty$.*

Donc f est continue en 0. Comme f est linéaire, pour tout $x\in E$,

$$\lim_{\|h\|\to 0}f(x+h)=\lim_{\|h\|\to 0}f(x)+f(h)=f(x)$$

donc f est continue.

On a $f(px)=p(fx)$ pour tout $p\in\mathbb{Z}$ puis $qf(\frac{p}{q}x)=f(px)=pf(x)$ pour tout $(p,q)\in\mathbb{Z}\times\mathbb{N}^*$ donc pour tout $r\in\mathbb{Q}$, $f(rx)=rf(x)$. Soit $\lambda\in\mathbb{E}$, il existe une suite de rationnels telle que $\lim_{n\to+\infty}r_n=\lambda$. Comme f est continue, on a

$$\begin{aligned}f(\lambda x)&=\lim_{n\to+\infty}f(r_nx)\\&=\lim_{n\to+\infty}r_nf(x)\\&=\lambda f(x)\end{aligned}$$

Donc f est linéaire.

Remarque 6.3. Soit $e_0 = 1$ et $e_1 = \sqrt{2}$ et $(e_i)_{i\in I}$ une $\mathbb{Q}$-base de $\mathbb{R}$ ($0 \in I$). On définie

$$f\Big(\sum_{i\in I} \lambda_i e_i\Big) = \lambda_0 e_0 + \sqrt{2} \sum_{i\in I\setminus\{0\}} \lambda_i e_i$$

f vérifie $f(x+y) = f(x) + f(y)$, mais si $(r_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est une suite de rationnels tendant vers $\sqrt{2}$, $f(r_n) = r_n \to \sqrt{2} \neq f(\sqrt{2}) = 2$.

Solution 6.7.

1. *On a $\alpha(A) \subset \overline{A}$ donc $\overline{\mathring{\overline{A}}} \subset \overline{A}$ donc $\alpha(\alpha(A)) \subset \alpha(A)$. Comme $\alpha(A)$ est un ouvert inclus dans $\overline{\mathring{\overline{A}}} \subset \overline{A}$ donc $\alpha(A) \subset \alpha(\alpha(A))$.*

2. *Si $\beta(A) = \overline{\mathring{A}}$, on montre aussi que $\beta(\beta(A)) = \beta(A)$. On a donc $A, \overline{A}, \mathring{A}, \overline{\mathring{A}}, \mathring{\overline{A}}, \overline{\mathring{\overline{A}}}$ et $\mathring{\overline{\mathring{A}}}$ et c'est tout.*

Solution 6.8.

1. *Si $d_A = d_B$,*
$$\overline{A} = \{x \in E \mid d_A(x) = 0\} = \{x \in E \mid d_B(x) = 0\} = \overline{B}$$
Réciproquement, soit $x \in E$ et $\varepsilon > 0$, il existe $a_1 \in \overline{A}$, $\|x - a_i\| \leqslant d_{\overline{A}}(x) + \frac{\varepsilon}{2}$ (par définition de l'inf). Il existe $a_2 \in A$, $\|a_1 - a_2\| \leqslant \frac{\varepsilon}{2}$ (par définition de la fermeture). Ainsi,
$$d_A(x) \leqslant \|x - a_2\| \leqslant \|x - a_1\| + \|a_1 - a_2\| \leqslant d_{\overline{A}}(x) + \varepsilon$$
Ceci valant pour tout $\varepsilon > 0$, $d_A(x) \leqslant d_{\overline{A}}(x)$. Comme $A \subset \overline{A}$, $d_{\overline{A}} \leqslant d_A$, on a $d_A = d_{\overline{A}} = d_{\overline{B}} = d_B$.
2. *Soit $x \in A$, on a $d_B(x) = |d_B(x) - d_A(x)| \leqslant \rho(A,B)$ donc $\sup\limits_{x\in A} d_B(x) \leqslant \rho(A,B)$, de même pour $\sup\limits_{y\in B} d_A(y)$ donc on on a un première inégalité.*
Réciproquement, soit $x \in E$ et $\varepsilon > 0$, il existe $a \in A$ et $b \in B$ tel que $\|x - a\| \leqslant d_A(x) + \varepsilon$ et $\|x - b\| \leqslant d_B(x) + \varepsilon$. On a alors
$$d_A(x) \leqslant \|x - a\| \leqslant \|a - b\| + \|x - b\| \leqslant d_B(x) + \varepsilon + \alpha(A,B)$$
Ceci vaut pour tout $\varepsilon > 0$, donc $d_A(x) \leqslant d_B(x) + \alpha(A,B)$. De même, $d_B(x) \leqslant d_A(x) + \alpha(A,B)$ donc $\rho(A,B) \leqslant \alpha(A,B)$.

Solution 6.9.

1. *Soit $(y_n)_{n\in\mathbb{N}} \in P(F)^{\mathbb{N}}$ qui converge vers $y \in \mathbb{C}$ donc il existe $(x_n) \in F^{\mathbb{N}}$ telle que l'on ait pour tout $n \in \mathbb{N}$, $P(x_n) = y_n$. $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est bornée car $\lim\limits_{z\to+\infty} |P(z)| = +\infty$ (car P est non constant), donc on peut extraire (Bolzano-Weierstrass) $x_{\sigma(n)} \to x$ et $x \in F$ car F est fermé. Par continuité de $z \mapsto P(z)$ sur $\mathbb{C}$, on a $y = P(x) \in P(F)$.*

2. *Soit Θ un ouvert de $\mathbb{C}$, soit $y \in P(\Theta), \exists x \in \Theta$ tel que $P(x) = y$ et il existe $r > 0$, $B(x,r) \subset \Theta$. Soit $y' \in \mathbb{C}$, supposons que pour tout $x' \in \mathbb{C}$ tel que $P(x') = y'$, on a $|x - x'| > r$. Soit $Q(X) = P(X) - y' = a\prod_{i=1}^{n}(X - x_i)$ non constant où a est le coefficient dominatrice de P. Par hypothèse, pour tout $i \in \{1, \dots, n\}$: $|x_i - x| > r$ (car $P(x_i) = y'$), ainsi*

$$|Q(x)| = |y - y'| \geqslant |a|r^n$$

Par contraposée, si $|y - y'| \leqslant \frac{|a|r^n}{2}$, alors il existe $x' \in \mathbb{C}$ tel que $P(x') = y'$ et $|x' - x| < r$.Ainsi, $x' \in B(x,r) \subset \Theta$ et $y' \in P(\Theta)$. Donc $B(y, |a|r^n) \subset P(\Theta)$ et $P(\Theta)$ est un ouvert.

Solution 6.10.

1. *Si $P \notin \mathcal{S}$, il existe $z_0 \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$ tel que $P(z_0) = 0$ et $|\Im(z_0)|^n > 0 = P(z_0)$. Par contraposée, si pour tout $z \in \mathbb{C}$, $|P(z)| \geqslant |\Im(z)|^n$,alors $P \in \mathcal{S}$.*
   Réciproquement, si $P = \prod_{i=1}^{n}(X - \lambda_i) \in \mathcal{S}$ avec $(\lambda_i)_{1 \leqslant i \leqslant n}$ réels, soit $z = a + ib \in \mathbb{C}$. On a

$$|P(z)| = \prod_{i=1}^{n} |a - \lambda_i + ib| \geqslant |b|^n$$

2. *Soit $(P_p)_{p\in\mathbb{N}} \in \mathcal{S}^{\mathbb{N}}$ telle que $P_p \xrightarrow[p\to+\infty]{} P \in F$. Soit $z \in \mathbb{C}$, on a pour tout $p \in \mathbb{N}$, $|P_p(z)| \geqslant |\Im(z)|^n$ donc quand $p \to +\infty$, $|P(z)| \geqslant |\Im(z)|^n$ donc $P \in \mathcal{S}$ et S est fermé.*
3. *Soit $(M_p)_{p\in\mathbb{N}}$ une suite de matrice trigonalisable sur $\mathbb{R}$ qui converge vers $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Ib bite χ_p le polynôme caractéristique de M_p. Pour tout $p \in \mathbb{N}$, $\chi_p \in \mathcal{S}$ et $\chi_p \xrightarrow[p\to+\infty]{} \chi_M$. Comme $\mathcal{S}$ est fermé, $\chi_M \in \mathcal{S}$ et M est trigonalisable sur $\mathbb{R}$.*

Solution 6.11.

1. *φ est linéaire et $\dim(\mathbb{K}_{m-1}[X] \times \mathbb{K}_{n-1}[X]) = m + n + = \dim(\mathbb{K}_{n+m-1}[X])$.*
   Si φ est bijective, elle est surjective et il existe $(U,V) \in \mathbb{K}[X]^2$ tel que $UA + BV = 1$ et d'après le théorème de Bézout, on a $A \wedge B = 1$.
   Réciproquement, si φ n'est pas surjective, il existe $(U,V) \in (\mathbb{K}_{m-1}[X] \times \mathbb{K}_{n-1}[X]) \setminus \{(0,0)\}$ tel que $\varphi(U,V) = 0$ d'où $AU = -BV$. Soit $\delta = A \wedge B$, on écrit $A = \delta A_1$ et $B = \delta B_1$ avec $A_1 \wedge B_1 = 1$ et on a $A_1U = -B_1V$. D'après le théorème de Gauss, on a $A_1 \mid V$ et $B_1 \mid U$. Si $U = 0$, on a $V = 0$ et de même si $V = 0$, on a $U = 0$. On peut donc supposer $U \neq 0$ et $V \neq 0$, et on a alors $\deg(A_1) \leqslant \deg(V) \leqslant n - 1 < n = \deg(A)$ mais $A = \delta A_1$ donc $\deg(\delta) \geqslant 1$ et $A \wedge B \neq 1$.
2. *Φ est continue car $R_{A,B}$ est un polynôme en les coefficients de A et B.*
3. *Comme on est dans $\mathbb{C}$, $\Delta = \{P \in \mathbb{C}_p[X] \mid P \wedge P' = 1\} = \{P \in \mathbb{C}_p[X] \mid R_{P,P'} \neq 0\}$. $\Phi_{P,P'}$ est continue d'après la question précédente, $\delta = \Phi_{P,P'}^{-1}(\mathbb{C}^*)$ donc Δ est ouvert.*
   Sur $\mathbb{R}$, on n'a pas la caractérisation de scindé à racines simples si et seulement si $P \wedge P' = 1$ (contre-exemple : $P = X^2 + 1$). Dans $\mathbb{R}_3[X]$, X est scindé à racines simples et $X(1 + \varepsilon X)^2 \xrightarrow[\varepsilon\to 0]{} X$ et $-\frac{1}{\varepsilon}$ est racine double, donc Δ n'est pas ouvert.

Remarque 6.4. On peut cependant considérer

$$\Delta_n = \{P \in \mathbb{C}_p[X] \mid P \text{ scindé à racines simples sur } \mathbb{R} \text{ et } \deg(P) = n\}$$

Si $\lambda_1 < \lambda_2 < \cdots < \lambda_n$ sont les racines (distinctes) de R sur $\mathbb{R}$, on choisit $\alpha_0 \in]-\infty, \lambda_1$, $\alpha_n \in]\lambda_n, +\infty[$ et $\alpha_i \in]\lambda_i, \lambda_{i+1}[$ si $i = 1, \ldots, n-1$.

Pour tout $k \in \{0, \ldots, n-1\}$, on a $P(\alpha_k)P(\alpha_{k+1}) < 0$ (car les racines de P provoquent des changements de signe). Soit

$$\begin{array}{rccl} \Psi : & \mathbb{R}_n[X] & \to & \mathbb{R}^n \\ & Q & \mapsto & (Q(\alpha_k)Q(\alpha_{k+1}))_{0 \leqslant k \leqslant n-1} \end{array}$$

Ψ est continue sur $\mathbb{R}_n[X]$ et $\Psi(P) \in (\mathbb{R}_-^*)^n$ qui est ouvert, donc il existe $r > 0$ tel que si $\|P - Q\| < r$, alors $\Psi(Q) \in (\mathbb{R}_-^*)^n$. Donc Q change n fois de signe, et admet au moins n racines. Mais $\deg(Q) = n$, donc Q est scindé à racines simples sur $\mathbb{R}$, donc Δ_n est ouvert dans $\{P \in \mathbb{R}[X] \mid \deg(P) = n\}$.

Remarque 6.5.

$$\{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \mid M \text{ diagonalisable à racines simples}\} = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \mid \chi_M \text{ sciné à racines simples}\}$$

est un ouvert de $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ car $M \mapsto \chi_M$ est continue sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, et c'est aussi vrai sur $\mathbb{R}$.

Solution 6.12.

1. *Soit*

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) & \to & \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \\ & A & \mapsto & A^n \end{array}$$

f est continue et $F = f^{-1}(\{0\})$ donc $F = \overline{F}$.
Soit $M_0 \in F$, X^n annule M_0 donc M_0 est trigonalisable : on écrit M_0 dans une base où les coefficients diagonaux sont tous nuls. Soit alors M_ε la même matrice dans la même base en rajoutant simplement ε en première position de la diagonale. Alors $M_\varepsilon \xrightarrow[\varepsilon \to 0]{} M_0$ et $M_\varepsilon \notin F$ donc $\mathring{F} = \emptyset$. Notons que cela signifie que F est dense.

2. *La norme dérive du produit scalaire $(A|B) \mapsto \mathrm{Tr}(A^\mathsf{T} B)$. Soit $M \in F$, on a $\|M - I_n\|^2 = \|M\|^2 + \|I_n\|^2 - 2(M|I_n)$. On a $(M|I_n) = \mathrm{Tr}(M) = 0$ car M est nilpotente. Donc $\|M - I_n\|^2$ est minimale pour $\|M\|^2$ minimale, donc pour $M = 0 \in F$. Donc $d(I_n, F) = \|I_n\| = \sqrt{n}$ (et la distance est atteinte pour $0_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})}$).*

Solution 6.13.

1. *$A \mapsto \det(A)$ est continue et $GL_n(\mathbb{K}) = \det^{-1}(\mathbb{K}^*)$ est donc ouvert. Si $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, pour $p \in \mathbb{N}$, on pose $A_p = A - \frac{1}{p+1} I_n$. Comme $\mathrm{Sp}(A)$ est fini, il existe $N \in \mathbb{N}$, tel que pour tout $p \geqslant N$, $\frac{1}{p+1} \notin \mathrm{Sp}(A)$. Donc pour tout $p \geqslant N$, $A_p \in GL_n(\mathbb{K})$, et $A_p \xrightarrow[p \to +\infty]{} A$ donc $GL_n(\mathbb{K})$ est dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.*

2. *On fixe $B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. Soit $A \in GL_n(\mathbb{K})$. On écrit $BA = A^{-1}(AB)A$ donc AB et BA sont semblables donc $\chi_{AB} = \chi_{BA}$. Comme, à B fixé, $A \mapsto \chi_{AB}$ et $A \mapsto \chi_{BA}$ sont continues sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, on a le résultat par densité.*

Solution 6.14.

1. *On a $v_p \circ (id_E - u) = (id_E - u) \circ v_p = \frac{1}{p}(id_E - u^p)$, donc $\|v_p \circ (id_E - u)\| \leqslant \frac{1}{p}(\|id_E\| + \|u^p\|) \xrightarrow[p \to +\infty]{} 0$.*
Soit $x \in \ker(u - id_E) \cap \mathrm{Im}(u - id_E)$, on a $u(x) = x$ et il existe $y \in E$, $x = (u - id_E)(y)$. On a $v_p(x) = \frac{1}{p}(px) = x$ et $v_p(x) = v_p \circ (u - id_E)(y) \xrightarrow[p \to +\infty]{} 0$ d'où $x = 0$. Le théorème du rang permet de conclure.

2. *Soit* $x \in E$, *on écrit* $x = x_1 + x_2$ *avec* $\Pi(x) = x_1$ *et* $x_2 = (u - id_E)(y_2)$. *Alors* $v_p(x) = x_1 + v_p \circ (u - id_E)(y_2) \xrightarrow[p \to +\infty]{} x_1 = \Pi(x)$.

7 Fonction d'une variable réelle

Solution 7.1. *On note* $A_h = \{|\varphi(x) - \varphi(y)| \mid (x,y) \in I^2 \text{ et } |x-y| \leqslant h\}$.

1. ω_φ *est bien défini car* $|\varphi(x) - \varphi(y)| \leqslant 2\|\varphi\|_\infty$*). Si* $0 < h \leqslant h'$*, alors* $A_h \subset A_{h'}$ *donc* $\sup(A_h) \leqslant \sup(A_{h'})$ *donc* $\omega_\varphi(h) \leqslant \omega_\varphi(h')$.
2. *Soit* $(h,h') \in (\mathbb{R}_+^*)^2$*, soit* $(x,y) \in I^2$ *tel que* $|x-y| \leqslant h+h'$ *(où on peut supposer que* $x \leqslant y$*).*
   - *Si* $y \in [x, x+h]$*, alors* $|x-y| \leqslant h$ *donc* $|\varphi(x) - \varphi(y)| \leqslant \omega_\varphi(h) \leqslant \omega_\varphi(h) + \omega_\varphi(h')$
   - *Si* $y \in [x+h, x+h+h']$, $|\varphi(x)-\varphi(y)| \leqslant |\varphi(x)-\varphi(x+h)|+|\varphi(x+h)-\varphi(y)| \leqslant \omega_\varphi(h)+\omega_\varphi(h')$ *car* $|x-(x+h)| \leqslant h$ *et* $|x+h-y| \leqslant h'$.

   Donc $\omega_\varphi(h+h') \leqslant \omega_\varphi(h) + \omega_\varphi(h')$.
3. *Par récurrence sur* $n \in \mathbb{N}$*, on a* $\omega_\varphi(nh) = n\omega_\varphi(h)$*. Si* $\lambda \in \mathbb{R}_+^*$*, on a* $\lambda h \leqslant (\lfloor \lambda \rfloor + 1)h$ *et par croissance et ce qui précède, on a*

$$\omega_\varphi(\lambda h) \leqslant (\lfloor \lambda \rfloor + 1)\omega_\varphi(h) \leqslant (\lambda + 1)\omega_\varphi(h)$$

4. *Soit* $\varepsilon > 0$*.* φ *étant uniformément continue, il existe* $\alpha > 0$ *tel que pour tout* $(x,y) \in I^2$*, si* $|x-y|\alpha$ *on a* $|\varphi(x) - \varphi(y)| \leqslant \varepsilon$ *et on a pour* $h \leqslant \alpha$, $\omega_\varphi(h) \leqslant \varepsilon$ *d'où* $\lim\limits_{h\to 0} \omega_\varphi(h) = 0$.

   Soit alors $h_0 > 0$ *fixé et* $h > 0$,
   - *si* $h_0 \leqslant h$*, on a* $0 \leqslant \omega_\varphi(h) - \omega_\varphi(h_0) \leqslant \omega_\varphi(h - h_0)$.
   - *si* $h \leqslant h_0$*, on a* $0 \leqslant \omega_\varphi(h_0) - \omega_\varphi(h) \leqslant \omega_\varphi(h_0 - h)$.

   Dans tous les cas, on a $|\omega_\varphi(h)-\omega_\varphi(h_0)| \leqslant \omega_\varphi(|h_0-h|)$*. Donc on a bien* $\lim\limits_{h\to h_0} \omega_\varphi(h) = \omega_\varphi(h_0)$.

   Donc ω_φ *est continue (et même uniformément).*

8 Suites et séries de fonctions

9 Séries entières

10 Intégration

11 Espaces préhilbertiens

12 Espaces euclidiens

13 Calcul différentiel

14 Équation différentielles linéaires