

**TRAVAUX DIRIGÉS : APPLICATIONS LINÉAIRES ET MATRICES
(RÉPONSES - INDICATIONS)**

1. CALCUL MATRICIEL

Exercice 1.

- (1) 2, (2) 2, (3) 2, (4) 2,
(5) 3, (6) 3, (7) 3, (8) 4.

Exercice 2.

- (1) A est inversible et $A^{-1} = -\frac{1}{3} \begin{pmatrix} 5 & -4 \\ -2 & 1 \end{pmatrix}$, (2) A est inversible et $A^{-1} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$,
(3) A n'est pas inversible, (4) A est inversible et $A^{-1} = \begin{pmatrix} -5 & 4 \\ 4 & -3 \end{pmatrix}$,
(5) A est inversible et $A^{-1} = \begin{pmatrix} 2 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, (6) A est inversible et $A^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -2 \\ 1 & -1/2 & 1 \\ -1 & 1/2 & 0 \end{pmatrix}$,
(7) A n'est pas inversible, (8) A n'est pas inversible.

Exercice 3. A l'aide de la formule du binôme, on trouve que, pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$A^n = \begin{pmatrix} 1 & n & n(n-1)/2 \\ 0 & 1 & n \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B^n = \begin{pmatrix} 2^n & 0 & 0 \\ 0 & 3^n & n3^{n-1} \\ 0 & 0 & 3^n \end{pmatrix}.$$

Exercice 4.

- (1) D'après le cours, on sait que B est inversible si et seulement si $\text{rg}(B) = n$. En calculant le rang de B , on trouve alors que $B = J + aI_n$ est inversible si et seulement si $a \notin \{0, -n\}$.
(2) En utilisant la formule du binôme, on trouve que, pour tout $p \in \mathbb{N}$:

$$B^p = a^p I_n + \frac{1}{n} ((a+n)^p - a^p) J.$$

Exercice 5.

- (1) $a = 0, b = -3, c = -1$.
(2) $A^{-1} = A^2 - 3I_3$.

Exercice 6.

- (1) (a) *Question de cours* : cf. cours de première année. On rappelle que (x_1, \dots, x_p) est une base de $\text{Vect}(x_1, \dots, x_p)$ si et seulement si cette famille est libre.
(b) Si $\lambda_1, \dots, \lambda_p, \mu_1, \dots, \mu_q$ sont des réels tels que :

$$\sum_{i=1}^p \lambda_i x_i + \sum_{j=1}^q \mu_j y_j = 0,$$

alors on voit que $\sum_{i=1}^p \lambda_i x_i = -\sum_{j=1}^q \mu_j y_j$ appartient à $E_1 \cap E_2$. En déduire que les réels $\lambda_1, \dots, \lambda_p, \mu_1, \dots, \mu_q$ sont tous nuls. On peut conclure que $p + q = \dim(E_1 + E_2)$.

- (2) On peut vérifier que :

$$F = \text{Vect} \left(\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right).$$

On en déduit que $\dim F = 4$.

- (3) Calculer le rang de chaque matrice et vérifier que $\text{rg}(M_i + J) = 4$ pour tout $i \in \llbracket 1, 4 \rrbracket$. On peut montrer ensuite que la famille $(M_i + J)_{1 \leq i \leq 4}$ est libre de façon classique.
- (4) En effectuant les opérations élémentaires $C_4 \leftarrow \theta C_4 - a_1 C_1$, puis $C_4 \leftarrow C_4 - a_2 C_2 - a_3 C_3$, on a :

$$\text{rg} \begin{pmatrix} \theta & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & \theta & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & \theta & a_3 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{pmatrix} = \text{rg} \begin{pmatrix} \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta & 0 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \theta - a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 \end{pmatrix}.$$

Si $M(a) + \theta J$ est non inversible pour tout $\theta \in \mathbb{R}^*$, alors on trouve avec le rang que la dernière colonne doit être nulle pour tout $\theta \in \mathbb{R}^*$. On en déduit que $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0$.

- (5) (a) Utiliser la question (4) pour montrer que $G \cap F = \{0\}$, et donc $\dim(F + G) = \dim(F) + \dim(G)$. On conclut en utilisant le fait que $F + G$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_4(\mathbb{R})$.
- (b) Soit F l'ensemble des matrices de $\mathcal{M}_4(\mathbb{R})$ dont la dernière colonne est nulle. On vérifie que $\dim(F) = 12$ et que F vérifie toutes les conditions demandées.

2. APPLICATIONS LINÉAIRES

Exercice 7. Soit $x \in \mathfrak{Im}(f)$. Alors il existe $y \in E$ tel que $x = f(y)$, et donc $g(x) = g \circ f(y) = 0$. Donc x appartient à $\ker(f)$.

Exercice 8. Utiliser la formule de Grassmann et le théorème du rang.

Exercice 9. Montrer tout d'abord que f^2 est un projecteur, et donc $E = \ker(f^2) \oplus \mathfrak{Im}(f^2)$. Vérifier ensuite que $\ker(f) = \ker(f^2)$.

Exercice 10. Procéder par double implication...

Exercice 11. Si $p \circ q = q \circ p = 0$, on vérifie facilement que $(p + q)^2 = p + q$, et donc $p + q$ est un projecteur. Pour la réciproque, on suppose que $p + q$ est un projecteur. On trouve d'abord que $p \circ q + q \circ p = 0$. On compose ensuite à droite et à gauche par p pour conclure.

Exercice 12. Pour répondre aux questions (1), (2), (3) en même temps, on peut soit procéder par Analyse-Synthèse, soit travailler avec une concaténation d'une base de F et d'une base de G . Si p et s sont respectivement le projecteur et la symétrie recherchés, on trouve que, pour tout $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$:

$$p(x, y, z) = (x, y, z) - (x - y + z)(1, 1, 1) \quad \text{et} \quad s(x, y, z) = (x, y, z) - 2(x - y + z)(1, 1, 1).$$

Exercice 13. Idem qu'à l'exercice 12. On trouve alors que, pour tout $P : x \mapsto a_0 + a_1 x + a_2 x^2$:

$$p(P) = P - \frac{(a_0 + a_1 + a_2)}{2}(x \mapsto (x - 2)(x - 3)) \quad \text{et} \quad s(P) = P - (a_0 + a_1 + a_2)(x \mapsto (x - 2)(x - 3)).$$

Exercice 14.

- (1) Procéder par récurrence en utilisant le théorème du rang et la formule de Grassmann.
- (2) (a) $\dim \ker(f) = \dim \ker(g) = n - 1$.
- (b) Si $\ker(f) = \ker(g)$, on commence par écrire que $E = \text{Vect}(u) \oplus \ker(f)$ et on calcule $f(x)$ et $g(x)$. Montrer ensuite que $f = \frac{f(u)}{g(u)}g$ et conclure. On vérifie ensuite facilement la réciproque.
- (c) Si f et g ne sont pas colinéaires, alors on a $\ker(f) \neq \ker(g)$. Donc $\ker(f) \cap \ker(g)$ est un sous-espace vectoriel strict de $\ker(f)$ et $\dim \ker(f) \cap \ker(g) \leq n - 2$. On conclut alors avec la question (1).

Exercice 15. A l'aide de l'exercice 7 et du théorème du rang, on montre que : $\sup_{(u,v) \in A} (\text{rg}(u) + \text{rg}(v)) = n$.

Exercice 16. Si u et p commutent, on vérifie facilement que $\ker(p)$ et $\mathfrak{Im}(p)$ sont stables par u . Pour la réciproque, on suppose que $\ker(p)$ et $\mathfrak{Im}(p)$ soient stables par u . On commence par écrire que $E = \ker(p) \oplus \mathfrak{Im}(p)$ (car p est un projecteur). On calcule ensuite $u \circ p(x)$ et $p \circ u(x)$ où $x \in E$, en l'écrivant sous la forme $x = x_1 + x_2$, où $x_1 \in \ker(p)$ et $x_2 \in \mathfrak{Im}(p)$, et on conclut que $p \circ u = u \circ p$.

3. APPLICATIONS LINÉAIRES ET MATRICES

Exercice 17.

(1) Vérifier la linéarité. On trouve :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

(2) Vérifier la linéarité. On trouve :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 5 & 8 \\ -4 & 10 \end{pmatrix}.$$

(3) Vérifier la linéarité. On trouve :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 5 & 10 \\ -1 & -3 \end{pmatrix}.$$

(4) Vérifier la linéarité. On trouve :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 7 & 5 \\ 1 & -7 \end{pmatrix}.$$

(5) Vérifier la linéarité. On trouve :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -7 & -5 & -1 \\ 5 & 4 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

(6) Vérifier la linéarité. On trouve :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 3 & 1 & 3 \\ -3 & -1 & -2 \end{pmatrix}.$$

Exercice 18. A vérifier en utilisant entre autres les formules d'addition pour cos et sin. On trouve que :

$$(1) \text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2) \text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} \cos(a) & \sin(a) \\ -\sin(a) & \cos(a) \end{pmatrix}, \quad (3) \text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} -\sin(a) & \cos(a) \\ -\cos(a) & -\sin(a) \end{pmatrix}.$$

Exercice 19. Montrer que l'application f est linéaire de $\mathbb{R}_n[x]$ dans $\mathbb{R}_n[x]$, puis donner sa matrice dans les bases \mathcal{B}, \mathcal{C} , et ce dans chacun des cas suivants :

(1) A faire pour la première partie. On trouve que :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & -n \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

(2) A faire pour la première partie. On trouve que :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} n & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ n & n-2 & -2 & \ddots & \vdots \\ 0 & n-1 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & -n \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -n \end{pmatrix}.$$

(3) A faire pour la première partie. On trouve (avec $(*) = n(n-1)(-n)^{n-2} - (-n)^{n-1}$) que :

$$\text{mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 6 & \cdots & (*) \\ 0 & -1 & -2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & n(n-2) \end{pmatrix}.$$

Exercice 20. Base de $\ker(f)$: $((1, -1, 0), (1, 0, 1))$. Base de $\mathfrak{Im}(f)$: $((1, -3, 2))$. On trouve que $\text{rg}(f) = 1$ et $f \circ f = 0$, donc f est nilpotent.

Exercice 21.

- (1) Vérifier que l est linéaire. On trouve que : $a = \frac{1}{2}$.
- (2) On obtient que $\ker(l) = \text{Vect}(x \mapsto x - 1)$ et $\mathfrak{Im}(l) = \text{Vect}(x \mapsto x, x \mapsto x - 1)$.
En passant par le calcul matriciel, on trouve que $l^2 = l^3$.
- (3) Vérifier que \mathcal{B} est libre, et conclure en utilisant le fait que $\text{card}(\mathcal{B}) = 3 = \dim \mathbb{R}_2[x]$. On a :

$$\text{mat}_{\mathcal{B}}(l) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Exercice 22.

- (1) Vérifier que f est linéaire et injective, en utilisant le fait que $f(P) = 0$ si et seulement si x_0, x_1, \dots, x_n sont racines de P , puis conclure.
- (2) On trouve que :

$$\text{mat}_{\mathcal{B}', \mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 1 & x_0 & \cdots & x_0^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^n \end{pmatrix}.$$

- (3) On trouve que $f(L_i) = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ pour tout $i \in \{0, \dots, n\}$, où le 1 se trouve en $(i+1)$ -ème position.
- (4) Montrer que (L_0, L_1, \dots, L_n) est libre et conclure en utilisant le fait que $\text{card}(\mathcal{C}) = n + 1 = \dim \mathbb{R}_n[x]$.
- (5) On trouve que $\text{mat}_{\mathcal{B}', \mathcal{C}}(f) = I_{n+1}$.

Exercice 23.

- (1) (a) Comme $(x, f(x))$ est liée pour tout $x \in E$, on obtient en remplaçant x par e_i que la famille $(e_i, f(e_i))$ est liée et on conclut.
(b) Par le calcul, on trouve que $f(e_i + e_j) = \lambda_i e_i + \lambda_j e_j = \lambda(e_i + e_j)$, et donc $\lambda = \lambda_i = \lambda_j$.
(c) Comme $\text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \lambda I_n$, on a $f = \lambda \text{Id}_E$.
- (2) Par contraposition!

Exercice 24. Base de F : $((-1, 1, 2))$. Base de G : $((1, 1, 0), (-1, 0, 1))$. On en déduit que $\dim(F) = 1$ et $\dim(G) = 2$. On peut vérifier que $F \subset G$, et donc $F \cap G = F$ et $F \cup G = G$. Enfin, on trouve que $\ker(f) = \text{Vect}((1, -2, 1))$ et $\mathfrak{Im}(f) = \text{Vect}((1, 1, 0), (1, 0, -1))$.

Exercice 25.

- (1) Vérifier que $\mathcal{B} = (f_0, f_1, f_2, f_3)$ est libre. Donc c'est une base de F_3 .
- (2) Si $\alpha \in \mathbb{R}$, vérifier que $\Phi(f_0) = f_0 - e^\alpha$. En déduire par l'absurde que $\Phi(f_0)$ n'appartient pas à F_3 . Donc Φ n'est pas un endomorphisme de F_3 .
- (3) (a) Tout d'abord, Φ est linéaire par linéarité de l'intégrale. Ensuite, on montre par des IPP que, pour tout polynôme $u : x \mapsto a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$:

$$\Phi(x \mapsto u(x)e^{-x}) = x \mapsto (u(x) - u'(x) + u''(x) - u'''(x))e^{-x}.$$

En déduire que F_3 est stable par Φ et conclure.

- (b) On trouve que :

$$M = \text{mat}_{\mathcal{B}}(\Phi) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 2 & -6 \\ 0 & 1 & -2 & 6 \\ 0 & 0 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Après calculs, on obtient que :

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

4. CHANGEMENT DE BASE - MATRICES SEMBLABLES - TRACE

Exercice 26. Déterminer la matrice de passage dans les bases $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ de E , et ce dans chacun des cas suivants :

(1) On trouve que :

$$P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

(2) On trouve que :

$$P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} 3 & -3 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}.$$

(3) On trouve que :

$$P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

(4) On trouve que :

$$P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 5 & 7 & 1 \\ -3 & -3 & 1 \end{pmatrix}.$$

(5) On trouve que :

$$P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

(6) On trouve que :

$$P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} 1 & a & \cdots & \cdots & \binom{n}{0}a^n \\ 0 & 1 & \ddots & & \binom{n}{1}a^{n-1} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \binom{n}{n-1}a^1 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \binom{n}{n}a^0 \end{pmatrix}.$$

Exercice 27.

$$(1) A' = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 8 & -1 \\ 7 & -2 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$(2) A' = \begin{pmatrix} -16 & -25 & -45 \\ 8 & 13 & 20 \\ 3 & 5 & 9 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$(3) A' = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

$$(4) A' = \begin{pmatrix} -1 & -3/2 & 3 \\ 4 & 0 & -2 \\ 4 & 5/2 & 6 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Exercice 28. Soit f l'application de $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$ dans $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$, définie pour tout $A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$ par $f(A) = A - {}^tA$.

(1) A faire!

$$(2) \text{ Base de } \ker(f) : \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right).$$

$$\text{ Base de } \mathfrak{Im}(f) : \left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \right).$$

Conclure que l'endomorphisme f n'est pas un isomorphisme.

(3) Si $\mathcal{B} = \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right)$ est la base canonique de $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$, on a :

$$M = \text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

On trouve alors que $\text{Tr}(f) = 2$.

- (4) Soit $\mathcal{S}_2(\mathbb{R})$ (resp. $\mathcal{A}_2(\mathbb{R})$) l'ensemble des matrices symétriques (resp. antisymétriques) de $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$. Utiliser le fait que $\mathcal{M}_2(\mathbb{R}) = \mathcal{S}_2(\mathbb{R}) \oplus \mathcal{A}_2(\mathbb{R})$ et que $\ker(f) = \mathcal{S}_2(\mathbb{R})$, $\mathfrak{Im}(f) = \mathcal{A}_2(\mathbb{R})$.
- (5) Si \mathcal{B}_0 est une base adaptée à la décomposition en somme directe ci-dessus, on trouve que :

$$\text{mat}_{\mathcal{B}_0}(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} = D.$$

Conclure que M est semblable à D .

Exercice 29. Calculer la trace de $\text{mat}_{\mathcal{B}}(p)$, où \mathcal{B} est obtenue par concaténation d'une base de $\ker(p)$ et d'une base de $\mathfrak{Im}(p)$.

Exercice 30. On voit que $H_n = \ker \text{Tr}$. Comme la trace est une forme linéaire non nulle, on a $\dim H_n = n^2 - 1$.

Exercice 31.

- (1) Faire une distinction de cas "rang 0" et "rang 1".
- (2) Calculer A^2 et $\text{Tr}(A)$ à l'aide de la décomposition $A = CL$.

Exercice 32.

- (1) A faire!

(2) On trouve que $M_a = \begin{pmatrix} n & a & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & n-1 & 2a & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & na \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix}$ et $\text{Tr}(f_a) = \frac{n(n+1)}{2}$.

- (3) Pour tout $k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, on a $f_a(x \mapsto (x-a)^k) = (n-k)(x \mapsto (x-a)^k)$.
- (4) Si l'on pose $\mathcal{B}_a = (x \mapsto 1, x \mapsto x-a, \dots, x \mapsto (x-a)^n)$, alors on a :

$$\text{mat}_{\mathcal{B}_a}(f_a) = \begin{pmatrix} n & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & n-1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} = D_a.$$

Conclure que M_a est semblable à D_a .

Exercice 33. Soit \mathcal{S} l'ensemble des solutions de l'équation $\text{Tr}(A)X = -\text{Tr}(X)A$. Si $\text{Tr}(A) \neq 0$, alors $\mathcal{S} = \{0\}$. Si maintenant $\text{Tr}(A) = 0$, alors \mathcal{S} est l'ensemble des matrices de trace nulle.

Exercice 34.

- (1) A faire!
- (2) Montrer que $\ker(T) = \{0\}$ si $\text{Tr}(A) \neq 1$ et $\ker(T) = \text{Vect}(A)$ si $\text{Tr}(A) = 1$, puis conclure.
- (3) Si $\text{Tr}(A) = 1$, vérifier que $T \circ T = T$. Conclure que T est le projecteur sur $\ker \text{Tr}$ parallèlement à $\text{Vect}(A)$.

Exercice 35.

- (1) On trouve que $\text{rg}(M) = 2$.
- (2) Soit f l'endomorphisme de \mathbb{R}^3 canoniquement associé à M . Soit $u \in \ker(f) \setminus \{0\}$ et soit $e_1 \notin \ker(f)$. On peut trouver un vecteur e_2 tel que $(e_1, e_1 + u, e_2)$ soit une base de \mathbb{R}^3 . Vérifier que la matrice de f dans cette base a ses deux premières colonnes égales et conclure.

5. EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

Exercice 36. Utiliser la matrice $P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$.

Exercice 37. Soit E un espace vectoriel de dimension 3 et soit $f \in \mathcal{L}(E)$ tel que $f \neq 0$ et $f \circ f = 0$.

- (1) Comme $f \circ f = 0$, on a $\mathfrak{Im}(f) \subset \ker(f)$. On utilise ensuite le théorème du rang.
- (2) Prendre $e_1 \notin \ker(f)$, $e_2 \in \ker(f) \setminus \{0\}$ et vérifier.
- (3) Vérifier que \mathcal{B} est libre et conclure. On trouve que :

$$\text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

- (4) Utiliser l'endomorphisme f canoniquement associé à la matrice M , et conclure avec les questions (1), (2), (3).

Exercice 38. Calculer P^2 et vérifier que $\text{rg}(p) = 2$. Base de $\ker(p)$: $((1, -1, 1))$. Base de $\mathfrak{Im}(p)$: $((0, 1, -1), (1, 0, 1))$.

Exercice 39.

- (1) Utiliser le fait que f^{p-1} n'est pas l'endomorphisme nul.
- (2) Procéder par récurrence pour montrer que la famille $\mathcal{F} = (x_0, f(x_0), \dots, f^{p-1}(x_0))$ est libre. Comme cette famille est libre, son cardinal est $\leq n$.
- (3) Comme \mathcal{F} est libre et que $p = n$, il s'ensuit que \mathcal{F} est une base de E . De plus :

$$\text{mat}_{\mathcal{F}}(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \ddots & & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Exercice 40. Pour tout $M \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$, on pose $f(M) = AM - MA$, où : $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$.

- (1) A faire!
- (2) Base de $\ker(f)$: $\left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \right)$.

$$\text{Base de } \mathfrak{Im}(f) : \left(\begin{pmatrix} 0 & -2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2 & -3 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \right).$$

L'endomorphisme f n'est pas un isomorphisme.

- (3) Avec la base canonique $\mathcal{B} = \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right)$, on trouve que :

$$\text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 0 & -2 & 2 & 0 \\ -2 & -3 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 3 & -2 \\ 0 & 2 & -2 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \text{Tr}(f) = 0.$$

Exercice 41.

- (1) $\dim \ker(f) = n$ et $\dim \mathfrak{Im}(f) = 1$. Base de $\ker(f)$: $\left(x \mapsto x - \frac{1}{2}, x \mapsto x^2 - \frac{1}{3}, \dots, x \mapsto x^n - \frac{1}{n+1} \right)$.
- (2) Vérifier que $\left(x \mapsto 1, x \mapsto x - \frac{1}{2}, x \mapsto x^2 - \frac{1}{3}, \dots, x \mapsto x^n - \frac{1}{n+1} \right)$ est une base de $\mathbb{R}_n[x]$.
- (3) On trouve que, pour tout $P : x \mapsto a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$:

$$p(P) = P - \sum_{k=0}^n \frac{a_k}{k+1}.$$

Exercice 42.

(1) Vérifier que f_λ est un endomorphisme de $\mathbb{R}_n[x]$. Si \mathcal{B} est la base canonique de $\mathbb{R}_n[x]$, on trouve que :

$$\text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} \lambda + 1 & 1 & \cdots & \cdots & \binom{n}{0} \\ 0 & \lambda + 1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \lambda + 1 \end{pmatrix}.$$

(2) f_λ est un isomorphisme si et seulement si $\lambda \neq -1$.

(3) $\text{Tr}(f_\lambda) = (n+1)(\lambda+1)$.

Base de $\ker(f_{-1}) : (x \mapsto 1)$.

Base de $\mathfrak{Im}(f_{-1}) : (x \mapsto 1, x \mapsto x, \dots, x \mapsto x^{n-1})$.

Exercice 43. Soient $a \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}^*$. Pour tout $P \in \mathbb{R}_n[x]$, on pose $f(P) : x \mapsto (x-a)P'(x) + P(x) - P(a)$.

(1) A faire!

(2) Si \mathcal{B} est la base canonique de $\mathbb{R}_n[x]$, on trouve que :

$$\text{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 0 & -2a & \cdots & \cdots & a^n \\ 0 & 2 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & n+1 \end{pmatrix}.$$

On en déduit que $\text{Tr}(f) = \frac{n(n+3)}{2}$, $\text{rg}(f) = n$ et $\ker(f) = \text{Vect}(x \mapsto 1)$.

(3) Calculer $f(P)(a)$ et conclure.

Base de $\mathfrak{Im}(f) : (x \mapsto x-a, x \mapsto (x-a)x, \dots, x \mapsto (x-a)x^{n-1})$.

Exercice 44.

(1) $\ker(\Phi)$ est l'espace vectoriel des suites constantes et $\dim \ker(\Phi) = 1$.

$\ker(\Phi^2) = \{(u_n) \in E \mid \exists (a, b) \in \mathbb{R}^2, \forall n \in \mathbb{N}, u_n = an + b\}$ et $\dim \ker(\Phi^2) = 2$.

$\mathfrak{Im}(\Phi) = E$.

(2) (a) A faire!

(b) Idem!

(c) Montrer par récurrence que, si $u_0 = u_1 = u_2 = 0$, alors $u_n = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

(d) $\dim \ker(\Phi^3) = 3$, base de $\ker(\Phi^3) : ((x_n), (y_n), (z_n))$.

Exercice 45. D'après le théorème du rang, on a $\dim \ker(f) + \dim \mathfrak{Im}(f) = 3$. Si $f \neq 0$, alors on trouve que soit $\dim \ker(f) = 1$ et $\dim \mathfrak{Im}(f) = 2$, soit $\dim \ker(f) = 2$ et $\dim \mathfrak{Im}(f) = 1$. Comme $\ker(f)$ et $\mathfrak{Im}(f)$ ne sont pas supplémentaires dans \mathbb{R}^3 , on peut en déduire que $\ker(f) \subset \mathfrak{Im}(f)$ ou $\mathfrak{Im}(f) \subset \ker(f)$.

Exercice 46. Comme $g \circ f = p$, on peut vérifier que $\ker(f) \subset \ker(p)$, et donc $\dim \ker(f) \leq 1$ d'après le théorème du rang. De plus, comme $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$, f n'est pas injective, ce qui entraîne que $\dim \ker(f) = 1$, et donc $\text{rg}(f) = 2$. De même, on trouve que $\text{rg}(g) = 2$.

Exercice 47. Si X est le vecteur colonne de composantes a_0, a_1, \dots, a_{n-1} et si $P : x \mapsto a_0 + a_1x + \dots + a_{n-1}x^{n-1}$, on peut remarquer que $MX = 0$ si et seulement si $1, 2, \dots, n$ sont racines de P , et conclure à partir de là.

Exercice 48.

(1) Si $y \in \mathfrak{Im}(g)$, il existe $z \in \mathfrak{Im}(f)$ tel que $y = g(z)$. Il existe alors $t \in E$ tel que $y = g(f(t)) = f^2(t)$, et donc $\mathfrak{Im}(g) \subset \mathfrak{Im}(f^2)$. Etablir l'inclusion réciproque de la même manière. Idem pour $\ker(g) = \ker(f) \cap \mathfrak{Im}(f)$.

(2) D'après le théorème du rang et la question (1), on voit que $\text{rg}(f^2) = \text{rg}(g) = 3n - \dim \ker(g)$ et $\dim \ker(g) \leq \dim \mathfrak{Im}(f)$. Conclure à partir de là.

Exercice 49.

(1) (a) Si $x \in u(\ker(u^k))$, alors il existe $y \in \ker(u^k)$ tel que $x = u(y)$. Vérifier ensuite que $u^{k-1}(x) = u^k(y) = 0$ et conclure.

(b) Montre l'inclusion $\ker(u^k) \subset \ker(u^{k+1})$ pour tout $k \in \mathbb{N}^*$ et conclure.

(c) A vérifier par récurrence pour tout $i \geq k$.

- (d) Si $\ker(u^k) = \ker(u^{k+1})$ pour un certain $k \in \llbracket 1, p-1 \rrbracket$, vérifier que $\ker(u^k) = \dots = \ker(u^p) = E$.
Donc $u^k = 0$, ce qui est impossible car $k < p$ et p est le plus petit entier tel que $u^p = 0$. Conclure.
- (e) M est triangulaire supérieure avec 0 sur la diagonale.
- (2) On note \mathcal{N} l'ensemble des matrices nilpotentes de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, où $n \geq 2$, et Tr l'application trace.

(a) L'ensemble \mathcal{N} n'est pas un espace vectoriel. Par exemple, pour $n = 2$, les matrices :

$$N_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad N_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

sont nilpotentes, mais $N_1 + N_2$ ne l'est pas car $(N_1 + N_2)^2 = I_2$.

(b) $\dim \ker(\text{Tr}) = n^2 - 1$.

(c) Utiliser la question (1)(e) pour vérifier que toute matrice nilpotente est de trace nulle, et conclure.

- (3) Pour tout $(i, j) \in \llbracket 1, \dots, n \rrbracket^2$, on note $E_{i,j}$ la matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ dont le seul coefficient non nul vaut 1 et se situe à l'intersection de la ligne i et de la colonne j . De plus, pour tout $k \in \llbracket 1, \dots, n \rrbracket$, on pose :

$$N_k = E_{1,1} - E_{1,k} + E_{k,1} - E_{k,k}.$$

(a) A faire avec précaution (commencer par les cas $n = 2$ et $n = 3$, puis généraliser).

(b) Utiliser le fait que $\text{Vect}(\mathcal{N}) \subset \ker(\text{Tr})$ et l'égalité des dimensions.

Exercice 50.

- (1) (a) Ecrire que $\dim E = \sum_{i=1}^k \dim F_i = \sum_{i=1}^k \dim \mathfrak{Im}(p_i)$ et conclure.
(b) Soit $x \in E$. Ecrire x sous la forme $x = \sum_{i=1}^k x_i$, où x_i appartient à F_i pour tout $i \in \llbracket 1, k \rrbracket$. Alors $x_i = p_i(x)$ pour tout $i \in \llbracket 1, k \rrbracket$. Conclure.
(c) Procéder comme à la question (1)(b).
- (2) Dans cette question, on considère des endomorphismes q_1, \dots, q_k de E , tous non nuls et tels que :

$$q_1 + q_2 + \dots + q_k = \text{Id}_E \quad \text{et} \quad \text{rg}(q_1) + \text{rg}(q_2) + \dots + \text{rg}(q_k) \leq n.$$

- (a) Par définition, on voit que $\sum_{i=1}^k \mathfrak{Im}(q_i)$ est un sous-espace vectoriel de E . Comme $\sum_{i=1}^k q_i = \text{Id}_E$, montrer que $E = \sum_{i=1}^k \mathfrak{Im}(q_i)$. En déduire que la somme en question est directe.
(b) Vérifier que $(q_1 + \dots + q_k) \circ q_i = q_i$, développer le tout et utiliser la question (2)(a).
(c) Conclure avec la question (2)(b).

Exercice 51. Comme L_1 et L_2 sont triangulaires inférieures et que tous leurs coefficients diagonaux sont égaux à 1, on voit que L_1 et L_2 sont inversibles. De plus, L_2^{-1} est aussi triangulaire inférieure, ainsi que $L_2^{-1}L_1$ (comme inverse et produit de matrices triangulaires inférieures). Dès lors, comme U_1 et U_2 sont triangulaires supérieures inversibles et que $L_1U_1 = L_2U_2$, on voit que $L_2^{-1}L_1 = U_2U_1^{-1}$. En particulier, $L_2^{-1}L_1$ est à la fois triangulaire supérieure et inférieure, et donc elle est diagonale. Enfin, comme tous les coefficients diagonaux de $L_2^{-1}L_1$ sont égaux à 1 (vu que c'est déjà le cas pour les matrices triangulaires inférieures L_1 et L_2), il s'ensuit que $L_2^{-1}L_1 = I_n$, et donc $L_1 = L_2$.