

# Calcul matriciel

## Opérations sur les matrices

### Exercice 1 [01247] [Correction]

Pour  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ , on note  $\sigma(A)$  la somme des termes de  $A$ .  
On pose

$$J = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & (1) & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Vérifier  $J.A.J = \sigma(A).J$ .

### Exercice 2 [01248] [Correction]

Pour  $i, j, k, \ell \in \{1, \dots, n\}$ , on note  $E_{i,j}$  et  $E_{k,\ell}$  les matrices élémentaires de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  d'indices  $(i, j)$  et  $(k, \ell)$ . Calculer

$$E_{i,j} \times E_{k,\ell}$$

### Exercice 3 [00403] [Correction]

Soit

$$M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$$

avec  $0 \leq d \leq c \leq b \leq a$  et  $b + c \leq a + d$ .

Pour tout  $n \geq 2$ , on note

$$M^n = \begin{pmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{pmatrix}$$

Démontrer que, pour tout  $n \geq 2$ ,

$$b_n + c_n \leq a_n + d_n$$

### Exercice 4 [03422] [Correction]

Soient  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  vérifiant

$$AB = A + B$$

Montrer que  $A$  et  $B$  commutent

### Exercice 5 [00702] [Correction]

Résoudre l'équation  $X^2 = A$  où

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 16 \end{pmatrix}$$

### Exercice 6 [03976] [Correction]

Soit  $A \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$  vérifiant

$$A + A^{-1} = I_n$$

Pour  $k \in \mathbb{N}$ , calculer  $A^k + A^{-k}$ .

## Problèmes de commutation

### Exercice 7 [01249] [Correction]

Soient  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  des éléments de  $\mathbb{K}$  deux à deux distincts et  $D = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ .  
Déterminer les matrices de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  commutant avec  $D$ .

### Exercice 8 [01250] [Correction]

Soit  $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ . Montrer que

$$\forall B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}), AB = BA \iff \exists \lambda \in \mathbb{K}, A = \lambda.I_n$$

### Exercice 9 [02687] [Correction]

Soient  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  où  $B$  est nilpotente et commute avec  $A$ . Montrer que  $A$  et  $A + B$  sont simultanément inversibles.

### Exercice 10 [00697] [Correction]

On suppose que  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  commutent et que  $A$  est inversible.  
Justifier que les matrices  $A^{-1}$  et  $B$  commutent.

### Exercice 11 [00709] [Correction]

a) Quelles sont les matrices de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  commutant avec toutes les matrices de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  ?

b) Même question avec les matrices commutant avec toutes celles de  $\text{GL}_n(\mathbb{K})$ .

**Exercice 12** [ 02689 ] [Correction]

Soient  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  des complexes distincts,  $A = \text{diag}(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  et

$$C(A) = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}), AM = MA\}$$

Montrer que  $(A^k)_{0 \leq k \leq n-1}$  est une base de  $C(A)$ .

**Exercice 13** [ 03144 ] [Correction]

Soit  $n \in \mathbb{N}$  avec  $n \geq 2$ .

a) Montrer que

$$\{A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) / \forall M \in \text{GL}_n(\mathbb{R}), AM = MA\} = \{\lambda I_n \mid \lambda \in \mathbb{R}\}$$

b) Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ . On suppose que

$$\forall M, N \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), A = MN \implies A = NM$$

Montrer qu'il existe  $\lambda \in \mathbb{R}$  tel que  $A = \lambda I_n$

**Exercice 14** [ 03164 ] [Correction]

Soit  $T \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  une matrice triangulaire supérieure.

Montrer que  $T$  commute avec sa transposée si, et seulement si, la matrice  $T$  est diagonale.

**Exercice 15** [ 03166 ] [Correction]

Soit  $n \geq 2$ . Déterminer les matrices de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  commutant avec toutes les matrices symétriques.

**Exercice 16** [ 03167 ] [Correction]

Soit  $n \geq 2$ . Déterminer les matrices de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  commutant avec toutes les matrices antisymétriques.

**Exercice 17** [ 00712 ] [Correction]

Soient  $D = \text{diag}(a_1, \dots, a_n) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  et

$$\varphi: M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \mapsto DM - MD$$

a) Déterminer noyau et image de l'endomorphisme  $\varphi$ .

b) Préciser ces espaces quand  $D$  est à coefficients diagonaux distincts.

## Calcul des puissances d'une matrice carrée

**Exercice 18** [ 01251 ] [Correction]

Calculer  $A^n$  pour  $n \in \mathbb{N}$  et les matrices  $A$  suivantes :

a)  $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$

b)  $A = \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & a \end{pmatrix}$

c)  $A = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$

**Exercice 19** [ 01252 ] [Correction]

On considère la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

et on pose  $B = A - I$ .

Calculer  $B^n$  pour  $n \in \mathbb{N}$  et en déduire l'expression de  $A^n$ .

**Exercice 20** [ 01253 ] [Correction]

Calculer  $A^n$  pour

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

de deux manières différentes.

**Exercice 21** [ 01254 ] [Correction]

On considère la matrice

$$A = \begin{pmatrix} -1 & -2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$$

a) Calculer  $A^2 - 3A + 2I$ . En déduire que  $A$  est inversible et calculer son inverse.

b) Pour  $n \geq 2$ , déterminer le reste de la division euclidienne de  $X^n$  par  $X^2 - 3X + 2$ .

c) En déduire l'expression de la matrice  $A^n$ .

**Exercice 22** [ 02929 ] [\[Correction\]](#)

Soit

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$$

- a) Soit  $k \in \mathbb{N}^*$ . Majorer les coefficients de  $A^k$ .  
 b) Calculer  $A^{-1}$ .  
 c) Calculer  $(A^{-1})^k$  pour  $k \in \mathbb{N}$ .

**Matrices carrées inversibles****Exercice 23** [ 01255 ] [\[Correction\]](#)

Soit

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_2(\mathbb{K})$$

Observer que

$$A^2 - (a+d)A + (ad-bc)I = 0$$

À quelle condition  $A$  est-elle inversible ? Déterminer alors  $A^{-1}$ .**Exercice 24** [ 01256 ] [\[Correction\]](#)

Calculer l'inverse des matrices carrées suivantes :

a)  $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & -3 \\ -1 & 0 & 2 \end{pmatrix}$       b)  $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$       c)  $C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -1 \end{pmatrix}$

**Exercice 25** [ 01257 ] [\[Correction\]](#)

Justifier que

$$A = \begin{pmatrix} 1 & & (-1) \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$$

est inversible et déterminer  $A^{-1}$ .**Exercice 26** [ 01258 ] [\[Correction\]](#)[Matrice à diagonale strictement dominante] Soit  $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  telle que

$$\forall 1 \leq i \leq n, \sum_{j \neq i} |a_{i,j}| < |a_{i,i}|$$

Montrer que la matrice  $A$  est inversible.**Exercice 27** [ 01259 ] [\[Correction\]](#)Soient  $n \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$  et  $\omega = \exp\left(\frac{2i\pi}{n}\right)$ . On pose

$$A = \left( \omega^{(k-1)(\ell-1)} \right)_{1 \leq k, \ell \leq n} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$$

Calculer  $A\bar{A}$ . En déduire que  $A$  est inversible et calculer  $A^{-1}$ .**Exercice 28** [ 01260 ] [\[Correction\]](#)

Soit

$$A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 2 \\ 5 & -3 & 3 \\ -1 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

- a) Calculer  $(A+I)^3$ .  
 b) En déduire que  $A$  est inversible.

**Exercice 29** [ 01261 ] [\[Correction\]](#)Soit  $A = (1 - \delta_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ 

- a) Calculer  $A^2$ .  
 b) Montrer que  $A$  est inversible et exprimer  $A^{-1}$ .

**Exercice 30** [ 01262 ] [\[Correction\]](#)Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  telle que la matrice  $I + A$  soit inversible. On pose  $B = (I - A)(I + A)^{-1}$ .

- a) Montrer que  $B = (I + A)^{-1}(I - A)$ .  
 b) Montrer que  $I + B$  est inversible et exprimer  $A$  en fonction de  $B$ .

**Exercice 31** [ 03420 ] [Correction]

Soient  $A, B, C \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) (n \geq 2)$  non nulles vérifiant

$$ABC = O_n$$

Montrer qu'au moins deux des matrices  $A, B, C$  ne sont pas inversibles.

**Exercice 32** [ 02575 ] [Correction]

Montrer que la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

est inversible et calculer son inverse.

**Exercice 33** [ 01291 ] [Correction]

Montrer que les matrices carrées d'ordre  $n \geq 2$  suivantes sont inversibles, et déterminer leur inverse par la méthode de Gauss :

$$\begin{array}{ll} \text{a) } A = \begin{pmatrix} 1 & -a & (0) \\ & \ddots & \ddots \\ & & \ddots & -a \\ (0) & & & 1 \end{pmatrix} & \text{c) } C = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & 2 \\ (0) & & & 1 \end{pmatrix} \\ \text{b) } B = \begin{pmatrix} 1 & (1) \\ & \ddots \\ (0) & 1 \end{pmatrix} & \end{array}$$

**Symétrie matricielle****Exercice 34** [ 01263 ] [Correction]

Déterminer une condition nécessaire et suffisante pour que le produit de deux matrices symétriques soit encore une matrice symétrique.

**Exercice 35** [ 01264 ] [Correction]

Montrer que  $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  et  $\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$  sont des sous-espaces vectoriels supplémentaires de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .

**Structures formées par un ensemble de matrices****Exercice 36** [ 01266 ] [Correction]

Soit  $E$  l'ensemble des matrices de la forme

$$M(a, b, c) = \begin{pmatrix} a & b & c \\ 0 & a & b \\ 0 & 0 & a \end{pmatrix}$$

avec  $a, b, c \in \mathbb{R}$ .

Notre objectif est d'établir que l'inverse d'une matrice inversible de  $E$  appartient encore à  $E$ , sans pour autant calculer cet inverse.

- Montrer que  $(E, +, \cdot)$  est un  $\mathbb{R}$ -espace vectoriel dont on précisera la dimension.
- Montrer que  $(E, +, \times)$  est un anneau commutatif.
- À quelle condition sur  $(a, b, c) \in \mathbb{R}^3$ , la matrice  $A = M(a, b, c)$  est-elle inversible dans  $\mathcal{M}_3(\mathbb{R})$ ? On suppose cette condition vérifiée. En considérant l'application  $f: E \rightarrow E$  définie par  $f(X) = AX$ , montrer que  $A^{-1} \in E$ .

**Exercice 37** [ 01267 ] [Correction]

[Matrices de permutation] Soit  $n \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$ . Pour  $\sigma \in \mathfrak{S}_n$ , on note

$$P(\sigma) = (\delta_{i, \sigma(j)})_{1 \leq i, j \leq n} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$$

appelée matrice de permutation associée à  $\sigma$ .

- Montrer que  $\forall (\sigma, \sigma') \in \mathfrak{S}_n^2, P(\sigma \circ \sigma') = P(\sigma)P(\sigma')$
- En déduire que  $E = \{P(\sigma) \mid \sigma \in \mathfrak{S}_n\}$  est un sous-groupe de  $\text{GL}_n(\mathbb{R})$  isomorphe à  $\mathfrak{S}_n$ .
- Vérifier que

$${}^t(P(\sigma)) = P(\sigma^{-1})$$

**Exercice 38** [ 01268 ] [Correction]

Soit  $E$  l'ensemble des matrices de  $\mathcal{M}_2(\mathbb{K})$  de la forme

$$A = \begin{pmatrix} a+b & b \\ -b & a-b \end{pmatrix} \text{ avec } (a, b) \in \mathbb{K}^2$$

- Montrer que  $E$  est un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{M}_2(\mathbb{K})$ , en donner une base.

- b) Montrer que  $E$  est un sous-anneau commutatif de  $\mathcal{M}_2(\mathbb{K})$ .  
 c) Déterminer les inversibles de  $E$ .  
 d) Déterminer les diviseurs de zéro de  $E$  c'est-à-dire les matrices  $A$  et  $B \in E$  vérifiant  $AB = O_2$  avec  $A, B \neq O_2$ .

**Exercice 39** [ 01563 ] [Correction]

On dit qu'une matrice  $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  est centro-symétrique si

$$\forall (i, j) \in \llbracket 1; n \rrbracket^2, a_{n+1-i, n+1-j} = a_{i,j}$$

- a) Montrer que le sous-ensemble  $C$  de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  formé des matrices centro-symétriques est un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .  
 b) Montrer que le produit de deux matrices centro-symétriques de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  est aussi centro-symétrique.  
 c) Soit  $A$  centro-symétrique de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  et inversible.  
 En considérant l'application  $X \mapsto AX$  de  $C$  vers  $C$ , montrer que  $A^{-1}$  est centro-symétrique.

## Matrice d'une application linéaires

**Exercice 40** [ 01269 ] [Correction]

Déterminer la matrice relative aux bases canoniques des applications linéaires  $f$  suivantes :

- a)  $f: \begin{cases} \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ (x, y, z) \mapsto (x + y, y - 2x + z) \end{cases}$   
 b)  $f: \begin{cases} \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3 \\ (x, y, z) \mapsto (y + z, z + x, x + y) \end{cases}$   
 c)  $f: \begin{cases} \mathbb{R}_3[X] \rightarrow \mathbb{R}_3[X] \\ P \mapsto P(X + 1) \end{cases}$   
 d)  $f: \begin{cases} \mathbb{R}_3[X] \rightarrow \mathbb{R}^4 \\ P \mapsto (P(1), P(2), P(3), P(4)) \end{cases}$

**Exercice 41** [ 01270 ] [Correction]

On considère les sous-espaces vectoriels supplémentaires de  $\mathbb{R}^3$  suivants :

$$P = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x + 2y - z = 0\} \text{ et } D = \text{Vect}(w) \text{ où } w = (1, 0, -1)$$

On note  $\mathcal{B} = (i, j, k)$  la base canonique de  $\mathbb{R}^3$ .

On note  $p$  la projection vectorielle sur  $P$  parallèlement à  $D$ ,  $q$  celle sur  $D$  parallèlement à  $P$ , et enfin,  $s$  la symétrie vectorielle par rapport à  $P$  et parallèlement à  $D$ .

- a) Former la matrice de  $p$  dans  $\mathcal{B}$ .  
 b) En déduire les matrices, dans  $\mathcal{B}$ , de  $q$  et de  $s$ .

**Exercice 42** [ 01271 ] [Correction]

Soit  $\varphi$  l'endomorphisme de  $\mathbb{R}_n[X]$  défini par  $\varphi(P) = P(X + 1)$ .

- a) Écrire la matrice  $A$  de  $\varphi$  dans la base canonique  $\mathcal{B}$  de  $\mathbb{R}_n[X]$ .  
 b) Justifier que  $A$  est inversible et calculer  $A^{-1}$ .

**Exercice 43** [ 00714 ] [Correction]

Soit  $A = (a_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n+1} \in \mathcal{M}_{n+1}(\mathbb{R})$  la matrice dont le coefficient général est donné par un coefficient binomial :

$$a_{i,j} = \binom{j-1}{i-1}$$

Soit  $\varphi \in \mathcal{L}(\mathbb{R}_n[X])$  l'endomorphisme représenté par la matrice  $A$  dans la base canonique  $(1, X, \dots, X^n)$ .

- a) Exprimer simplement  $\varphi(P)$  pour tout  $P \in \mathbb{R}_n[X]$ .  
 b) Calculer  $A^m$  pour tout  $m \in \mathbb{N}$ .  
 c) Calculer  $A^{-1}$ .

**Exercice 44** [ 00715 ] [Correction]

Soient  $a \in \mathbb{C}^*$  et  $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  définie par  $f(z) = z + a\bar{z}$ .

- a) Former la matrice de l'endomorphisme  $f$  du  $\mathbb{R}$ -espace vectoriel  $\mathbb{C}$  dans la base  $(1, i)$ .  
 b) Déterminer image et noyau de  $f$ .

## Matrice d'un endomorphisme dans une base bien choisie

**Exercice 45** [ 01273 ] [Correction]

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension 3 et  $f \in \mathcal{L}(E)$  tel que  $f^2 \neq 0$  et  $f^3 = 0$ .

Montrer qu'il existe une base de  $E$  dans laquelle la matrice de  $f$  est

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

**Exercice 46** [ 01275 ] [Correction]

Soit  $f$  un endomorphisme d'un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel  $E$  de dimension  $n \in \mathbb{N}^*$  vérifiant

$$f^n = 0 \text{ et } f^{n-1} \neq 0$$

- Justifier qu'il existe un vecteur  $x \in E$  tel que la famille  $\mathcal{B} = (x, f(x), f^2(x), \dots, f^{n-1}(x))$  forme une base de  $E$ .
- Déterminer les matrices de  $f, f^2, \dots, f^{n-1}$  dans cette base.
- En déduire que

$$\{g \in \mathcal{L}(E) \mid g \circ f = f \circ g\} = \text{Vect}(\text{Id}, f, f^2, \dots, f^{n-1})$$

**Exercice 47** [ 01277 ] [Correction]

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel muni d'une base  $\mathcal{B} = (i, j, k)$ .  
Soit  $f$  l'endomorphisme de  $E$  dont la matrice dans  $\mathcal{B}$  est

$$A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

- Calculer  $A^2$ . Qu'en déduire sur  $f$ ?
- Déterminer une base de  $\text{Im } f$  et  $\ker f$ .
- Quelle est la matrice de  $f$  relativement à une base adaptée à la supplémentarité de  $\text{Im } f$  et  $\ker f$ ?

**Exercice 48** [ 01278 ] [Correction]

Soit

$$A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

On note  $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$  la base canonique de  $\mathbb{R}^3$ .

Soit  $f$  l'endomorphisme de  $\mathbb{R}^3$  dont la matrice dans  $\mathcal{B}$  est  $A$ .

- Déterminer  $\ker f$  et  $\text{Im } f$ . Démontrer que ces sous-espaces sont supplémentaires dans  $\mathbb{R}^3$ .
- Déterminer une base adaptée à cette supplémentarité et écrire la matrice de  $f$  dans cette base.
- Décrire  $f$  comme composée de transformations vectorielles élémentaires.

**Exercice 49** [ 00719 ] [Correction]

Soient  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $f \in \mathcal{L}(E)$  tel que  $f^n = 0$  et  $f^{n-1} \neq 0$ .

Montrer qu'il existe une base  $\mathcal{B}$  de  $E$  pour laquelle :

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

**Exercice 50** [ 00720 ] [Correction]

Soit  $f \in \mathcal{L}(E)$  tel que  $f^2 = 0$ .

Montrer qu'il existe une base  $\mathcal{B}$  telle que la matrice de  $f$  dans  $\mathcal{B}$  soit

$$\left( \begin{array}{c|c} 0 & I_r \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right)$$

## Changement de bases

**Exercice 51** [ 01276 ] [Correction]

Soit

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -3 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

On note  $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$  la base canonique de  $\mathbb{R}^3$ .

Soit  $f$  l'endomorphisme de  $\mathbb{R}^3$  dont la matrice dans  $\mathcal{B}$  est  $A$ .

On pose  $\varepsilon_1 = (1, 1, 1), \varepsilon_2 = (1, -1, 0), \varepsilon_3 = (1, 0, 1)$  et  $\mathcal{B}' = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ .

- Montrer que  $\mathcal{B}'$  constitue une base de  $\mathbb{R}^3$ .
- Écrire la matrice de  $f$  dans cette base.
- Déterminer une base de  $\ker f$  et de  $\text{Im } f$ .

**Exercice 52** [ 00716 ] [Correction]

Soit  $f \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^3)$  représenté dans la base canonique  $\mathcal{B}$  par :

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- Soit  $\mathcal{C} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$  avec  $\varepsilon_1 = (1, 0, 1)$ ,  $\varepsilon_2 = (-1, 1, 0)$ ,  $\varepsilon_3 = (1, 1, 1)$ .  
Montrer que  $\mathcal{C}$  est une base.
- Déterminer la matrice de  $f$  dans  $\mathcal{C}$ .
- Calculer la matrice de  $f^n$  dans  $\mathcal{B}$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ .

**Exercice 53** [ 01282 ] [Correction]

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel muni d'une base  $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$ .

Soit  $f$  l'endomorphisme de  $E$  dont la matrice dans  $\mathcal{B}$  est

$$A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -2 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

Soit  $\mathcal{B}' = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$  la famille définie par

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = e_1 + e_2 - e_3 \\ \varepsilon_2 = e_1 - e_3 \\ \varepsilon_3 = e_1 - e_2 \end{cases}$$

- Montrer que  $\mathcal{B}'$  est une base de  $E$  et former la matrice  $D$  de  $f$  dans  $\mathcal{B}'$ .
- Exprimer la matrice de passage  $P$  de  $\mathcal{B}$  à  $\mathcal{B}'$  et calculer  $P^{-1}$ .
- Quelle relation lie les matrices  $A, D, P$  et  $P^{-1}$  ?
- Calculer  $A^n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ .

**Exercice 54** [ 01284 ] [Correction]

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension 3 et  $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$  une base de  $E$ .

On considère les matrices

$$A = \begin{pmatrix} 4 & -2 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 3 & -2 & -1 \end{pmatrix} \text{ et } D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Soit  $f$  l'endomorphisme de  $E$  dont la matrice dans la base  $\mathcal{B}$  est  $A$ .

- Montrer qu'il existe une base  $\mathcal{C} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$  de  $E$  telle que la matrice de  $f$  dans  $\mathcal{C}$  soit  $D$ .
- Déterminer la matrice  $P$  de  $\text{GL}_3(\mathbb{R})$  telle que  $A = PDP^{-1}$ . Calculer  $P^{-1}$ .
- Calculer  $A^n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ .
- En déduire le terme général des suites  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ,  $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(z_n)_{n \in \mathbb{N}}$  définies par :

$$\begin{cases} x_0 = 1 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases} \text{ et } \forall n \in \mathbb{N}, \begin{cases} x_{n+1} = 4x_n - 2(y_n + z_n) \\ y_{n+1} = x_n - z_n \\ z_{n+1} = 3x_n - 2y_n - z_n \end{cases}$$

**Exercice 55** [ 03212 ] [Correction]

Soient  $b = (i, j)$  et  $B = (I, J)$  deux bases d'un  $\mathbb{R}$ -espace vectoriel de dimension 2 et  $P$  la matrice de passage de  $b$  à  $B$ .

Pour  $x \in E$ , notons

$$v = \text{Mat}_b x \text{ et } V = \text{Mat}_B x$$

- Retrouver la relation entre  $v$  et  $V$ .
- Soient  $f \in \mathcal{L}(E)$  et

$$m = \text{Mat}_b f \text{ et } M = \text{Mat}_B f$$

Retrouver la relation entre  $m$  et  $M$ .

- Par quelle méthode peut-on calculer  $m^n$  lorsqu'on connaît deux vecteurs propres non colinéaires de  $f$ .

**Exercice 56** [ 00717 ] [Correction]

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension 3 muni d'une base  $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$ .

Soit  $f \in \mathcal{L}(E)$  dont la matrice dans la base  $\mathcal{B}$  est

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

On pose  $\varepsilon_1 = e_1 + e_3$ ,  $\varepsilon_2 = e_1 + e_2$  et  $\varepsilon_3 = e_1 + e_2 + e_3$ .

- Montrer que la famille  $\mathcal{B}' = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$  forme une base de  $E$  et déterminer la matrice de  $f$  dans  $\mathcal{B}'$ .
- Calculer  $A^n$ .

**Exercice 57** [ 00718 ] [Correction]

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension 3 muni d'une base  $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$ .

Soit  $f \in \mathcal{L}(E)$  dont la matrice dans la base  $\mathcal{B}$  est

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 \\ -1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

On pose  $\varepsilon_1 = e_1 + e_3$ ,  $\varepsilon_2 = e_1 + e_2$  et  $\varepsilon_3 = e_1 + e_2 + e_3$ .

- Montrer que  $\mathcal{B}' = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$  forme une base de  $E$  et déterminer la matrice de  $f$  dans  $\mathcal{B}'$ .
- Calculer  $A^n$ .

**Exercice 58** [ 01283 ] [Correction]

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel muni d'une base  $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$ .

Soit  $f$  l'endomorphisme de  $E$  dont la matrice dans  $\mathcal{B}$  est

$$A = \begin{pmatrix} 3 & -2 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

- Montrer qu'il existe une base  $\mathcal{C} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$  de  $E$  dans laquelle la matrice représentative de  $f$  est une matrice diagonale  $D$  de coefficients diagonaux : 1, 2 et 3.
- Déterminer la matrice de passage  $P$  de  $\mathcal{B}$  à  $\mathcal{C}$ . Calculer  $P^{-1}$ .
- Quelle relation lie les matrices  $A, D, P$  et  $P^{-1}$  ?
- Calculer  $A^n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ .

## Rang d'une matrice

**Exercice 59** [ 01285 ] [Correction]

Calculer le rang de familles de vecteurs suivantes de  $\mathbb{R}^3$  :

- $(x_1, x_2, x_3)$  avec  $x_1 = (1, 1, 0)$ ,  $x_2 = (1, 0, 1)$  et  $x_3 = (0, 1, 1)$
- $(x_1, x_2, x_3)$  avec  $x_1 = (2, 1, 1)$ ,  $x_2 = (1, 2, 1)$  et  $x_3 = (1, 1, 2)$
- $(x_1, x_2, x_3)$  avec  $x_1 = (1, 2, 1)$ ,  $x_2 = (1, 0, 3)$  et  $x_3 = (1, 1, 2)$ .

**Exercice 60** [ 01286 ] [Correction]

Calculer le rang des applications linéaires suivantes :

- $f: \mathbb{K}^3 \rightarrow \mathbb{K}^3$  définie par

$$f(x, y, z) = (-x + y + z, x - y + z, x + y - z)$$

- $f: \mathbb{K}^3 \rightarrow \mathbb{K}^3$  définie par

$$f(x, y, z) = (x - y, y - z, z - x)$$

- $f: \mathbb{K}^4 \rightarrow \mathbb{K}^4$  définie par

$$f(x, y, z, t) = (x + y - t, x + z + 2t, 2x + y - z + t, -x + 2y + z)$$

**Exercice 61** [ 01287 ] [Correction]

Calculer le rang des matrices suivantes en fonction des paramètres :

$$\text{a) } \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ b+c & c+a & a+b \\ bc & ca & ab \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \begin{pmatrix} 1 & \cos \theta & \cos 2\theta \\ \cos \theta & \cos 2\theta & \cos 3\theta \\ \cos 2\theta & \cos 3\theta & \cos 4\theta \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \begin{pmatrix} a & b & (0) \\ & \ddots & \ddots \\ (0) & & \ddots & b \\ b & (0) & & a \end{pmatrix}$$

**Exercice 62** [ 01288 ] [Correction]

Soient  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  définie par

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \ddots & 1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Donner le rang de  $M$  et la dimension de son noyau.
- Préciser noyau et image de  $M$ .
- Calculer  $M^n$ .

**Exercice 63** [ 01289 ] [Correction]

Soit  $A$  et  $B$  deux matrices carrées d'ordre 3 telles que  $AB = O_3$ .

Montrer que l'une au moins de ces matrices est de rang inférieur ou égal à 1.

**Exercice 64** [ 00698 ] [\[Correction\]](#)

Soient  $A \in \mathcal{M}_{3,2}(\mathbb{R})$  et  $B \in \mathcal{M}_{2,3}(\mathbb{R})$  telles que

$$AB = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Déterminer les rangs de  $A$  et  $B$ .
- Calculer  $BA$  en observant  $(AB)^2 = AB$ .

**Exercice 65** [ 00699 ] [\[Correction\]](#)

Soient  $A \in \mathcal{M}_{3,2}(\mathbb{R})$  et  $B \in \mathcal{M}_{2,3}(\mathbb{R})$  matrices de rang 2 vérifiant  $(AB)^2 = AB$ .  
Montrer  $BA = I_2$ .

**Exercice 66** [ 00710 ] [\[Correction\]](#)

Soit  $G$  un groupe multiplicatif formé d'éléments de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .  
Montrer que les éléments de  $G$  ont tous le même rang.

**Exercice 67** [ 03861 ] [\[Correction\]](#)

Soient  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  vérifiant  $A^2B = A$  et  $\text{rg } A = \text{rg } B$ . Montrer  $B^2A = B$ .

## Systèmes d'équations linéaires

**Exercice 68** [ 01292 ] [\[Correction\]](#)

Discuter, selon  $m$  paramètre réel, la dimension des sous-espaces vectoriels de  $\mathbb{R}^3$  suivants :

$$\begin{aligned} \text{a) } F &= \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{cases} x + my + z = 0 \\ mx + y + mz = 0 \end{cases} \right\} \\ \text{b) } F &= \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{cases} x + y + mz = 0 \\ x + my + z = 0 \\ mx + y + z = 0 \end{cases} \right\}. \end{aligned}$$

**Exercice 69** [ 01293 ] [\[Correction\]](#)

On considère, pour  $m$  paramètre réel, les sous-espaces vectoriels de  $\mathbb{R}^3$  :

$$F = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x + my + z = 0 \text{ et } mx + y - mz = 0\}$$

et

$$G = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x - my + z = 0\}.$$

- Déterminer la dimension de  $F$  et  $G$ .

- Discuter, selon la valeur de  $m$ , la dimension du sous-espace vectoriel  $F \cap G$ .

**Exercice 70** [ 01294 ] [\[Correction\]](#)

Résoudre en fonction du paramètre  $m \in \mathbb{C}$ , les systèmes suivants d'inconnues complexes :

$$\begin{aligned} \text{a) } & \begin{cases} x - y + z = m \\ x + my - z = 1 \\ x - y - z = 1 \end{cases} \\ \text{b) } & \begin{cases} mx + y + z = 1 \\ x + my + z = m \\ x + y + mz = m^2 \end{cases} \\ \text{c) } & \begin{cases} mx + y + z + t = 1 \\ x + my + z + t = m \\ x + y + mz + t = m + 1 \end{cases} \end{aligned}$$

**Exercice 71** [ 01295 ] [\[Correction\]](#)

Soient  $a, b \in \mathbb{C}$ . Résoudre le système :

$$\begin{cases} ax + by + z = 1 \\ x + aby + z = b \\ x + by + az = 1 \end{cases}$$

**Exercice 72** [ 01296 ] [\[Correction\]](#)

Résoudre le système d'équations suivant d'inconnues complexes :

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n = 1 \\ x_1 + 2x_2 + 2x_3 + \dots + 2x_n = 1 \\ x_1 + 2x_2 + 3x_3 + \dots + 3x_n = 1 \\ \vdots \\ x_1 + 2x_2 + 3x_3 + \dots + nx_n = 1 \end{cases}$$

**Exercice 73** [ 01297 ] [\[Correction\]](#)

Résoudre le système d'équations suivant d'inconnues complexes :

$$\left\{ \begin{array}{ccccccccc} x_1 & + & x_2 & & & & & & & = & 0 \\ x_1 & + & x_2 & + & x_3 & & & & & = & 0 \\ & & x_2 & + & x_3 & + & x_4 & & & = & 0 \\ & & & & \ddots & & \ddots & & \ddots & & \vdots \\ & & & & & x_{n-2} & + & x_{n-1} & + & x_n & = & 0 \\ & & & & & & & x_{n-1} & + & x_n & = & 0 \end{array} \right.$$

**Exercice 74** [ 01298 ] [\[Correction\]](#)

Soient  $a_1, \dots, a_n$  des points du plan complexe.

Déterminer à quelle(s) condition(s) il existe au moins un polygone à  $n$  sommets

$z_1, \dots, z_n$  tel que :

$a_i$  est le milieu de  $[z_i ; z_{i+1}]$  et  $a_n$  est le milieu de  $[z_n ; z_1]$ .

**Exercice 75** [ 02560 ] [\[Correction\]](#)

Discuter suivant  $a$  et  $b$  et résoudre

$$\left\{ \begin{array}{l} ax + 2by + 2z = 1 \\ 2x + aby + 2z = b \\ 2x + 2by + az = 1 \end{array} \right.$$

**Exercice 76** [ 02579 ] [\[Correction\]](#)

Résoudre, en discutant selon  $a, b \in \mathbb{R}$  le système

$$\left\{ \begin{array}{l} ax + y + z + t = 1 \\ x + ay + z + t = b \\ x + y + az + t = b^2 \\ x + y + z + at = b^3 \end{array} \right.$$

## Matrices équivalentes

**Exercice 77** [ 00703 ] [\[Correction\]](#)

- a) Montrer qu'une matrice  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  est non inversible si, et seulement si, elle est équivalente à une matrice nilpotente.

- b) Soit  $f: \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}$  une application vérifiant :  $f(O_n) = 0$ ,  $f(I_n) \neq 0$  et pour tout  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ ,

$$f(AB) = f(A)f(B)$$

Montrer que  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  est inversible si, et seulement si,  $f(A) \neq 0$ .

**Exercice 78** [ 02602 ] [\[Correction\]](#)

Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  une matrice de rang  $r$ . Déterminer la dimension de l'espace

$$\{B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid ABA = O_n\}$$

**Exercice 79** [ 01602 ] [\[Correction\]](#)

Soient  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .

- a) Justifier qu'il existe  $U, V \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$  tels que

$$\text{rg}(UA + BV) = \min(n, \text{rg } A + \text{rg } B)$$

- b) On suppose  $\text{rg } A + \text{rg } B \geq n$ . Montrer qu'il existe  $U, V \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$  tels que

$$UA + BV \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$$

**Exercice 80** [ 03808 ] [\[Correction\]](#)

- a) Montrer que si  $C \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  vérifie :

$$\forall X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), \det(C + X) = \det X$$

alors elle est nulle (on pourra étudier le rang de  $C$ ).

- b) Montrer que si  $A$  et  $B$  de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  vérifient :

$$\forall X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), \det(A + X) = \det(B + X)$$

alors  $A = B$ .

**Exercice 81** [ 01290 ] [\[Correction\]](#)

Soit  $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K})$  de rang  $r$ . Montrer qu'il existe des matrices  $B$  et  $C$  respectivement dans  $\mathcal{M}_{n,r}(\mathbb{K})$  et  $\mathcal{M}_{r,p}(\mathbb{K})$  telles que  $A = BC$ .

## Matrices de rang 1

### Exercice 82 [00701] [Correction]

Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  une matrice carrée de rang 1.

- Établir l'existence de colonnes  $X, Y \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$  vérifiant  $A = X^t Y$ .
- En déduire l'existence de  $\lambda \in \mathbb{K}$  tel que  $A^2 = \lambda A$ .

### Exercice 83 [00700] [Correction]

Soit  $A$  une matrice carrée de rang 1. Montrer qu'il existe  $\lambda \in \mathbb{K}$  tel que  $A^2 = \lambda A$ .

### Exercice 84 [03460] [Correction]

Soit  $H \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$  une matrice de rang 1.

- Montrer qu'il existe des matrices  $U, V \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$  telles que  $H = U^t V$ .
- En déduire

$$H^2 = \text{tr}(H)H$$

- On suppose  $\text{tr } H \neq -1$ . Montrer que  $I_n + H$  est inversible et

$$(I_n + H)^{-1} = I_n - \frac{1}{1 + \text{tr } H} H$$

- Soient  $A \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$  telle que  $\text{tr}(HA^{-1}) \neq -1$ . Montrer que  $A + H$  est inversible et

$$(A + H)^{-1} = A^{-1} - \frac{1}{1 + \text{tr}(HA^{-1})} A^{-1} H A^{-1}$$

## Rang d'une matrice par blocs

### Exercice 85 [03134] [Correction]

Soient  $A, B, C, D \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .

- On note  $\begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n,2n}(\mathbb{K})$  la matrice obtenue en accolant les colonnes de  $B$  à droite de celles de  $A$ .  
Montrer

$$\text{rg} \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} = \text{rg } A \iff \exists U \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}), B = AU$$

- On note  $\begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2n,n}(\mathbb{K})$  la matrice obtenue en accolant les lignes de  $C$  en dessous de celles de  $A$ .  
Montrer

$$\text{rg} \begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} = \text{rg } A \iff \exists V \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}), C = VA$$

- En déduire

$$\text{rg} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \text{rg } A \iff \exists U, V \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}), \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & AU \\ VA & VAU \end{pmatrix}$$

### Exercice 86 [01604] [Correction]

Soient  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ ,  $B \in \mathcal{M}_p(\mathbb{K})$  et  $M$  la matrice

$$M = \begin{pmatrix} A & O_{n,p} \\ O_{p,n} & B \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n+p}(\mathbb{K})$$

Établir

$$\text{rg } M = \text{rg } A + \text{rg } B$$

### Exercice 87 [01649] [Correction]

Soient  $B \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K})$  et  $C \in \mathcal{M}_p(\mathbb{K})$ .

Montrer

$$\text{rg} \begin{pmatrix} I_n & B \\ O_{p,n} & C \end{pmatrix} = n + \text{rg } C$$

### Exercice 88 [02335] [Correction]

Soient  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ ,  $B \in \mathcal{M}_p(\mathbb{K})$ ,  $C \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K})$  et

$$M = \begin{pmatrix} A & C \\ O_{p,n} & B \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n+p}(\mathbb{K})$$

On suppose  $B$  inversible. Établir

$$\text{rg } M = p \iff A = O_n$$

### Exercice 89 [03101] [Correction]

Soient  $A \in \text{GL}_p(\mathbb{R})$ ,  $B \in \mathcal{M}_{p,q}(\mathbb{R})$ ,  $C \in \mathcal{M}_q(\mathbb{R})$  et

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ O_{q,p} & C \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{p+q}(\mathbb{R})$$

Déterminer le rang de  $M$  en fonction de celui de  $C$ .

## Calcul par blocs

### Exercice 90 [03264] [Correction]

Soient  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  et

$$B = \begin{pmatrix} O_n & A \\ I_n & O_n \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2n}(\mathbb{K})$$

- Montrer que  $A$  est inversible si, et seulement si,  $B$  l'est.
- Calculer  $B^p$  pour tout  $p \in \mathbb{N}$ .

### Exercice 91 [00747] [Correction]

Soit  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  une matrice de rang  $r$  décomposée par blocs sous la forme

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

avec  $A \in \mathcal{M}_r(\mathbb{K})$  supposée inversible.

- Montrer que pour toute colonne  $Y \in \mathcal{M}_{n-r,1}(\mathbb{K})$  il existe une colonne  $X \in \mathcal{M}_{r,1}(\mathbb{K})$  telle que

$$M \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ 0_{n-r} \end{pmatrix}$$

- En déduire que  $D = CA^{-1}B$ .

### Exercice 92 [03137] [Correction]

Soient  $A, B, C, D \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  et

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2n}(\mathbb{K})$$

On suppose que les matrices  $A, D$  et  $M$  sont inversibles. Exprimer  $M^{-1}$ .

### Exercice 93 [03702] [Correction]

Soit

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Calculer  $A^n$  pour tout  $n \in \mathbb{Z}$ .

## Trace

### Exercice 94 [03258] [Correction]

Existe-t-il des matrices  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  vérifiant

$$AB - BA = I_n?$$

### Exercice 95 [03259] [Correction]

Soient  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  des matrices vérifiant

$$AB - BA = A$$

Calculer  $\text{tr}(A^p)$  pour  $p \in \mathbb{N}^*$ .

### Exercice 96 [00729] [Correction]

Soient  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie et  $f \in \mathcal{L}(E)$  de rang 1.

Montrer

$$f^2 = \text{tr}(f) \cdot f$$

À quelle condition un endomorphisme de rang 1 est-il un projecteur ?

### Exercice 97 [03029] [Correction]

Soient  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  et  $\varphi$  l'endomorphisme de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  défini par

$$\varphi(M) = MA$$

Exprimer la trace de  $\varphi$  en fonction de celle de  $A$ .

### Exercice 98 [00730] [Correction]

Soit  $M$  une matrice carrée de taille  $n$  à coefficients dans  $\mathbb{K}$  sous-corps de  $\mathbb{C}$ .

Montrer que si  $\text{tr } M = 0$ , il existe deux matrices  $A$  et  $B$  telles que

$$M = AB - BA$$

### Exercice 99 [00731] [Correction]

Soit  $\varphi$  une forme linéaire sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ . Montrer qu'il existe  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  tel que pour tout  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ ,  $\varphi(M) = \text{tr}(AM)$ .

**Exercice 100** [ 00733 ] [\[Correction\]](#)

On note  $\text{tr}$  la forme linéaire trace sur  $E = \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .

Établir

$$\ker(\text{tr}) = \text{Vect} \{[A; B] \mid A, B \in E\}$$

où l'on note  $[A; B] = AB - BA$ .

**Exercice 101** [ 00711 ] [\[Correction\]](#)

Établir que  $\text{Vect} \{AB - BA \mid A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})\}$  est un hyperplan de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .

**Exercice 102** [ 00735 ] [\[Correction\]](#)

Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ . Résoudre l'équation

$$X + {}^tX = \text{tr}(X)A$$

d'inconnue  $X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .

**Exercice 103** [ 03261 ] [\[Correction\]](#)

- a) Dans un espace de dimension finie, pourquoi le rang d'un projecteur est-il égal à sa trace ?
- b) Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  vérifiant  $A^q = I_n$ .  
Montrer

$$\dim \ker(A - I_n) = \frac{1}{q} \sum_{k=0}^{q-1} \text{tr}(A^k)$$

**Exercice 104** [ 00734 ] [\[Correction\]](#)

Soient  $E$  un espace vectoriel de dimension finie et  $G$  un sous-groupe de  $\text{GL}(E)$  de cardinal fini  $n$ . Montrer

$$\dim \left( \bigcap_{g \in G} \ker(g - \text{Id}_E) \right) = \frac{1}{n} \sum_{g \in G} \text{tr } g$$

**Exercice 105** [ 02388 ] [\[Correction\]](#)

Soient  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$  et  $H$  une partie non vide et finie de  $\text{GL}_n(\mathbb{K})$  stable par multiplication.

- a) Soit  $M \in H$ . Montrer que  $k \in \mathbb{N}^* \mapsto M^k \in H$  n'est pas injective.  
En déduire que  $H$  est un sous-groupe de  $\text{GL}_n(\mathbb{K})$ .

Soient

$$q = |H| \text{ et } P = \frac{1}{q} \sum_{M \in H} M$$

- b) Montrer, si  $M \in H$ , que  $MP = PM = P$ . En déduire  $P^2 = P$ .
- c) Trouver un supplémentaire, dans  $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ , stable par tous les éléments de  $H$ , de

$$\bigcap_{M \in H} \ker(M - I_n)$$

- d) Montrer que

$$\sum_{M \in H} \text{tr } M \in q\mathbb{N}$$

Que dire si cette somme est nulle ?

**Exercice 106** [ 02651 ] [\[Correction\]](#)

- a) Soit  $G$  un sous-groupe fini de  $\text{GL}_n(\mathbb{R})$  tel que  $\sum_{g \in G} \text{tr } g = 0$ . Montrer que  $\sum_{g \in G} g = 0$ .
- b) Soit  $G$  un sous-groupe fini de  $\text{GL}_n(\mathbb{R})$ ,  $V$  un sous-espace vectoriel de  $\mathbb{R}^n$  stable par les éléments de  $G$ . Montrer qu'il existe un supplémentaire de  $V$  dans  $\mathbb{R}^n$  stable par tous les éléments de  $G$ .

**Exercice 107** [ 00732 ] [\[Correction\]](#)

Soit  $T$  une forme linéaire sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  vérifiant

$$\forall A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}), T(AB) = T(BA)$$

Établir que  $T \in \text{Vect} \{ \text{tr} \}$ .

**Exercice 108** [ 02616 ] [\[Correction\]](#)

Soit  $f$  une forme linéaire sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  vérifiant

$$\forall A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), f(AB) = f(BA)$$

Montrer que  $f$  est proportionnelle à la trace.

**Exercice 109** [ 02686 ] [Correction]

a) Soit  $f$  une forme linéaire sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  vérifiant

$$\forall A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), f(AB) = f(BA)$$

montrer que  $f$  est proportionnelle à la trace.

b) Soit  $g$  un endomorphisme de l'espace vectoriel  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  vérifiant

$$g(AB) = g(BA)$$

pour toutes  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  et  $g(I_n) = I_n$ . Montrer que  $g$  conserve la trace.

**Exercice 110** [ 03419 ] [Correction]

Soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ . Calculer la trace de l'endomorphisme  $f \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  donné par

$$f(M) = AM + MA$$

**Exercice 111** [ 02563 ] [Correction]

Pour  $A$  et  $B$  fixées dans  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ , résoudre dans  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  l'équation

$$X = \operatorname{tr}(X)A + B$$

**Exercice 112** [ 02547 ] [Correction]

Soit  $E$  un  $\mathbb{R}$ -espace vectoriel de dimension finie  $n > 1$ .

Montrer que  $f \in \mathcal{L}(E)$  de rang 1 n'est pas forcément un projecteur.

Montrer que  $f \in \mathcal{L}(E)$  de rang 1 et de trace 1 est un projecteur.

Trouver une base de  $\mathcal{L}(E)$  constituée de projecteurs.

**Exercice 113** [ 03864 ] [Correction]

Soient  $A_1, \dots, A_k \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  vérifiant

$$A_1 + \dots + A_k = I_n \text{ et } \forall 1 \leq i \leq k, A_i^2 = A_i$$

Montrer

$$\forall 1 \leq i \neq j \leq k, A_i A_j = O_n$$

**Application des matrices à l'étude d'applications linéaires****Exercice 114** [ 02679 ] [Correction]

Soient  $f, g \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^2)$  tel que  $f^2 = g^2 = 0$  et  $f \circ g = g \circ f$ . Calculer  $f \circ g$ .

**Exercice 115** [ 02688 ] [Correction]

Soit  $\omega$  une racine primitive  $n$ -ième de 1. On pose

$$F_\omega(P) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=0}^{n-1} P(\omega^k) X^k$$

pour tout  $P \in \mathbb{C}_{n-1}[X]$ .

Montrer que  $F_\omega$  est un automorphisme de  $\mathbb{C}_{n-1}[X]$  et exprimer son inverse.

**Exercice 116** [ 03160 ] [Correction]

Soit  $E$  un espace vectoriel réel de dimension finie  $n \geq 2$ .

- Indiquer des endomorphismes de  $E$  dont la représentation matricielle est la même dans toutes les bases de  $E$ .
- Soit  $(e_1, \dots, e_n)$  une base de  $E$ . Montrer que pour tout  $i \in \{2, \dots, n\}$ , la famille  $(e_1 + e_i, e_2, \dots, e_n)$  est une base de  $E$ .
- Déterminer tous les endomorphismes de  $E$  dont la représentation matricielle est diagonale dans toutes les bases de  $E$ .
- Quels sont les endomorphismes de  $E$  dont la représentation matricielle est la même dans toutes les bases de  $E$ ?

**Exercice 117** [ 02596 ] [Correction]

Soit  $f$  un élément non nul de  $\mathcal{L}(\mathbb{R}^3)$  vérifiant

$$f^3 + f = 0$$

Montrer que  $\mathbb{R}^3 = \ker f \oplus \operatorname{Im} f$  et que l'on peut trouver une base dans laquelle  $f$  a pour matrice

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

**Exercice 118** [ 02533 ] [[Correction](#)]

Soient  $u, v: \mathbb{R}_n[X] \rightarrow \mathbb{R}_n[X]$  définies par

$$u(P) = P(X + 1) \text{ et } v(P) = P(X - 1)$$

- a) Calculer  $\text{rg}(u - v)$  en utilisant sa matrice.
- b) Retrouver ce résultat d'une autre manière.

**Exercice 119** [ 02380 ] [[Correction](#)]

Quels sont les  $f \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n)$  telles que  $f(\mathbb{Z}^n) = \mathbb{Z}^n$  ?

## Corrections

### Exercice 1 : [énoncé]

Notons

$$A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$$

On a

$$\sigma(A) = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n a_{k,\ell}$$

Par produit  $B = A.J = (b_{i,j})$  avec  $b_{i,j} = \sum_{\ell=1}^n a_{i,\ell}.1$  et  $C = J.A.J = J.B = (c_{i,j})$  avec

$$c_{i,j} = \sum_{k=1}^n 1.b_{k,j} = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n a_{k,\ell} = \sigma(A)$$

Ainsi  $C = \sigma(A).J$ .

### Exercice 2 : [énoncé]

On peut décrire

$$E_{i,j} = (\delta_{p,i}\delta_{q,j})_{1 \leq p,q \leq n} \text{ et } E_{k,\ell} = (\delta_{p,k}\delta_{q,\ell})_{1 \leq p,q \leq n}$$

On a alors

$$A = E_{i,j}E_{k,\ell} = (a_{p,q})$$

avec

$$a_{p,q} = \sum_{r=1}^n (\delta_{p,i}\delta_{r,j})(\delta_{r,k}\delta_{q,\ell}) = \left(\sum_{r=1}^n \delta_{r,j}\delta_{r,k}\right)\delta_{p,i}\delta_{q,\ell} = \delta_{j,k}\delta_{p,i}\delta_{q,\ell}$$

Ainsi

$$E_{i,j}E_{k,\ell} = \delta_{j,k}E_{i,\ell}$$

### Exercice 3 : [énoncé]

Pour  $n \geq 1$ , en exploitant  $M^{n+1} = M \times M^n$ , on a

$$\begin{cases} a_{n+1} = aa_n + bc_n \\ b_{n+1} = ab_n + bd_n \\ c_{n+1} = ca_n + dc_n \\ d_{n+1} = cb_n + dd_n \end{cases}$$

Par suite

$$a_{n+1} + d_{n+1} - (b_{n+1} + c_{n+1}) = (a - c)(a_n - b_n) + (b - d)(c_n - d_n)$$

Sachant  $a \geq c$  et  $b \geq d$ , il suffit d'établir  $a_n \geq b_n$  et  $c_n \geq d_n$  pour conclure.

Dans le cas  $n = 1$ , la propriété est vérifiée.

Dans le cas  $n \geq 2$ , exploitons la relation  $M^n = M^{n-1} \times M$

$$\begin{cases} a_n = a_{n-1}a + b_{n-1}c \\ b_n = a_{n-1}b + b_{n-1}d \\ c_n = c_{n-1}a + d_{n-1}c \\ d_n = c_{n-1}b + d_{n-1}d \end{cases}$$

On a alors

$$a_n - b_n = a_{n-1}(a - b) + b_{n-1}(c - d) \text{ et } c_n - d_n = c_{n-1}(a - b) + d_{n-1}(c - d)$$

Puisqu'il est évident que  $a_{n-1}, b_{n-1}, c_{n-1}, d_{n-1} \geq 0$  (cela se montre par récurrence), on obtient sachant  $a - b \geq 0$  et  $c - d \geq 0$  les inégalités permettant de conclure.

Notons que l'hypothèse  $b + c \leq a + d$  ne nous a pas été utile.

### Exercice 4 : [énoncé]

On a

$$(I_n - A)(I_n - B) = I_n - A - B + AB = I_n$$

On en déduit que  $I_n - A$  est inversible et que  $I_n - B$  est son inverse. L'égalité

$$(I_n - B)(I_n - A) = I_n$$

entraîne alors

$$BA = A + B$$

et on peut conclure que  $A$  et  $B$  commutent.

### Exercice 5 : [énoncé]

Une matrice  $X$  solution commute avec  $A$ .

En étudiant l'équation  $AX = XA$  coefficients par coefficients, on observe que  $X$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} a & 0 & x \\ 0 & b & y \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix}$$

Pour une telle matrice, l'équation  $X^2 = A$  équivaut au système :

$$\begin{cases} a^2 = 1 \\ b^2 = 4 \\ c^2 = 16 \\ (a + c)x = 1 \\ (b + c)y = 2 \end{cases}$$

Les solutions sont donc  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1/5 \\ 0 & 2 & 1/3 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1/3 \\ 0 & 2 & 1/3 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1/5 \\ 0 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix},$   
 $\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1/3 \\ 0 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1/3 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -4 \end{pmatrix}$  etc...

**Exercice 6 :** [énoncé]

Posons  $B_k = A^k + A^{-k}$ . On vérifie

$$(A^k + A^{-k})(A + A^{-1}) = A^{k+1} + A^{-(k+1)} + A^{k-1} + A^{-(k-1)}$$

et donc

$$B_k = B_{k+1} + B_{k-1}$$

Sachant  $B_0 = 2I_n$  et  $B_1 = I_n$ , on a par récurrence  $B_k = \lambda_k I_n$  avec  $(\lambda_k)$  la suite récurrente linéaire double déterminée par

$$\begin{cases} \lambda_0 = 2, \lambda_1 = 1 \\ \lambda_{n+1} = \lambda_n - \lambda_{n-1} \end{cases}$$

Après résolution

$$\lambda_n = \frac{(1 + i\sqrt{3})^n + (1 - i\sqrt{3})^n}{2^n}$$

**Exercice 7 :** [énoncé]

Soit  $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .

$B = AD = (b_{i,j})$  avec  $b_{i,j} = a_{i,j}\lambda_j$  et  $C = DA = (c_{i,j})$  avec  $c_{i,j} = \lambda_i a_{i,j}$ .

On a  $AD = DA$  si, et seulement si,

$$\forall 1 \leq i, j \leq n, a_{i,j}\lambda_i = a_{i,j}\lambda_j$$

soit

$$\forall 1 \leq i, j \leq n, a_{i,j}(\lambda_i - \lambda_j) = 0$$

Les  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  étant deux à deux distincts,  $AD = DA$  si, et seulement si,

$$\forall 1 \leq i \neq j \leq n, a_{i,j} = 0$$

ce qui signifie que  $A$  est diagonale.

**Exercice 8 :** [énoncé]

Si  $A$  est solution alors  $AE_{i,j} = E_{i,j}A$  implique  $a_{i,i} = a_{j,j}$  et  $a_{i,k} = 0$  pour  $k \neq i$  donc  $A = \lambda I_n$ .

La réciproque est immédiate.

**Exercice 9 :** [énoncé]

Supposons  $A$  inversible. Puisque  $A$  et  $B$  commutent,  $A^{-1}$  et  $B$  aussi. Comme  $B$  est nilpotente,  $-A^{-1}B$  l'est aussi. Or il est classique d'observer que si  $N$  est nilpotente,  $I - N$  est inversible d'inverse  $I + N + \dots + N^{p-1}$  avec  $p$  l'ordre de nilpotence de  $N$ . Ainsi  $I + A^{-1}B$  est inversible et  $A + B = A(I + A^{-1}B)$  aussi. Supposons  $A + B$  inversible, puisque  $-B$  est nilpotente et commute avec  $A + B$ ,  $A = A + B - B$  est inversible.

**Exercice 10 :** [énoncé]

Il suffit d'écrire

$$A^{-1}B = A^{-1}(BA)A^{-1} = A^{-1}(AB)A^{-1} = BA^{-1}$$

**Exercice 11 :** [énoncé]

a) Soit  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  commutant avec toute matrice de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .

Pour  $i \neq j$ , on a  $E_{i,j}M = ME_{i,j}$ .

L'égalité des coefficients d'indice  $(i, i)$  donne  $m_{j,i} = 0$ .

L'égalité des coefficients d'indice  $(i, j)$  donne  $m_{j,j} = m_{i,i}$ .

Par suite la matrice  $M$  est scalaire. La réciproque est immédiate.

b) On reprend l'étude ci-dessus en étudiant la commutation de  $M$  avec  $I_n + E_{i,j}$  qui conduit à nouveau à l'égalité  $E_{i,j}M = ME_{i,j}$ . On obtient la même conclusion.

**Exercice 12 :** [énoncé]

En étudiant l'égalité  $AM = MA$ , on justifie  $C(A) = D_n(\mathbb{C})$ .  $C(A)$  est donc un sous-espace vectoriel de dimension  $n$ . De plus il contient évidemment les éléments  $A^k$  pour  $k \in \{0, \dots, n-1\}$  (et, plus généralement, tout polynôme en  $A$ ).

Supposons

$$\lambda_0 I + \lambda_1 A + \dots + \lambda_{n-1} A^{n-1} = 0$$

Le polynôme  $P = \lambda_0 + \lambda_1 X + \dots + \lambda_{n-1} X^{n-1}$  est annulateur de  $A$ , donc les  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  qui sont valeurs propres de  $A$  sont aussi racines de  $P$  qui possède alors

plus de racines que son degré. On peut alors affirmer  $P = 0$  puis  $\lambda_0 = \dots = \lambda_{n-1} = 0$ .

La famille  $(A^k)_{0 \leq k \leq n-1}$  est une famille libre à  $n$  éléments de  $C(A)$ , c'en est donc une base

### Exercice 13 : [énoncé]

a) L'inclusion  $\supset$  est immédiate.

Inversement, soit  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  commutant avec toute matrice  $M \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ .

Soient  $i, j \in \{1, \dots, n\}$  avec  $i \neq j$ .

Pour  $M = I_n + E_{i,j}$ , la relation  $AM = MA$  donne

$$AE_{i,j} = E_{i,j}A$$

L'identification des coefficients d'indices  $(i, j)$  et  $(j, j)$  donnent respectivement

$$a_{i,i} = a_{j,j} \text{ et } a_{j,i} = 0$$

On en déduit que la matrice  $A$  est diagonale et que ses coefficients diagonaux sont égaux, autrement dit,  $A$  est une matrice scalaire.

b) Soit  $B \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$ . On peut écrire

$$A = (AB^{-1})B$$

et donc

$$A = B(AB^{-1})$$

On en déduit

$$AB = BA$$

et ainsi la matrice  $A$  commute avec toute matrice inversible. On peut alors conclure que  $A$  est une matrice scalaire.

### Exercice 14 : [énoncé]

Par récurrence sur  $n \geq 1$ .

La propriété est immédiate pour  $n = 1$ .

Supposons la propriété vraie au rang  $n \geq 1$ .

Soit  $T \in \mathcal{M}_{n+1}(\mathbb{K})$  triangulaire supérieure commutant avec sa transposée.

On peut écrire

$$T = \begin{pmatrix} \alpha & {}^tX \\ O_{n,1} & S \end{pmatrix}$$

avec  $\alpha \in \mathbb{K}$ ,  $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$  et  $S \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  triangulaire supérieure.

L'identification du coefficient d'indice  $(1, 1)$  dans la relation  ${}^tTT = T{}^tT$  donne

$$\alpha^2 = \alpha^2 + {}^tXX$$

On en déduit  $X = O_{n,1}$  et l'égalité  ${}^tTT = T{}^tT$  donne alors  ${}^tSS = S{}^tS$ .

Par hypothèse de récurrence, la matrice  $S$  est diagonale et par conséquent la matrice  $T$  l'est aussi.

Récurrence établie.

### Exercice 15 : [énoncé]

Soit  $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  une matrice commutant avec toutes les matrices symétriques.

Soient  $i < j \in \{1, \dots, n\}$ .

La matrice  $A$  commute avec la matrice symétrique  $E_{i,j} + E_{j,i}$  ce qui permet d'écrire

$$A(E_{i,j} + E_{j,i}) = (E_{i,j} + E_{j,i})A$$

L'égalité des coefficients d'indice  $(i, j)$  donne

$$a_{i,i} = a_{j,j}$$

La matrice  $A$  commute avec la matrice symétrique  $E_{i,i}$  ce qui permet d'écrire

$$AE_{i,i} = E_{i,i}A$$

L'égalité des coefficients d'indice  $(i, j)$  donne

$$a_{i,j} = 0$$

On en déduit que la matrice  $A$  est de la forme  $\lambda I_n$  avec  $\lambda \in \mathbb{K}$ .

La réciproque est immédiate.

### Exercice 16 : [énoncé]

Cas  $n = 2$

Les matrices antisymétriques sont colinéaires à la matrice

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

En étudiant la commutation d'une matrice de  $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$  avec cette dernière, on obtient que les matrices de  $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$  commutant avec les matrices antisymétriques sont de la forme

$$\begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$$

Cas  $n \geq 3$

Soit  $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  une matrice commutant avec toutes les matrices antisymétriques.

Soient  $i < j \in \{1, \dots, n\}$  et  $k \in \{1, \dots, n\}$  avec  $k \neq i, j$ .

La matrice  $A$  commute avec la matrice antisymétrique  $E_{i,j} - E_{j,i}$  ce qui permet d'écrire

$$A(E_{i,j} - E_{j,i}) = (E_{i,j} - E_{j,i})A$$

L'égalité des coefficients d'indice  $(i, j)$  et  $(k, j)$  donne

$$a_{i,i} = a_{j,j} \text{ et } a_{k,i} = 0$$

On en déduit que la matrice  $A$  est de la forme  $\lambda I_n$  avec  $\lambda \in \mathbb{K}$ .

La réciproque est immédiate.

### Exercice 17 : [énoncé]

a)  $DE_{i,j} = a_i E_{i,j}$  et  $E_{i,j}D = a_j E_{i,j}$  donc

$$\varphi(E_{i,j}) = (a_i - a_j)E_{i,j}$$

Posons  $I = \{(i, j) \in \llbracket 1; n \rrbracket^2 \mid a_i \neq a_j\}$  et

$$J = \{(i, j) \in \llbracket 1; n \rrbracket^2 \mid a_i = a_j\} = \llbracket 1; n \rrbracket^2 \setminus I.$$

Pour  $(i, j) \in I$ ,  $E_{i,j} \in \text{Im } \varphi$  et pour  $(i, j) \in J$ ,  $E_{i,j} \in \ker \varphi$ .

Ainsi

$$\text{Vect}\{E_{i,j} \mid (i, j) \in I\} \subset \text{Im } \varphi \text{ et } \text{Vect}\{E_{i,j} \mid (i, j) \in J\} \subset \ker \varphi$$

Or

$$\dim \text{Vect}\{E_{i,j} \mid (i, j) \in I\} + \dim \text{Vect}\{E_{i,j} \mid (i, j) \in J\} = n^2 = \dim \text{Im } \varphi + \dim \ker \varphi$$

donc

$$\dim \text{Vect}\{E_{i,j} \mid (i, j) \in I\} = \dim \text{Im } \varphi$$

et

$$\dim \text{Vect}\{E_{i,j} \mid (i, j) \in J\} = \dim \ker \varphi$$

puis

$$\text{Vect}\{E_{i,j} \mid (i, j) \in I\} = \text{Im } \varphi \text{ et } \text{Vect}\{E_{i,j} \mid (i, j) \in J\} = \ker \varphi$$

b) Si  $D$  est à coefficients diagonaux distincts alors

$$I = \{(i, j) \in \llbracket 1; n \rrbracket^2 \mid i \neq j\} \text{ et } J = \{(i, i) \mid i \in \llbracket 1; n \rrbracket\}$$

Par suite  $\text{Im } \varphi$  est l'espace des matrices de diagonale nulle tandis que  $\ker \varphi$  est l'espace des matrices diagonales.

### Exercice 18 : [énoncé]

a) On observe

$$A^n = \begin{pmatrix} 1 & a_n \\ 0 & 2^n \end{pmatrix}$$

avec  $a_{n+1} = 1 + 2a_n$ .

En introduisant  $b_n = a_n + 1$ , on obtient  $a_n = 2^n - 1$ .

Ainsi

$$A^n = \begin{pmatrix} 1 & 2^n - 1 \\ 0 & 2^n \end{pmatrix}$$

b) Par récurrence

$$A^n = \begin{pmatrix} a^n & na^{n-1}b \\ 0 & a^n \end{pmatrix}$$

c) Par récurrence

$$A^n = \begin{pmatrix} \cos n\theta & -\sin n\theta \\ \sin n\theta & \cos n\theta \end{pmatrix}$$

### Exercice 19 : [énoncé]

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et  $B^n = O_3$  pour  $n \geq 3$ .

Comme  $B$  et  $I$  commutent, la formule du binôme donne

$$A^n = (I + B)^n = I + nB + \frac{n(n-1)}{2}B^2$$

et donc

$$A^n = \begin{pmatrix} 1 & n & \frac{n(n-1)}{2} \\ 0 & 1 & n \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Exercice 20 :** [énoncé]

a) Par récurrence

$$A = \begin{pmatrix} 1 & n & \frac{n(n-1)}{2} \\ 0 & 1 & n \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

b)  $A = I_3 + B$  avec

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Puisque  $I_3$  et  $B$  commutent, la formule du binôme donne

$$A^n = I + nB + \frac{n(n-1)}{2}B^2$$

car  $B^k = O_3$  pour  $k \geq 3$ **Exercice 21 :** [énoncé]a)  $A^2 - 3A + 2I = 0$ . Comme  $A(-\frac{1}{2}A + \frac{3}{2}I) = I$ , on a

$$A^{-1} = -\frac{1}{2}A + \frac{3}{2}I = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -3/2 & -1/2 \end{pmatrix}$$

b)  $X^2 - 3X + 2 = (X-1)(X-2)$ . Sachant que le reste de la division euclidienne considérée est de la forme  $aX + b$ , en évaluant en 1 et 2, on détermine  $a$  et  $b$  et on obtient :

$$X^n = (X^2 - 3X + 2)Q(X) + (2^n - 1)X + 2 - 2^n$$

c) On peut remplacer  $X$  par  $A$  dans le calcul qui précède et on obtient :

$$A^n = (A^2 - 3A + 2I)Q(A) + (2^n - 1)A + (2 - 2^n)I = (2^n - 1)A + (2 - 2^n)I$$

et donc

$$A^n = \begin{pmatrix} 3 - 2^{n+1} & 2 - 2^{n+1} \\ 3 \cdot 2^n - 3 & 3 \cdot 2^n - 2 \end{pmatrix}$$

**Exercice 22 :** [énoncé]a) Si  $M_k$  majore les coefficients de  $A^k$  alors  $nM_k$  majore les coefficients de  $A^{k+1}$ . On en déduit que les coefficients de  $A^k$  sont majorés par

$$n^{k-1}$$

On peut sans doute proposer plus fin.

b) Posons  $T$  la matrice de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  dont tous les coefficients sont nuls sauf ceux de coefficients  $(i, i+1)$  qui valent 1. On remarque

$$A = I_n + T + \dots + T^{n-1}$$

On en déduit

$$(I - T)A = I_n - T^n$$

et puisque  $T^n = O_n$ , on obtient

$$A^{-1} = I - T$$

c) Le calcul des puissances de  $A^{-1}$  est immédiat

$$(A^{-1})^k = \sum_{j=0}^k (-1)^j \binom{k}{j} T^j$$

et donc le coefficient d'indice  $(i, j)$  de  $(A^{-1})^k$  est

$$a_{i,j}^{-k} = (-1)^{j-i} \binom{k}{j-i} = (-1)^{j-i} \frac{k(k-1)\dots(k-j+i+1)}{(j-i)(j-i-1)\dots 1}$$

Cette formule laisse présumer que le coefficient d'indice  $(i, j)$  de  $A^k$  est

$$a_{i,j}^k = (-1)^{j-i} \frac{(-k)(-k-1)\dots(-k-j+i+1)}{(j-i)(j-i-1)\dots 1} = \binom{k+j-i-1}{j-i}$$

ce que l'on démontre en raisonnant par récurrence.

**Exercice 23 :** [énoncé]La relation  $A^2 - (a+d)A + (ad-bc)I = 0$  est immédiateSi  $ad-bc \neq 0$  alors  $A$  est inversible et

$$A^{-1} = \frac{1}{ad-bc}((a+d)I - A) = \frac{1}{ad-bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}.$$

Si  $ad-bc = 0$  alors  $A^2 - (a+d)A = 0$ .Par l'absurde, si  $A$  est inversible,  $A$  est régulière donc  $A = (a+d)I$  puis  $A = O$ . Absurde.

**Exercice 24 :** [\[énoncé\]](#)

- a) Par la méthode du pivot, on opère sur les lignes d'une matrice de blocs  $A$  et  $I_n$  pour transformer  $A$  en  $I_n$ . On sait qu'alors le bloc  $I_n$  sera transformé en  $A^{-1}$ .

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & -3 & | & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & | & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & | & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & | & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & | & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

On conclut

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- b) Par la méthode du pivot

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 1 & | & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & | & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & | & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & | & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & | & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & | & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & | & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & | & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

On conclut

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

- c) Par la méthode du pivot

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & | & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & -1 & | & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 3 & | & -2 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & | & -2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & | & -2 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 3 & | & -2 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & | & 2 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & | & 2 & 1 & -2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & | & 4 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & | & 2 & 1 & -2 \end{pmatrix}$$

On conclut

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

**Exercice 25 :** [\[énoncé\]](#)

$A$  est inversible car triangulaire supérieure à coefficients diagonaux non nuls. Soient  $X, Y \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ . L'équation  $Y = AX$  équivaut à  $X = A^{-1}Y$  or

$$\begin{cases} x_1 - (x_2 + \dots + x_n) = y_1 \\ \vdots \\ x_{n-1} - x_n = y_{n-1} \\ x_n = y_n \end{cases} \iff \begin{cases} x_1 = y_1 + y_2 + 2y_3 + \dots + 2^{n-2}y_n \\ \vdots \\ x_{n-2} = y_{n-2} + y_{n-1} + 2y_n \\ x_{n-1} = y_{n-1} + y_n \\ x_n = y_n \end{cases}$$

donc

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & \dots & 2^{n-2} \\ & \ddots & \ddots & & \vdots \\ & & \ddots & \ddots & 2 \\ 0 & & & \ddots & 1 \\ & & & & 1 \end{pmatrix}$$

**Exercice 26 :** [énoncé]

Notons  $C_1, \dots, C_n$  les colonnes de  $A$  et supposons

$$\lambda_1 C_1 + \dots + \lambda_n C_n = 0$$

Si  $m = \max(|\lambda_1|, \dots, |\lambda_n|) \neq 0$  alors, puisque pour tout  $1 \leq i \leq n$ ,

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j a_{i,j} = 0$$

on obtient

$$|\lambda_i| \leq \frac{\sum_{j \neq i} |\lambda_j| |a_{i,j}|}{|a_{i,i}|} \leq m \frac{\sum_{j \neq i} |a_{i,j}|}{|a_{i,i}|} < m$$

ce qui est absurde compte tenu de la définition de  $m$ .

Par suite, la famille  $(C_1, \dots, C_n)$  est libre et donc  $A$  inversible.

**Exercice 27 :** [énoncé]

$A = (a_{k,\ell})$  avec  $a_{k,\ell} = \omega^{(k-1)(\ell-1)}$ .  $\bar{A} = (b_{k,\ell})$  avec  $b_{k,\ell} = \bar{a}_{k,\ell} = \bar{\omega}^{(k-1)(\ell-1)} = \omega^{-(k-1)(\ell-1)}$ .  
 $A\bar{A} = (c_{k,\ell})$  avec

$$c_{k,\ell} = \sum_{m=1}^n a_{k,m} b_{m,\ell} = \sum_{m=1}^n \omega^{(k-1)(m-1)} \omega^{-(m-1)(\ell-1)} = \sum_{m=0}^{n-1} (\omega^{k-\ell})^m$$

Si  $k = \ell$  alors  $\omega^{k-\ell} = 1$  et

$$c_{k,k} = n$$

Si  $k \neq \ell$  alors  $\omega^{k-\ell} \neq 1$  et

$$c_{k,\ell} = \frac{1 - (\omega^{k-\ell})^n}{1 - \omega^{k-\ell}} = 0$$

Ainsi  $A\bar{A} = nI_n$ . On en déduit que  $A$  est inversible et que

$$A^{-1} = \frac{1}{n} \bar{A}$$

**Exercice 28 :** [énoncé]

a)  $(A + I)^3 = O_3$ .

b)  $A^3 + 3A^2 + 3A + I = O$  donc  $A$  est inversible et  $A^{-1} = -(A^2 + 3A + 3I)$ .

**Exercice 29 :** [énoncé]

a)  $A = J - I_n$  avec  $J^2 = nJ$  donc  $A^2 = (n-2)J + I_n = (n-2)A + (n-1)I_n$ .

b)  $AB = I_n$  pour  $B = \frac{1}{n-1}(A - (n-2)I_n)$  donc  $A$  est inversible et  $B = A^{-1}$ .

**Exercice 30 :** [énoncé]

a) Comme  $(I + A)(I - A) = (I - A)(I + A)$ , on a, en multipliant à droite et à gauche par  $(I + A)^{-1}$ , la relation

$$(I - A)(I + A)^{-1} = (I + A)^{-1}(I - A).$$

b) On a

$$(I + A)(I + B) = (I + A) + (I - A) = 2I$$

donc  $I + B$  est inversible et

$$(I + B)^{-1} = \frac{1}{2}(I + A)$$

puis

$$(I - B)(I + B)^{-1} = \frac{1}{2}(I + A - (I - A)) = A.$$

**Exercice 31 :** [énoncé]

Supposons  $A$  et  $B$  inversibles. En multipliant à gauche par  $A^{-1}$  et  $B^{-1}$  on obtient  $C = O_n$  ce qui est exclu.

En raisonnant de façon analogue, on exclut les autres cas où deux des trois matrices sont inversibles.

**Exercice 32 :** [énoncé]

On a  $A^2 = 3I + 2A$  donc

$$A^{-1} = \frac{1}{3}(A - 2I)$$

**Exercice 33 :** [énoncé]

- a) En effectuant successivement les opérations élémentaires :  
 $C_2 \leftarrow C_2 + aC_1, C_3 \leftarrow C_3 + aC_2, \dots, C_n \leftarrow C_n + aC_{n-1}$  on obtient :

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 & \dots & a^{n-1} \\ 0 & 1 & a & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & a^2 \\ \vdots & & & \ddots & 1 & a \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- b) En effectuant successivement les opérations élémentaires :  
 $C_n \leftarrow C_n - C_{n-1}, C_{n-1} \leftarrow C_{n-1} - C_{n-2}, \dots, C_2 \leftarrow C_2 - C_1$ , on obtient :

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & & (0) \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & -1 \\ (0) & & & 1 \end{pmatrix}$$

- c) En effectuant successivement les opérations élémentaires :  
 $C_n \leftarrow C_n - C_{n-1}, C_{n-1} \leftarrow C_{n-1} - C_{n-2}, \dots, C_2 \leftarrow C_2 - C_1$ ,  
 puis encore  $C_n \leftarrow C_n - C_{n-1}, C_{n-1} \leftarrow C_{n-1} - C_{n-2}, \dots, C_2 \leftarrow C_2 - C_1$ ,  
 on obtient :

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & & (0) \\ & 1 & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & 1 \\ & & & 1 & -2 \\ (0) & & & & 1 \end{pmatrix}$$

#### Exercice 34 : [énoncé]

Soient  $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ . Sachant

$${}^t(AB) = {}^tB {}^tA$$

on a

$${}^t(AB) = AB \iff BA = AB$$

Le produit de deux matrices symétriques est une matrice symétrique si, et seulement si, les deux matrices commutent.

#### Exercice 35 : [énoncé]

On peut procéder de manière élémentaire, en observant l'écriture

$$M = \frac{1}{2} (M + {}^tM) + \frac{1}{2} (M - {}^tM)$$

avec  $\frac{1}{2} (M + {}^tM) \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  et  $\frac{1}{2} (M - {}^tM) \in \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$

On peut aussi exploiter que l'application  $T: \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  définie par  $T(A) = {}^tA$  est un endomorphisme involutif donc une symétrie vectorielle ce qui assure que les espaces  $\ker(T - \text{Id}) = \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  et  $\ker(T + \text{Id}) = \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$  sont supplémentaires.

#### Exercice 36 : [énoncé]

- a)  $M(a, b, c) = a.I + b.J + c.K$  avec

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, J = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } K = J^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On observe que :  $E = \text{Vect}(I, J, K)$ . Par suite  $E$  un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{M}_3(\mathbb{R})$ .

De plus la famille  $(I, J, K)$  est libre, c'est donc une base de  $E$  et par suite  $\dim E = 3$ .

- b) De plus  $I \in E$ ,  $M(a, b, c) - M(a', b', c') = M(a - a', b - b', c - c') \in E$  et  
 $M(a, b, c)M(a', b', c') = (aI + bJ + cK)(a'I + b'J + c'K) =$   
 $aa'I + (ab' + a'b)J + (ac' + bb' + ca')K \in E$ .

Donc  $E$  est un sous-anneau de  $\mathcal{M}_3(\mathbb{R})$ .

De plus  $M(a, b, c)M(a', b', c') = M(a', b', c')M(a, b, c)$ , donc  $E$  est un anneau commutatif.

- c)  $A$  est inversible si, et seulement si,  $a \neq 0$  (ici  $A$  est triangulaire supérieure)  
 $f(\lambda.X + \mu.Y) = A(\lambda.X + \mu.Y) = \lambda.AX + \mu.AY = \lambda.f(X) + \mu.f(Y)$ .  $f$  est un endomorphisme de  $E$ .

Soit  $X \in E$ , si  $X \in \ker f$  alors  $AX = O$  puis  $A^{-1}AX = O$  d'où  $X = O$ . Par suite  $\ker f = \{0\}$

$f$  est un endomorphisme injectif d'un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie, c'est donc un automorphisme. Par suite il existe  $B \in E$  telle que

$$f(B) = AB = I.$$

En multipliant par  $A^{-1}$ , on conclut  $A^{-1} = B \in E$ .

**Exercice 37 :** [\[énoncé\]](#)

- a)  $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$  la base canonique de  $\mathbb{R}^n$ .  
 Notons  $f_\sigma$  l'endomorphisme canoniquement associé à  $P(\sigma)$ .  
 Pour tout  $1 \leq j \leq n$ , on a  $f_\sigma(e_j) = e_{\sigma(j)}$ .  
 Par suite  $(f_\sigma \circ f_{\sigma'})(e_j) = f_{\sigma \circ \sigma'}(e_j)$  puis  $P(\sigma \circ \sigma') = P(\sigma)P(\sigma')$
- b)  $I_n = P(\text{Id}) \in E$ .  
 $P(\sigma)P(\sigma') = P(\sigma \circ \sigma') \in E$   
 et  $P(\sigma)P(\sigma^{-1}) = P(\sigma \circ \sigma^{-1}) = P(\text{Id}) = I_n$  donc  $P(\sigma) \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$  et  
 $P(\sigma)^{-1} = P(\sigma^{-1}) \in E$ .  
 On peut alors conclure que  $E$  est un sous-groupe de  $\text{GL}_n(\mathbb{R})$ .  
 L'application  $P: \mathfrak{S}_n \rightarrow E$  qui à  $\sigma$  associe  $P(\sigma)$  est un morphisme de groupe surjectif.  
 Soit  $\sigma \in \ker P$ , on a  $P(\sigma) = I_n$  donc  $\forall 1 \leq j \leq n, \sigma(j) = j$  soit  $\sigma = \text{Id}$ .
- c)
- $${}^t P(\sigma) = (\delta_{j, \sigma(i)})_{i,j} = (\delta_{\sigma^{-1}(j), i})_{i,j} = (\delta_{i, \sigma^{-1}(j)})_{i,j} = P(\sigma^{-1})$$

**Exercice 38 :** [\[énoncé\]](#)

- a)  $E = \text{Vect}(I, J)$  avec
- $$J = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$$
- La famille  $(I, J)$  forme une base de  $E$  car cette famille est évidemment libre.
- b)  $E \subset \mathcal{M}_2(\mathbb{K})$ ,  $I \in E$ . Soient  $A = aI + bJ \in E$  et  $B = cI + dJ \in E$ .  
 $A - B = (a - c)I + (b - d)J \in E$  et  $AB = (ac)I + (ad + bc)J$  car  $J^2 = O$ .  
 Ainsi  $E$  est un sous-anneau de  $\mathcal{M}_2(\mathbb{K})$ . De plus  $AB = BA$  donc  $E$  commutatif.
- c) Avec les notations précédentes  $AB = I$  si, et seulement si,
- $$\begin{cases} ac = 1 \\ ad + bc = 0 \end{cases}$$
- Par suite  $A$  est inversible si, et seulement si,  $a \neq 0$ .
- d) Avec les notations précédentes  $AB = O_2$  si et seulement si
- $$\begin{cases} ac = 0 \\ ad + bc = 0 \end{cases}$$

Les diviseurs de zéros sont donc les matrices

$$\begin{pmatrix} b & b \\ -b & -b \end{pmatrix} \text{ avec } b \in \mathbb{K}$$

**Exercice 39 :** [\[énoncé\]](#)

- a)  $C \subset \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  et  $O_n \in C$ .  
 Soient  $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$  et  $A, B \in C$ .  
 Pour tout  $(i, j) \in \llbracket 1; n \rrbracket^2$ ,

$$(\lambda A + \mu B)_{n+1-i, n+1-j} = \lambda A_{n+1-i, n+1-j} + \mu B_{n+1-i, n+1-j} = \lambda A_{i,j} + \mu B_{i,j}$$

et donc

$$(\lambda A + \mu B)_{n+1-i, n+1-j} = (\lambda A + \mu B)_{i,j}$$

On en déduit  $\lambda A + \mu B \in C$ .

Ainsi  $C$  est un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .

- b) Soient  $A, B \in C$ .  
 Pour tout  $(i, j) \in \llbracket 1; n \rrbracket^2$ ,

$$(AB)_{i,j} = \sum_{k=1}^n a_{i,k} b_{k,j}$$

donc

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

Par le changement d'indice  $\ell = n + 1 - k$

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

et puisque  $A$  et  $B$  sont centro-symétriques

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

Ainsi  $AB \in C$ .

- c) L'application  $\varphi: X \in C \mapsto AX$  est linéaire et c'est évidemment un endomorphisme de  $C$  car  $C$  est stable par produit.  
 Soit  $X \in \ker \varphi$ . On a  $AX = O_n$  donc  $A^{-1}(AX) = O_n$  puis  $X = O_n$ .  
 On en déduit que l'endomorphisme  $\varphi$  est injectif, or  $C$  est un espace vectoriel de dimension finie, donc  $\varphi$  est un automorphisme de  $C$ .  
 Puisque la matrice  $I_n$  est centro-symétrique, par surjectivité de  $\varphi$ , il existe  $B \in C$  vérifiant  $AB = I_n$ . Or  $A^{-1}(AB) = A^{-1}$  donc  $B = A^{-1}$  puis  $A^{-1} \in C$ .

**Exercice 40 :** [\[énoncé\]](#)

On note  $A$  la représentation matricielle cherchée.

a)

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

b)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

c)

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

d)

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 \\ 1 & 3 & 9 & 27 \\ 1 & 4 & 16 & 64 \end{pmatrix}$$

**Exercice 41 :** [\[énoncé\]](#)

a) Pour  $u = (x, y, z)$  calculons  $p(u) = (x', y', z')$ .

Comme  $p(u) - u \in D$ , il existe  $\lambda \in \mathbb{K}$  tel que  $p(u) = u + \lambda.w$ .

Comme  $p(u) \in P$  on a  $x' + 2y' - z' = 0$  ce qui donne

$$\lambda = -(x + 2y - z)/2$$

et donc

$$p(u) = ((x - 2y + z)/2, y, (x + 2y + z)/2)$$

Par suite

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(p) = \begin{pmatrix} 1/2 & -1 & 1/2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1/2 & 1 & 1/2 \end{pmatrix}$$

b) Comme  $q = I - p$  et  $s = 2p - I$ ,

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(q) = \begin{pmatrix} 1/2 & 1 & -1/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1/2 & -1 & 1/2 \end{pmatrix} \text{ et } \text{Mat}_{\mathcal{B}}(s) = \begin{pmatrix} 0 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

**Exercice 42 :** [\[énoncé\]](#)

a) Les colonnes de  $A$  sont formées des coefficients de

$$\varphi(X^j) = (X + 1)^j = \sum_{i=0}^j \binom{j}{i} X^i$$

Ainsi  $A = (a_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n+1} \in \mathcal{M}_{n+1}(\mathbb{R})$  avec

$$a_{i,j} = \binom{j-1}{i-1} \text{ si } i \leq j \text{ et } a_{i,j} = 0 \text{ sinon}$$

b) L'endomorphisme  $\varphi$  est inversible avec

$$\varphi^{-1}(P) = P(X - 1)$$

On en déduit  $\varphi^{-1}(X^j) = (X - 1)^j$  d'où

$$A^{-1} = ((-1)^{j-i} a_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n+1}$$

**Exercice 43 :** [\[énoncé\]](#)

a) Pour  $0 \leq k \leq n$ ,

$$\varphi(X^k) = \sum_{i=0}^n \binom{k}{i} X^i = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} X^i = (X + 1)^k$$

On en déduit

$$\varphi(P) = P(X + 1)$$

b)  $\varphi^m(P) = P(X + m)$  donc

$$\varphi(X^k) = (X + m)^k = \sum_{i=0}^n \binom{k}{i} m^{k-i} X^i$$

d'où

$$A^m = (m^{j-i} a_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n+1}$$

c)  $\varphi^{-1}(P) = P(X - 1)$  donc

$$\varphi^{-1}(X^k) = (X - 1)^k$$

d'où

$$A^{-1} = ((-1)^{j-i} a_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n+1}$$

**Exercice 44 :** [\[énoncé\]](#)

- a) Posons  $x = \operatorname{Re}(a)$  et  $y = \operatorname{Im}(a)$ .  
 $f(1) = 1 + x + iy$  et  $f(i) = i - ai = y + i(1 - x)$ .  
 La matrice de  $f$  dans la base  $(1, i)$  est donc

$$\begin{pmatrix} 1+x & y \\ y & 1-x \end{pmatrix}$$

- b) Si  $|a| \neq 1$  alors  $\det f \neq 0$ .  $\operatorname{Im} f = \mathbb{C}$  et  $\ker f = \{0\}$ .  
 Si  $|a| = 1$  alors  $\det f = 0$  et  $f \neq 0$ .  $f$  est un endomorphisme de rang 1.  
 On a  $f(e^{i\theta/2}) = 2e^{i\theta/2}$  et  $f(e^{i(\theta+\pi)/2}) = 0$  donc  $\operatorname{Im} f = \operatorname{Vect}\{e^{i\theta/2}\}$  et  $\ker f = i \operatorname{Im} f$ .

**Exercice 45 :** [\[énoncé\]](#)

Comme  $f^2 \neq 0$ , il existe  $x \in E$  tel que  $f^2(x) \neq 0$ . Posons

$$e_1 = x, e_2 = f(x), e_3 = f^2(x)$$

Si  $\lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2 + \lambda_3 e_3 = 0$  alors

$$\lambda_1 x + \lambda_2 f(x) + \lambda_3 f^2(x) = 0$$

En appliquant  $f^2$  à cette relation, on a  $\lambda_1 f^2(x) = 0$  car on sait  $f^3 = 0$ .  
 Puisque  $f^2(x) \neq 0$ , on a  $\lambda_1 = 0$  et sans plus de difficultés on montre aussi  $\lambda_2 = 0$  et  $\lambda_3 = 0$ .

La famille  $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$  est libre en dimension 3, c'est donc une base de  $E$ . La matrice de  $f$  dans celle-ci est comme voulue.

**Exercice 46 :** [\[énoncé\]](#)

- a) Comme  $f^{n-1} \neq 0, \exists x \in E, f^{n-1}(x) \neq 0$ .  
 Si  $\lambda_0 x + \lambda_1 f(x) + \dots + \lambda_{n-1} f^{n-1}(x) = 0$  alors :  
 en composant avec  $f^{n-1}$ , on obtient  $\lambda_0 f^{n-1}(x) = 0$  d'où  $\lambda_0 = 0$ .  
 en composant successivement avec  $f^{n-2}, \dots, f, I$ , on obtient successivement  
 $\lambda_1 = 0, \dots, \lambda_{n-2} = 0, \lambda_{n-1} = 0$   
 Par suite  $\mathcal{B} = (x, f(x), f^2(x), \dots, f^{n-1}(x))$  est libre et forme donc une base de  $E$ .

- b) On a

$$\operatorname{Mat}_{\mathcal{B}} f = \begin{pmatrix} 0 & & & (0) \\ 1 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & \\ (0) & & 1 & 0 \end{pmatrix} = A$$

puis

$$\operatorname{Mat}_{\mathcal{B}}(f^2) = A^2 = \begin{pmatrix} 0 & & & (0) \\ 0 & \ddots & & \\ 1 & \ddots & \ddots & \\ (0) & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \dots,$$

$$\operatorname{Mat}_{\mathcal{B}}(f^{n-1}) = A^{n-1} = \begin{pmatrix} 0 & & & (0) \\ 0 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & \\ 1 & & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- c) Notons  $C(f) = \{g \in \mathcal{L}(E) \mid g \circ f = f \circ g\}$ .  
 Il est clair que  $\operatorname{Vect}(I, f, f^2, \dots, f^{n-1}) \subset C(f)$ .  
 Inversement, soit  $g \in C(f)$ , notons  $a_0, \dots, a_{n-1}$  les composantes de  $g(x)$  dans  $\mathcal{B}$ . On a

$$\begin{cases} g(x) = a_0 x + a_1 f(x) + \dots + a_{n-1} f^{n-1}(x) \\ g(f(x)) = f(g(x)) = a_0 f(x) + \dots + a_{n-2} f^{n-1}(x) \\ \vdots \\ g(f^{n-1}(x)) = f^{n-1}(g(x)) = a_0 f^{n-1}(x) \end{cases}$$

Par suite

$$\operatorname{Mat}_{\mathcal{B}} g = \begin{pmatrix} a_0 & & & (0) \\ a_1 & \ddots & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \\ a_{n-1} & \dots & a_1 & a_0 \end{pmatrix} = a_0 I + a_1 A + \dots + a_{n-1} A^{n-1}$$

Donc  $g = a_0 I + a_1 f + \dots + a_{n-1} f^{n-1} \in \operatorname{Vect}(I, f, \dots, f^{n-1})$ .  
 Ainsi

$$C(f) = \operatorname{Vect}(I, f, f^2, \dots, f^{n-1})$$

**Exercice 47 :** [\[énoncé\]](#)

a)

$$A^2 = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} = A$$

donc  $f$  est une projection vectorielle.

b) En résolvant les équations  $f(x) = x$  et  $f(x) = 0$  on obtient que  $(u, v)$  forme une base de  $\text{Im } f$  et  $(w)$  forme une base de  $\ker f$  avec  $u = i + j, v = i + k$  et  $w = i + j + k$ .

c)

$$\text{Mat}_{(u,v,w)} f = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

#### Exercice 48 : [énoncé]

a)  $\ker f = \text{Vect}(u)$  avec  $u = (1, 1, 1)$ .  $\text{Im } f = \text{Vect}(v, w)$  avec  $v = (2, -1, -1), w = (-1, 2, -1)$ .

Comme  $\mathcal{C} = (u, v, w)$  est libre on peut conclure que  $\ker f$  et  $\text{Im } f$  sont supplémentaires dans  $\mathbb{R}^3$ .

b)  $\mathcal{C}$  est une base adaptée à la supplémentarité de  $\ker f$  et  $\text{Im } f$ .

$$\text{Mat}_{\mathcal{C}} f = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

c)  $f$  est la composée, commutative, de l'homothétie vectorielle de rapport 3 avec la projection vectorielle sur  $\text{Im } f$  parallèlement à  $\ker f$ .

#### Exercice 49 : [énoncé]

Soit  $x \notin \ker f^{n-1}$ . Un tel  $x$  existe puisque  $f^{n-1} \neq 0$ .

Considérons la famille  $\mathcal{B} = (f^{n-1}(x), \dots, f(x), x)$ .

Supposons

$$\lambda_{n-1}f^{n-1}(x) + \dots + \lambda_1f(x) + \lambda_0x = 0_E$$

En y appliquant successivement  $f^{n-1}, \dots, f, \text{Id}$  on obtient  $\lambda_0 = 0, \dots, \lambda_{n-2} = 0$  puis  $\lambda_{n-1} = 0$  car  $f^{n-1}(x) \neq 0_E$ .

$\mathcal{B}$  est une famille libre formée de  $n = \dim E$  vecteurs, c'est donc une base de  $E$ .

De plus  $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$  est de la forme convenable.

#### Exercice 50 : [énoncé]

Posons  $r = \text{rg } f$  et  $(f(e_1), \dots, f(e_r))$  une base de  $\text{Im } f$ .

Puisque  $f^2 = 0$ , la famille  $\mathcal{B} = (f(e_1), \dots, f(e_r))$  est formée de vecteurs de  $\ker f$ , de plus elle est libre, on peut donc la compléter en une base de la forme

$\mathcal{B}' = (f(e_1), \dots, f(e_r), \varepsilon_{r+1}, \dots, \varepsilon_p)$  avec  $p = \dim \ker f$ .

Considérons  $\mathcal{C} = (f(e_1), \dots, f(e_r), \varepsilon_{r+1}, \dots, \varepsilon_p, e_1, \dots, e_r)$ .

En vertu du théorème du rang, cette famille est formée de  $\dim E$  vecteurs.

De plus si l'on dispose d'une combinaison linéaire nulle des vecteurs de  $\mathcal{C}$ , en appliquant  $f$  et en exploitant la liberté de  $\mathcal{B}$ , on justifie que les coefficients devant les  $e_1, \dots, e_r$  sont nuls. Ensuite, sachant  $\mathcal{B}'$  libre, on conclut que les autres coefficients sont nuls. La famille  $\mathcal{B}$  est une base et la matrice de  $f$  dans  $\mathcal{C}$  est de la forme voulue.

#### Exercice 51 : [énoncé]

a) On vérifie que la famille  $\mathcal{B}'$  est libre, puis c'est une base car formée de trois vecteurs en dimension 3.

b) Par calcul matriciel

$$f(\varepsilon_1) = \varepsilon_1, f(\varepsilon_2) = 2\varepsilon_2, f(\varepsilon_3) = 0$$

et donc

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}'} f = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

c) On observe que  $\varepsilon_3 \in \ker f$  et  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in \text{Im } f$ .

Le théorème du rang permet de conclure :  $(\varepsilon_3)$  est une base de  $\ker f$  et  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  est une base de  $\text{Im } f$ .

#### Exercice 52 : [énoncé]

a) On vérifie aisément que famille  $\mathcal{C}$  est libre et c'est donc une base de  $\mathbb{R}^3$ .

b)  $f(\varepsilon_1) = \varepsilon_1, f(\varepsilon_2) = \varepsilon_2$  et  $f(\varepsilon_3) = \varepsilon_1 + \varepsilon_3$  donc

$$\text{Mat}_{\mathcal{C}} f = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

c) Par récurrence :

$$\text{Mat}_{\mathcal{C}}(f^n) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & n \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Par changement de bases avec

$$P = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } P^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

on obtient

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f^n) = \begin{pmatrix} n+1 & n & -n \\ 0 & 1 & 0 \\ n & n & 1-n \end{pmatrix}$$

### Exercice 53 : [énoncé]

a)  $\mathcal{B}'$  est libre et formée de trois vecteurs en dimension 3, c'est une base de  $E$ .

$f(\varepsilon_1) = \varepsilon_1, f(\varepsilon_2) = 2\varepsilon_2, f(\varepsilon_3) = 3\varepsilon_3$  donc  $D = \text{diag}(1, 2, 3)$ .

b)

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}, P^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

c) Par formule de changement base

$$A = PDP^{-1}$$

d) Puisqu'il est facile de calculer  $D^n$

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

### Exercice 54 : [énoncé]

a) En résolvant les équations :  $f(u) = 0, f(u) = u$  et  $f(u) = 2u$  on trouve que

$\varepsilon_1 = e_1 + e_2 + e_3, \varepsilon_2 = e_2 - e_3$  et  $\varepsilon_3 = e_1 + e_3$  sont des vecteurs tels que

$f(\varepsilon_1) = 0, f(\varepsilon_2) = \varepsilon_2, f(\varepsilon_3) = 2\varepsilon_3$ .

On vérifie aisément que la famille  $\mathcal{C}$  est libre et c'est donc une base de  $E$ , celle-ci convient.

b) On a

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}, P^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

c) Par changement de base

$$A^n = P D^n P^{-1} = \begin{pmatrix} 2^{n+1} & -2^n & -2^n \\ 1 & 0 & -1 \\ 2^{n+1} - 1 & -2^n & 1 - 2^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} + 2^n \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

d) Posons  $X_n = {}^t(x_n \ y_n \ z_n)$ . On observe  $X_{n+1} = A X_n$ . Par récurrence  $X_n = A^n X_0$ .

Avec  $X_0 = {}^t(1 \ 0 \ 0)$  on obtient

$$\begin{cases} x_n = 2^{n+1} \\ y_n = 1 \\ z_n = 2^{n+1} - 1 \end{cases}$$

### Exercice 55 : [énoncé]

a)  $P$  est la matrice de l'application  $\text{Id}_E$  dans les bases  $B$  au départ et  $b$  à l'arrivée.

La relation  $x = \text{Id}_E(x)$  donne matriciellement  $v = PV$ .

b) La relation  $f = \text{Id}_E^{-1} \circ f \circ \text{Id}_E$  donne matriciellement  $M = P^{-1}mP$ .

c) Dans une base de vecteurs propres, la matrice de  $f$  est diagonale et ses puissances sont alors faciles à calculer. Par changement de base, on en déduit  $m^n$ .

### Exercice 56 : [énoncé]

a) On vérifie aisément que la famille  $\mathcal{B}'$  est libre et c'est donc une base de  $E$ .

$f(\varepsilon_1) = \varepsilon_1, f(\varepsilon_2) = \varepsilon_2, f(\varepsilon_3) = \varepsilon_3 + \varepsilon_1$  donc

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}'} f = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = B$$

b) Par récurrence

$$B^n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & n \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

puis  $A^n = PB^nP^{-1}$  avec

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } P^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

d'où

$$A^n = \begin{pmatrix} 1-n & n & n \\ 0 & 1 & 0 \\ -n & n & n+1 \end{pmatrix}$$

### Exercice 57 : [énoncé]

a) On vérifie aisément que la famille  $\mathcal{B}'$  est libre et c'est donc une base de  $E$ .  
 $f(\varepsilon_1) = \varepsilon_1, f(\varepsilon_2) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, f(\varepsilon_3) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  donc

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}'} f = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = B$$

b)  $B = I_3 + J$  avec

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, J^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Puisque  $I_3$  et  $J$  commutent la formule du binôme donne

$$B^n = I_3 + nJ + \frac{n(n-1)}{2}J^2$$

car  $J^k = O_3$  pour  $k \geq 3$ .

Par formule de changement de base, on obtient

$$A^n = \begin{pmatrix} 1 - \frac{n(n+1)}{2} & \frac{n(n+3)}{2} & \frac{n(n+1)}{2} \\ -n & n+1 & n \\ -\frac{n(n-1)}{2} & \frac{n(n+1)}{2} & 1 + \frac{n(n-1)}{2} \end{pmatrix}$$

### Exercice 58 : [énoncé]

a) En recherchant des vecteurs tels que  $f(x) = x, f(x) = 2x$  et  $f(x) = 3x$  on observe que  $\varepsilon_1 = (-1, 1, 2), \varepsilon_2 = (0, 1, 1)$  et  $\varepsilon_3 = (1, 1, 1)$  conviennent. De plus ces trois vecteurs forment une famille libre et donc une base de  $\mathbb{R}^3$ .

b)

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

c) Par changement base

$$A = PDP^{-1}$$

d) Sachant calculer  $D^n$  on obtient

$$A^n = \begin{pmatrix} 3^n & 1-3^n & -1+3^n \\ -2^n+3^n & -1+3 \cdot 2^n-3^n & 1-2 \cdot 2^n+3^n \\ -2^n+3^n & -2+3 \cdot 2^n-3^n & 2-2 \cdot 2^n+3^n \end{pmatrix}$$

qu'on peut encore écrire

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

### Exercice 59 : [énoncé]

a)  $\text{rg}(x_1, x_2, x_3) = 3$  b)  $\text{rg}(x_1, x_2, x_3) = 3$  c)  $\text{rg}(x_1, x_2, x_3) = 2$

### Exercice 60 : [énoncé]

a)  $\text{rg}(f) = 3$

b)  $\text{rg}(f) = 2$

c)  $\text{rg}(f) = 4$ .

### Exercice 61 : [énoncé]

a) Notons  $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ b+c & c+a & a+b \\ bc & ca & ab \end{pmatrix}$ ,

$$\operatorname{rg}(A) = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & a-b & a-c \\ 0 & c(a-b) & b(a-c) \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & a-b & a-c \\ 0 & 0 & (b-c)(a-c) \end{pmatrix}$$

En discutant les 5 cas possibles :  $\operatorname{rg}(A) = \operatorname{Card} \{a, b, c\}$ .

b) Notons  $A = \begin{pmatrix} 1 & \cos \theta & \cos 2\theta \\ \cos \theta & \cos 2\theta & \cos 3\theta \\ \cos 2\theta & \cos 3\theta & \cos 4\theta \end{pmatrix}$ .

$$\operatorname{rg}(A) = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \sin 2\theta \\ \cos 2\theta & \sin \theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta \end{pmatrix}$$

Si  $\sin \theta = 0$  alors  $\operatorname{rg}(A) = 1$ .

Si  $\sin \theta \neq 0$  alors

$$\operatorname{rg}(A) = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \times \sin^2 \theta \\ \cos 2\theta & \sin \theta \sin 2\theta & 2 \cos \theta \times \sin \theta \sin 2\theta \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \cos \theta & \sin^2 \theta \\ \cos 2\theta & \sin \theta \sin 2\theta \end{pmatrix}$$

Résumons : Si  $\theta \neq 0 \pmod{\pi}$ ,  $\operatorname{rg}(A) = 2$ , sinon  $\operatorname{rg}(A) = 1$ .

c) Notons  $A$  la matrice étudiée.

Cas  $a = b = 0$  alors  $\operatorname{rg}(A) = 0$  car la matrice  $A$  est nulle.

Cas  $a = 0$  et  $b \neq 0$  alors  $\operatorname{rg}(A) = n$  car les  $n$  colonnes de  $A$  sont indépendantes.

Cas  $a \neq 0$  :

En effectuant successivement :

$C_2 \leftarrow aC_2 - bC_1, C_3 \leftarrow a^2C_3 - bC_2, \dots, C_n \leftarrow a^{n-1}C_n - bC_{n-1}$  on obtient :

$$\operatorname{rg}(A) = \begin{pmatrix} a & & & \\ & \ddots & & \\ & & a & \\ & & & a^n - (-1)^n b^n \end{pmatrix}$$

(il y a conservation du rang car  $a \neq 0$ ).

Donc si  $a^n = (-b)^n$  alors  $\operatorname{rg}(A) = n - 1$ , sinon  $\operatorname{rg}(A) = n$ .

### Exercice 62 : [énoncé]

a) En retirant la première ligne à la dernière

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \ddots & 1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & -1 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

puis en ajoutant la deuxième ligne à la dernière etc.

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \ddots & 1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 - (-1)^n \end{pmatrix}$$

Si  $n$  est pair alors  $\operatorname{rg} M = n - 1$ , sinon  $\operatorname{rg} M = n$ .

b) Dans le cas  $n$  impair c'est immédiat.

Dans le cas  $n$  pair :  $\ker M = \operatorname{Vect}^t(1 \ -1 \ \cdots \ 1 \ -1)$  et

$\operatorname{Im} M : x_1 - x_2 + x_3 + \cdots + x_{n-1} - x_n = 0$ .

c)  $M = I + N$  avec la matrice de permutation

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \ddots & 1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On en déduit

$$M^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} N^k = \begin{pmatrix} 2C_n^0 & C_n^1 & C_n^2 & \cdots & C_n^{n-1} \\ C_n^{n-1} & 2C_n^0 & C_n^1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & C_n^2 \\ C_n^2 & & \ddots & \ddots & C_n^1 \\ C_n^1 & C_n^2 & \cdots & C_n^{n-1} & 2C_n^0 \end{pmatrix}$$

en notant  $C_n^k = \binom{n}{k}$ .

**Exercice 63 :** [énoncé]

Soit  $u$  et  $v$  les endomorphismes de  $\mathbb{R}^3$  canoniquement associés à  $A$  et  $B$ .  
 Comme  $u \circ v = 0$ , on a  $\text{Im } v \subset \ker u$ , puis  $\text{rg}(v) = 3 - \dim \ker v \leq \dim \ker u$ .  
 Par suite  $\dim \ker u + \dim \ker v \geq 3$ , puis  $\dim \ker u \geq 2$  ou  $\dim \ker v \geq 2$ .  
 On a alors respectivement  $\text{rg}(u) = \text{rg}(A) \leq 1$  ou  $\text{rg}(v) = \text{rg}(B) \leq 1$ .

**Exercice 64 :** [énoncé]

a) De part leurs tailles, on sait déjà

$$\text{rg } A \leq 2 \text{ et } \text{rg } B \leq 2$$

Aussi

$$\text{rg}(AB) = 2 \text{ et } \text{rg}(AB) \leq \min(\text{rg } A, \text{rg } B)$$

On en déduit

$$\text{rg}(A) = \text{rg}(B) = 2$$

b) On a  $ABAB = AB$  donc  $A(BA - I_2)B = O_3$ .

On en déduit  $\text{Im}((BA - I_2)B) \subset \ker A = \{0\}$  donc  $(BA - I_2)B = O_{2,3}$ .

Par suite  $\text{Im } B \subset \ker(BA - I_2)$  or  $B$  est surjective donc  $BA - I_2 = O_2$  puis

$$BA = I_2$$

**Exercice 65 :** [énoncé]

On a  $A(BA - I_2)B = 0$ .

Or puisque  $A$  est de rang 2,  $\ker A = \{0\}$  et donc  $(BA - I_2)B = 0$ .

De plus, puisque  $B$  est de rang 2,  $\text{Im } B = \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$  et donc  $BA - I_2 = 0$ .

**Exercice 66 :** [énoncé]

Commençons par noter que le neutre multiplicatif de  $G$  n'est pas nécessairement  $I_n$ . Par exemple,  $G = \{O_n\}$  est un groupe multiplicatif formé d'éléments de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ .

Notons  $J$  le neutre du groupe  $G$ . Soit  $A \in G$ .

D'une part  $JA = A$  donc  $\text{rg}(A) = \text{rg}(JA) \leq \text{rg}(J)$ .

D'autre part, il existe  $B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  tel que  $AB = J$  donc  $\text{rg}(J) = \text{rg}(AB) \leq \text{rg}(A)$ .

Finalement,

$$\forall A \in G, \text{rg}(A) = \text{rg}(J).$$

On peut même être plus précis et constater que les matrices de  $A$  ont toutes la même image.

**Exercice 67 :** [énoncé]

Par inclusion et égalité des dimensions, on vérifie  $\ker A = \ker B$ .

Quitte à considérer des matrices semblables, on peut alors supposer que les matrices  $A, B$  s'écrivent par blocs

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & O \\ A_2 & O \end{pmatrix} \text{ et } B = \begin{pmatrix} B_1 & O \\ B_2 & O \end{pmatrix} \text{ avec } A_1, B_1 \in \mathcal{M}_r(\mathbb{C})$$

où  $r$  est le rang commun aux matrices  $A$  et  $B$ . La relation  $A^2B = A$  donne alors

$$A_1^2B_1 = A_1 \text{ et } A_2A_1B_1 = A_2$$

et ainsi

$$A_1(A_1B_1 - I_r) = O \text{ et } A_2(A_1B_1 - I_r) = O$$

Ainsi pour chaque ligne  $L$  de la matrice  $A_1$  ou de la matrice  $A_2$ , on a

$$L(A_1B_1 - I_r) = 0$$

Or la matrice  $A$  est de rang exactement  $r$  est les lignes  $L$  évoquées ci-dessus constituent une base de  $\mathcal{M}_r(\mathbb{C})$ . On en déduit  $A_1B_1 = I_r$ . La matrice  $A_1$  est donc inversible d'inverse  $B_1$  et on a alors

$$B^2A = \begin{pmatrix} B_1^2A_1 & O \\ B_2B_1A_1 & O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 & O \\ B_2 & O \end{pmatrix} = B$$

**Exercice 68 :** [énoncé]

$$\text{a) } \text{rg} \begin{pmatrix} 1 & m & 1 \\ m & 1 & m \end{pmatrix} = \begin{cases} 1 & \text{si } m = \pm 1 \\ 2 & \text{sinon} \end{cases}, \text{ donc } \dim F = \begin{cases} 2 & \text{si } m = \pm 1 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}.$$

$$\text{b) } \text{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & m \\ 1 & m & 1 \\ m & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{cases} 1 & \text{si } m = 1 \\ 2 & \text{si } m = -2 \\ 3 & \text{sinon} \end{cases}, \text{ donc } \dim F = \begin{cases} 2 & \text{si } m = 1 \\ 1 & \text{si } m = -2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}.$$

**Exercice 69 :** [énoncé]

$$\text{a) } \text{rg} \begin{pmatrix} 1 & m & 1 \\ m & 1 & -m \end{pmatrix} = 2 \text{ donc } \dim F = 1 \text{ et } \text{rg} \begin{pmatrix} 1 & -m & 1 \end{pmatrix} = 1 \text{ donc } \dim G = 2.$$

$$b) \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & m & 1 \\ m & 1 & -m \\ 1 & -m & 1 \end{pmatrix} = \begin{cases} 2 & \text{si } m = 0 \\ 3 & \text{sinon} \end{cases} \text{ donc } \dim F \cap G = \begin{cases} 1 & \text{si } m = 0 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

**Exercice 70 :** [énoncé]a) Si  $m = -1$  alors

$$\mathcal{S} = \{(y, y, -1) \mid y \in \mathbb{C}\}$$

Si  $m \neq -1$  alors

$$\mathcal{S} = \left\{ \left( \frac{m+1}{2}, 0, \frac{m-1}{2} \right) \right\}$$

b) On a

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} m & 1 & 1 \\ 1 & m & 1 \\ 1 & 1 & m \end{pmatrix} = \begin{cases} 1 & \text{si } m = 1 \\ 2 & \text{si } m = -2 \\ 3 & \text{sinon} \end{cases}$$

Si  $m \neq 1$  et  $m \neq -2$  alors

$$\mathcal{S} = \left\{ \left( -\frac{1+m}{2+m}, \frac{1}{2+m}, \frac{(1+m)^2}{2+m} \right) \right\}$$

Si  $m = 1$  alors

$$\mathcal{S} = \{(x, y, 1 - x - y) \mid x, y \in \mathbb{C}\}$$

Si  $m = -2$  alors système incompatible

$$\mathcal{S} = \emptyset$$

c) Si  $m = 1$  : système incompatible

$$\mathcal{S} = \emptyset$$

Si  $m \neq 1$ ,

$$\begin{cases} mx + y + z + t = 1 \\ x + my + z + t = m \\ x + y + mz + t = m + 1 \end{cases} \iff \begin{cases} x + y + mz + t = m + 1 \\ (1 - m)y + (m - 1)z = 1 \\ (m + 2)z + t = \frac{m(m+1)}{m-1} \end{cases}$$

et donc

$$S = \left\{ \left( z - \frac{m}{m-1}, y = z - \frac{1}{m-1}, z, \frac{m(m+1)}{m-1} - (m+2)z \right) \mid z \in \mathbb{C} \right\}$$

**Exercice 71 :** [énoncé]

$$\begin{cases} ax + by + z = 1 \\ x + aby + z = b \\ x + by + az = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x + by + az = 1 \\ b(1-a)y + (1-a^2)z = 1-a \\ b(a-1)y + (1-a)z = b-1 \end{cases},$$

$$\begin{cases} x + by + az = 1 \\ b(1-a)y + (1-a^2)z = 1-a \\ (1-a)(2+a)z = b-a \end{cases}$$

Cas  $a \neq 1$ ,  $a \neq -2$  et  $b \neq 0$  :

$$x = \frac{a-b}{(a-1)(a+2)}, y = \frac{ab-2+b}{(a-1)(a+2)b}, z = \frac{a-b}{(a-1)(a+2)}$$

Cas  $a \neq 1$ ,  $a \neq -2$  et  $b = 0$  :

On doit avoir simultanément

$$(1-a^2)z = 1-a \text{ et } (1-a)(2+a)z = -a$$

ce qui est incompatible :  $\mathcal{S} = \emptyset$ .Cas  $a = 1$  alors

$$\begin{cases} x + by + z = 1 \\ 0 = 0 \\ 0 = b - 1 \end{cases}$$

Si  $b \neq 1$  alors  $\mathcal{S} = \emptyset$ .Si  $b = 1$  alors  $\mathcal{S} : x + y + z = 1$ .Cas  $a = -2$  alors

$$\begin{cases} x + by - 2z = 1 \\ 3by - 3z = 3 \\ 0 = b + 2 \end{cases}$$

Si  $b \neq -2$  alors  $\mathcal{S} = \emptyset$ .Si  $b = -2$  alors

$$\begin{cases} x = -1 - 2y \\ z = -1 - 2y \end{cases}$$

**Exercice 72 :** [énoncé]

Par les opérations élémentaires :  $L_n \leftarrow L_n - L_{n-1}, \dots, L_2 \leftarrow L_2 - L_1$  on obtient le système équivalent :

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1 \\ x_2 + \dots + x_n = 0 \\ \vdots \\ x_{n-1} + x_n = 0 \\ x_n = 0 \end{cases}$$

Donc

$$\mathcal{S} = \{(1, 0, \dots, 0)\}$$

**Exercice 73 :** [énoncé]

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 0 \\ x_1 + x_2 + x_3 = 0 \\ x_2 + x_3 + x_4 = 0 \\ \vdots \\ x_{n-2} + x_{n-1} + x_n = 0 \\ x_{n-1} + x_n = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} x_1 = x_1, x_2 = -x_1, x_3 = 0 \\ x_4 = x_1, x_5 = -x_1, x_6 = 0 \\ \dots \\ x_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n \equiv 0 \pmod{3} \\ x_1 & \text{si } n \equiv 1 \pmod{3} \\ -x_1 & \text{si } n \equiv 2 \pmod{3} \end{cases} \\ \dots \\ x_{n-1} + x_n = 0 \end{cases}$$

Donc si  $n \not\equiv 2 \pmod{3}$  alors

$$\mathcal{S} = \{(0, 0, 0)\}$$

et si  $n \equiv 2 \pmod{3}$  alors

$$\mathcal{S} = \{(x, -x, 0, x, -x, 0, \dots, x, -x) \mid x \in \mathbb{C}\}$$

**Exercice 74 :** [énoncé]

Le problème revient à résoudre le système

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = 2a_1 \\ \vdots \\ z_{n-1} + z_n = 2a_{n-1} \\ z_n + z_1 = 2a_n \end{cases}$$

$(n) \leftarrow (n) - (1)$  donne

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = 2a_1 \\ \vdots \\ z_{n-1} + z_n = 2a_{n-1} \\ z_n - z_2 = 2a_n - 2a_1 \end{cases}$$

$(n) \leftarrow (n) + (2)$  donne

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = 2a_1 \\ \vdots \\ z_{n-1} + z_n = 2a_{n-1} \\ z_n + z_3 = 2(a_n - a_1 + a_2) \end{cases}$$

etc.

On obtient au final

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = 2a_1 \\ \vdots \\ (1 - (-1)^n) z_n = 2(a_n - a_1 + a_2 + \dots + (-1)^n a_{n-1}) \end{cases}$$

On peut alors conclure :

- Si  $n$  est impair, le système est de Cramer et donc possède une solution unique.
- Si  $n$  est pair alors le système possède une solution si, et seulement si,

$$a_1 - a_2 + \dots + a_{n-1} - a_n = 0$$

**Exercice 75 :** [énoncé]

$$\begin{cases} ax + 2by + 2z = 1 \\ 2x + aby + 2z = b \\ 2x + 2by + az = 1 \end{cases} \iff \begin{cases} 2x + 2by + az = 1 \\ b(a - 2)y + (2 - a)z = b - 1 \\ (a - 2)x + (2 - a)z = 0 \end{cases}$$

Si  $a = 2$ , on parvient au système

$$\begin{cases} 2x + 2by + 2z = 1 \\ 0 = b - 1 \end{cases}$$

Dans le cas  $b \neq 1$ , le système est incompatible.

Dans le cas  $b = 1$ , on parvient à l'équation  $2x + 2y + 2z = 1$ .

Si  $a \neq 2$ , on parvient au système

$$\begin{cases} 2x + 2by + az = 1 \\ by - z = \frac{b-1}{a-2} \\ x - z = 0 \end{cases}$$

puis

$$\begin{cases} (a+4)z = \frac{a-2b}{a-2} \\ by = z + \frac{b-1}{a-2} \\ x = z \end{cases}$$

Dans le cas  $a = -4$ , le système n'est compatible que si  $b = -2$  et on parvient au système

$$\begin{cases} x = z \\ -4y = 2z + 1 \end{cases}$$

Dans le cas  $b = 0$ , le système est incompatible.

Dans le cas général restant, on parvient à

$$x = z = \frac{a-2b}{(a-2)(a+4)}, y = \frac{ab+2b-4}{b(a-2)(a+4)}$$

### Exercice 76 : [énoncé](#)

Le déterminant de ce système carré est  $(a-1)^3(a+3)$ .

Cas  $a = 1$  :

Le système est compatible si, et seulement si,  $b = 1$  et ses solutions sont les quadruplets  $(x, y, z, t)$  vérifiant

$$x + y + z + t = 1$$

Cas  $a = -3$  :

En sommant les quatre équations, on obtient l'équation de compatibilité  $0 = 1 + b + b^2 + b^3$ .

Si  $b \notin \{i, -1, -i\}$  alors le système est incompatible.

Si  $b \in \{i, -1, -i\}$  alors le système équivaut à

$$\begin{cases} x - 3y + z + t = b \\ x + y - 3z + t = b^2 \\ x + y + z - 3t = b^3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x - 3y + z + t = b \\ 4y - 4z = b^2 - b \\ 4y - 4t = b^3 - b \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = y + \frac{1}{2}b + \frac{1}{4}b^2 + \frac{1}{4}b^3 \\ z = y + \frac{1}{4}(b - b^2) \\ t = y + \frac{1}{4}(b - b^3) \end{cases}$$

ce qui permet d'exprimer la droite des solutions.

Cas  $a \notin \{1, -3\}$  :

C'est un système de Cramer...

Sa solution est

$$x = \frac{2 + a - b - b^2 - b^3}{2a - 3 + a^2}, y = \frac{ab - 1 + 2b - b^2 - b^3}{2a - 3 + a^2},$$

$$z = \frac{ab^2 - 1 - b + 2b^2 - b^3}{2a - 3 + a^2}, t = \frac{ab^3 - 1 - b - b^2 + 2b^3}{2a - 3 + a^2}$$

### Exercice 77 : [énoncé](#)

- Si  $A$  n'est pas inversible alors  $\text{rg } A < n$ . Or il est possible de construire une matrice nilpotente de rang égal à  $\text{rg } A$ . Deux matrices étant équivalentes si, et seulement si, elles ont le même rang, on peut conclure que  $A$  est équivalente à une matrice nilpotente. La réciproque est immédiate.
- Si  $A$  est inversible alors  $f(A)f(A^{-1}) = f(I_n) = 1$  donc  $f(A) \neq 0$ . Si  $A$  n'est pas inversible alors  $A$  est équivalente à une matrice nilpotente  $B$ . Pour celle-ci, on a  $f(B) = 0$  car  $f(B^n) = f(B)^n$ . Puisqu'on peut écrire  $A = PBQ$  avec  $P$  et  $Q$  inversibles, on peut conclure  $f(A) = 0$ .

### Exercice 78 : [énoncé](#)

La matrice est équivalente à la matrice  $J_r = \begin{pmatrix} I_r & O_{r,n-r} \\ O_{n-r,r} & O_{n-r} \end{pmatrix}$  et donc il existe

des matrices  $P, Q$  inversibles vérifiant  $A = QJ_rP$ . Par suite

$ABA = O_n \iff J_rPBQJ_r = O_n$ . Via l'isomorphisme  $B \mapsto PBQ$ , l'espace  $\{B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid ABA = O_n\}$  est isomorphe à  $\{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid J_rMJ_r = O_n\}$ .

En écrivant la matrice  $M$  par blocs, on vérifie que les matrices  $M$  vérifiant

$J_rMJ_r = O_n$  sont les matrices de la forme  $\begin{pmatrix} O_r & * \\ * & * \end{pmatrix}$ . On en déduit

$\dim \{B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid ABA = O_n\} = n^2 - r^2$ .

**Exercice 79 :** [énoncé]

- a) Posons  $r = \text{rg } A$  et  $s = \text{rg } B$ . Les matrices  $A$  et  $B$  sont respectivement équivalentes aux matrices

$$J_r = \begin{pmatrix} I_r & O_{r,n-r} \\ O_{n-r,r} & O_{n-r} \end{pmatrix} \text{ et } J'_s = \begin{pmatrix} O_{n-s} & O_{n-s,s} \\ O_{s,n-s} & I_s \end{pmatrix}$$

Il existe donc  $P, Q, R, S \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$  telles que

$$PAQ = J_r \text{ et } RBS = J'_s$$

et alors

$$PAQ + RBS = J_r + J'_s$$

qui est une matrice de rang  $\min(n, r + s)$ .

On peut aussi écrire

$$(R^{-1}P)A + B(SQ^{-1}) = R^{-1}(J_r + J'_s)Q^{-1}$$

et en posant  $U = R^{-1}P$  et  $V = SQ^{-1}$ , on obtient  $U, V \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$  telles que

$$\text{rg}(UA + BV) = \min(n, r + s)$$

- b) Si  $r + s \geq n$  alors  $\min(n, r + s) = n$  et ce qui précède conduit à une matrice inversible.

**Exercice 80 :** [énoncé]

- a) Posons  $r = \text{rg } C$ . On peut écrire  $C = QJ_rP$  avec  $P, Q$  inversibles et

$$J_r = \begin{pmatrix} I_r & (0) \\ (0) & O_{n-r} \end{pmatrix}$$

Posons alors  $X = QJ'_rP$  avec

$$J'_r = \begin{pmatrix} O_r & (0) \\ (0) & I_{n-r} \end{pmatrix}$$

Puisque  $A + X = QI_nP = QP$ , la matrice  $A + X$  est inversible et donc  $\det X = \det(A + X) \neq 0$ .

On en déduit que la matrice  $J'_r$  est l'identité et donc  $r = 0$  puis  $A = O_n$ .

- b) Quand  $X$  parcourt  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  alors  $Y = B + X$  parcourt  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  et en posant  $C = A - B$ , on obtient

$$\forall Y \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), \det(C + Y) = \det Y$$

Ce qui précède permet alors de conclure.

**Exercice 81 :** [énoncé]

Comme  $\text{rg}(A) = r$ , il existe  $(P, Q) \in \text{GL}_p(\mathbb{K}) \times \text{GL}_n(\mathbb{K})$  tel que  $A = QJ_rP$ .

Posons  $D = \begin{pmatrix} I_r & \\ O_{n-r,r} & \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n,r}(\mathbb{K})$  et  $E = \begin{pmatrix} I_r & O_{r,p-r} \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{r,p}(\mathbb{K})$ .

On a  $A = BC$  avec  $B = QD \in \mathcal{M}_{n,r}(\mathbb{K})$  et  $C = EP \in \mathcal{M}_{r,p}(\mathbb{K})$

**Exercice 82 :** [énoncé]

- a)  $A$  est équivalente à la matrice  $J_1 = \text{diag}(1, 0, \dots, 0)$  donc il existe

$P, Q \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$  vérifiant  $A = PJ_1Q$ .

Pour  $C = {}^t(1, 0, \dots, 0)$ , on a  $J_1 = C^tC$  donc  $A = X^tY$  avec  $X = PC$  et  $Y = {}^tQC$ .

- b)  $A^2 = X({}^tYX)^tY$ .  ${}^tYX$  est un scalaire  $\lambda$  donc  $A^2 = X\lambda^tY = \lambda X^tY = \lambda A$ .

**Exercice 83 :** [énoncé]

Il existe une colonne  $X$  telle que  $AX \neq 0$  et alors  $\text{Im } A = \text{Vect}(AX)$ .

$A^2X \in \text{Im } A$  donc il existe  $\lambda \in \mathbb{K}$  tel que  $A^2X = \lambda AX$ .

De plus pour  $Y \in \ker A$ ,  $A^2Y = 0 = \lambda AY$ .

Enfin  $\ker A$  et  $\text{Vect}(X)$  sont supplémentaires dans  $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$  donc  $A^2 = \lambda A$ .

**Exercice 84 :** [énoncé]

- a) Soit  $U$  une colonne non nulle de l'image de  $H$ .

Pour tout  $1 \leq j \leq p$ , la colonne  $C_j$  de  $H$  peut s'écrire  $C_j = \lambda_j U$  avec  $\lambda_j \in \mathbb{K}$ .

La matrice colonne  $V = {}^t(\lambda_1 \dots \lambda_n)$  vérifie alors  $H = U^tV$ .

- b) On a alors  $H^2 = U({}^tVU)^tV$  avec  $\lambda = {}^tVU$  un scalaire donc  $H^2 = \lambda H$  et

$$\lambda = {}^tVU = \text{tr}({}^tVU) = \text{tr}(U^tV) = \text{tr } H$$

c) En développant

$$(I_n + H) \left( I_n - \frac{1}{1 + \operatorname{tr} H} H \right) = I_n + H - \frac{1}{1 + \operatorname{tr} H} H - \frac{1}{1 + \operatorname{tr} H} H^2 = I_n$$

Par le théorème d'inversibilité des matrices, on obtient  $I_n + H$  est inversible et

$$(I_n + H)^{-1} = I_n - \frac{1}{1 + \operatorname{tr} H} H$$

d) On a  $\operatorname{rg}(HA^{-1}) = \operatorname{rg} H = 1$  car on ne modifie pas le rang en multipliant par une matrice inversible.

On en déduit que  $I_n + HA^{-1}$  est inversible et

$$(I_n + HA^{-1})^{-1} = I_n - \frac{1}{1 + \operatorname{tr}(HA^{-1})} HA^{-1}$$

En multipliant par la matrice inversible  $A$ , on obtient

$A + H = (I_n + HA^{-1}) A$  inversible et

$$(A + H)^{-1} = A^{-1} (I_n + HA^{-1})^{-1} = A_n^{-1} - \frac{1}{1 + \operatorname{tr}(HA^{-1})} A^{-1} HA^{-1}$$

### Exercice 85 : [énoncé]

a) ( $\implies$ ) Supposons  $\operatorname{rg} (A \mid B) = \operatorname{rg} A = r$ .

Rappelons que le rang d'une matrice est le rang de la famille de ses colonnes.

Puisque  $\operatorname{rg} A = r$ , la matrice  $A$  possède  $r$  colonnes indépendantes.

Puisque  $\operatorname{rg} (A \mid B) = r$ , les colonnes de  $(A \mid B)$  sont toutes combinaisons linéaires des colonnes précédentes.

En particulier les colonnes de  $B$  sont combinaisons linéaires des colonnes de  $A$ . Ceci permet de former  $U \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  vérifiant  $B = AU$ .

( $\impliedby$ ) Supposons  $B = AU$ .

Les colonnes de  $B$  sont combinaisons linéaires des colonnes de  $A$  et donc par opérations sur les colonnes

$$\operatorname{rg} (A \mid B) = \operatorname{rg} (A \mid O_n) = \operatorname{rg} A$$

b) Il suffit de transposer le raisonnement qui précède en raisonnant sur les lignes et en exploitant que le rang d'une matrice est aussi le rang de la famille des ses lignes.

c) Supposons

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \operatorname{rg} A$$

Puisque

$$\operatorname{rg} A \leq \operatorname{rg} (A \mid B) \leq \operatorname{rg} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \operatorname{rg} A$$

on a

$$\operatorname{rg} A = \operatorname{rg} (A \mid B) \text{ et } \operatorname{rg} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \operatorname{rg} (A \mid B)$$

En vertu de a) il existe une matrice  $U \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  telle que

$$B = AU$$

En raisonnant comme en b), il existe une matrice  $V \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  telle que

$$(C \mid D) = (VA \mid VBA)$$

On en déduit

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & AU \\ VA & VBA \end{pmatrix}$$

Inversement, supposons

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & AU \\ VA & VBA \end{pmatrix}$$

Les  $n$  dernières lignes étant combinaisons linéaires des  $n$  premières, on a

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} A & AU \\ O_n & O_n \end{pmatrix} = \operatorname{rg} (A \mid AU)$$

puis

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} A & AU \\ O_n & O_n \end{pmatrix} = \operatorname{rg} A$$

### Exercice 86 : [énoncé]

Posons  $r = \operatorname{rg} A$  et  $s = \operatorname{rg} B$ . Les matrices  $A$  et  $B$  sont respectivement équivalentes aux matrices

$$J_r = \begin{pmatrix} I_r & O_{r,n-r} \\ O_{n-r,t} & O_{n-r} \end{pmatrix} \text{ et } J_s = \begin{pmatrix} I_s & O_{s,p-s} \\ O_{p-s,t} & O_{p-s} \end{pmatrix}$$

Il existe donc  $P, Q \in \operatorname{GL}_n(\mathbb{K})$  et  $R, S \in \operatorname{GL}_p(\mathbb{K})$  telles que

$$PAQ = J_r \text{ et } RBS = J_s$$

En opérant par blocs, on a alors

$$\begin{pmatrix} P & O \\ O & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & O \\ O & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q & O \\ O & S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_r & O \\ O & J_s \end{pmatrix}$$

avec les facteurs

$$\begin{pmatrix} P & O \\ O & R \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} Q & O \\ O & S \end{pmatrix}$$

inversibles.

On en déduit

$$\operatorname{rg} M = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} J_r & O \\ O & J_s \end{pmatrix} = r + s$$

### Exercice 87 : [énoncé]

En multipliant par la matrice inversible

$$\begin{pmatrix} I_n & -B \\ O_{p,n} & I_p \end{pmatrix}$$

on obtient

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} I_n & B \\ O_{p,n} & C \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} I_n & O_{n,p} \\ O_{p,n} & C \end{pmatrix}$$

En posant  $r = \operatorname{rg} C$ , on peut écrire  $PCQ = J_r$  avec

$$P, Q \in \operatorname{GL}_p(\mathbb{K}) \text{ et } J_r = \begin{pmatrix} I_r & O_{r,p-r} \\ O_{p-r,r} & O_{p-r} \end{pmatrix}$$

En multipliant à gauche et à droite par les matrices inversibles

$$\begin{pmatrix} I_n & O_{n,p} \\ O_{p,n} & P \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} I_n & O_{n,p} \\ O_{p,n} & Q \end{pmatrix}$$

on obtient

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} I_n & B \\ O_{p,n} & C \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} I_n & O_{n,p} \\ O_{p,n} & J_r \end{pmatrix} = n + r$$

### Exercice 88 : [énoncé]

L'implication ( $\Leftarrow$ ) est immédiate car  $\operatorname{rg} B = p$ .

Inversement, supposons  $\operatorname{rg} M = p$ .

Puisque  $B$  est inversible, les  $p$  dernières lignes de  $M$  sont indépendantes et donc les autres lignes de  $M$  sont combinaisons linéaires de celles-ci puisque  $\operatorname{rg} M = p$ .

Puisque les  $n$  premières lignes de  $M$  sont combinaisons linéaires des  $p$  dernières lignes de  $M$ , on a

$$A = O_n$$

### Exercice 89 : [énoncé]

Introduisons la matrice inversible

$$M' = \begin{pmatrix} A^{-1} & O_{p,q} \\ O_{q,p} & I_q \end{pmatrix}$$

On a  $\operatorname{rg} M = \operatorname{rg}(MM')$  avec

$$MM' = \begin{pmatrix} I_p & B \\ O_{q,p} & C \end{pmatrix}$$

Par opérations élémentaires sur les colonnes, la matrice  $MM'$  a le rang de la matrice

$$\begin{pmatrix} I_p & O_{p,q} \\ O_{q,p} & C \end{pmatrix}$$

Enfin, les opérations élémentaires déterminant le rang de  $C$  se transposent à la matrice en cours afin d'en donner le rang. Au final

$$\operatorname{rg} M = p + \operatorname{rg} C$$

### Exercice 90 : [énoncé]

a) Si  $A$  est inversible alors en posant

$$C = \begin{pmatrix} O_n & I_n \\ A^{-1} & O_n \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2n}(\mathbb{K})$$

on obtient  $BC = I_{2n}$  et on en déduit que  $B$  est inversible et que  $C$  est son inverse en vertu du théorème d'inversibilité.

Si  $A$  n'est pas inversible alors les lignes de  $A$  sont liées et les  $n$  premières lignes de  $B$  sont aussi liées par la même relation linéaire. On en déduit que  $B$  n'est pas inversible.

b) On obtient

$$B^{2p} = \begin{pmatrix} A^p & O_n \\ O_n & A^p \end{pmatrix} \text{ et } B^{2p+1} = \begin{pmatrix} O_n & A^{p+1} \\ A^p & O_n \end{pmatrix}$$

### Exercice 91 : [énoncé]

a) Notons  $\text{Im } M = \{MZ \mid Z \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})\}$ .

Considérons ensuite  $\varphi$  l'application linéaire qui à  $X \in \mathcal{M}_{r,1}(\mathbb{K})$  associe

$$M \begin{pmatrix} X \\ O_{n-r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AX \\ CX \end{pmatrix}$$

On a évidemment  $\text{Im } \varphi \subset \text{Im } M$ .

Or l'application linéaire  $\varphi$  est injective car  $A$  est inversible et donc

$\text{rg } \varphi = \dim \mathcal{M}_{r,1}(\mathbb{K})$ .

Puisque par hypothèse  $\text{rg } M = r$ , par inclusion et égalité des dimensions, on a  $\text{Im } \varphi = \text{Im } M$ .

Pour tout  $Y \in \mathcal{M}_{n-r,1}(\mathbb{K})$ , on a  $M \begin{pmatrix} 0_r \\ Y \end{pmatrix} \in \text{Im } M$  donc il existe  $X \in \mathcal{M}_{r,1}(\mathbb{K})$

(et celui-ci est même unique) tel que

$$M \begin{pmatrix} 0_r \\ Y \end{pmatrix} = \varphi(X) = M \begin{pmatrix} X \\ O_{n-r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ O_{n-r} \end{pmatrix}$$

b) La relation

$$M \begin{pmatrix} 0_r \\ Y \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X \\ O_{n-r} \end{pmatrix}$$

donne

$$\begin{pmatrix} BY \\ DY \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AX \\ CX \end{pmatrix}$$

donc  $X = A^{-1}BY$  puis  $DY = CX = CA^{-1}BY$ .

Puisque cette dernière relation vaut pour toute colonne  $Y \in \mathcal{M}_{n-r,1}(\mathbb{K})$ , on peut conclure  $D = CA^{-1}B$ .

### Exercice 92 : [énoncé]

On peut écrire la matrice  $M^{-1}$  sous la forme

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix}$$

La relation  $MM^{-1} = I_{2n}$  donne alors le système

$$\begin{cases} AA' + BC' = I_n \\ CA' + DC' = O_n \\ AB' + BD' = O_n \\ CB' + DD' = I_n \end{cases}$$

qui entraîne

$$\begin{cases} (A - BD^{-1}C)A' = I_n \\ C' = -D^{-1}CA' \\ B' = -A^{-1}BD' \\ (D - CA^{-1}B)D' = I_n \end{cases}$$

On en déduit que les matrices  $A - BD^{-1}C$  et  $D - CA^{-1}B$  sont nécessairement inversibles et  $A'$  et  $D'$  sont leurs inverses respectifs.

Au final

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} (A - BD^{-1}C)^{-1} & A^{-1}B(CA^{-1}B - D)^{-1} \\ D^{-1}C(BD^{-1}C - A)^{-1} & (D - CA^{-1}B)^{-1} \end{pmatrix}$$

### Exercice 93 : [énoncé]

Par blocs, on a

$$A = \begin{pmatrix} M & O_2 \\ O_2 & -M \end{pmatrix} \text{ avec } M = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Par récurrence, on obtient

$$\forall n \in \mathbb{N}, M^n = \begin{pmatrix} 1 & -n \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

et on en déduit

$$\forall n \in \mathbb{N}, A^n = \begin{pmatrix} 1 & -n & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (-1)^n & (-1)^{n+1}n \\ 0 & 0 & 0 & (-1)^n \end{pmatrix}$$

On vérifie que cette relation est encore valable pour  $n \in \mathbb{Z}$  en constatant que cette expression satisfait

$$A^n \times A^{-n} = I_4$$

### Exercice 94 : [énoncé]

De telles matrices n'existent pas car

$$\text{tr}(AB) = \text{tr}(BA)$$

et donc

$$\text{tr}(AB - BA) = 0 \neq \text{tr}(I_n)$$

**Exercice 95 :** [énoncé]

On a

$$\operatorname{tr} A = \operatorname{tr}(AB - BA) = \operatorname{tr}(AB) - \operatorname{tr}(BA) = 0$$

car  $\operatorname{tr}(AB) = \operatorname{tr}(BA)$ .

Généralisons ce calcul

$$\operatorname{tr}(A^p) = \operatorname{tr}(A^{p-1}(AB - BA)) = \operatorname{tr}(A^p B) - \operatorname{tr}(A^{p-1}BA)$$

Or

$$\operatorname{tr}(A^{p-1}BA) = \operatorname{tr}((A^{p-1}B)A) = \operatorname{tr}(A(A^{p-1}B)) = \operatorname{tr}(A^p B)$$

donc

$$\operatorname{tr}(A^p) = 0$$

**Exercice 96 :** [énoncé]

Soit  $(e_1, \dots, e_n)$  une base de  $E$  avec  $e_1, \dots, e_{n-1} \in \ker f$  et  $e_n \in \operatorname{Im} f$ . On a  $f(e_n) \in \operatorname{Im} f = \operatorname{Vect}(e_n)$  donc il existe  $\lambda \in \mathbb{K}$  tel que  $f(e_n) = \lambda e_n$  et donc  $f^2(e_n) = \lambda f(e_n)$ . Cette relation vaut aussi pour les vecteurs  $e_1, \dots, e_{n-1}$  et donc par coïncidence de deux applications linéaires sur les vecteurs d'une base on peut affirmer que  $f^2 = \lambda f$ . De plus, la matrice de  $f$  dans la base  $(e_1, \dots, e_n)$  donne  $\lambda = \operatorname{tr} f$ . Ainsi, pour  $f$  de rang 1,  $f$  est un projecteur si, et seulement si,  $\operatorname{tr} f = 1$ .

**Exercice 97 :** [énoncé]

Calculons les coefficients diagonaux de la représentation matricielle de  $\varphi$  dans la base canonique formée des matrices élémentaires  $E_{i,j}$ .

On a  $\varphi(E_{i,j}) = E_{i,j}A$ .

Or  $A = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n a_{k,\ell} E_{k,\ell}$  donc  $\varphi(E_{i,j}) = \sum_{\ell=1}^n a_{j,\ell} E_{i,\ell}$  car  $E_{i,j} E_{k,\ell} = \delta_{j,k} E_{i,\ell}$ .

La composante de  $\varphi(E_{i,j})$  selon  $E_{i,j}$  vaut  $a_{j,j}$ .

Par suite la trace de  $\varphi$  vaut  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{j,j} = n \operatorname{tr} A$ .

**Exercice 98 :** [énoncé]

Supposons que  $M$  soit semblable à une matrice  $M'$  via une matrice inversible  $P$  i.e.

$$M' = P^{-1}MP$$

Si on peut écrire  $M' = A'B' - B'A'$  alors  $M = AB - BA$  avec  $A = PA'P^{-1}$  et  $B = PB'P^{-1}$ .

On peut ainsi transformer la matrice  $M$  en une matrice semblable sans changer la problématique.

Établissons maintenant le résultat demandé en raisonnant par récurrence sur la taille de la matrice  $M$ .

Si  $M$  est taille 1 : ok

Supposons la propriété établie au rang  $n \in \mathbb{N}^*$ .

Soit  $M$  une matrice carrée d'ordre  $n+1$  de trace nulle.

Montrons que  $M$  est semblable à une matrice de la forme

$$\left( \begin{array}{c|c} 0 & * \\ \hline * & * \end{array} \right)$$

Si  $M$  est matrice d'une homothétie alors  $\operatorname{tr} M = 0$  permet de conclure  $M = O_n$ . Sinon, il existe des vecteurs qui ne sont pas vecteurs propres de l'endomorphisme associé à  $M$ .

Soit  $x$ , un tel vecteur. En introduisant une base dont  $x$  et  $f(x)$  sont les deux premiers vecteurs, on obtient que la matrice  $M$  est semblable à celle voulue.

Compte tenu de la remarque préliminaire, on suppose désormais que la matrice  $M$  est de la forme

$$\left( \begin{array}{c|c} 0 & L \\ \hline C & M' \end{array} \right)$$

avec  $\operatorname{tr} M' = 0$ .

Par l'hypothèse de récurrence on peut écrire

$$M' = A'B' - B'A'$$

Soit  $\lambda \in \mathbb{K}$  qui n'est pas valeur propre de la matrice  $B'$ .

En posant

$$A = \left( \begin{array}{c|c} 1 & L(B' - \lambda I)^{-1} \\ \hline (\lambda I - B')^{-1}C & A' \end{array} \right)$$

et

$$B = \left( \begin{array}{c|c} \lambda & 0 \\ \hline 0 & B' \end{array} \right)$$

on obtient

$$M = AB - BA$$

Récurrence établie.

**Exercice 99 :** [énoncé]

Posons  $a_{j,i} = \varphi(E_{i,j})$ .  $\varphi(M) = \sum_{1 \leq i,j \leq n} a_{j,i} m_{i,j} = \operatorname{tr}(AM)$  avec  $A = (a_{i,j})$ .

**Exercice 100 :** [énoncé]

Puisque  $\text{tr}(AB) = \text{tr}(BA)$ , on a  $\text{tr}[A; B] = 0$ .  $\ker(\text{tr})$  est donc un sous-espace vectoriel contenant  $\{[A; B] \mid A, B \in E\}$  donc

$$\text{Vect}\{[A; B] \mid A, B \in E\} \subset \ker(\text{tr})$$

De plus,  $\text{tr}$  étant une forme linéaire non nulle,  $\ker(\text{tr})$  est un hyperplan.

Montrons qu'il en est de même de  $\text{Vect}\{[A; B] \mid A, B \in E\}$ .

Pour  $i \neq j$ ,  $E_{i,j} = [E_{i,i}, E_{i,j}]$  et pour  $i \neq n$ ,  $E_{i,i} - E_{n,n} = [E_{i,n}, E_{n,i}]$ .

Par suite  $\text{Vect}\{[A; B] \mid A, B \in E\}$  contient la famille libre à  $n^2 - 1$  éléments formée par les  $E_{i,j}$ ,  $i \neq j$  et les  $E_{i,i} - E_{n,n}$ ,  $i \neq n$ . Il en découle que  $\text{Vect}\{[A; B] \mid A, B \in E\}$  est de dimension supérieure ou égale à  $n^2 - 1$ .

Par inclusion et un argument de dimension, on peut conclure

$$\ker(\text{tr}) = \text{Vect}\{[A; B] \mid A, B \in E\}$$

**Exercice 101 :** [énoncé]

Notons que  $\text{Vect}\{AB - BA \mid A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})\}$  est inclus dans l'hyperplan des matrices de trace nulle.

Par suite  $\dim \text{Vect}\{AB - BA \mid A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})\} \leq n^2 - 1$ .

Pour  $A = E_{i,j}$  et  $B = E_{j,i}$  (avec  $i \neq j$ ) :  $AB - BA = E_{i,j}$ .

Pour  $A = E_{i,n}$  et  $B = E_{n,i}$  :  $AB - BA = E_{i,i} - E_{n,n} = F_i$ .

La famille formée des  $E_{i,j}$  et des  $F_i$  est libre et constituée de  $n^2 - 1$  éléments.

Par suite  $\dim \text{Vect}\{AB - BA \mid A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})\} \geq n^2 - 1$ .

Finalement  $\dim \text{Vect}\{AB - BA \mid A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})\} = n^2 - 1$ .

**Exercice 102 :** [énoncé]

Soit  $X$  solution. La matrice  $X + {}^tX$  est symétrique.

Cas  $A$  n'est pas symétrique :

Nécessairement  $\text{tr}(X) = 0$  et l'équation étudiée devient  $X + {}^tX = 0$  dont les solutions sont les matrices antisymétriques. Inversement, ces dernières sont solutions de l'équation initiale.

Cas  $A$  est symétrique.

En passant à la trace l'équation étudiée, on obtient  $2\text{tr}(X) = \text{tr}(X)\text{tr}(A)$ .

Si  $\text{tr}(A) \neq 2$  alors on obtient à nouveau  $\text{tr}(X) = 0$  et on conclut que  $X$  est antisymétrique.

Si  $\text{tr}(A) = 2$  alors  $Y = X - \frac{1}{2}\text{tr}(X)A$  vérifie  $Y + {}^tY = X + {}^tX - \text{tr}(X)A = 0$  donc

$Y$  est antisymétrique puis la matrice  $X$  est de la forme  $\lambda A + Y$  avec  $Y$

antisymétrique. Inversement, une telle matrice est solution.

Pour résumer :

Si  $A \notin \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  ou  $\text{tr}(A) \neq 2$  alors  $\mathcal{S} = \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ .

Si  $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$  et  $\text{tr}(A) = 2$  alors  $\mathcal{S} = \text{Vect}(A) \oplus \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ .

**Exercice 103 :** [énoncé]

- a) Soit  $p$  un projecteur de  $E$  espace de dimension  $n$ . En posant  $F = \text{Im } p$  et  $G = \ker p$ , la matrice de  $p$  dans une base adaptée à la décomposition  $E = F \oplus G$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} I_r & O_{p,r-p} \\ O_{r-p,p} & O_{r-p} \end{pmatrix}$$

On y lit

$$\text{rg } p = r = \text{tr } p$$

- b) Posons

$$B = \frac{1}{q} \sum_{k=0}^{q-1} A^k$$

Puisque  $A^q = I_n$ , on a  $AB = B$  et plus généralement  $A^k B = B$  pour tout  $k \in \mathbb{N}$ .

On en déduit

$$B^2 = \frac{1}{q} \sum_{k=0}^{q-1} A^k B = \frac{1}{q} \sum_{k=0}^{q-1} B = B$$

et donc  $B$  est la matrice d'un projecteur. Par suite

$$\text{rg } B = \text{tr } B = \frac{1}{q} \sum_{k=0}^{q-1} \text{tr}(A^k)$$

Pour  $X \in \ker(A - I_n)$ , on a  $AX = X$  donc  $BX = X$  et ainsi

$\ker(A - I_n) \subset \text{Im } B$ .

Inversement, si  $Y \in \text{Im } B$ , il existe  $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$  tel que  $Y = BX$  et alors

$$(A - I_n)Y = ABX - BX = BX - BX = 0$$

donc  $\text{Im } B \subset \ker(A - I_n)$  puis  $\text{Im } B = \ker(A - I_n)$ . On peut alors conclure

$$\dim \ker(A - I_n) = \text{rg } B = \frac{1}{q} \sum_{k=0}^{q-1} \text{tr}(A^k)$$

**Exercice 104 :** [énoncé]

Soit

$$p = \frac{1}{n} \sum_{g \in G} g$$

On a

$$p \circ p = \frac{1}{n^2} \sum_{h \in G} \sum_{g \in G} h \circ g$$

Or, pour  $h \in G$  fixé, les  $h \circ g$  parcourt  $G$  pour  $g$  parcourant  $G$ . Ainsi

$$\sum_{g \in G} h \circ g = \sum_{k \in G} k$$

puis

$$p \circ p = \frac{1}{n^2} \sum_{h \in G} \sum_{k \in G} k = \frac{1}{n} \sum_{k \in G} k = p$$

Ainsi  $p$  est un projecteur et la dimension de son image  $\text{Im } p = \ker(p - \text{Id})$  est sa trace

$$\text{tr } p = \frac{1}{n} \sum_{g \in G} \text{tr } g$$

Pour tout  $g \in G$ , on vérifie  $g \circ p = p$  par des calculs analogues aux précédents. Si  $x$  est invariant par  $p$ , il l'est aussi par  $g$  et donc

$$\ker(p - \text{Id}) \subset \bigcap_{g \in G} \ker(g - \text{Id})$$

L'inclusion inverse étant immédiate, on conclut

$$\bigcap_{g \in G} \ker(g - \text{Id}) = \ker(p - \text{Id})$$

puis l'on obtient l'égalité de dimension

$$\dim \left( \bigcap_{g \in G} \ker(g - \text{Id}_E) \right) = \frac{1}{n} \sum_{g \in G} \text{tr } g$$

### Exercice 105 : [\[énoncé\]](#)

- a) L'application considérée est au départ d'un ensemble infini et à valeurs dans un ensemble fini, elle ne peut donc être injective et il existe  $k < \ell \in \mathbb{N}$ ,  $M^k = M^\ell$  ce qui fournit  $M^p = I_n$  avec  $p = \ell - k$  car  $M$  est inversible. On en déduit que  $I_n \in H$  et que  $M^{-1} = M^{p-1} \in H$ . Cela suffit pour conclure que  $H$  est un sous-groupe de  $\text{GL}_n(\mathbb{K})$ .

- b) Si  $M \in H$  alors  $N \mapsto MN$  et  $N \mapsto NM$  sont des permutations de  $H$ . On en déduit que  $MP = PM = P$  car pour chaque terme les sommes portent sur les mêmes éléments.

$$P^2 = \frac{1}{q} \sum_{M \in H} MP = \frac{1}{q} \sum_{M \in H} P = P$$

- c) Puisque  $P^2 = P$ ,  $\text{Im } P = \ker(P - I_n)$  et  $\ker P$  sont supplémentaires dans  $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ .

Si  $X \in \ker P$  alors  $PX = 0$  et pour tout  $M \in H$ ,  $PMX = PX = 0$  donc  $MX \in \ker P$ . Ainsi  $\ker P$  est stable par  $H$ .

Si  $X \in \bigcap_{M \in H} \ker(M - I_n)$  alors pour tout  $M \in H$ ,  $MX = X$  donc  $PX = X$  puis  $X \in \ker(P - I_n)$ .

Inversement, si  $X \in \ker(P - I_n)$  alors  $PX = X$  et pour tout  $M \in H$ ,  $X = PX = MPX = MX$  et donc  $X \in \bigcap_{M \in H} \ker(M - I_n)$ . Ainsi

$$\bigcap_{M \in H} \ker(M - I_n) = \ker(P - I_n)$$

et  $\ker P$  est solution du problème posé.

- d)  $P$  est une projection donc  $\text{tr } P = \text{rg } P \in \mathbb{N}$  et donc  $\sum_{M \in H} \text{tr } M = q \text{tr } P \in q\mathbb{N}$ . Si  $\sum_{M \in H} \text{tr } M = 0$  alors  $P = 0$ . Par suite  $\bigcap_{M \in H} \ker(M - I_n) = \{0\}$  et il n'y a donc pas de vecteur non nul invariant pour tous les éléments de  $H$  et inversement.

### Exercice 106 : [\[énoncé\]](#)

- a) Posons  $p = \sum_{g \in G} g$ .  $p^2 = \sum_{g \in G} \sum_{h \in G} gh$ . Or pour  $g \in G$ , l'application  $h \mapsto gh$  est une permutation du groupe  $G$  donc  $\sum_{h \in G} gh = p$  et par suite  $p^2 = \text{Card } G \cdot p$ .  
Par suite  $\frac{1}{\text{Card } G} p$  est une projection vectorielle et puisque son rang égale sa trace,  $\text{rg } p = 0$ . Ainsi  $p = 0$ .
- b) Considérons  $\varphi(x, y) = \sum_{g \in G} (g(x) \mid g(y))$ .  $\varphi$  est un produit scalaire sur  $\mathbb{R}^n$  pour lequel on a  $\forall h \in G, h^* = h^{-1}$ . Pour ce produit scalaire,  $V^\perp$  est un supplémentaire de  $V$  stable pour tout  $h^{-1}$  avec  $h$  élément de  $G$  donc stable pour tout élément de  $G$ .

### Exercice 107 : [\[énoncé\]](#)

Si  $i \neq j$  alors  $E_{i,i}E_{i,j} = E_{i,j}$  et  $E_{i,j}E_{i,i} = 0$  donc  $T(E_{i,j}) = 0$ .

De plus  $E_{i,j}E_{j,i} = E_{i,i}$  et  $E_{j,i}E_{i,j} = E_{j,j}$  donc  $T(E_{i,i}) = T(E_{j,j}) = \alpha$ .

Soit  $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ .

$$T(A) = T\left(\sum_{i,j=1}^n a_{i,j} E_{i,j}\right) = \sum_{i,j=1}^n a_{i,j} T(E_{i,j}) = \alpha \operatorname{tr}(A)$$

donc  $T = \alpha \cdot \operatorname{tr}$ .

**Exercice 108 :** [énoncé]

$f(E_{i,i}) = f(E_{i,j}E_{j,i}) = f(E_{j,i}E_{i,j}) = f(E_{j,j})$  et si  $i \neq j$ ,  
 $f(E_{i,j}) = f(E_{i,j}E_{j,j}) = f(E_{j,j}E_{i,j}) = f(0) = 0$ .

Ainsi

$$f(A) = f\left(\sum a_{i,j} E_{i,j}\right) = \lambda \operatorname{tr} A$$

en notant  $\lambda$  la valeur commune des  $f(E_{i,i})$ .

**Exercice 109 :** [énoncé]

a) Notons  $E_{i,j}$  les matrices élémentaires de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ . Puisque

$$E_{i,i} = E_{i,j}E_{j,i} \text{ et } E_{j,j} = E_{j,i}E_{i,j}$$

l'hypothèse de travail donne

$$f(E_{i,i}) = f(E_{i,j}E_{j,i}) = f(E_{j,i}E_{i,j}) = f(E_{j,j})$$

De plus, pour  $i \neq j$ , on a

$$E_{i,j} = E_{i,j}E_{j,j} \text{ et } O_n = E_{j,i}E_{i,j}$$

donc

$$f(E_{i,j}) = f(E_{i,j}E_{j,j}) = f(E_{j,i}E_{i,j}) = f(O_n) = 0$$

Ainsi

$$f(A) = f\left(\sum a_{i,j} E_{i,j}\right) = \lambda \operatorname{tr} A$$

en notant  $\lambda$  la valeur commune des  $f(E_{i,i})$ .

b) Posons  $f = \operatorname{tr} \circ g$ . L'application  $f$  est une forme linéaire vérifiant

$$\forall A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), f(AB) = f(BA)$$

Ainsi  $f = \lambda \operatorname{tr}$ .

Or  $f(I_n) = \operatorname{tr}(g(I_n)) = \operatorname{tr} I_n$  donc  $\lambda = 1$ . Ainsi  $f = \operatorname{tr}$  et

$$\forall M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), \operatorname{tr}(g(M)) = f(M) = \operatorname{tr}(M)$$

**Exercice 110 :** [énoncé]

La trace de  $f$  est la somme des coefficients diagonaux de la matrice représentative de  $f$  dans la base de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  formée des matrices élémentaires  $E_{i,j}$ . Puisque le coefficient d'indice  $(i, j)$  de la matrice  $f(E_{i,j})$  est  $a_{i,i} + a_{j,j}$  on obtient

$$\operatorname{tr} f = \sum_{1 \leq i, j \leq n} (a_{i,i} + a_{j,j}) = 2n \operatorname{tr} A$$

**Exercice 111 :** [énoncé]

Si  $X$  est solution alors

$$\operatorname{tr}(X) = \operatorname{tr}(X) \operatorname{tr}(A) + \operatorname{tr}(B)$$

et donc

$$\operatorname{tr}(X)(1 - \operatorname{tr}(A)) = \operatorname{tr}(B)$$

Cas  $\operatorname{tr} A \neq 1$ .

On obtient

$$\operatorname{tr}(X) = \frac{\operatorname{tr}(B)}{1 - \operatorname{tr}(A)}$$

puis

$$X = \frac{\operatorname{tr}(B)}{1 - \operatorname{tr}(A)} A + B$$

Inversement, cette matrice est bien solution.

Cas  $\operatorname{tr} A = 1$ .

Sous cas  $\operatorname{tr} B \neq 0$ .

L'équation  $\operatorname{tr}(X)(1 - \operatorname{tr}(A)) = \operatorname{tr}(B)$  est incompatible, il n'y a pas de solution.

Sous cas  $\operatorname{tr} B = 0$ .

La solution  $X$  est de la forme  $\lambda A + B$  avec  $\lambda \in \mathbb{R}$  et inversement de telles matrices sont solutions.

**Exercice 112 :** [énoncé]

Soit  $(e_1, \dots, e_n)$  une base de  $E$  avec  $e_1, \dots, e_{n-1} \in \ker f$ .

La matrice de  $f$  dans cette base est de la forme

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \lambda_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \lambda_{n-1} \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix}$$

avec  $\lambda_n = \operatorname{tr} f$ .

On observe alors que  $A^2 = \lambda_n A$ .

Ainsi si  $\text{tr } f = 1$  alors  $A^2 = A$  donc  $f^2 = f$  puis  $f$  est un projecteur.

Par l'isomorphisme de représentation matricielle dans une base donnée de  $E$ , on peut retraduire le problème matriciellement.

En considérant les éléments  $E_{i,i}$  et  $E_{i,i} + E_{i,j}$  pour  $1 \leq i \neq j \leq n$  on forme une base de  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$  telle que souhaitée.

### Exercice 113 : [énoncé]

Les matrices  $A_i$  sont des matrices de projection et donc

$$\text{tr } A_i = \text{rg } A_i$$

On en déduit

$$\sum_{i=1}^k \text{rg } A_i = \sum_{i=1}^k \text{tr } A_i = \text{tr } I_n = n$$

Or

$$\mathbb{R}^n = \text{Im } \sum_{i=1}^k A_i \subset \sum_{i=1}^k \text{Im } A_i \subset \mathbb{R}^n$$

Ainsi

$$\sum_{i=1}^k \text{Im } A_i = \mathbb{R}^n$$

et la relation sur les rangs donne

$$\sum_{i=1}^k \dim(\text{Im } A_i) = \dim \mathbb{R}^n$$

Les espaces  $\text{Im } A_i$  sont donc en somme directe

$$\bigoplus_{i=1}^k \text{Im } A_i = \mathbb{R}^n$$

Pour tout  $x \in \mathbb{R}^n$ , on peut écrire

$$x = A_1 x + \cdots + A_k x$$

En particulier, pour le vecteur  $A_j x$ , on obtient

$$A_j x = A_1 A_j x + \cdots + A_j x + \cdots + A_k A_j x$$

La somme directe précédente donne alors par unicité d'écriture

$$\forall 1 \leq i \neq j \leq k, A_i A_j x = 0$$

et peut alors conclure.

### Exercice 114 : [énoncé]

Si  $f = 0$  alors  $f \circ g = 0$ .

Sinon il existe une base de  $\mathbb{R}^2$  dans laquelle la matrice de  $f$  est

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

La matrice de  $g$  commutant avec  $f$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} a & b \\ 0 & a \end{pmatrix}$$

et puisque  $g^2 = 0$ ,  $a = 0$ .

Par suite la matrice de  $f \circ g$  est nulle.

### Exercice 115 : [énoncé]

$F_\omega$  est clairement un endomorphisme de  $\mathbb{C}_{n-1}[X]$ . Sa matrice dans la base

$(1, X, \dots, X^{n-1})$  est  $A = (a_{i,j})_{0 \leq i,j \leq n-1}$  avec  $a_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{n}} \omega^{ij}$ . On remarque que

$\bar{A}A = I_n$  car  $\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \omega^{(j-i)k} = \delta_{i,j}$ . Par suite  $F_\omega$  est un automorphisme et  $F_\omega^{-1}$  étant représenté par  $\bar{A}$ ,  $F_\omega^{-1}(P) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=0}^{n-1} P(\omega^{-k}) X^k$ .

### Exercice 116 : [énoncé]

- Les endomorphismes  $\lambda \text{Id}_E$  ont la propriété voulue.
- Les familles  $(e_1, \dots, e_n)$  et  $(e_1 + e_i, e_2, \dots, e_n)$  engendrent le même espace vectoriel. Étant toutes deux formées de  $n$  vecteurs, si l'une est libre, l'autre aussi.
- Soit  $u$  un endomorphisme de  $E$  dont la matrice est diagonale dans toutes les bases de  $E$ .  
La matrice de  $u$  dans la base  $(e_1, \dots, e_n)$  est de la forme  $\text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ .  
Puisque la matrice de  $u$  dans la base  $(e_1 + e_i, e_2, \dots, e_n)$  est aussi diagonale, il existe  $\alpha \in \mathbb{R}$  tel que

$$u(e_1 + e_i) = \alpha(e_1 + e_i)$$

Or par linéarité

$$u(e_1 + e_i) = u(e_1) + u(e_i) = \lambda_1 e_1 + \lambda_i e_i$$

Par liberté de la famille  $(e_1, e_i)$  on identifie les scalaires et on peut affirmer

$$\lambda_1 = \alpha = \lambda_i$$

Ainsi, si un endomorphisme à une représentation matricielle diagonale dans toutes les bases de  $E$ , sa matrice est de la forme  $\lambda I_n$  et donc cet endomorphisme est de la forme  $\lambda \text{Id}_E$ .

- d) Soit  $u$  un tel endomorphisme. Si  $A = (a_{i,j})$  est sa matrice dans une base  $(e_1, \dots, e_n)$  alors sa matrice dans la base  $(e_1, 2e_2, \dots, ne_n)$  a pour coefficient général

$$\frac{j}{i} a_{i,j}$$

et comme cette matrice doit être égale à la précédente, on obtient

$$\forall i, j \in \{1, \dots, n\}, i \neq j \implies a_{i,j} = 0$$

Ainsi, cet endomorphisme a une matrice diagonale dans toute base de  $E$  et en vertu de ce qui précède, il est de la forme  $\lambda \text{Id}_E$  avec  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

### Exercice 117 : [énoncé]

Soit  $x \in \ker f \cap \text{Im } f$ . Il existe  $a \in \mathbb{R}^3$  tel que  $x = f(a)$  et alors

$$x = -f^3(a) = -f^2(x) = -f(f(x)) = -f(0) = 0$$

Ainsi  $\ker f \cap \text{Im } f = \{0\}$  puis, par le théorème du rang, on peut affirmer

$$\mathbb{R}^3 = \ker f \oplus \text{Im } f$$

Si  $f^2 + \text{Id} = \tilde{0}$  alors  $f^2 = -\text{Id}$  puis  $(\det f)^2 = \det(-\text{Id}) = -1$ . C'est impossible. On en déduit que  $f^2 + \text{Id} \neq \tilde{0}$  et puisque  $f \circ (f^2 + \text{Id}) = \tilde{0}$ , on a  $\ker f \neq \{0\}$ .

Soit  $e_1 \in \ker f$  non nul.

Puisque par hypothèse  $f$  n'est pas l'application nulle, considérons

$e_2 = f(a) \in \text{Im } f$  vecteur non nul. Posons  $e_3 = -f(e_2) \in \text{Im } f$ .

On vérifie

$$f(e_3) = -f^2(e_2) = -f^3(a) = f(a) = e_2$$

De plus les vecteurs  $e_2$  et  $e_3$  ne sont pas colinéaires.

En effet si  $e_3 = \lambda e_2$ , on obtient en composant par  $f$ ,  $e_2 = -\lambda e_3$  et on en déduit  $e_2 = -\lambda^2 e_2$ . Sachant  $e_2 \neq 0$ , on obtient  $\lambda^2 = -1$  ce qui est impossible avec  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

Puisque  $(e_2, e_3)$  est une famille libre de  $\text{Im } f$  et puisque  $(e_1)$  est une famille libre de  $\ker f$ , on peut affirmer que  $(e_1, e_2, e_3)$  est une base de  $\mathbb{R}^3$ . Dans celle-ci, la matrice de  $f$  est égale à  $A$ .

### Exercice 118 : [énoncé]

- a) Dans la base canonique, la matrice de  $u - v$  est de la forme

$$\begin{pmatrix} 0 & 2 & & * \\ & 0 & \ddots & \\ & & \ddots & 2n \\ 0 & & & 0 \end{pmatrix}$$

donc

$$\text{rg}(u - v) = (n + 1) - 1 = n$$

- b) On peut aussi étudier le noyau de  $u - v$  et par un argument de périodicité justifier que seuls les polynômes constants sont éléments de ce noyau.

### Exercice 119 : [énoncé]

Soit  $f$  solution. La matrice de  $f$  relative à la base canonique est à coefficients entiers. De plus  $f$  est un automorphisme car les vecteurs de la base canonique sont des valeurs prises par  $f$  et comme  $f^{-1}(\mathbb{Z}^n) = \mathbb{Z}^n$ , la matrice de  $f^{-1}$  relative à la base canonique est à coefficients entiers. Inversement, si  $f$  est un automorphisme telle que  $f$  et  $f^{-1}$  soient représentés par des matrices à coefficients entiers dans la base canonique, il est immédiat que  $f(\mathbb{Z}^n) \subset \mathbb{Z}^n$  et que  $f^{-1}(\mathbb{Z}^n) \subset \mathbb{Z}^n$  donc que  $\mathbb{Z}^n \subset f(\mathbb{Z}^n)$  et finalement  $f(\mathbb{Z}^n) = \mathbb{Z}^n$ . Notons que les endomorphismes solutions peuvent aussi se décrire comme étant les endomorphismes canoniquement représentés par une matrice à coefficients entiers et qui sont de déterminant égal à 1 ou  $-1$ .