

**FEUILLE DE TD 1. ESPACES VECTORIELS, DUAL,
OPÉRATIONS ÉLÉMENTAIRES**

ALGÈBRE LINÉAIRE II (2M270), ANNÉE 2018–19

Exercice 1. VRAI ou FAUX ? Les applications suivantes sont des formes linéaires sur un espace vectoriel :

- (1) $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto 2x - y$;
- (2) $\mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Q}, x \mapsto x$;
- (3) $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 0$;
- (4) $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 2$;
- (5) $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}, x \mapsto -x$;
- (6) $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2$;
- (7) $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}, z \mapsto \operatorname{Re}(z)$;
- (8) $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, z \mapsto \bar{z}$;
- (9) $\mathbb{R}[X] \rightarrow \mathbb{R}, P(X) \mapsto P(3)$;
- (10) $C^1(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}, f \mapsto f'(0)f(1)$;
- (11) $C^0([0, 1]) \rightarrow \mathbb{R}, f \mapsto \int_0^1 f(t)dt$;
- (12) $\{\text{suites réelles}\} \rightarrow \mathbb{R}, (u_n)_{n \in \mathbb{N}} \mapsto \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n$.

Exercice 2. (1) Écrire la matrice dans la base canonique de l'application linéaire $u : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^3$ définie par

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x_1 + 2x_2 + 3x_3 - x_4 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \\ x_1 - x_3 + 3x_4 \end{pmatrix} ;$$

(2) Même question pour l'application linéaire $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ définie par

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -x + \sqrt{2}y + z \\ \sqrt{2}x + \sqrt{2}z \\ x + \sqrt{2}y - z \end{pmatrix} .$$

Exercice 3. Soit \mathbb{K} un corps. Pour toute matrice $A = (a_{ij}) \in M_n(\mathbb{K})$, on définit sa *trace* $\operatorname{Tr}(A) = \sum_{i=1}^n a_{ii}$ (somme des coefficients diagonaux).

- (1) Montrer que Tr est une forme linéaire sur $M_n(\mathbb{K})$.
- (2) Soient $A, B \in M_n(\mathbb{K})$. Montrer que $\operatorname{Tr}(AB) = \operatorname{Tr}(BA)$.

Exercice 4. Soient $E = \mathbb{R}_n[X]$ l'espace des polynômes de degré $\leq n$ et ϕ l'endomorphisme de E qui à tout $P \in E$ associe $P + P'$ (où P' est le polynôme dérivé de P). Montrer que ϕ est surjectif. (Indication : montrer d'abord que ϕ est injectif.)

Exercice 5. Soit \mathcal{E} le \mathbb{R} -espace vectoriel des suites $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de nombres réels et soit Δ l'endomorphisme de \mathcal{E} qui envoie toute suite $\mathbf{u} = (u_0, u_1, u_2, \dots)$ sur la suite $\Delta(\mathbf{u}) = (u_1, u_2, u_3, \dots)$. Montrer que Δ est surjectif mais n'est pas injectif. En déduire que \mathcal{E} n'est pas de dimension finie.

Exercice 6. Soit D (resp. L) l'endomorphisme de $\mathbb{R}[X]$ qui à tout polynôme $P \in \mathbb{R}[X]$ associe le polynôme dérivé P' (resp. le polynôme XP).

- (1) Calculer l'image et le noyau de L , puis de D . Que constatez-vous?
- (2) En utilisant 1., montrer que le \mathbb{R} -espace vectoriel $\mathbb{R}[X]$ n'est pas de dimension finie.

Exercice 7. Soient V un k -espace vectoriel, E et F deux sous-espaces vectoriels, de dimension p et q respectivement. Soit $\mathcal{B}_0 = (v_1, \dots, v_r)$ une base de $E \cap F$, on la complète en une base $\mathcal{E} = (e_1, \dots, e_{p-r}, v_1, \dots, v_r)$ de E et en une base $\mathcal{F} = (v_1, \dots, v_r, f_1, \dots, f_{q-r})$ de F .

- (1) Montrer que la famille $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_{p-r}, v_1, \dots, v_r, f_1, \dots, f_{q-r})$ est libre. (Indication : considérer une égalité

$$\lambda_1 e_1 + \dots + \lambda_{p-r} e_{p-r} + \mu_1 v_1 + \dots + \mu_r v_r = t_1 f_1 + \dots + t_{q-r} f_{q-r}.)$$

- (2) Montrer que $\dim(E + F) = \dim(E) + \dim(F) - \dim(E \cap F)$.

Exercice 8. On considère dans \mathbb{R}^5 le sous-espace L , resp. M , engendré par les vecteurs

$$\begin{aligned} v_1 &= \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, & v_2 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}, & v_3 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \\ \text{resp. } v_4 &= \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}, & v_5 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, & v_6 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

En faisant des opérations sur les colonnes de la ou les matrice(s) appropriée(s), donner des bases de L , M , $L + M$ et de $L \cap M$.

Exercice 9. Soit

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2 & 1 & 5 & 4 & 3 \\ 3 & 2 & 8/3 & 5 & 22/3 \end{pmatrix} \in M_{4,5}(\mathbb{R}).$$

- (1) En faisant des opérations élémentaires sur les colonnes, déterminer $\text{rang}(A)$ et des bases de $\text{Im}(A)$ et $\text{Ker}(A)$.
- (2) Donner une base de F° où F est le sous-espace du dual de \mathbb{R}^5 engendré par les formes linéaires

$$x \mapsto x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 4x_4 + 5x_5, \quad x \mapsto 3x_2 + 4x_3 + 5x_4 + 6x_5,$$

$$x \mapsto 2x_1 + x_2 + 5x_3 + 4x_4 + 3x_5, \quad x \mapsto 3x_1 + 2x_2 + \frac{8}{3}x_3 + 5x_4 + \frac{22}{3}x_5.$$

Exercice 10. Reprendre la question 1 de l'exercice précédent avec la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 3 & 5 & 7 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \in M_5(\mathbb{R}).$$

Deviner la question suivante et la résoudre !

Exercice 11. Soit

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 3 \\ 1 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 8 \end{pmatrix} \in M_4(\mathbb{R}).$$

- (1) Déterminer A^{-1} .
- (2) Justifier que la famille

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \\ 8 \end{pmatrix}$$

est une base de \mathbb{R}^4 et trouver sa base duale.

Exercice 12. En faisant des opérations élémentaires sur les colonnes, déterminer, en fonction du paramètre $t \in \mathbb{R}$, une base de l'image et du noyau de la matrice

$$A_t = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 & 3 \\ 2 & -1 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 0 & -2 \\ 2-t & 2-t & t-1 & t-2 \end{pmatrix} \in M_4(\mathbb{R}).$$

Exercice 13 (Défi chrono!). Inverser le plus vite possible et sans erreur la matrice...

Exercice 14. Soit $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3, e_4)$ la base canonique de $V = \mathbb{R}^4$, soit V^* l'espace dual de V et $\mathcal{B}^* = (e_1^*, e_2^*, e_3^*, e_4^*)$ la base duale de \mathcal{B} .

- (1) Soit P le plan de V engendré par les vecteurs $v_1 = e_1 + 2e_2 + e_3 + e_4$ et $v_2 = e_2 + e_3 + e_4$. Pour $a_1, a_2, a_3, a_4 \in \mathbb{R}$, sous quelles conditions la forme linéaire $f = a_1e_1^* + a_2e_2^* + a_3e_3^* + a_4e_4^*$ s'annule-t-elle sur P ?
- (2) Déterminer une base (f_1, \dots, f_d) du sous-espace

$$P^\perp = \{f \in V^* \mid f(v) = 0, \quad \forall v \in P\}$$

de V^* (où $d = \dim P^\perp$). Puis, de façon équivalente, donner d équations linéaires, linéairement indépendantes, définissant P .

- (3) Considérons les formes linéaires $\phi = e_1^* + e_2^* - e_3^*$ et $\psi = e_1^* + e_4^*$. Déterminer la dimension et une base du sous-espace

$$E = \{v \in V \mid \phi(v) = 0 = \psi(v)\}.$$

Exercice 15. Soit $V = \mathbb{R}_n[X]$ l'espace des polynômes de degré $\leq n$ et soit \mathcal{B} la base $(1, X, \dots, X^n)$ de V . Soit ∂ l'endomorphisme de V qui à tout $P \in V$ associe son polynôme dérivé P' . On pose $\partial^i = \partial \circ \dots \circ \partial$ (i facteurs) pour $i \in \mathbb{N}^*$, et $\partial^0 = \text{id}_V$. On fixe $n = 4$ (mais on peut faire l'exercice pour n arbitraire).

- (1) Pour $i = 0, \dots, n$, on considère la forme linéaire

$$\begin{aligned} \phi_i: V &\longrightarrow \mathbb{R} \\ P &\longmapsto \frac{(\partial^i P)(0)}{i!}. \end{aligned}$$

Montrer que (ϕ_0, \dots, ϕ_n) est la base duale de la base $(1, X, \dots, X^n)$ de V .

- (2) Soit $\lambda \in \mathbb{R}$. Écrire la matrice A_λ exprimant la famille de vecteurs $\mathcal{C}_\lambda = (1, X - \lambda, (X - \lambda)^2, \dots, (X - \lambda)^n)$ dans la base \mathcal{B} et montrer que \mathcal{C}_λ est une base de V .
- (3) Soit u_λ l'endomorphisme de V tel que $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u_\lambda) = A_\lambda$. Si $\mu \in \mathbb{R}$, pouvez-vous déterminer sans calcul la matrice de $u_\mu \circ u_\lambda$ puis celle de u_λ^{-1} ? Sinon, calculez A_λ^{-1} .
- (4) Soit \mathcal{C}_λ^* la base duale de \mathcal{C}_λ . Écrire la matrice de passage $\text{Mat}_{\mathcal{B}^*}(\mathcal{C}_\lambda^*)$.

Exercice 16 (Pour aller plus loin...). Trouver toutes les formes linéaires ϕ sur $M_n(\mathbb{R})$ qui sont multiplicatives, c'est à dire telles que pour toutes matrices $A, B \in M_n(\mathbb{R})$, on ait $\phi(AB) = \phi(A)\phi(B)$.