
DM 66. Enoncé

Il s'agit d'un sujet supplémentaire pour votre travail personnel.

Il n'est pas à rendre.

Le corrigé est disponible dès aujourd'hui.

Notations.

Soit \mathbb{K} un corps commutatif et V un espace vectoriel de dimension finie sur \mathbb{K} .

- On note $\mathcal{L}(V)$ l'algèbre des endomorphismes de V ;
- on note I l'application identique de V ;
- on note fg le produit (au sens de la composition) des éléments f et g de $\mathcal{L}(V)$;
- on note f^q le produit de q éléments de $\mathcal{L}(V)$ identiques à f , et par convention $f^0 = I$.
- Si X est un espace vectoriel de dimension finie, on note $\dim(X)$ sa dimension.
- Si f est une application linéaire, on note respectivement $\text{Im}f$, $\text{Ker}f$, $\text{rg}f$, son image, son noyau et son rang.
- Si A est une partie d'un espace vectoriel on note $\text{Vect}(A)$ le sous-espace vectoriel engendré par A .

Partie I : Idéaux de $\mathcal{L}(V)$

◇ On dit que la partie M de $\mathcal{L}(V)$ est un idéal à gauche lorsque M est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{L}(V)$ et que

$$\forall \varphi \in \mathcal{L}(V), \forall f \in M, \quad \varphi f \in M$$

On dit que la partie M de $\mathcal{L}(V)$ est un idéal à droite lorsque M est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{L}(V)$ et que

$$\forall \varphi \in \mathcal{L}(V), \forall f \in M, \quad f\varphi \in M$$

- ◇ Soit W un sous-espace vectoriel de V ;
on note J_W l'ensemble des endomorphismes de V dont l'image est contenue dans W
et K_W l'ensemble des endomorphismes de V dont le noyau contient W .
- ◇ Soit f un élément de $\mathcal{L}(V)$, on note Δ_f l'ensemble des $f\varphi$ où φ décrit $\mathcal{L}(V)$ et Γ_f l'ensemble des φf où φ décrit $\mathcal{L}(V)$.

1°) a) Soit f un élément de $\mathcal{L}(V)$.

Montrer que Δ_f est un idéal à droite et que Γ_f est un idéal à gauche.

b) Soit W un sous-espace vectoriel de V .

Montrer que J_W est un idéal à droite et que K_W est un idéal à gauche.

2°) a) Soit W un sous-espace vectoriel de V .

Montrer que $\dim(J_W) = (\dim V)(\dim W)$ et que $\dim(K_W) = (\dim V - \dim W)(\dim V)$.

b) Soit f un endomorphisme de V .

Montrer que $\dim(\Delta_f) = (\operatorname{rg} f)(\dim V) = \dim(\Gamma_f)$.

c) Soit W un sous-espace vectoriel de V .

Montrer qu'il existe f dans J_W telle que $\Delta_f = J_W$ et g dans K_W telle que $\Gamma_g = K_W$.

3°) a) Soit W, W' des sous-espaces vectoriels de V .

Montrer que $J_W \cap J_{W'} = J_{W \cap W'}$ et $K_W \cap K_{W'} = K_{W+W'}$.

b) Montrer que $J_W + J_{W'} = J_{W+W'}$ et $K_W + K_{W'} = K_{W \cap W'}$.

4°) a) Soit M un idéal à droite de $\mathcal{L}(V)$. Soit W un sous-espace vectoriel de V tel que $J_W \subset M$ et tel qu'aucun sous-espace W' de V ne vérifie $J_{W'} \subset M$ et $\dim W' > \dim W$. Montrer que $J_W = M$.

b) Soit M un idéal à gauche de $\mathcal{L}(V)$. Montrer de même qu'il existe un sous-espace vectoriel W de V tel que $K_W = M$.

c) Conclure de cette étude que pour tout idéal à droite M de $\mathcal{L}(V)$, il existe f dans $\mathcal{L}(V)$ telle que $\Delta_f = M$ et que pour tout idéal à gauche M de $\mathcal{L}(V)$, il existe g telle que $\Gamma_g = M$.

5°) a) Soit U et W des sous-espaces vectoriels de V .

Montrer que $\dim(J_U \cap K_W) = (\dim U)(\dim V - \dim W)$.

b) Montrer que $\{0\}$ et $\mathcal{L}(V)$ sont les seules parties de $\mathcal{L}(V)$ qui sont à la fois idéal à gauche et idéal à droite.

Partie II : Bases stables de $\mathcal{L}(V)$

◇ On pose $n = \dim(V)$ et on suppose jusqu'à la fin du problème que $n \geq 2$.

◇ Une base S de $\mathcal{L}(V)$ est dite stable lorsqu'elle vérifie :

$$\forall f, g \in S, \quad fg \in S \text{ ou } fg = 0.$$

6°) Soit B une base de V , notée $B = (e_1, e_2, \dots, e_n)$.

Une partie S de $\mathcal{L}(V)$ est dite canoniquement associée à B lorsqu'il existe une bijection $(i, j) \mapsto f_{ij}$ de $\{1, \dots, n\}^2$ sur S telle que :

$$\forall i, j, k \in \{1, \dots, n\} \quad f_{ij}(e_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } j \neq k \\ e_i & \text{si } j = k \end{cases}.$$

Dans ce cas, déterminer pour tout $i, j \in \{1, \dots, n\}$ la matrice de $f_{i,j}$ dans la base B , puis montrer que S est une base de $\mathcal{L}(V)$ qui est stable.

Soit S une base stable de $\mathcal{L}(V)$ et soit r le minimum du rang des éléments de S .

On note S' l'ensemble des f de S telles que $\operatorname{rg} f = r$.

7°) Montrer que :

$$\forall g \in S, \forall f \in S', (gf \in S' \text{ ou } gf = 0) \text{ et } (fg \in S' \text{ ou } fg = 0).$$

En utilisant la question 5.b, montrer que $\text{Vect}(S') = \mathcal{L}(V)$ puis que $S' = S$.

Tous les éléments de S ont donc le même rang r .

8°) On veut montrer dans cette question que $r < n$.

a) Montrer que si l'élément φ de $\mathcal{L}(V)$ vérifie $\forall h \in \mathcal{L}(V), \varphi h = h\varphi$, alors il existe $\lambda \in \mathbb{K}$ tel que $\varphi = \lambda I$.

b) On pose $\varphi = \sum_{f \in S} f$. Montrer que si l'on avait $r = n$ alors on aurait

$$\forall g \in S, \quad \varphi g = g\varphi = \varphi.$$

c) Conclure.

On note désormais \mathcal{J} l'ensemble des sous-espaces vectoriels U de V tels qu'il existe au moins un élément f de S vérifiant $\text{Im} f = U$; on note \mathcal{K} l'ensemble des sous-espaces vectoriels W de V tels qu'il existe au moins un élément f de S vérifiant $\text{Ker} f = W$.

Pour tout U de \mathcal{J} et pour tout W de \mathcal{K} on note S_U l'ensemble des f de S telles que $\text{Im} f = U$ et S^W l'ensemble des f de S telles que $\text{Ker} f = W$.

9°) a) Montrer que $\text{Vect}(S_U) = J_U$ et que $\text{Vect}(S^W) = K_W$ pour tout U de \mathcal{J} et tout W de \mathcal{K} .

b) Montrer que $\mathcal{L}(V)$ est la somme directe des J_U , où U décrit \mathcal{J} , c'est-à-dire :

$$\mathcal{L}(V) = \bigoplus_{U \in \mathcal{J}} J_U.$$

c) Montrer que V est la somme directe des U , où U décrit \mathcal{J} (on pourra utiliser la décomposition de I dans la somme des J_U).

10°) a) Soit W un élément de \mathcal{K} . Montrer que K_W est la somme directe des sous-espaces vectoriels engendrés par les $S_U \cap S^W$, où U décrit \mathcal{J} :

$$K_W = \bigoplus_{U \in \mathcal{J}} \text{Vect}(S_U \cap S^W)$$

b) En déduire que

$$\forall U \in \mathcal{J}, \forall W \in \mathcal{K}, \text{Vect}(S_U \cap S^W) = K_W \cap J_U.$$

11°) a) Soit f un élément de $S_U \cap S^W$. Montrer que $f^2 = 0$ ou $f^2 \in S_U \cap S^W$.

b) En déduire que pour tout $W \in \mathcal{K}$ et tout $U \in \mathcal{J}$, ou bien $U \subset W$ ou bien $U \oplus W = V$.

c) Montrer que pour tout élément W de \mathcal{K} , il existe au moins un élément U de \mathcal{J} tel que $U \oplus W = V$.

12°) Soit (U, W) un élément de $\mathcal{J} \times \mathcal{K}$ tel que $U \oplus W = V$.

On définit une application $f \mapsto \tilde{f}$ de $J_U \cap K_W$ dans $\mathcal{L}(U)$ en posant

$$\forall x \in U, \tilde{f}(x) = f(x).$$

a) Montrer que $f \mapsto \tilde{f}$ est un isomorphisme d'espaces vectoriels.

b) En appliquant la question 8 à U , montrer que $r = 1$.

c) Montrer que $S_U \cap S^W$ a pour unique élément la projection d'image U et de noyau W .

13°) a) Montrer que \mathcal{J} et \mathcal{K} ont chacun n éléments et que pour tout $U \in \mathcal{J}$ et tout $W \in \mathcal{K}$, $S_U \cap S^W$ est un singleton. On note $\varphi_{U,W}$ l'unique élément de $S_U \cap S^W$.

b) Montrer que :

$$\varphi_{U,W} \varphi_{U',W'} = \begin{cases} 0 & \text{si } U' \subset W \\ \varphi_{U,W'} & \text{si } U' \oplus W = V \end{cases}.$$

c) Montrer que $\bigcap_{W \in \mathcal{K}} W = \{0\}$.

Partie III : Construction de bases stables

On note $V^* = \mathcal{L}(V, \mathbb{K})$ le dual de V .

Soit S une base stable de $\mathcal{L}(V)$.

14°) Montrer que l'on peut trouver une base (e_1, e_2, \dots, e_n) de V , une base $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ de V^* et une matrice $\Lambda = (\lambda_{ij})_{1 \leq i, j \leq n} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ telles que les éléments de S sont les n^2 endomorphismes φ_{ij} définis par $\varphi_{ij}(x) = \lambda_{ij} \theta_j(x) e_i$, pour tout $x \in V$.

On note Ω la matrice $(\theta_i(e_j))_{1 \leq i, j \leq n}$ et on désigne par A l'ensemble des couples (i, j) tels que $\theta_i(e_j) \neq 0$.

15°) a) Lorsque $(j, k) \in A$, montrer que pour tout $i, \ell \in \{1, \dots, n\}$, $\lambda_{ij} \lambda_{k, \ell} \theta_j(e_k) = \lambda_{i, \ell}$. Montrer qu'on peut choisir les bases (e_1, e_2, \dots, e_n) et $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ de façon que $\theta_1(e_1) = 1$. On pose alors $a_i = \lambda_{i1}$ et $b_j = \lambda_{1j}$.

b) Montrer que si $(j, k) \in A$ alors $\theta_j(e_k) = \frac{1}{a_k b_j}$.

c) Montrer qu'il existe une base $(e'_1, e'_2, \dots, e'_n)$ de V et une base $(\theta'_1, \theta'_2, \dots, \theta'_n)$ de V^* telles que si $(j, k) \in A$ alors $\theta'_j(e'_k) = 1$ et telles que les éléments de S vérifient : $\varphi_{ij}(x) = \theta'_j(x) e'_i$, pour tout $x \in V$.

16°) Quitte à remplacer (e_1, e_2, \dots, e_n) par $(e'_1, e'_2, \dots, e'_n)$ et $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ par $(\theta'_1, \theta'_2, \dots, \theta'_n)$, on peut donc supposer que $\forall i, j, \lambda_{ij} = 1$, et que si $(j, k) \in A$ alors $\theta_j(e_k) = 1$. Montrer que la matrice Ω est inversible. En déduire comment construire toutes les bases stables de $\mathcal{L}(V)$.

17°) Construire, pour $n = 2$, une base stable de $\mathcal{L}(V)$ qui ne soit pas canoniquement associée à une base de V .