

Mines 2017 - PSI2

Endomorphismes échangeurs : un corrigé

A. Quelques considérations en dimension 2

1. La trace est linéaire et donc pour tout $u \in \mathcal{L}(E)$, $\text{Tr}(-u) = -\text{Tr}(u)$. Si u vérifie **(C3)** alors $u = -u$ et donc $\text{Tr}(u) = -\text{Tr}(u)$ et la trace est donc nulle.

$$\boxed{\text{Si } u \text{ vérifie (C3) alors } \text{Tr}(u) = 0}$$

2. E étant de dimension 2, $\chi_u = X^2 - \text{Tr}(u)X + \det(u) = X^2 - \delta^2$. Ce polynôme annulant u (Cayley-Hamilton) on en déduit que $u^2 = \delta^2 \text{Id}_E$.

Le spectre est l'ensemble des racines de χ_u et vaut ici $\{\delta, -\delta\}$. On a deux valeurs propres en dimension 2 et comme les sous-espaces propres sont en somme directe, il ne peuvent qu'être de dimension 1.

$$\boxed{u^2 = \delta^2 \text{Id}_E, \text{Sp}(u) = \{\delta, -\delta\}, \dim(E_\delta(u)) = \dim(E_{-\delta}(u)) = 1}$$

3. Notons e_+ un vecteur propre pour δ et e_- un vecteur propre pour $-\delta$. Ces vecteurs sont indépendants et on a

$$u(e_+ + e_-) = \delta(e_+ - e_-)$$

$D = \text{Vect}(e_+ + e_-)$ est une droite (car $e_+ + e_- \neq 0$) et elle n'est pas stable par u (car $\delta \neq 0$ et $(e_+ + e_-, e_+ - e_-)$ est libre car (e_+, e_-) l'est). On a donc $u(D) \not\subset D$.

Posons $F = D$ et $G = u(D)$. Ce sont des droites (car u est inversible et conserve la dimension) non égales et donc en somme directe (intersection réduite à $\{0\}$). Par dimension, ce sont des supplémentaires de E . Par définition, $u(F) = G$. De plus $u(G) = u^2(F) = \delta^2 F = F$. Ainsi,

$$\boxed{u \text{ est échangeur}}$$

B. La condition (C1) implique (C2) et (C3)

4. Un calcul par blocs montre que

$$\begin{pmatrix} 0_n & B \\ 0_{p,n} & 0_p \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} 0_n & 0_{n,p} \\ 0_{p,n} & 0_p \end{pmatrix} = 0_{n+p}$$

On montre de même que

$$\begin{pmatrix} 0_n & 0_{n,p} \\ A & 0_p \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} 0_n & 0_{n,p} \\ 0_{p,n} & 0_p \end{pmatrix} = 0_{n+p}$$

$$\boxed{M = \begin{pmatrix} 0_n & 0_{n,p} \\ A & 0_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0_n & B \\ 0_{p,n} & 0_p \end{pmatrix} \text{ est somme de deux matrices de carré nul}}$$

5. On vérifie par un calcul par blocs, par exemple, que

$$D^2 = I_n$$

D est donc inversible et est son propre inverse. Le calcul par blocs donne aussi

$$DM D^{-1} = DMD = \begin{pmatrix} 0_n & B \\ -A & 0_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_n & 0_{n,p} \\ 0_{p,n} & -I_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0_n & -B \\ -A & 0_p \end{pmatrix} = -M$$

Par définition de la similitude,

M et $-M$ sont semblables

6. $u(F) \subset G$ indique qu'il y a un bloc de 0 en haut à gauche.
 $u(G) \subset F$ indique qu'il y a un bloc de 0 en bas à droite.
 Finalement

$$\exists A, B / \text{Mat}_B(u) = \begin{pmatrix} 0_n & B \\ A & 0_p \end{pmatrix}$$

7. Si F et G sont non nuls, la question 4 montre que u vérifie (C_2) en utilisant l'isomorphisme entre endomorphisme et matrice associée dans la base B . La question 5 montre de même que u et $-u$ sont semblables.

Si F est nul, alors $G = E$ et $\text{Im}(u) = u(G) \subset F = \{0\}$. u est l'endomorphisme nul qui vérifie immédiatement **(C2)** et **(C3)**. C'est la même chose si $G = \{0\}$ (travailler alors avec $F = E$).

u vérifie **(C2)** et **(C3)**

C. La condition (C2) implique (C1) : cas d'un automorphisme

8. Si $x \in \text{Im}(f)$, il existe y tel que $x = f(y)$ et donc $f(x) = f^2(y) = 0$. Ainsi $x \in \ker(f)$. Par théorème du rang,

$$\dim(E) = \dim(\ker(f)) + \dim(\text{Im}(f)) \leq 2 \dim(\ker(f))$$

On a donc

$$\text{Im}(f) \subset \ker(f) \text{ et } \dim(\ker(f)) \geq \frac{\dim(E)}{2}$$

9. Soit $x \in \ker(a) \cap \ker(b)$. On a $u(x) = a(x) + b(x) = 0$ et comme u est injective $x = 0$. Ceci montre que $\ker(a) \oplus \ker(b)$.

Soit $x \in E$; on a $x = u(u^{-1}(x)) = a(u^{-1}(x)) + b(u^{-1}(x)) \in \ker(a) + \ker(b)$ car $a^2 = b^2 = 0$. Ainsi

$$E = \ker(a) \oplus \ker(b)$$

De plus $\text{Im}(a) \subset \ker(a)$ (car $a^2 = 0$) et $\text{Im}(b) \subset \ker(b)$ (car $b^2 = 0$). $\ker(a) \oplus \ker(b)$ entraîne ainsi $\text{Im}(a) \oplus \text{Im}(b)$.

Mais on a aussi $\forall x \in E, x = u(u^{-1}(x)) = a(u^{-1}(x)) + b(u^{-1}(x)) \in \text{Im}(a) + \text{Im}(b)$ et donc $E = \text{Im}(a) + \text{Im}(b)$ et finalement $E = \text{Im}(a) \oplus \text{Im}(b)$.

Si l'une des inclusions $\text{Im}(a) \subset \ker(a)$ ou $\text{Im}(b) \subset \ker(b)$ était stricte, on aurait $\dim(E) = \dim(\text{Im}(a)) + \dim(\text{Im}(b)) < \dim(\ker(a)) + \dim(\ker(b)) = \dim(E)$ ce qui est une contradiction. Les inclusions sont donc des égalités.

$$\text{Im}(a) = \ker(a) \text{ et } \text{Im}(b) = \ker(b)$$

10. On a $u(\ker(a)) \subset a(\ker(a)) + b(\ker(a)) = b(\ker(a)) \subset \text{Im}(b) = \ker(b)$ et de même $u(\ker(b)) \subset \ker(a)$. Comme $\ker(a)$ et $\ker(b)$ sont supplémentaires,

u est échangeur

D. Intermède : un principe de décomposition

11. Soit $k \in \mathbb{N}$. Si $x \in \ker(v^k)$ alors $v^{k+1}(x) = v(v^k(x)) = v(0) = 0$ et donc $x \in \ker(v^{k+1})$. Ainsi $\ker(v^k) \subset \ker(v^{k+1})$ et

$$(\ker(v^k))_{k \in \mathbb{N}} \text{ croît pour l'inclusion}$$

12. La suite de terme général $d_k = \dim(\ker(v^k))$ est donc aussi croissante. Or, elle est majorée (par $\dim(E)$). Elle est donc convergente.

Comme elle est constituée d'entiers, elle finit par stationner (puisque pour des indices grands, deux termes consécutifs de la suite sont des entiers distants de moins de $1/2$). En notant p le rang à partir duquel la suite stationne, on peut conclure que

$$\exists p \in \mathbb{N} / \forall k \geq p, \ker(v^k) = \ker(v^p)$$

Comme les noyaux sont emboîtés, on a $\bigcup_{k \leq p} \ker(v^k) = \ker(v^p)$. L'intersection avec les noyaux suivants ne change alors rien puisque ceux-ci sont égaux à $\ker(v^p)$.

$$\ker(v^p) = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \ker(v^k)$$

Si p convient, tout entier plus grand que p convient aussi et on peut supposer p pair quitte à le changer en $p+1$.

13. Les noyaux étant emboîtés, $E_\lambda^c(f) = \ker(v^p) \subset \ker(v^{2p})$. Mais $\ker(v^{2p})$ est aussi inclus dans l'intersection des $\ker(v^k)$ pour $k \geq p$ et donc a fortiori dans $\ker(v^p)$. Ainsi,

$$E_\lambda^c(f) = \ker(v^{2p})$$

Soit $x \in E_\lambda^c(f) \cap \text{Im}(v^p)$. Il existe y tel que $x = v^p(y)$ et $v^{2p}(y) = v^p(x) = 0$ montre que $y \in \ker(v^{2p}) = \ker(v^p)$ et donc que $x = v^p(y) = 0$. On a donc $E_\lambda^c(f) \oplus \text{Im}(v^p)$.

Par théorème du rang, les sommes des dimensions de $E_\lambda^c(f) = \ker(v^p)$ et $\text{Im}(v^p)$ vaut $\dim(E)$. La somme précédente est donc égale à E et nos espaces sont supplémentaires dans E .

Si $x \in \text{Im}(v^p)$, x s'écrit $x = v^p(y)$ et $v(x) = v^p(v(y)) \in \text{Im}(v^p)$.

Si $x \in \ker(v^p)$ alors $v^p(v(x)) = v(v^p(x)) = v(0) = 0$ et donc $v(x) \in \ker(v^p)$.

$$E_\lambda^c(f) \text{ et } \text{Im}(v^p) \text{ sont des supplémentaires de } E \text{ stables par } f.$$

14. Supposons, par l'absurde, que λ soit valeur propre de $f|_{\text{Im}(v^p)}$. Il existe alors $x \in \text{Im}(v^p)$ non nul tel que $f(x) = \lambda x$ c'est à dire tel que $x \in \ker(v) \subset E_\lambda^c$. Comme $E_\lambda^c(f)$ et $\text{Im}(v^p)$ sont en somme directe, $x = 0$ et ceci est contradictoire.

$(X - \lambda)^p$ annule $f|_{E_\lambda^c(f)}$ (par définition de $E_\lambda^c(f)$). La seule valeur propre possible pour $f|_{E_\lambda^c(f)}$ est donc λ .

$$\lambda \notin \text{Sp}(f|_{\text{Im}(v^p)}) \text{ et } \text{Sp}(f|_{E_\lambda^c(f)}) \subset \{\lambda\}$$

Si $E_\lambda^c(f)$ n'est pas réduit à $\{0\}$ (ce qui revient à dire que λ est valeur propre de f), l'inclusion est une égalité (par exemple car dans un $\mathbb{C}$ espace de dimension ≥ 1 tout endomorphisme a au moins une valeur propre).

15. Les seules valeurs propres possibles de f sont λ et μ . Comme on est dans un $\mathbb{C}$ -espace, il existe des entiers q et r tels que

$$\chi_f = (X - \lambda)^q (X - \mu)^r$$

q et r peuvent être nuls si λ ou μ n'est pas valeur propre mais $q + r = \dim(E)$.

Notons $g = f|_{\text{Im}(v^p)}$. Un polynôme annulant f annule g et le théorème de Cayley-Hamilton indique que

$$(g - \lambda Id)^p \circ (g - \mu Id)^r = 0$$

La question précédente indique que $(g - \lambda Id)^p$ est inversible (car λ n'est pas valeur propre de g) et en composant par l'inverse, on a donc

$$(g - \mu Id)^r = 0$$

En particulier, $\forall x \in \text{Im}(v^p)$, $x \in \ker((g - \mu Id)^r) \subset \ker((f - \mu Id)^r) \subset E_\mu^c(f)$.

Avec le résultat de la question 13, on a donc

$$E \subset E_\lambda^c(f) + E_\mu^c(f)$$

Par ailleurs, dans une base adaptée à la décomposition $E = E_\lambda^c(f) \oplus \text{Im}(v^p)$, la matrice de f est bloc-diagonale d'après la question 13. De plus, la question 14 indique qu'un bloc n'admet que λ comme valeur propre et l'autre n'admet que μ comme valeur propre. Le polynôme caractéristique du premier bloc est $(X - \lambda)^{\dim(E_\lambda^c(f))}$ et celui du second est $(X - \mu)^{\dim(\text{Im}(v^p))}$. Comme le produit de ces polynômes donne χ_f , on a $\dim(E_\lambda^c(f)) = q$. De même, on a $\dim(E_\mu^c(f)) = q$.

Ainsi, $E = E_\lambda^c(f) + E_\mu^c(f)$ et les dimensions sont les bonnes (la dimension de E est la somme des dimensions des deux autres espaces). On conclut que

$$\boxed{E = E_\lambda^c(f) \oplus E_\mu^c(f)}$$