

Corrigé, Pr. Mamouni, CPGE My Youssef, Rabat ⑤

1^{ère} Partie.

A-Quelques propriétés de Φ_u .

- ① $\mathcal{T} = \ker \text{Tr}$ est un hyperplan car Tr est une forme linéaire sur E , non nulle, vu que $\text{Tr}(\text{id}_E) = n$.
- ② Vérifier rapidement que :
- ☛ $\Phi(u, v) = -\Phi(v, u)$, d'où l'antisymétrie.
 - ☛ $\Phi(u + \lambda v, w) = \Phi(u, w) + \lambda \Phi(v, w)$, d'où la linéarité à gauche, l'antisymétrie en plus implique la linéarité à droite, donc la bilinéarité.
- ③ **a** $\text{id}_E, u, \dots, u^{n-1}$ appartiennent à $\ker \Phi_u$ car commutent avec u , donc $\text{Vect}(\text{id}_E, u, \dots, u^{n-1}) \subset \ker \Phi_u$, d'autre part $\{\text{id}_E, u\}$ est libre dans $\ker \Phi_u$, car u n'est pas une homothétie, donc $\dim \ker \Phi_u \geq 2$.
- b** $v \in \ker \Phi_u \implies v$ commute avec u , donc les sous-espaces propres $E_u(\lambda)$ de u sont stables par v .
- ④ $\text{Im } \Phi \subset \mathcal{T}$ car $\text{Tr}(uv) = \text{Tr}(vu)$, et aussi $\text{Im } \Phi_u \subset \text{Im } \Phi \subset \mathcal{T}$.
On ne peut pas avoir $[u, v] = \text{id}_E$, car $\text{Tr}(\text{id}_E) = n \neq 0$ et $\text{Tr}([u, v]) = 0$.
On ne peut pas avoir $\text{Im } \Phi_u = \mathcal{T}$, car $\dim \mathcal{T} = n^2 - 1$, alors que $\dim \text{Im } \Phi_u = n^2 - \dim \ker \Phi_u \leq n^2 - 2$.

a L'implication directe est évidente.

Réciproquement, supposons $\{x, u(x)\}$ est liée, donc $\forall x \in E, \exists \lambda_x \in \mathbb{K}$ tel que $u(x) = \lambda_x \cdot x$, pour montrer que u est une homothétie il suffit de montrer que λ_x ne dépend pas de x , autrement dit $\lambda_x = \lambda_y$.

Soit $x, y \in E$ non nul.

☛ 1^{er} cas : $\{x, y\}$ est liée, donc $y = \alpha x$, d'où $u(y) = \alpha u(x)$, ainsi $\lambda_y \cdot y = \alpha \lambda_x \cdot x = \lambda_x \cdot y$, d'où $\lambda_y = \lambda_x$.

☛ 2^{ème} cas $\{x, y\}$ est libre.

$$\begin{aligned} u(x+y) = u(x) + u(y) &\implies \lambda_{x+y} \cdot (x+y) = \lambda_x \cdot x + \lambda_y \cdot y \\ &\implies (\lambda_{x+y} - \lambda_x) \cdot x + (\lambda_{x+y} - \lambda_y) \cdot y = 0_E \\ &\implies \lambda_{x+y} = \lambda_x = \lambda_y \end{aligned}$$

⑥ **a** Pour $k = 0$, vrai car $(\Phi_u)^0(v) = v$.

Supposons vrai pour k , donc

$$\begin{aligned} (\Phi_u)^{k+1}(v) &= \Phi_u \circ (\Phi_u)^k(v) \\ &= \Phi_u \left(\sum_{p=0}^k (-1)^p \binom{p}{k} u^{k-p} v u^p \right) \\ &= \sum_{p=0}^k (-1)^p \binom{p}{k} \Phi_u \left(u^{k-p} v u^p \right) \\ &= \sum_{p=0}^k (-1)^p \binom{p}{k} u^{k+1-p} v u^p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{p=0}^k (-1)^p \binom{p}{k} u^{k-p} v u^{p+1} \\
 & = \sum_{p=0}^k (-1)^p \binom{p}{k} u^{k+1-p} v u^p \\
 & + \sum_{p=1}^{k+1} (-1)^p \binom{p-1}{k} u^{k+1-p} v u^p
 \end{aligned}$$

On remplace p par p-1 dans la 2ème somme

$$\begin{aligned}
 & = u^{k+1} v + \sum_{p=1}^k (-1)^p \left(\binom{p}{k} + \binom{p-1}{k} \right) k u^{k+1-p} v u^p \\
 & + (-1)^{k+1} v u^{k+1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & = u^{k+1} v + \sum_{p=1}^k (-1)^p \binom{p}{k+1} k u^{k+1-p} v u^p \\
 & + (-1)^{k+1} v u^{k+1} \\
 & = \sum_{p=0}^{k+1} (-1)^p \binom{p}{k+1} k u^{k+1-p} v u^p
 \end{aligned}$$

b Supposons $u^k = 0$, dans ce cas $(\Phi_u)^{2k}(v) = \sum_{p=0}^{2k} (-1)^p \binom{p}{2k} k u^{2k-p} v u^p = 0$, car $u^p = 0$ si $p \geq k$ et $u^{2k-p} = 0$ si $p \leq k$. Donc u nilpotent $\implies \Phi_u$ nilpotent.

B-Détermination de l'image de Φ .

- ① Si $u = \lambda \text{id}_E$, alors $\text{Tr}(u) = \lambda n = 0$, donc $\lambda = 0$, d'où $u = 0$, contradiction, donc u ne peut pas être une homothétie.
- ② Comme u n'est pas une homothétie d'après I.A.5.a) $\exists e_1 \in$

E tel que $\{e_1, u(e_1)\}$ soit libre.

- ③ Prendre $e_2 = u(e_1)$ puis utiliser le théorème de la base incomplète, car $\{e_1, e_2\}$ libre, ainsi, $u(e_1) = e_2$ ne peut pas s'exprimer en fonction de e_1 , d'où $A = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(u) = \begin{pmatrix} 0 & {}^t X \\ Y & A_1 \end{pmatrix}$, où $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$.
- ④ **a** Il suffit de prendre α qui n'est pas valeur propre de U .

b Un calcul très simple à faire.

- ⑤ On a déjà vu que $\text{Im } \Phi \subset \mathcal{T}$ dans I.A.4), montrons l'autre inclusion réciproque par récurrence sur $n = \dim E$. Pour $n = 1$, $\dim \mathcal{L}(E) = 1$, donc tous les endomorphismes sont proportionnels à id_E , donc des homothéties, d'où $\Phi = 0$, donc $\dim \text{Im } \Phi = 0 = \dim \mathcal{T}$, d'où l'égalité.

Supposons vrai pour $n - 1$, donc $\text{Tr}(u) = \text{Tr}(A) = \text{Tr}(A_1) = 0$, appliquons l'hypothèse de récurrence pour l'endomorphisme canoniquement associé à A_1 , donc $A_1 = UV - VU$, d'où $A = U'V' - V'U'$, avec $U' = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & U \end{pmatrix}$, $V' =$

$\begin{pmatrix} 0 & {}^t R \\ S & V \end{pmatrix}$ où α, S, R vérifient la question précédente, choisis tels que $U - \alpha I_{n-1}$ inversible, $S = (U - \alpha I_{n-1})^{-1} Y$ et $R = -{}^t((U - \alpha I_{n-1})^{-1}) X$.

Soit u', v' les endomorphismes canoniquement associés à U' et V' , alors $u = u'v' - v'u' \in \text{Im } \Phi$.

C-Détermination de $\text{Tr}(\Phi_u)$.

- ① La famille $(u_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n}$ est de cardinal $n^2 = \dim(\mathcal{L}(E))$, il suffit donc de montrer qu'elle est libre.

En effet supposons $\sum_{1 \leq i, j \leq n} \lambda_{i,j} u_{i,j} = 0$, donc $\forall 1 \leq k \leq n$, on a $\sum_{1 \leq i, j \leq n} \lambda_{i,j} u_{i,j}(e_k) = 0$, d'où $\sum_{1 \leq i, j \leq n} \lambda_{i,j} \delta_{j,k} e_i = 0$, d'où $\sum_{1 \leq i \leq n} \lambda_{i,k} e_i = 0$, d'où $\lambda_{i,k} = 0, \forall 1 \leq i, k \leq n$, car la famille $(e_i)_{1 \leq i \leq n}$ est libre.

② Pour tout $1 \leq p \leq n$, on a : $u_{i,j} u_{k,l}(e_p) = \delta_{l,p} u_{i,j}(e_k) = \delta_{l,p} \delta_{j,k} e_i = \delta_{j,k} u_{i,l}(e_p)$, d'où $u_{i,j} u_{k,l} = \delta_{j,k} u_{i,l}$ car ils coïncident sur la base $(e_p)_{1 \leq p \leq n}$.

On a $u = \sum_{1 \leq k, l \leq n} a_{k,l} u_{k,l}$, d'où :

$$\begin{aligned} \Phi_u(u_{i,j}) &= uu_{i,j} - u_{i,j}u \\ &= \sum_{1 \leq k, l \leq n} a_{k,l} u_{k,l} u_{i,j} - \sum_{1 \leq k, l \leq n} a_{k,l} u_{i,j} u_{k,l} \\ &= \sum_{1 \leq k, l \leq n} a_{k,l} \delta_{l,i} u_{k,j} - \sum_{1 \leq k, l \leq n} a_{k,l} \delta_{j,k} u_{i,l} \\ &= \sum_{1 \leq k \leq n} a_{k,i} u_{k,j} - \sum_{1 \leq l \leq n} a_{j,l} u_{i,l} \\ &= \sum_{1 \leq k \leq n} a_{k,i} u_{k,j} - \sum_{1 \leq k \leq n} a_{j,k} u_{i,k} \end{aligned}$$

On remplace l par k dans la 2ème somme

③ D'après la question précédente, on a :

$$\begin{aligned} \Phi_u(u_{i,j}) &= \sum_{\substack{1 \leq k \leq n \\ k \neq i}} a_{k,i} u_{k,j} + a_{i,i} u_{i,j} - \sum_{\substack{1 \leq k \leq n \\ k \neq j}} a_{j,k} u_{i,k} - a_{j,j} u_{i,j} \\ &= \sum_{\substack{1 \leq k \leq n \\ k \neq i}} a_{k,i} u_{k,j} - \sum_{\substack{1 \leq k \leq n \\ k \neq j}} a_{j,k} u_{i,k} + (a_{i,i} - a_{j,j}) u_{i,j} \end{aligned}$$

Ainsi les termes diagonaux de la matrice de Φ_u dans la base $(u_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n}$, sont les $a_{i,i} - a_{j,j}$ tel que $1 \leq i, j \leq n$, d'où

$\text{Tr}(\Phi_u) = \sum_{1 \leq i, j \leq n} (a_{i,i} - a_{j,j}) = \sum_{1 \leq i, j \leq n} a_{i,i} - \sum_{1 \leq i, j \leq n} a_{j,j} = 0$ car i, j jouent des rôles symétriques.

2ème Partie.

A-Cas où u est diagonalisable.

① a $A = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(u_{i,j}) = \begin{pmatrix} \mu_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \mu_n \end{pmatrix}$ est diagonale, d'après I.C.2), $\Phi_u(u_{i,j}) = a_{i,i} u_{i,j} - a_{j,i} u_{i,j} = (\mu_i - \mu_j) u_{i,j}$.

b D'après la question précédente, $\mu_i - \mu_j$ sont des valeurs propres, dont les vecteurs propres associés sont les $(u_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n}$ qui forment une base de $\mathcal{L}(E)$, ainsi Φ_u admet une base propre donc diagonalisable.

② $v \in \ker \Phi_u \implies v(E_u(\lambda_i)) \subset E_u(\lambda_i), \forall 1 \leq i \leq p$, d'après I.A.3.a).

Inversement supposons $v(E_u(\lambda_i)) \subset E_u(\lambda_i), \forall 1 \leq i \leq p$, et montrons que $vu = uv$, il suffit alors de le montrer sur la base $(e_i)_{1 \leq i \leq n}$.

En effet $e_i \in E_u(\mu_i) \implies v(e_i) \in E_u(\mu_i) \implies uv(e_i) = \mu_i v(e_i)$, or $vu(e_i) = v(\mu_i e_i) = \mu_i v(e_i)$, d'où l'égalité.

③ Posons $\Psi : \ker \Phi_u \longrightarrow \mathcal{L}(E_u(\lambda_1)) \times \cdots \times \mathcal{L}(E_u(\lambda_p))$
 $v \longmapsto (v|_{E_u(\lambda_1)}, \cdots, v|_{E_u(\lambda_p)})$

Ψ est bien définie car les sous-espaces propres $E_u(\lambda_i)$ sont stables par tout $v \in \ker \Phi_i$ qui y induit un endomorphisme.

Ψ est linéaire, car $(v + \lambda w)|_{E_u(\lambda_i)} = v|_{E_u(\lambda_i)} + \lambda w|_{E_u(\lambda_i)}$, pour tous $v, w \in \ker \Phi_i$.

Ψ est injective, car $v \in \ker \Phi_i \implies v = 0$ sur $E_u(\lambda_i) \forall 1 \leq i \leq p$, donc $v = 0$ sur $\bigoplus_{i=1}^p E_u(\lambda_i) = E$ car u est diagonalisable.

Enfin, Soit $(v_1, \dots, v_p) \in \mathcal{L}(E_u(\lambda_1)) \times \dots \times \mathcal{L}(E_u(\lambda_p))$, cherchons $v \in \ker \Phi_u$ tel que $\Psi(v) = (v_1, \dots, v_p)$, pour cela, tout $x \in E$ s'écrit de façon unique sous la forme, $x = x_1 + \dots + x_p$ tel que $x_i \in E_u(\lambda_i)$, posons $v(x) = v_1(x_1) + \dots + v_p(x_p)$ il est clair que $v|_{E_u(\lambda_i)} = v_i$ et donc $v(E_u(\lambda_i)) = v_i(E_u(\lambda_i)) \subset E_u(\lambda_i)$, d'où $v \in \ker \Phi_u$ et $\Psi(v) = (v_1, \dots, v_p)$. Donc Ψ est surjective.

Ainsi Ψ définit un isomorphisme de $\ker \Phi_u$ vers $\mathcal{L}(E_u(\lambda_1)) \times \dots \times \mathcal{L}(E_u(\lambda_p))$.

Donc $\dim(\ker \Phi_u) = \dim(\mathcal{L}(E_u(\lambda_1)) \times \dots \times \mathcal{L}(E_u(\lambda_p))) = \sum_{i=1}^p \dim(\mathcal{L}(E_u(\lambda_i))) = \sum_{i=1}^p \dim(E_u(\lambda_i))^2 = \sum_{i=1}^p m_i^2$, car u est diagonalisable, donc $\text{rg}(\text{Im } \Phi_u) = \dim(\text{Im } \Phi_u) =$

$$\dim(\mathcal{L}(E)) - \dim(\ker \Phi_u) = (n^2) - \sum_{i=1}^p m_i^2$$

④ Si u n'admet que des valeurs propres distinctes alors elles sont toutes simples, donc $m_i = 1, \forall 1 \leq i \leq n$, d'où $\dim(\ker \Phi_u) = n$.

$\text{id}_E, u, \dots, u^{n-1} \in \ker \Phi_u$ car commutent avec u , donc $\text{Vect}(\text{id}_E, u, \dots, u^{n-1}) \subset \ker \Phi_u$.

D'autre part, supposons $(\text{id}_E, u, \dots, u^{n-1})$ est liée, alors ils existeraient des scalaires, $(\lambda_k)_{0 \leq k \leq n-1}$ non tous nuls, tels que

$$\sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k u^k = 0, \text{ d'où } P(X) = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k X^k \text{ est un polynôme annula-}$$

teur de u , non nul de degré inférieur à $n - 1$, impossible car $\deg \pi_u = n$ puisque u admet n valeurs propres.

Donc $\dim(\text{Vect}(\text{id}_E, u, \dots, u^{n-1})) = n = \dim(\ker \Phi_u)$ et $\text{Vect}(\text{id}_E, u, \dots, u^{n-1}) \subset \ker \Phi_u$, d'où l'égalité.

B- Cas où $\dim E = 2$.

① u n'est pas une homothétie, donc $\exists e \in E$ tel que $\mathcal{B} = (e, u(e))$ libre dans E , d'après I.A.5.a), donc base de E car $\dim E = 2$.

Soit $v \in \ker \Phi_u$, donc $uv = vu$, montrons que $v \in \text{Vect}(\text{id}_E, u)$, c'est à dire $v = \lambda \text{id}_E + \mu u$

Soit $U = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(u) = \begin{pmatrix} 0 & \alpha \\ 1 & \beta \end{pmatrix}$ et $V = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(v) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$, montrons alors que $V = \lambda I_n + \mu U$, il suffit de prendre $\lambda = a$ et $\mu = c$ en utilisant le fait que $UV = VU$.

Ainsi $\ker \Phi_u \subset \text{Vect}(\text{id}_E, u)$, l'autre inclusion est évidente car id_E et u commutent avec u .

② $\chi_{\Phi|_{\ker \Phi_u}}$ divise χ_{Φ_u} , car $\ker \Phi_u$ stable par Φ_u , or $\dim \ker \Phi_u = 2$ et 0 est l'une valeur propre de $\Phi|_{\ker \Phi_u}$, donc $\chi_{\Phi|_{\ker \Phi_u}} = X^2$, d'où $\chi_{\Phi_u} = X^2(X^2 + \beta)$.

③ Si $\beta = 0$, alors $\chi_{\Phi_u} = X^4$, si de plus Φ_u est diagonalisable, alors $\pi_{\Phi_u} = X$, car ses racines simples, or $\pi_{\Phi_u}(\Phi_u) = 0$, d'où $\Phi_u = 0$, donc $\ker \Phi_u = \mathcal{L}(E)$, donc u est une homothétie, contradiction.

④ Supposons $\beta \neq 0$.

$\leftarrow \mathbb{K} = \mathbb{C}$, soit $\lambda, -\lambda$ les solutions dans \mathbb{C} de l'équation : $X^2 + \beta = 0$, ce sont des racines simples de χ_{Φ_u} et 0 est une

valeur propre double, dont l'espace propre associé est de dimension 2, donc Φ_u diagonalisable.

☛ $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ et $\beta < 0$, pareil que le 1^{er} cas.

☛ $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ et $\beta > 0$, dans ce cas χ_{Φ_u} n'est pas scindé dans \mathbb{R} , car admet des racines complexes, non réelles, donc Φ_u n'est pas diagonalisable.

⑤ **a** Reprendre le raisonnement fait dans la question précédente.

b $\Phi_u(v) = \lambda v$, donc $uv - vu = \lambda v$, supposons v inversible, donc $u - vu v^{-1} = \lambda id_E$, d'où $\left[uv^{-1}, \frac{v}{\lambda}\right] = id_E$, impossible car $id_E \notin \text{Im } \Phi$.

$$v = \frac{\lambda}{\lambda} uv - vu, \text{ donc } \text{Tr} v = \frac{\lambda}{\text{Tr}(uv) - \text{Tr}(vu)} = 0.$$

Puisque, $\dim E = 2$, alors $\chi_v = v^2 - \text{Tr}(v)v + \det v$, or $\det v = 0$ car v n'est pas inversible et $\text{Tr}(v) = 0$, d'où $\chi_v = v^2$, comme $\chi_v(v) = 0$, alors $v^2 = 0$.

c Détermination de $\text{Sp}(u)$.

☛ $\mathcal{B} = (e, v(e))$ base de $E \iff (e, v(e))$ libre dans E
car $\dim E = 2$
 $\iff v(e) \neq \lambda e$ tel que $\lambda \in \text{Sp}(v)$
 $\iff v(e) \neq 0_E$ car $\text{Sp}(v) = \{0\}$
puisque $v^2 = 0$

☛ Posons $u(e) = ae + bv(e)$, et donc $vu(e) = av(e)$ car $v^2 = 0$
 $uv - vu = \lambda v \implies uv(e) = vu(e) + \lambda v(e)$
 $\implies uv(e) = (a + \lambda)v(e)$

$$\text{D'où } \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(u) = \begin{pmatrix} a & 0 \\ b & a + \lambda \end{pmatrix}$$

Ainsi $\text{Tr}(u) = 2a + \lambda$, d'où $a = \frac{\text{Tr}(u) - \lambda}{2}$ et

$$\text{Sp}(u) = \left\{ a = \frac{\text{Tr}(u) - \lambda}{2}, a + \lambda = \frac{\text{Tr}(u) + \lambda}{2} \right\}.$$

Donc u est diagonalisable car admet 2 valeurs propres distinctes, et $\dim E = 2$.

⑥ v non inversible, donc $\ker v \neq \{0_E\}$, et $v \neq 0$, donc $\ker v \neq E$, d'où $\dim \ker v = 1$, de même $\dim \ker w = 1$

Supposons $\ker v \cap \ker w \neq \{0_E\}$, alors $\ker v = \ker w$, vu que $\dim \ker v = \dim \ker w = 1$.

C- Cas où Φ_u est diagonalisable

① $uv_i - v_i u = \beta v_i$, donc $uv_i(x) = v_i u(x) + \beta v_i(x) = (\lambda_i + \beta)v_i(x)$ car $u(x) = \lambda_i x$.

Donc $v_i(x)$ sont des vecteurs propres de u .

② Il est clair que Ψ est linéaire.

Surjection : Soit $y \in E$.

☛ Si $y = 0_E$, prendre $v = 0$.

☛ Si $y \neq 0_E$, on complète x et y pour avoir deux bases \mathcal{B} et \mathcal{B}' qui commencent par x et y , et soit v l'application linéaire qui transforme \mathcal{B} en \mathcal{B}' , donc $v(x) = y$.

③ (v_1, \dots, v_{n^2}) est une base de $\mathcal{L}(E)$, donc son image par Ψ est génératrice de $\text{Im } \Psi = E$ car Ψ est surjective, ainsi $(v_1(x), \dots, v_{n^2}(x))$ est une famille génératrice de E formée par des vecteurs propres de u , de la quelle on peut extraire une base de E , donc u est diagonalisable.

3^{ème} Partie.

- ① ① Découle immédiatement de l'égalité $uv - vu = \lambda v$.
- ② Supposons $\det v \neq 0$, la question précédente implique que
 $\det(u - x \text{id}_E) = \det(u - (x + \lambda) \text{id}_E)$, donc
 $\chi_u(x) = \chi_u(x + \lambda), \forall x \in \mathbb{K}$.
 Supposons χ_u n'est pas constant, soit $x \in \mathbb{C}$ racine de χ_u , alors $x + \lambda, x + 2\lambda, \dots$ sont des racines de χ_u qui est donc nul car admet une infinité de racines, ce qui est impossible, donc χ_u est constant.
- ③ Si v est inversible, alors $\det v \neq 0$, donc χ_u est constant, d'où $\deg u = 0$, ce qui est impossible car $\dim E = \deg \chi_u$
- ② Raisonons par récurrence sur $k \in \mathbb{N}^*$
 Pour $k = 1$, c'est vrai car v vecteur propre de Φ_u associé à la valeur propre à la valeur propre λ .
 Supposons vrai pour k , dans ce cas $\Phi_u(v^{k+1}) = uv^{k+1} - v^{k+1}u = (uv)v^k - v^{k+1}u = (vu + \lambda v)v^k - v^{k+1}u = v(uv^k - v^k u) + \lambda v^{k+1} = v\Phi_u(v^k) + \lambda v^{k+1} = (k + 1)\lambda v^{k+1}$.
 Si $v^p \neq 0$, alors c'est un vecteur propre de Φ_u associé à la valeur propre $p\lambda$.
- ③ Si $v^p \neq 0, \forall p \in \mathbb{N}^*$, alors Φ_u aurait une infinité de valeurs propres distinctes, les $p\lambda$, absurde, donc $\exists p \in \mathbb{N}^*$ tel que $v^p = 0$.
- ④ ① $\text{Im } v^p$ est stable par v , car v^p commute avec v .
 D'autre part, soit $y = v^p(x) \in \text{Im } v^p$, on a $uv^p = v^p u + p\lambda v^p$, d'après III.2, donc $u(y) = uv^p(x) = v^p(u(x) + p\lambda x) \in \text{Im } v^p$, d'où $\text{Im } v^p$ est aussi stable par u .

- ② On a : $v_1 : \text{Im } v^p \rightarrow \text{Im } v^p$ avec $\ker v_1 = \ker v \cap \text{Im } v^p$
 $x \mapsto v(x)$
 $\text{Im } v^p \subset \ker v$, donc $\dim \ker v_1 \leq 1$ et $\text{Im } v_1 = v(\text{Im } v^p) = \text{Im } v^{p+1}$. D'après la formule du rang, on a :
 $\dim \text{Im } v^p = \dim \ker v_1 + \dim \text{Im } v^{p+1}$.
 Supposons $\ker v_1 = \{0_E\}$, donc $v^{p+1}(x) = 0 \implies v^p(x) \in \ker v_1 \implies v^p(x) = 0$
- ③ $\dim \ker v = 1 \implies \dim \text{Im } v = n - 1$
 $\implies \dim \text{Im } v^2 = \dim \text{Im } v - 1 = n - 2$
 \vdots
 $\implies \dim \text{Im } v^{n-1} = 1$
 $\implies \dim \text{Im } v^n = 0$
- Donc $v^{n-1} \neq 0$ et $v^n = 0$.
- ⑤ $\text{card } \mathcal{B} = n = \dim E$, il suffit donc de montrer que \mathcal{B} est libre.
 En effet : Soit $\lambda_0, \dots, \lambda_{n-1} \in \mathbb{K}$ tel que $\lambda_0 e + \dots + \lambda_{n-1} u^{n-1}(e) = 0$, on compose par u^{n-1} , donc $\lambda_0 u^{n-1}(e) = 0$, d'où $\lambda_0 = 0$, puis on compose par u^{n-2} pour montrer que $\lambda_1 = 0$ et ainsi de suite.
- $$\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(v) = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ 1 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$
- ⑥ ① Il suffit de définir w_0 sur la base \mathcal{B} , pour cela posons $w_0(v^k(e)) = \Phi_u(v^k)(e)$, d'après III.2, on a $w_0(v^k(e)) = k\lambda v^k(e)$, donc $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(w) = \text{Diag}(0, \lambda, \dots, (n-1)\lambda)$

② $\forall w \in \mathcal{A}$, on a $w - w_0 \in \ker \Phi_v$, d'où \mathcal{A} est un espace affine de direction $\ker \Phi_v$ et d'origine w_0 .

③ Montrons que $(\text{id}_E, v, \dots, v^{n-1})$ base de $\ker \Phi_v$.

Soit $\lambda_0, \dots, \lambda_{n-1} \in \mathbb{K}$ tel que $\lambda_0 \text{id}_E + \dots + \lambda_{n-1} v^{n-1} = 0$, on applique l'égalité à e , donc $\lambda_0 e + \dots + \lambda_{n-1} v^{n-1}(e) = 0$, or \mathcal{B} libre, donc $\lambda_0 = \dots = \lambda_{n-1} = 0$, donc la famille est libre.

D'autre part, soit $w \in \ker \Phi_v$, donc commute avec v mais aussi avec v^k pour $0 \leq k \leq n-1$, or \mathcal{B} base de E , donc $w(e) = \lambda_0 e + \dots + \lambda_{n-1} v^{n-1}(e) = P(v)(e)$, et $wv^k(e) = v^k w(e) = v^k P(v)(e) = P(v)(v^k(e))$, d'où $w = P(v)$ car égaux sur la base \mathcal{B} , donc notre famille est génératrice pour $\ker \Phi_v$, donc base et par suite sa dimension vaut n .

⑦ Posons $u(e) = \lambda_0 e + \dots + \lambda_{n-1} v^{n-1}(e) = P(v)(e)$, on a $\Phi_u(v^k) = k\lambda v^k$, d'où $uv^k = v^k u + k\lambda v^k$, d'où $uv^k(e) = v^k P(v)(e) + k\lambda v^k(e)$, or $v^n = 0$, donc $vP(v) = \lambda_0 v(e) + \dots + \lambda_{n-2} v^{n-1}(e)$, $v^2 P(v) = \lambda_0 v^2(e) + \dots + \lambda_{n-3} v^{n-1}(e)$, ..., $v^{n-1} P(v)(e) = \lambda_0 v^{n-1}(e)$,

$$\text{d'où } \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(u) = \begin{pmatrix} \lambda_0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_1 & \lambda_0 + \lambda & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \lambda_{n-1} & \lambda_{n-2} & \dots & \lambda_1 & \lambda_0 + (n-1)\lambda \end{pmatrix}$$

⑧ Posons $\mathcal{B}' = (e_0, \dots, e_{n-1})$, donc $u(e_k) = (\alpha + k\lambda)e_k = \alpha_k e_k$.
Soit $v \in E_{\Phi_u}(\lambda)$, donc $uv - vu = \lambda v$, posons $v(e_0) =$

$$\sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k e_k, \text{ donc } uv(e_0) = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k u(e_k) = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k \alpha_k e_k \text{ et } vu(e_0) =$$

$$\alpha_0 v(e_0) = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k \alpha_0 e_k, \text{ or } \lambda v(e_0) = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k \lambda e_k, \text{ d'où } \lambda_k \alpha_k - \lambda_k \alpha_0 = \lambda_k \lambda, \text{ donc } \lambda_k (\alpha_k - \alpha_0 - \lambda) = 0, \text{ donc } (k-1)\lambda \lambda_k = 0, \text{ d'où } \lambda_k = 0 \text{ si } k \neq 1, \text{ ainsi la 1ère colonne de la matrice de } u$$

$$\text{sera de la forme suivante : } \begin{pmatrix} 0 \\ a_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

En adoptant le même raisonnement pour calculer $v(e_1)$, on

$$\text{trouve que la 2ème colonne est de la forme suivante } \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a_2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Et ainsi de suite la forme finale de la matrice sera

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ a_1 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & \dots & 0 & a_{n-1} & 0 \end{pmatrix}$$

Ces matrices forment un espace vectoriel de dimension $n-1$.