

Notations et définitions

Dans tout le problème, \mathbb{K} désigne \mathbb{R} ou \mathbb{C} , \mathbb{N} désigne l'ensemble des entiers naturels et n est un entier naturel.

On rappelle que $\mathbb{K}[X]$ est un anneau principal. Pour tout $P \in \mathbb{K}[X]$, on note (P) l'idéal engendré par P dans $\mathbb{K}[X]$.

On note $\mathbb{K}_n[X]$ le sous-espace vectoriel de $\mathbb{K}[X]$ des polynômes de degré inférieur ou égal à n à coefficients dans \mathbb{K} et, pour $n \geq 1$, $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ la \mathbb{K} -algèbre des matrices carrées de taille n à coefficients dans \mathbb{K} . La matrice unité est notée I_n et on désigne par $\text{GL}_n(\mathbb{K})$ le groupe des matrices inversibles de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

Pour toute matrice A de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, on note A^\top la transposée de la matrice A , $\text{rg}(A)$ son rang, $\text{tr}(A)$ sa trace, $\chi_A = \det(XI_n - A)$ son polynôme caractéristique, π_A son polynôme minimal et $\text{sp}(A)$ l'ensemble de ses valeurs propres dans \mathbb{K} .

Dans tout le problème, E désigne un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension finie $n \geq 2$ et f désigne un endomorphisme de E . On note $\mathcal{L}(E)$ l'algèbre des endomorphismes de E .

On note $f^0 = \text{Id}_E$ et $\forall k \in \mathbb{N}$, $f^{k+1} = f^k \circ f$. Si $Q \in \mathbb{K}[X]$ avec $Q(X) = a_0 + a_1X + \dots + a_mX^m$, $Q(f)$ désigne l'endomorphisme $a_0\text{Id}_E + a_1f + \dots + a_mf^m$. On note $\mathbb{K}[f]$ la sous-algèbre commutative de $\mathcal{L}(E)$ constituée des endomorphismes $Q(f)$ quand Q décrit $\mathbb{K}[X]$. L'application $\mathbb{K}[X] \rightarrow \mathbb{K}[f]$ ainsi définie est un morphisme de \mathbb{K} -algèbre de $\mathbb{K}[X]$ dans $\mathcal{L}(E)$.

On utilise les notations suivantes, similaires à celles des matrices, pour un endomorphisme f de E : $\text{rg}(f)$, $\text{tr}(f)$, χ_f , π_f et $\text{sp}(f)$.

Pour tout $x \in E$, on note φ_x l'application linéaire de $\mathbb{K}[X]$ dans E définie par $P(X) \mapsto P(f)(x)$. On note $E_{f,x}$ le sous-espace vectoriel de E engendré par la famille $(f^k(x))_{k \in \mathbb{N}}$. On dit que f est *cyclique* si et seulement s'il existe un vecteur x_0 dans E tel que $E = E_{f,x_0}$.

0. Considérations algébriques

Soit $x \in E$.

1. Montrer que $E_{f,x}$ est le plus petit sous-espace vectoriel de E stable par f et contenant x .
2. Montrer que f est cyclique si et seulement si il existe un vecteur x_0 dans E tel que $(x_0, f(x_0), \dots, f^{n-1}(x_0))$ est une base de E .
3. On suppose dans cette question que f est cyclique et on prend $x_0 \in E$ tel que $E = E_{f,x_0}$.
 - (a) Montrer que pour tout polynôme $P \in \mathbb{K}[X]$, si $P(f)(x_0) = 0$, alors $P(f) = 0$. En déduire que $\ker(\varphi_{x_0}) = (\pi_f)$.
 - (b) En déduire (sans utiliser le théorème de Cayley-Hamilton, qui sera démontré plus loin) que $\deg(\pi_f) \leq n$ puis que $\dim \mathbb{K}[f] \leq n$.

- (c) Montrer que l'application $\psi : \mathbb{K}[f] \rightarrow E$ définie par $P(f) \mapsto P(f)(x_0)$ est un isomorphisme de \mathbb{K} -espace vectoriel.
- (d) Montrer qu'un sous-espace vectoriel $F \subset E$ est stable par f si et seulement si $\psi^{-1}(F)$ est un idéal de $\mathbb{K}[f]$.
- (e) À l'aide du morphisme φ_{x_0} , en déduire une correspondance bijective entre les sous-espaces vectoriels de E stable par f et les idéaux de $\mathbb{K}[X]$ contenant l'idéal (π_f) .
- (f) En déduire que E n'admet qu'un nombre fini de sous-espaces vectoriels stables par f . *Indication : utiliser le fait que l'anneau $\mathbb{K}[X]$ est principal et le lien de divisibilité entre $P, Q \in \mathbb{K}[X]$ lorsque $(P) \subset (Q)$.*
4. On suppose dans cette question que \mathbb{K} est un corps infini.
- (a) Montrer que si la réunion d'un nombre fini de sous-espaces vectoriels F_1, \dots, F_r de E est un sous-espace vectoriel, alors l'un des sous-espaces F_i contient tous les autres.
- (b) En déduire que f est cyclique si et seulement si E n'admet qu'un nombre fini de sous-espaces vectoriels stables par f . *Indication : utiliser un vecteur $x \in E$ qui n'appartient à aucun sous-espace propre de E stable par f .*

I. Matrices compagnons et endomorphismes cycliques

I.A. Matrices compagnons

5. Soit $(a_0, a_1, \dots, a_{n-1}) \in \mathbb{K}^n$ et $Q(X) = X^n + a_{n-1}X^{n-1} + \dots + a_0$. On considère la matrice

$$C_Q = \begin{pmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & \ddots & & \vdots & -a_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 1 & 0 & -a_{n-2} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & -a_{n-1} \end{pmatrix}$$

Déterminer en fonction de Q le polynôme caractéristique de C_Q .

6. Soit λ une valeur propre de C_Q^\top . Déterminer la dimension et une base du sous-espace propre associé.

I.B. Endomorphismes cycliques

7. Montrer que f est cyclique si et seulement s'il existe une base \mathcal{B} de E dans laquelle la matrice de f est de la forme C_Q , où Q est un polynôme unitaire de degré n .
8. Soit f un endomorphisme cyclique. Montrer que f est diagonalisable si et seulement si χ_f est scindé sur \mathbb{K} et a toutes ses racines simples.
9. Montrer que si f est cyclique, alors $(\text{Id}, f, f^2, \dots, f^{n-1})$ est libre dans $\mathcal{L}(E)$ et le polynôme minimal de f est de degré n .

I.C. Application à une démonstration du théorème de Cayley-Hamilton

10. Soit x un vecteur non nul de E . Montrer qu'il existe un entier p strictement positif tel que la famille $(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$ soit libre et qu'il existe $(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{p-1}) \in \mathbb{K}^p$ tel que :

$$\alpha_0 x + \alpha_1 f(x) + \dots + \alpha_{p-1} f^{p-1}(x) + f^p(x) = 0$$

11. Justifier que $\text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$ est stable par f .
12. Montrer que $X^p + \alpha_{p-1}X^{p-1} + \dots + \alpha_0$ divise le polynôme χ_f .
13. Démontrer que $\chi_f(f)$ est l'endomorphisme nul.
14. En déduire que si f est cyclique, alors $\pi_f = \chi_f$.

II. Etude des endomorphismes cycliques

II.A. Endomorphismes cycliques nilpotents

Dans cette sous-partie II.A, on suppose que f est un endomorphisme nilpotent de E . On note r le plus petit entier naturel tel que $f^r = 0$.

15. Montrer que f est cyclique si et seulement si $r = n$. Préciser alors la matrice compagnon.

II.B.

Dans cette sous-partie II.B, on suppose $\mathbb{K} = \mathbb{C}$.

On suppose que $(\text{Id}, f, f^2, \dots, f^{n-1})$ est libre et on se propose de montrer que f est cyclique.

On factorise le polynôme caractéristique de f sous la forme

$$\chi_f(X) = \prod_{k=1}^p (X - \lambda_k)^{m_k}$$

où les λ_k sont les p valeurs propres deux à deux distinctes de f et les m_k de \mathbb{N}^* leurs ordres de multiplicité respectifs.

Pour $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, on pose $F_k = \ker((f - \lambda_k \text{Id}_E)^{m_k})$.

16. Montrer que les sous-espaces vectoriels F_k sont stables et que $E = F_1 \oplus \dots \oplus F_p$.

Pour $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, on note φ_k l'endomorphisme induit par $f - \lambda_k \text{Id}$ sur le sous-espace vectoriel F_k ,

$$\varphi_k : \begin{cases} F_k \rightarrow F_k \\ x \mapsto f(x) - \lambda_k x \end{cases}$$

17. Justifier que φ_k est un endomorphisme nilpotent de F_k .

On note ν_k le plus petit entier naturel tel que $\varphi_k^{\nu_k} = 0$.

18. Pourquoi a-t-on $\nu_k \leq \dim(F_k)$?

19. Montrer, avec l'hypothèse proposée, que pour tout $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, on a $\nu_k = m_k$.

20. Expliciter la dimension de F_k pour $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, puis en déduire l'existence d'une base $\mathcal{B} = (u_1, \dots, u_n)$ de E dans laquelle f a une matrice diagonale par blocs, ces blocs appartenant à $\mathcal{M}_{m_k}(\mathbb{C})$ et étant de la forme

$$\begin{pmatrix} \lambda_k & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 1 & \lambda_k & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 1 & \lambda_k & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \lambda_k & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & \lambda_k \end{pmatrix}$$

On pose $x_0 = u_1 + u_{m_1+1} + \dots + u_{m_1+\dots+m_{p-1}+1}$.

21. Déterminer les polynômes $Q \in \mathbb{C}[X]$ tels que $Q(f)(x_0) = 0$.

22. Justifier que f est cyclique.

III. Endomorphismes commutants, décomposition de Frobenius

On appelle commutant de f l'ensemble $C(f) = \{g \in \mathcal{L}(E) / f \circ g = g \circ f\}$.

23. Montrer que $C(f)$ est une sous-algèbre de $\mathcal{L}(E)$.

III.A. Commutant d'un endomorphisme cyclique

On suppose que f est cyclique et on choisit un vecteur x_0 dans E tel que $(x_0, f(x_0), \dots, f^{n-1}(x_0))$ est une base de E .

Soit $g \in C(f)$, un endomorphisme qui commute avec f .

24. Justifier l'existence de $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}$ de \mathbb{K} tels que

$$g(x_0) = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k f^k(x_0)$$

25. Montrer alors que $g \in \mathbb{K}[f]$.

26. Établir que $g \in C(f)$ si et seulement si il existe un polynôme $R \in \mathbb{K}_{n-1}[X]$ tel que $g = R(f)$.

III.B. Décomposition de Frobenius

On se propose de démontrer le théorème de décomposition de Frobenius : toute matrice est semblable à une matrice diagonale par blocs, ces blocs étant des matrices compagnons.

Soit f un endomorphisme de E . On note d le degré de π_f .

27. Soit $x \in E$.

(a) Montrer que $\ker(\varphi_x)$ est un anneau engendré par un polynôme unitaire $\pi_{f,x}$ qui est un diviseur de π_f .

(b) Justifier l'existence d'un vecteur x_1 de E tel que $(x_1, f(x_1), \dots, f^{d-1}(x_1))$ est libre.

Pour tout x non nul de E , on pourra considérer les sous-espaces vectoriels $\ker(\pi_{f,x}(f))$.

On pose $e_1 = x_1, e_2 = f(x_1), \dots, e_d = f^{d-1}(x_1)$ et $E_1 = \text{Vect}(e_1, e_2, \dots, e_d)$.

28. Montrer que E_1 est stable par f et que $E_1 = \{P(f)(x_1) \mid P \in \mathbb{K}[X]\}$.

On note ψ_1 l'endomorphisme induit par f sur le sous-espace vectoriel E_1 ,

$$\psi_1 : \begin{cases} E_1 \rightarrow E_1 \\ x \mapsto f(x) \end{cases}$$

29. Justifier que ψ_1 est cyclique.

On complète, si nécessaire, (e_1, e_2, \dots, e_d) en une base (e_1, e_2, \dots, e_n) de E . Soit Φ la d -ième forme coordonnée qui à tout vecteur x de E associe sa coordonnée suivant e_d . On note $F = \{x \in E \mid \forall i \in \mathbb{N}, \Phi(f^i(x)) = 0\}$.

30. Montrer que F est stable par f et que E_1 et F sont en somme directe.

Soit Ψ l'application linéaire de E dans \mathbb{K}^d définie, pour tout $x \in E$, par

$$\Psi(x) = (\Phi(f^i(x)))_{0 \leq i \leq d-1} = (\Phi(x), \Phi(f(x)), \dots, \Phi(f^{d-1}(x)))$$

31. Montrer que Ψ induit un isomorphisme entre E_1 et \mathbb{K}^d .

32. Montrer que $E = E_1 \oplus F$.

33. En déduire qu'il existe r sous-espaces vectoriels de E , notés E_1, \dots, E_r , tous stables par f , tels que :

- $E = E_1 \oplus \dots \oplus E_r$;
- pour tout $1 \leq i \leq r$, l'endomorphisme ψ_i induit par f sur le sous-espace vectoriel E_i est cyclique ;
- si on note P_i le polynôme minimal de ψ_i , alors P_{i+1} divise P_i pour tout entier i tel que $1 \leq i \leq r-1$.

III.C. Commutant d'un endomorphisme quelconque

34. Montrer que la dimension de $C(f)$ est supérieure ou égale à n .

35. Montrer que f est cyclique si et seulement si l'algèbre $C(f)$ est égale à $\mathbb{K}[f]$.

IV. Endomorphismes orthocycliques

Dans cette partie, on suppose que $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ et que E est un espace euclidien. Le produit scalaire de deux vecteurs x, y de E est noté $(x|y)$ et on désigne par $O(E)$ le groupe des isométries vectorielles de E .

On dit qu'un endomorphisme est *orthocyclique* s'il existe une base orthonormale de E dans laquelle la matrice de f est de la forme C_Q (matrice compagnon).

IV.A. Isométries vectorielles orthocycliques

Soit $f \in O(E)$.

36. Soit $f' \in O(E)$ ayant le même polynôme caractéristique que f . Montrer qu'il existe des bases orthonormales \mathcal{B} et \mathcal{B}' de E pour lesquelles la matrice de f dans \mathcal{B} est égale à la matrice de f' dans \mathcal{B}' .

37. En déduire que f est orthocyclique si et seulement si $\chi_f = X^n - 1$ ou $\chi_f = X^n + 1$.

IV.B. Endomorphismes nilpotents orthocycliques

Soit f un endomorphisme nilpotent de E .

38. Montrer qu'il existe une base orthonormale de E dans laquelle la matrice de f est triangulaire inférieure.

39. En déduire que f est orthocyclique si et seulement si

$$f \text{ est de rang } n - 1 \text{ et } \forall x, y \in (\ker f)^\perp, (f(x)|f(y)) = (x|y)$$