

Devoir Maison

Endomorphismes Cycliques (Centrale 2019)

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 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 espace vectoriel sur le corps \mathbb{K} de dimension finie n supérieure ou égale à 2, et $\mathcal{L}(E)$ est l'algèbre des endomorphismes de E . On note f un endomorphisme 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 $\mathbb{K}[X]$.

De même, 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 $\text{sp}(f)$.

Enfin, on dit que f est *cyclique* si et seulement s'il existe un vecteur x_0 dans E tel que $(x_0, f(x_0), \dots, f^{n-1}(x_0))$ soit une base de E .

I Matrices compagnons et endomorphismes cycliques

I.A – Soit $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

Q 1. Montrer que M et M^\top ont même spectre.

Q 2. Montrer que M^\top est diagonalisable si et seulement si M est diagonalisable.

I.B – *Matrices compagnons*

Q 3. 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 .

Q 4. Soit λ une valeur propre de C_Q^\top . Déterminer la dimension et une base du sous-espace propre associé.

I.C – *Endomorphismes cycliques*

Q 5. 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 .

Q 6. 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.

Q 7. 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.D – Application à une démonstration du théorème de Cayley-Hamilton

Q 8. 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 :

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

Q 9. Justifier que $\text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$ est stable par f .

Q 10. Montrer que : $X^p + \alpha_{p-1} X^{p-1} + \dots + \alpha_0$ divise le polynôme χ_f .

Q 11. Démontrer que $\chi_f(f)$ est l'endomorphisme nul.

II Étude des endomorphismes cycliques

II.A – Endomorphismes cycliques nilpotents

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

Q 12. 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 que $\mathbb{K} = \mathbb{C}$.

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 $F_k = \ker((f - \lambda_k \text{Id}_E)^{m_k})$.

Q 13. Montrer que les sous-espaces vectoriels F_k sont stables par f 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 ,

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

Q 14. Justifier que φ_k est un endomorphisme nilpotent de F_k .

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

Q 15. Pourquoi a-t-on $\nu_k \leq \dim(F_k)$?

Q 16. Montrer, avec l'hypothèse proposée, que pour tout $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, on a $\nu_k = m_k$.

Q 17. 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

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

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

Q 18. Déterminer les polynômes $Q \in \mathbb{C}[X]$ tels que $Q(f)(x_0) = 0$.

Q 19. Justifier que f est cyclique.

III Endomorphismes commutants, décomposition de Frobenius

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

Q 20. Montrer que $\mathcal{C}(f)$ 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 $g \in \mathcal{C}(f)$, un endomorphisme qui commute avec f .

Q 21. Justifier l'existence de $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}$ de \mathbb{K} tels que

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

Q 22. Montrer alors que $g \in \mathbb{K}[f]$.

Q 23. Établir que $g \in \mathcal{C}(f)$ si et seulement s'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.

Q 24. 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 vectoriels F_i contient tous les autres.

On note d le degré de π_f .

Q 25. 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 remarquer que $I_x = \{P \in \mathbb{K}[X] \mid P(f)(x) = 0\}$ est un idéal de $\mathbb{K}[X]$ engendré par un polynôme unitaire $\pi_{f,x}$ diviseur de π_f et 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 $E_1 = \text{Vect}(e_1, e_2, \dots, e_d)$.

Q 26. 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 ,

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

Q 27. 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 $F = \{x \in E \mid \forall i \in \mathbb{N}, \Phi(f^i(x)) = 0\}$.

Q 28. 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

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

Q 29. Montrer que Ψ induit un isomorphisme entre E_1 et \mathbb{K}^d .

Q 30. Montrer que $E = E_1 \oplus F$.

Q 31. 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

Q 32. Montrer que la dimension de $\mathcal{C}(f)$ est supérieure ou égale à n .

Q 33. On suppose que f est un endomorphisme tel que l'algèbre $\mathcal{C}(f)$ est égale à $\mathbb{K}[f]$. Montrer que f est cyclique.

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 $(x \mid y)$ et on désigne par $O(E)$ le groupe des isométries vectorielles de E .

On dit qu'un endomorphisme f de E 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 $f \in O(E)$.

Q 34. Soit $f' \in O(E)$ ayant 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}' .

Q 35. 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 .

Q 36. Montrer qu'il existe une base orthonormale de E dans laquelle la matrice de f est triangulaire inférieure.

Q 37. En déduire que f est orthocyclique si et seulement si

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

• • • FIN • • •

I. Matrices compagnons et endomorphismes cycliques

I.A.

1. On a $\chi_M = \det(XI_n - M) = \det((XI_n - M)^\top) = \det(XI_n - M^\top) = \chi_{M^\top}$ donc

$$\forall \lambda \in \mathbb{K}, \lambda \in \text{sp}(M) \Leftrightarrow \chi_M(\lambda) = 0 \Leftrightarrow \chi_{M^\top}(\lambda) = 0 \Leftrightarrow \lambda \in \text{sp}(M^\top)$$

Ainsi $\text{sp}(M) = \text{sp}(M^\top)$ et donc M et M^\top ont même spectre

2. \Leftarrow : On suppose que M est diagonalisable.

Ceci q nous fournit $P \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$ et $D \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ diagonale telles que $M = PDP^{-1}$

donc $M^\top = (P^{-1})^\top D^\top P^\top = (P^\top)^{-1} D P^\top$ d'où M^\top est diagonalisable

\Rightarrow : On suppose que M^\top est diagonalisable.

Pour montrer que M est diagonalisable, on utilise l'implication précédente en remarquant que $M = (M^\top)^\top$.

On a bien montré que M^\top est diagonalisable si et seulement si M est diagonalisable

I.B. Matrices compagnons

$$3. \text{ On a } \chi_{C_Q}(X) = \det(XI_n - C_Q) = \begin{vmatrix} X & \dots & \dots & \dots & 0 & a_0 \\ -1 & X & \dots & \dots & 0 & a_1 \\ 0 & -1 & \ddots & & \vdots & a_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & -1 & X & a_{n-2} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -1 & X + a_{n-1} \end{vmatrix}$$

On effectue alors les opérations élémentaires pour i allant de $n-1$ à 1 : $L_i \leftarrow L_i + XL_{i+1}$:

$$\chi_{C_Q}(X) = \begin{vmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & Q(X) \\ -1 & 0 & \dots & \dots & 0 & X^{n-1} + a_{n-1}X^{n-2} + \dots + a_2X + a_1 \\ 0 & -1 & \ddots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & -1 & 0 & X^2 + a_{n-1}X + a_{n-2} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -1 & X + a_{n-1} \end{vmatrix}$$

On développe ensuite selon la première ligne pour obtenir :

$$\chi_{C_Q}(X) = (-1)^{n+1} Q(X) \begin{vmatrix} -1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & -1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -1 \end{vmatrix} = (-1)^{n+1} Q(X) (-1)^{n-1}$$

Ainsi Q est le polynôme caractéristique de C_Q

$$4. \text{ On a } (C_Q)^\top = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \dots & & -a_{n-1} \end{pmatrix}.$$

On a $\chi_{C_Q^\top} = \chi_{C_Q} = Q$ ainsi $Q(\lambda) = 0$.

$$\text{Soit } X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K}),$$

$$(C_Q)^\top X = \lambda X \iff \begin{cases} x_2 = \lambda x_1 \\ x_3 = \lambda x_2 \\ \vdots \\ x_n = \lambda x_{n-1} \\ -a_0 x_1 - \dots - a_{n-1} x_n = \lambda x_n \end{cases} \iff \begin{cases} x_2 = \lambda x_1 \\ x_3 = \lambda^2 x_1 \\ \vdots \\ x_n = \lambda^{n-1} x_1 \\ (-a_0 - a_1 \lambda - \dots - a_{n-1} \lambda^{n-1}) x_1 = \lambda^n x_1 \end{cases}$$

$$\text{Ainsi } (C_Q)^\top X = \lambda X \iff \begin{cases} \forall i \in \llbracket 2, n \rrbracket, x_i = \lambda^{i-1} x_1 \\ Q(\lambda) x_1 = 0 \end{cases}$$

Notez bien que le "ainsi" concerne toute l'équivalence !

$$\text{Comme } \lambda \text{ est racine de } Q, \text{ alors } \dim(E_\lambda(C_Q^\top)) = 1, E_\lambda(C_Q^\top) = \text{vect}(X_\lambda) \text{ où } X_\lambda = \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda \\ \vdots \\ \lambda^{n-1} \end{pmatrix}$$

I.C. Endomorphismes cycliques

5. \Rightarrow : On suppose que f est cyclique.

Ceci nous fournit $x_0 \in E$ tel que $\mathcal{B} = (x_0, f(x_0), \dots, f^{n-1}(x_0))$ soit une base de E

Il existe alors $(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}) \in \mathbb{K}^n$ tel que $f^n(x_0) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i f^i(x_0)$

Je pose alors $Q = X^n + \sum_{i=0}^{n-1} (-\lambda_i) X^i \in \mathbb{K}[X]$

de sorte que Q est unitaire de degré n et $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) = C_Q$

\Leftarrow : On suppose qu'il existe une base $\mathcal{B} = (e_0, e_1, \dots, e_{n-1})$ de E dans laquelle la matrice de f est de la forme C_Q , où Q est un polynôme unitaire de degré n

Ainsi $\forall i \in \llbracket 0, n-2 \rrbracket, f(e_i) = e_{i+1}$

donc $(e_0, f(e_0), f^2(e_0), \dots, f^{n-1}(e_0))$ est une base de E et donc f est cyclique

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

6. \Leftarrow : On suppose que χ_f est scindé sur \mathbb{K} et a toutes ses racines simples.

Ainsi $|\text{sp}(f)| = \deg(\chi_f) = \dim E$

donc f est diagonalisable d'après le cours

\Leftarrow : On suppose que f est diagonalisable. Comme f est cyclique, ceci nous fournit \mathcal{B} une base de E et $Q \in \mathbb{K}[X]$ unitaire de degré n tel que $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) = C_Q$ d'après 5.

Ainsi C_Q est diagonalisable et il en est de même pour C_Q^T d'après 2

$$\text{Ainsi } \mathbb{K}^n = \bigoplus_{\lambda \in \text{sp}(f)} E_{\lambda}(C_Q^T) \text{ d'où } n = \sum_{\lambda \in \text{sp}(C_Q^T)} \dim(E_{\lambda}(C_Q^T))$$

or on a $\forall \lambda \in \text{sp}(C_Q^T)$, $\dim(E_{\lambda}(C_Q^T)) = 1$ d'après 4 donc $|\text{sp}(C_Q^T)| = n$

or d'après 1 : $\text{sp}(C_Q^T) = \text{sp}(C_Q) = \text{sp}(f)$

donc f admet n valeurs propres distinctes dans \mathbb{K}

donc χ_f est scindé sur \mathbb{K} et a toutes ses racines simples

Ainsi f est diagonalisable si et seulement si χ_f est scindé sur \mathbb{K} et a toutes ses racines simples

7. On suppose que f est cyclique.

Soit $(\lambda_0, \dots, \lambda_{n-1}) \in \mathbb{K}^n$ tel que $\sum_{i=0}^n \lambda_i f^i = 0_{\mathcal{L}(E)}$. Montrons $\forall i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$, $\lambda_i = 0$

Comme f est cyclique, ceci nous fournit $x \in E$ tel que $\mathcal{B} = (x, f(x), \dots, f^{n-1}(x))$ soit une base de E

$$\text{donc } \sum_{i=0}^n \lambda_i f^i(x) = 0_{\mathcal{L}(E)}(x) = 0_E$$

ainsi $\forall i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$, $\lambda_i = 0$ car \mathcal{B} est libre

Alors $(\text{Id}, f, f^2, \dots, f^{n-1})$ est libre dans $\mathcal{L}(E)$

Je note d le degré de π_f . D'après le cours on a $d = \dim(\mathbb{K}[f])$.

Or $(\text{Id}, f, f^2, \dots, f^{n-1})$ est libre dans $\mathbb{K}[f]$ donc $d \geq n$

de plus d'après Cayley-Hamilton, on a χ_f est annulateur de f

d'où $\pi_f \mid \chi_f$ or ce sont des polynômes non nuls ainsi on a $d = \deg(\pi_f) \leq \deg(\chi_f) = n$

ainsi $n = d$ d'où le polynôme minimal de f est de degré n

On ne se sert pas de cette question pour montrer le théorème de Cayley-Hamilton dans le paragraphe I.D qui suit.

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

8. On note $N_x = \left\{ m \in \mathbb{N}^* \mid (f^i(x))_{0 \leq i \leq m-1} \text{ libre} \right\}$.

On sait que $1 \in N_x$ car $x \neq 0_E$ et que $\forall m \geq n$, $m \notin N_x$ car $\dim E = n$

Ainsi N_x est une partie de \mathbb{N}^* non vide majorée par $n-1$

donc N_x admet un plus grand élément $p \in \mathbb{N}^*$.

Ainsi la famille $(f^i(x))_{0 \leq i \leq p-1}$ est libre et la famille $(f^i(x))_{0 \leq i \leq p}$ est liée

On a bien l'existence de $p \in \mathbb{N}^*$ et de $(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{p-1}) \in \mathbb{K}^p$ tels que la famille $(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$ est libre et $\alpha_0 x + \alpha_1 f(x) + \dots + \alpha_{p-1} f^{p-1}(x) + f^p(x) = 0$

9. On a $f(\text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))) = \text{Vect}(f(x), f^2(x), f^3(x), \dots, f^p(x))$ car f linéaire

or $f^p(x) = -\alpha_0 x - \alpha_1 f(x) + \dots - \alpha_{p-1} f^{p-1}(x) \in \text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$

d'où $f(\text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))) \subset \text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$

Ainsi $\text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$ est stable par f

10. Je note alors \tilde{f} l'endomorphisme induit par f sur $\text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$
 D'après ce qui précède $\mathcal{B} = (x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$ est une base de $\text{Vect}(x, f(x), f^2(x), \dots, f^{p-1}(x))$
 On remarque que $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(\tilde{f}) = C_{\mathbb{Q}}$ en notant $Q = \alpha_0 + \alpha_1 X + \dots + \alpha_{p-1} X^{p-1} + X^p$
 d'où $\chi_{\tilde{f}} = Q$ or $\chi_{\tilde{f}} | \chi_f$ car \tilde{f} induit par f
 On a montré que $X^p + \alpha_{p-1} X^{p-1} + \dots + \alpha_0$ divise le polynôme χ_f
11. En reprenant les notations précédentes, on a $Q(f)(x) = 0$ et il existe $P \in \mathbb{K}[X]$ tel que $PQ = \chi_f$
 Ainsi $\chi_f(f) = P(f) \circ Q(f)$ donc $\chi(f)(x) = P(f)[Q(f)(x)] = P(f)(0) = 0$ car $P(f)$ linéaire
 On a ainsi montré que : $\forall x \in E, \chi(f)(x) = 0$
 or $\chi(f) \in \mathcal{L}(E)$ d'où $\chi_f(f)$ est l'endomorphisme nul

II. Etude des endomorphismes cycliques

II.A. Endomorphismes cycliques nilpotents

12. \Rightarrow : On suppose f cyclique alors $\deg(\pi_f) = n$ d'après 7
 De plus d'après le cours, $\chi_f = X^n$ car f nilpotente
 or $\pi_f | \chi_f$ selon Cayley-Hamilton et π_f est unitaire par définition
 donc $\pi_f = X^n$
 ainsi $f^n = 0$ et $\forall i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket, f^i \neq 0$
 d'où $r = n$
- \Leftarrow : On suppose que $r = n$ donc $f^n = 0$ et $f^{n-1} \neq 0$
 Ceci nous fournit $x \in E$ tel que $f^{n-1}(x) \neq 0$
 Soit $\lambda_0, \dots, \lambda_{n-1} \in \mathbb{K}$ tels que $\sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i f^i(x) = 0$.
 On montre que $\forall i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket, \lambda_i = 0$
 On suppose, par l'absurde, que la propriété est fautive
 Je note alors j le minimum de $\{i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket \mid \lambda_i \neq 0\}$
 Ainsi $0 = f^{n-1-j} \left(\sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i f^i(x) \right) = f^{n-1-j} \left(\sum_{i=j}^{n-1} \lambda_i f^i(x) \right) = \lambda_j f^{n-1}(x) + \sum_{i=j}^{n-1} \lambda_i f^{n-1+i-j}(x)$
 Or $\forall i \geq j, f^i(x) = 0$ donc $\lambda_j f^{n-1}(x) = 0$ et $\lambda_j \neq 0$
 d'où $f^{n-1}(x) = 0$ ce qui est absurde
 Ainsi $(x, f(x), \dots, f^{n-1}(x))$ est une famille libre composée de n vecteurs de E et $\dim E = n$
 donc $(x, f(x), \dots, f^{n-1}(x))$ est une base de E
 donc f est cyclique.
- On a montré que f est cyclique si et seulement si $r = n$
- On remarque que la matrice compagnon associée est unique car les coefficients de cette matrices sont donnés par ceux du polynôme caractéristique.
- On sait que si f est cyclique et nilpotente, alors $\chi_f = X^n$

ainsi la matrice compagnon de f dans ce cas est
$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$$

II.B.

13. Pour $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, $(f - \lambda_k \text{Id}_E)^{m_k}$ et f commutent car $\mathbb{C}[f]$ est une algèbre commutative

donc $\mathbb{F}_k = \text{Ker}((f - \lambda_k \text{Id}_E)^{m_k})$ est stable par f

On a $\chi_f(X) = \prod_{k=1}^p (X - \lambda_k)^{m_k}$ et les polynômes $(X - \lambda_k)^{m_k}$ sont deux à deux premiers entre eux

Alors selon le lemme de décomposition des noyaux, on a

$$\text{Ker}(\chi_f(f)) = \text{Ker}((f - \lambda_1 \text{Id}_E)^{m_1}) \oplus \dots \oplus \text{Ker}((f - \lambda_p \text{Id}_E)^{m_p}) = \mathbb{F}_1 \oplus \dots \oplus \mathbb{F}_p$$

de plus selon Cayley-Hamilton, $\chi_f(f) = 0$ et donc $\text{Ker}(\chi_f(f)) = E$

d'où $E = \mathbb{F}_1 \oplus \dots \oplus \mathbb{F}_p$

14. Soit $x \in \mathbb{F}_k$. On a $(f - \lambda_k \text{Id})^{m_k}(x) = 0$

Pour tout $y \in \mathbb{F}_k$, on a $(f - \lambda_k \text{Id})(y) = \varphi_k(y) \in \mathbb{F}_k$

ainsi pour tout $p \in \mathbb{N}$, $(f - \lambda_k \text{Id})^p(x) = \varphi_k^p(x)$ par récurrence immédiate sur p

donc $\varphi_k^{m_k}(x) = 0$, comme c'est vrai pour tout $x \in \mathbb{F}_k$, on conclut que φ_k est un endomorphisme nilpotent de \mathbb{F}_k

15. D'après le cours, l'indice de nilpotence de φ_k , endomorphisme de \mathbb{F}_k est majoré par $\dim \mathbb{F}_k$

ainsi $\nu_k \leq \dim(\mathbb{F}_k)$

16. Je note $P = \prod_{i=1}^p (X - \lambda_i)^{\nu_i}$. Soit $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$. Soit $x \in \mathbb{F}_k$.

$$\text{On a } P(f) = \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^p (X - \lambda_i)^{\nu_i}(f) \right] \circ (f - \lambda_k \text{Id})^{\nu_k}$$

$$\text{donc } P(f)(x) = \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^p (X - \lambda_i)^{\nu_i}(f) \right] (\varphi_k^{\nu_k}(x)) = \left[\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^p (X - \lambda_i)^{\nu_i}(f) \right] (0) = 0$$

donc $P(f)$ coïncide avec l'endomorphisme nul sur chaque \mathbb{F}_k et $E = \mathbb{F}_1 \oplus \dots \oplus \mathbb{F}_p$ d'après 13

donc $P(f) = 0$

Je note d le degré de P comme P est unitaire alors $(\text{Id}, f, f^2, \dots, f^d)$ est liée

donc $d \geq n$ car $(\text{Id}, f, f^2, \dots, f^{n-1})$ est libre

$$\text{or } d = \sum_{i=0}^p \nu_i \text{ d'où } n \leq \sum_{i=0}^p \nu_i$$

On remarque à l'aide de la question 14 que $\nu_k \leq m_k$ pour tout $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$

$$\text{donc } n \leq \sum_{k=0}^p \nu_k \leq \sum_{i=0}^p m_k = n$$

ainsi les inégalités sont des égalités et pour tout $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, on a $\nu_k = m_k$

17. Comme $E = F_1 \oplus \dots \oplus F_p$ d'après 13 et $\forall k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, $\nu_k \leq \dim F_k$ d'après 15

$$\text{on a donc avec la question précédente } n = \sum_{k=1}^p \nu_k \leq \sum_{k=1}^p \dim(F_k) = n$$

Comme à la question précédente, on obtient : $\boxed{\forall k \in \llbracket 1, p \rrbracket, \nu_k = m_k = \dim(F_k)}$

φ_k est un endomorphisme nilpotent de F_k d'indice $\nu_k = m_k = \dim(F_k)$
donc selon 12, φ_k est nilpotent et cyclique.

$$\text{ceci nous fournit une base } \mathcal{B}_k \text{ de } F_k \text{ tel que } \mathcal{M}_{\mathcal{B}_k}(\varphi_k) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{m_k}(\mathbb{C})$$

En notant f_k l'endomorphisme induit par f sur F_k ,

$$\text{on a alors } \mathcal{M}_{\mathcal{B}_k}(f_k) = \begin{pmatrix} \lambda_k & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 1 & \lambda_k & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 1 & \lambda_k & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \lambda_k & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & \lambda_k \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{m_k}(\mathbb{C})$$

En concaténant les bases \mathcal{B}_k pour k allant de 1 à p

On obtient une base \mathcal{B} adaptée à la décomposition en somme directe $E = F_1 \oplus \dots \oplus F_p$

ainsi $\boxed{\mathcal{B} = (u_1, \dots, u_n)}$ est une base de E dans laquelle f a une matrice diagonale par blocs de formes voulues

Remarque : pour la suite on peut démontrer que pour une telle base on a nécessairement :

$$\forall k \in \llbracket 1, p \rrbracket, (f - \lambda_k \text{Id})^{m_k}(u_{m_1+\dots+m_{k-1}+1}) = 0 \text{ puis}$$

$$\forall k \in \llbracket 1, p \rrbracket, \forall i \in \llbracket 1, m_k \rrbracket, u_{m_1+\dots+m_{k-1}+i} \in F_k$$

On peut aussi supposer que l'on travaille avec la base choisie.

18. Pour $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$, on a $u_{m_1+\dots+m_{k-1}+1} \in F_k$

ainsi $\forall i \in \mathbb{N}$, $f^i(u_{m_1+\dots+m_{k-1}+1}) \in F_k$ car F_k stable par f

puis pour tout $P \in \mathbb{C}[X]$, on a $P(f)(u_{m_1+\dots+m_{k-1}+1}) \in F_k$ car F_k est stable par combinaison linéaire.

Et ainsi $P(f)(x_0) = \sum_{k=1}^p P(f)(u_{m_1+\dots+m_{k-1}+1})$ est la décomposition de $P(f)(x_0)$ sur $F_1 \oplus \dots \oplus F_p$

Soit $Q \in \mathbb{C}[X]$. On a donc $Q(f)(x_0) = 0 \iff \forall k \in \llbracket 1, p \rrbracket, Q(f)(e_k) = 0$

Je note $e_k = u_{m_1+\dots+m_{k-1}+1}$ et on a $\mathcal{B}_k = (e_k, \varphi_k(e_k), \dots, \varphi_k^{m_k-1}(e_k))$ est une base de F_k

On a vu que la matrice de φ_k dans cette base est $C_X^{m_k}$

donc $\pi_{\varphi_k} = X^{m_k}$ car φ_k est cyclique et nilpotent et $\dim(F_k) = m_k$ selon 12

$$\forall k \in \llbracket 1, p \rrbracket, (f - \lambda_k \text{Id})^{m_k}(u_{m_1+\dots+m_{k-1}+1}) = 0 \text{ puis}$$

$$\forall k \in \llbracket 1, p \rrbracket, \forall i \in \llbracket 1, m_k \rrbracket, u_{m_1 + \dots + m_{k-1} + i} \in F_k$$

Par ailleurs on montre facilement que

$$\forall P \in \mathbb{C}[X], P(\varphi_k) = 0 \iff P(\varphi_k)(e_k) = 0$$

car $P(\varphi_k)$ commute avec tout φ_k^i et que $(\varphi_k^i(e_k))_{0 \leq i < m_k}$ est une base de F_k .

Par ailleurs on a $Q(\varphi_k) = 0 \iff X^{m_k} | Q$ (nilpotent et cyclique)

donc $Q(f)(e_k) = 0 \iff Q(\varphi_k + \lambda_k \text{Id}_{F_k})(e_k) = 0 \iff X^{m_k} | Q(X + \lambda_k)$

ainsi $Q(f)(e_k) = 0 \iff (X - \lambda_k)^{m_k} | Q(X)$

donc comme les $(X - \lambda_k)^{m_k}$ sont deux à deux premiers entre eux,

on a finalement
$$Q(f)(x_0) = 0 \iff \prod_{k=1}^p (X - \lambda_k)^{m_k} | Q$$

19. Soit $(\lambda_i)_{0 \leq i \leq n-1} \in \mathbb{K}^n$ tel que $\sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i f^i(x_0) = 0$. Je note $Q = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i X^i$ de sorte que $Q(f)(x_0) = 0$

ainsi $\prod_{k=1}^p (X - \lambda_k)^{m_k} | Q$ d'après la question précédente or $\deg(Q) \leq n-1 < n = \deg\left(\prod_{k=1}^p (X - \lambda_k)^{m_k}\right)$

donc Q est le polynôme nul et ainsi $\forall i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket, \lambda_i = 0$

donc $(f^i(x_0))_{0 \leq i \leq n-1}$ est une famille libre de n vecteurs de E et $n = \dim E$

d'où $(f^i(x_0))_{0 \leq i \leq n-1}$ est une base de E ce qui justifie que f est cyclique

III. Endomorphismes commutants, décomposition de Frobenius

20. L'application $g \mapsto f \circ g - g \circ f$ est un endomorphisme de $\mathcal{L}(E)$ dont le noyau est $C(f)$

Ainsi $C(f)$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{L}(E)$

De plus, soit g et $h \in C(f)$. On a $(g \circ h) \circ f = g \circ f \circ h = f \circ (g \circ h)$

ainsi $C(f)$ est stable par \circ et il est clair que $\text{Id} \in C(f)$

Ainsi $C(f)$ est une sous-algèbre de $\mathcal{L}(E)$

III.A. Commutant d'un endomorphisme cyclique

21. On a $g(x_0) \in E$ et $(x_0, f(x_0), \dots, f^{n-1}(x_0))$ est une base de E .

d'où l'existence de $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}$ de \mathbb{K} tels que $g(x_0) = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k f^k(x_0)$

22. Il suffit d'établir que les applications linéaires g et $\sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k f^k$ coïncident sur la base $(x_0, f(x_0), \dots, f^{n-1}(x_0))$.

On montre par récurrence immédiate que $\forall i \in \mathbb{N}, g \in C(f^i)$

Soit $i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$. En utilisant 21 et le fait que l'algèbre $\mathbb{K}[f]$ est commutative

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

donc $g = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k f^k$ et $g \in \mathbb{K}[f]$

23. On vient d'établir le sens direct (avec un polynôme de degré $\leq n-1$)

La réciproque vient du fait que $\mathbb{K}[f]$ est une algèbre commutative et que $\mathbb{K}_{n-1}[X] \subset \mathbb{K}[X]$ et $f \in \mathbb{K}[f]$.

On conclut que

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

III.B. Décomposition de Frobenius

24. On suppose que $G = F_1 \cup \dots \cup F_r$ est un sous espace de E .

Par l'absurde, je suppose qu'aucun des sous-espaces F_i ne contient tous les autres.

Ainsi $r \geq 2$ et $G \neq \{0\}$.

Méthode 1 : Quitte à réduire le nombre, on peut supposer qu'aucun F_i n'est inclus dans la réunion des autres. Cela nous fournit $x_1 \in F_1$ qui n'est dans aucun des F_i pour $i \geq 2$.

Sinon, $F_1 \neq G$ et on peut aussi trouver $y \in G \setminus F_1$.

Pour tout scalaire λ , on a $y + \lambda x_1 \notin F_1$ (car sinon $y \in F_1$) et ainsi $y + \lambda x_1 \in F_2 \cup \dots \cup F_r$.

La droite affine $y + \mathbb{K}x_1$ est donc incluse dans $F_2 \cup \dots \cup F_r$ et contient une infinité d'éléments

car \mathbb{K} est infini et $t \in \mathbb{K} \mapsto y + tx_1$ est injective car $x_1 \neq 0$

Ceci nous fournit $j \in \llbracket 2, r \rrbracket$ et $\lambda \neq \lambda'$ dans \mathbb{K} tel que $y + \lambda x_1 \in F_j$ et $y + \lambda' x_1 \in F_j$

donc $x_1 \in F_j$ (par combinaison linéaire) ce qui est absurde

Méthode 2 : Comme G est un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension finie, on peut munir G d'une norme.

De plus les notions topologiques sur G sont indépendantes du choix de la norme car $\dim G < +\infty$.

Comme les F_i sont des sous-espaces de G de dimensions finies, ce sont des fermés de G .

Soit $i \in \llbracket 1, r \rrbracket$. Comme $F_i \neq G$, cela nous fournit $e \in G \setminus F_i$.

Soit $x \in F_i$. On a alors : $\forall p \in \mathbb{N}^*$, $x + \frac{1}{p}e \notin F_i$

Pour toute boule B_x centré en x , il existe $p_0 \in \mathbb{N}^*$, $x + \frac{1}{p_0}e \in B_x$ car $(x + \frac{1}{p_0}e)_{p \geq 1}$ converge vers x

Ainsi relativement à G , les F_i sont des fermés d'intérieurs vides.

Donc pour $i \in \llbracket 1, r \rrbracket$, $\Omega_i = G \setminus F_i$ un ouvert dense dans G

On pose $V_i = \bigcap_{j=1}^i \Omega_j$

On montre par récurrence finie que les V_i ($1 \leq i \leq r$) sont des ouverts non vides de G

Pour l'initialisation c'est évident car $V_1 = \Omega_1$ est dense dans G .

Pour l'hérédité, on suppose pour $i < r$ que V_i est un ouvert non vide

on a $V_{i+1} = V_i \cap \Omega_{i+1}$ est un ouvert (intersection de deux ouverts) et non vide car $V_i \neq \emptyset$ et Ω_{i+1} dense

donc $V_r \neq \emptyset$ et $V_r = G \setminus \left(\bigcup_{j=1}^r F_j \right) = \emptyset$ ce qui est absurde

Ainsi $\boxed{\text{l'un des sous-espaces } F_i \text{ contient tous les autres}}$

Remarque : Pour $r = 2$, il existe une preuve classique purement algébrique. Pour le cas général, la preuve doit utiliser le fait que \mathbb{K} est infini.

En effet, si je prends le corps $K = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$, $E = K^2$, $F_1 = \text{Vect}((1, 0))$, $F_2 = \text{Vect}((0, 1))$ et $F_3 = \text{Vect}((1, 1))$.

On a $E = F_1 \cup F_2 \cup F_3$ et pourtant aucun des sous-espaces F_i ne contient tous les autres.

25. Soit $x \in E$ On considère l'application $\varphi_x : P \in \mathbb{K}[X] \mapsto P(f)(x) \in E$.

Comme $I_x = \{P \in \mathbb{K}[X] \mid P(f)(x) = 0\}$ est le noyau de l'application linéaire φ_x ,

I_x un sous groupe de $(\mathbb{K}[X], +)$

Pour $P \in I_x$ et $Q \in \mathbb{K}[X]$, on a $QP \in I_x$

car $(QP)(f)(x) = (Q(f) \circ P(f))(x) = Q(f)(P(f)(x)) = 0$ car $Q(f) \in \mathcal{L}(E)$

d'où I_x est un idéal de $\mathbb{K}[X]$ comme $\pi_f \in I_x$, cet idéal est non réduit à $\{0\}$

ce qui nous fournit $\pi_{f,x} \in \mathbb{K}[X]$ unitaire (donc non nul) tel que $I_x = (\pi_{f,x}) = \{\pi_{f,x}P \mid P \in \mathbb{K}[X]\}$

On remarque que : $\forall x \in E, \pi_{f,x} \mid \pi_f$

Si on écrit $\pi_f = \prod_{k=1}^N P_i^{\alpha_i}$ décomposition en facteurs irréductibles, où $N \in \mathbb{N}^*$, les P_i sont irréductibles unitaires et distincts deux à deux et enfin les $\alpha_i \in \mathbb{N}^*$.

Alors le nombre de diviseurs unitaires de π_f est $\prod_{k=1}^N (\alpha_i + 1)$

Ainsi l'ensemble $\{\pi_{f,x} \mid x \in E\}$ est fini de cardinal noté r où $r \in \llbracket 1, \prod_{k=1}^N (\alpha_i + 1) \rrbracket$

On peut donc choisir $u_1, \dots, u_r \in E$, tel que $\{\pi_{f,x} \mid x \in E\} = \{\pi_{f,u_i} \mid i \in \llbracket 1, r \rrbracket\}$

Ainsi $E = \bigcup_{i=1}^r \ker(\pi_{f,u_i}(f))$ car $\forall x \in E, x \in \ker(\pi_{f,x}(f))$

La question 24 nous fournit $i_0 \in \llbracket 1, r \rrbracket$ tel que $\ker(\pi_{f,u_{i_0}}(f)) = E$

On note $x_1 = u_{i_0}$ et on a $\ker(\pi_{f,x_1}(f)) = E$

On remarque que $\pi_{f,x_1}(f) = 0_{\mathcal{L}(E)}$ donc $\pi_f \mid \pi_{f,x_1}$

or $\pi_{f,x_1} \mid \pi_f$ et ce sont des polynômes unitaires

donc $\pi_{f,x_1} = \pi_f$ Finalement

$$\forall P \in \mathbb{K}[X], P(f)(x_1) = 0 \iff \pi_f \mid P$$

en faisant comme en 19, on montre que $(x_1, f(x_1), \dots, f^{d-1}(x_1))$ est libre

26. En faisant comme en 9, on montre que E_1 est stable par f

De plus, on a $E_1 = \{P(f)(x_1) \mid P \in \mathbb{K}_{d-1}[X]\} \subset \{P(f)(x_1) \mid P \in \mathbb{K}[X]\}$

Soit $P \in \mathbb{K}[X]$. Comme $\pi_f \neq 0$,

le théorème de la division euclidienne nous fournit Q et $R \in \mathbb{K}[X]$ tels que $\begin{cases} P = Q\pi_f + R \\ \deg(R) < d = \deg(\pi_f) \end{cases}$

On a alors $P(f)(x_1) = [Q(f) \circ \pi_f(f)](x_1) + R(f)(x_1) = R(f)(x_1) \in \{T(f)(x_1) \mid T \in \mathbb{K}_{d-1}[X]\}$

On conclut que $E_1 = \{P(f)(x_1) \mid P \in \mathbb{K}[X]\}$

27. D'après ce qui précède $\mathcal{B} = (e_1, e_2, \dots, e_d)$ est une base de E_1 .

De plus on a $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(\psi_1) = C_{\pi_f}$ matrice compagnon du π_f polynôme unitaire de degré $d = \dim(E_1)$

alors d'après 5, ψ_1 est cyclique

28. Pour $i \in \mathbb{N}$, on note $F_i = \text{Ker}(\Phi \circ f^i)$ ainsi $F = \bigcap_{i \in \mathbb{N}} F_i$ est bien un sous-espace de E

De plus, on a pour $i \geq 1, f(F_i) \subset F_{i-1}$ donc

$$f(F) \subset f\left(\bigcap_{i \in \mathbb{N}^*} F_i\right) \subset \bigcap_{i \in \mathbb{N}^*} f(F_i) \subset \bigcap_{i \in \mathbb{N}^*} F_{i-1} = F$$

d'où $\boxed{F \text{ est stable par } f}$

Soit $u \in E_1 \cap F$.

Comme $u \in E_1$, cela nous fournit $\lambda_1, \dots, \lambda_d \in \mathbb{K}$ tels que $u = \sum_{k=1}^d \lambda_k e_k$

or $\Phi(x) = \lambda_d$ et $\Phi(f^0(x)) = 0$ car $u \in F$, donc $\lambda_d = 0$ d'où $u = \sum_{k=1}^{d-1} \lambda_k e_k$

puis $f(u) = \sum_{k=1}^{d-1} \lambda_k e_{k+1}$ et donc $\lambda_{d-1} = 0$ et $f(u) = \sum_{k=1}^{d-2} \lambda_k e_{k+1}$

En réitérant le procédé, on trouve $\lambda_{d-2} = \dots = \lambda_1 = 0$

donc $u = 0$

L'autre inclusion étant évidente, on a $E_1 \cap F = \{0\}$ d'où $\boxed{E_1 \text{ et } F \text{ sont en somme directe}}$

29. Je note Ψ_1 l'application linéaire induite par Ψ entre E_1 et \mathbb{K}^d .

Soit $x \in \text{Ker}(\Psi_1)$.

On a $x \in E_1$ et $\Phi(x) = \Phi(f(x)) = \dots = \Phi(f^{d-1}(x)) = 0$.

En faisant comme à la question précédente, on obtient $x = 0$

L'autre inclusion étant évidente, on a $\text{Ker}(\Psi_1) = \{0\}$

Ainsi Ψ_1 est une application linéaire injective entre E_1 et \mathbb{K}^d or $\dim(E_1) = d = \dim(\mathbb{K}^d)$

En utilisant le théorème du rang, on obtient que Ψ_1 est surjective puis bijective

Ainsi $\boxed{\Psi \text{ induit un isomorphisme entre } E_1 \text{ et } \mathbb{K}^d}$

30. De la question précédente, on montre que Ψ est surjective de E vers \mathbb{K}^d et que $\text{ker}(\Psi) \cap E_1 = \{0\}$.

Ainsi $\dim(E_1) = d = \text{rg}(\Psi)$ et $\dim(E) = \dim(\text{ker}(\Psi)) + \text{rg}(\Psi) = \dim(\text{ker}(\Psi)) + \dim(E_1)$

donc $E = E_1 \oplus \text{Ker}(\Psi)$

On a $\text{Ker} \Psi = \bigcap_{i=0}^{d-1} F_i$ (les F_i sont introduits en 28) on a donc $F \subset \text{Ker} \Psi$

Soit $x \in \text{Ker}(\Psi)$. Montrons que $x \in F$

Soit $i \in \mathbb{N}$. Il suffit d'établir que $\Phi(f^i(x)) = 0$

Le théorème de la division euclidienne nous fournit Q et $R \in \mathbb{K}[X]$ tel que $\deg(R) < d$ et $X^i = Q\pi_f + R$.

On peut écrire $R = \sum_{k=0}^{d-1} a_k X^k$. On a comme en 26 et car Φ est linéaire

$$\Phi(f^i(x)) = \Phi(0) + \Phi(R(f)(x)) = 0 + \sum_{k=0}^{d-1} a_k \Phi(f^k(x)) = 0$$

ainsi $F \supset \text{Ker} \Psi$ d'où $F = \text{Ker} \Psi$

on conclut que $\boxed{E = E_1 \oplus F}$

31. **Préambule :** Avant de commencer la construction par récurrence, on remarque que dans ce qui précède le polynôme minimal de f est celui de ψ_1 et donc que $\forall x \in F, \pi_{\psi_1}(f)(x) = 0$

Initialisation : On prend E_1, F et ψ_1 comme ci dessus.

On a E_1 stable par F et ψ_1 cyclique.

On pose $P_1 = \pi_f = \pi_{\psi_1}$, $G_1 = F$ de sorte que $E_1 \oplus G_1 = E$

On a $\forall x \in G_1, P_1(f)(x) = 0$

Hérédité : Soit $k \in \mathbb{N}^*$.

On suppose avoir l'existence de k sous-espaces vectoriels de E , notés E_1, \dots, E_k et G_k tous stables par f , tels que

- $E = E_1 \oplus \dots \oplus E_k \oplus G_k$;
- pour tout $1 \leq i \leq k$, l'endomorphisme ψ_k 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 $1 \leq i \leq k-1$
- $\forall x \in G_k, P_k(f)(x) = 0$

Si $\dim G_k = 0$, on s'arrête et on pose $r = k$

Sinon, on applique 24 à 30 à l'endomorphisme induit par f sur G_k

On obtient alors E_{k+1}, G_{k+1} sous espaces stables par f et le polynôme P_{k+1} tels que

- $E = E_1 \oplus \dots \oplus E_{k+1} \oplus G_{k+1}$;
- l'endomorphisme ψ_{k+1} induit par f sur le sous-espace vectoriel E_{k+1} est cyclique ;
- si on note P_{k+1} le polynôme minimal de ψ_{k+1} , alors P_{k+1} divise P_k
- $\forall x \in G_{k+1}, P_{k+1}(f)(x) = 0$

On a ainsi la construction voulue au rang k .

Conclusion : Cette construction algorithmique s'arrête car à chaque étape $\dim(E_k) \leq 1$ et donc $r \leq \dim(E)$. car $(\dim G_k)_k$ est une suite à valeurs dans \mathbb{N} strictement décroissante.

On obtient ainsi le résultat voulu.

On en déduit 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

32. Je reprends les notations de la questions précédente pour la décomposition de Frobenius de f .

Je note Λ l'application telle que pour $(g_1, \dots, g_r) \in \mathcal{L}(E_1) \times \dots \times \mathcal{L}(E_r)$, on a $\Lambda(g_1, \dots, g_r)$ défini sur E par

$$\Lambda(g_1, \dots, g_r)(x) = g_1(x_1) + \dots + g_r(x_r) \text{ où } x = \sum_{k=1}^r x_k \text{ et les } x_k \in E_k$$

Ainsi définie, Λ est linéaire de $\mathcal{L}(E_1) \times \dots \times \mathcal{L}(E_r)$ à valeurs dans $\mathcal{L}(E)$

De plus on montre facilement que Λ est injective et que $\Lambda(C(\psi_1) \times \dots \times C(\psi_r)) \subset C(f)$

Ainsi $\dim(C(f)) \geq \dim(C(\psi_1) \times \dots \times C(\psi_r)) = \dim(C(\psi_1)) + \dots + \dim(C(\psi_r))$

or pour $i \in [1, r]$, en notant $n_i = \dim E_i$ on a $C(\psi_i) = \text{Vect}(\psi_i^0, \psi_i^1, \dots, \psi_i^{n_i-1})$ d'après 23 du III.A

Comme ψ_i est cyclique alors $(\psi_i^0, \psi_i^1, \dots, \psi_i^{n_i-1})$ est libre d'après 7

donc $\dim(C(\psi_i)) = n_i = \dim(E_i)$ d'où

$$\dim(C(\psi_1)) + \dots + \dim(C(\psi_r)) = \dim(E_1) + \dots + \dim(E_r) = \dim(E_1 \oplus \dots \oplus E_r) = \dim(E) = n$$

Ainsi la dimension de $C(f)$ est supérieure ou égale à n

33. On note $d = \deg(\pi_f)$. D'après le cours, on a $\dim(\mathbb{K}[f]) = d$

or $\mathbb{K}[f] \subset C(f)$ et $\dim C(f) \geq n$ donc $d \geq n$.

Or on a $\pi_f | \chi_f$ comme conséquence de Cayley-Hamilton ainsi $d \leq n$

donc $d = n$

Or en reprenant les notations précédentes, on a $\dim(E_1) = d = n$

Donc $E_1 = E$ et $\psi_1 = f$ or ψ_1 est cyclique

ainsi f est cyclique

IV. Endomorphismes orthocycliques

IV.A. Isométries vectorielles orthocycliques

34. Pour $\theta \in \mathbb{R}$, la matrice $R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$ est semblable à la matrice $R(-\theta)$ (géométriquement en échangeant les deux vecteurs de la base orthonormée ce qui change l'orientation du plan).

Si $\theta \equiv 0 [2\pi]$, alors $R(\theta) = I_2$.

Si $\theta \equiv \pi [2\pi]$, alors $R(\theta) = -I_2$.

Si $\theta \not\equiv 0 [\pi]$, alors il existe $\theta' \in]0, \pi[$ tel que $R(\theta)$ soit semblable à $R(\theta')$.

D'après le cours sur la réduction des automorphismes orthogonaux, il existe une base orthonormale \mathcal{B} , p, q et $r \in \mathbb{N}$ et $\theta_1, \dots, \theta_r \in]0, \pi[$ tels que la matrice de f dans \mathcal{B} soit diagonale par blocs de la forme : $\text{diag}(I_p, -I_q, R(\theta_1), \dots, R(\theta_r))$.

On remarque que $p + q + 2r = n = \dim(E)$

et $\chi_{R(\theta)} = X^2 - \text{tr}(R(\theta)) + \det(R(\theta)) = X^2 - 2\cos(\theta) + 1 = (X - e^{i\theta})(X - e^{-i\theta})$

on a ainsi $\chi_f = \chi_{I_p} \times \chi_{-I_q} \times \chi_{R(\theta_1)} \times \dots \times \chi_{R(\theta_r)} = (X - 1)^p (X + 1)^q \prod_{i=1}^r (X - e^{i\theta_i})(X - e^{-i\theta_i})$

Quitte à réordonner les vecteurs de la base, on peut supposer que $0 < \theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_r < \pi$

ainsi p est la multiplicité de 1, q est la multiplicité de -1 dans χ_f et les $\theta_1, \dots, \theta_r$ sont donnés dans l'ordre par les racines non réelles de χ_f

Ainsi comme $\chi_f = \chi_{f'}$, on pourra trouver \mathcal{B}' base orthonormée telle que $\mathcal{M}_{\mathcal{B}'}(f')$ ait la même forme diagonale par blocs.

ainsi il existe des bases orthonormales \mathcal{B} et \mathcal{B}' de E telles que $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) = \mathcal{M}_{\mathcal{B}'}(f')$

35. \implies : On suppose que f est orthocyclique.

Ceci nous fournit $Q = X^n + a_{n-1}X^{n-1} + \dots + a_1X + a_0 \in \mathbb{R}[X]$ et \mathcal{B} une base orthonormée de E tels que

$$\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) = C_Q = \begin{pmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & \ddots & & \vdots & -a_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 1 & 0 & -a_{n-2} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & -a_{n-1} \end{pmatrix} = (C_1 | \dots | C_n)$$

où C_1, \dots, C_n désigne les colonnes de la matrice.

Comme $f \in O(E)$, \mathcal{B} est orthonormée, alors $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) \in O(n)$

d'où (C_1, \dots, C_n) est une base orthonormée de \mathbb{R}^n muni du produit scalaire usuel noté $\langle \cdot, \cdot \rangle$

donc pour $1 \leq i \leq n-1$, on a $C_i \perp C_n$ et donc $0 = \langle C_i, C_n \rangle = -a_i$ et $1 = \langle C_n, C_n \rangle = a_0^2$

$$\text{ainsi } a_0 \in \{-1, 1\} \text{ et } \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) = C_Q = \begin{pmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Ainsi d'après 3, on a $\chi_f \in \{X^n - 1, X^n + 1\}$

\Leftarrow : On suppose que $\chi_f = X^n + a$ avec $a \in \{-1, 1\}$.

On note $Q = \chi_f$ et on considère $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_{n-1}, e_n)$ une base orthonormée de E .

On considère alors l'unique endomorphisme $g \in \mathcal{L}(E)$ tel que $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(g) = C_Q$ fourni par le cours.

g envoie la base \mathcal{B} sur la famille $\mathcal{F} = (e_2, \dots, e_n, ae_1)$.

On remarque que \mathcal{F} est une famille orthonormale de E composée de n vecteurs de E or $\dim(E) = n$

donc g est un endomorphisme de E qui envoie la base orthonormée \mathcal{B} sur la base orthonormée \mathcal{F}

Ainsi $g \in O(E)$ et $\chi_g = \chi_{\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(g)} = \chi_{C_Q} = Q = \chi_f$ et $f \in O(E)$.

Alors la question 34 nous fournit les deux bases orthonormées respectivement \mathcal{B}_f et \mathcal{B}_g pour lesquelles respectivement f et g ont la même matrice notée M . Ainsi il existe $P \in O(n)$ matrice de changement de bases orthonormales telle que

$$M = P^{-1}\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(g)P = P^{-1}C_QP$$

Ainsi la matrice $C_Q = PMP^{-1} = P\mathcal{M}_{\mathcal{B}_f}(f)P^{-1}$ représente f dans une base orthonormée.

Ce qui prouve que f est orthocyclique.

On en déduit que : f est orthocyclique si et seulement si $\chi_f = X^n - 1$ ou $\chi_f = X^n + 1$

IV.B. Endomorphismes nilpotents orthocycliques

36. Comme f est nilpotent, le cours nous fournit une base $\mathcal{B}_s = (e_1^s, \dots, e_n^s)$ telle que $\mathcal{M}_{\mathcal{B}_s}(f)$ soit triangulaire supérieure.

On applique le procédé de Gram-Schmidt à \mathcal{B}_s pour obtenir une base orthonormale $\mathcal{B}_o = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n)$ et en notant la matrice de passage P de \mathcal{B}_s à \mathcal{B}_o est triangulaire supérieure ainsi que P^{-1} .

Comme le sous-espace des matrices triangulaires supérieures est stable par produit ;

alors la matrice $\mathcal{M}_{\mathcal{B}_o}(f) = P^{-1}\mathcal{M}_{\mathcal{B}_s}(f)P$ est triangulaire supérieure.

Alors en notant $\mathcal{B}_i = (\epsilon_n, \dots, \epsilon_2, \epsilon_1)$, on a \mathcal{B}_i base orthonormale de E et $\mathcal{M}_{\mathcal{B}_i}(f)$ triangulaire inférieure

ainsi il existe une base orthonormale de E dans laquelle la matrice de f est triangulaire inférieure

37. \Leftarrow : On suppose que f est de rang $n - 1$ et que $\forall x, y \in (\ker f)^\perp, (f(x)|f(y)) = (x|y)$.

La question précédente nous fournit une base orthonormée $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ tel que $A = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f)$ soit triangulaire inférieure.

Je note $A = (C_1 | \dots | C_n)$ en colonnes.

Comme f est nilpotente, alors $\chi_f = X^n$ d'après le cours

donc la matrice est triangulaire strictement inférieure (diagonale nulle)

ainsi $e_n \in \text{Ker } f \setminus \{0\}$ et comme $\dim(\text{Ker } f) = n - \text{rg}(f) = 1$,

on a $\text{Ker } f = \text{Vect}(e_n)$ et $\text{Ker}(f)^\perp = \{e_n\}^\perp = \text{Vect}(e_1, \dots, e_{n-1})$ car \mathcal{B} est orthonormée

Ainsi pour tout $i, j \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$, par calcul dans une base orthonormée on a :

$$\langle C_i, C_j \rangle = (f(e_i)|f(e_j)) = (e_i|e_j) = \delta_{i,j} \text{ (symbole de Kronecker)}$$

donc si $1 \leq i < j \leq n-1$, on a $\langle C_i, C_j \rangle = 0$ et $\langle C_i, C_i \rangle = \langle C_j, C_j \rangle = 1$

$$\text{On a donc } C_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \text{ et } C_{n-1} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ a_{n-1} \end{pmatrix} \text{ avec } a_{n-1} \in \{-1, 1\} \text{ car } a_{n-1}^2 = \langle C_{n-1}, C_{n-1} \rangle = 1$$

On trouve ensuite $C_{n-2} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ a_{n-2} \\ 0 \end{pmatrix}$ avec $a_{n-1} \in \{-1, 1\}$ car $\langle C_{n-2}, C_{n-1} \rangle = 0$ et $\langle C_{n-2}, C_{n-2} \rangle = 1$

En procédant de même, on obtient $A = \begin{pmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ a_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & \ddots & & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & a_{n-2} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & a_{n-1} & 0 \end{pmatrix}$ où les $a_i \in \{-1, 1\}$

La base $\mathcal{B}' = (e_1, a_1 e_2, a_1 a_2 e_3, \dots, \prod_{i=0}^{n-2} a_i e_{n-1}, \prod_{i=0}^{n-1} a_i e_n)$ est orthonormée et $\mathcal{M}_{\mathcal{B}'}(f) = C_{X^n}$.

Ainsi f est orthocyclique.

\implies : On suppose que f est orthocyclique.

Comme f est cyclique et nilpotent, on a $\pi_f = \chi_f = X^n$ d'après 12

Comme f est orthocyclique,

cela nous fournit une base orthonormée $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ telle que $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) = C_{\mathbb{Q}}$.

Comme $X^n = \chi_f = \chi_{C_{\mathbb{Q}}} = \mathbb{Q}$, on a $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) = C_{X^n}$.

donc $\text{rg}(f) = \text{rg}(C_{X^n}) = n - 1$, $\text{Vect}(e_n) = \text{Ker } f$ et $\text{Vect}(e_1, \dots, e_{n-1}) = (\text{Ker } f)^\perp$

et on vérifie facilement que $\forall x, y \in (\text{ker } f)^\perp$, $(f(x)|f(y)) = (x|y)$ par calcul dans la base orthonormée \mathcal{B}