

Maths

Algèbre

Réduction

Autre critère de diagonalisabilité

Caractérisation des endomorphismes nilpotents

Codiagonalisabilité

Commutant d'un endomorphisme diagonalisable

Cotrigonalisation

Critère de Diagonalisabilité

Critère de trigonalisabilité sur le polynôme minimal

Diagonalisabilité

Diagonalisabilité d'un endomorphisme induit

Décomposition de Dunford

Décomposition en sous espaces caractéristiques

Démonstration annexe du théorème des noyaux

Endomorphisme commutateur de matrices

Endomorphisme différence de produits de matrices

Endomorphismes cycliques

Endomorphismes de produit de matrices

Endomorphismes nilpotents cycliques

Endomorphismes semi-simples

Endomorphismes simples

Existence d'une droite ou d'un plan stable dans un espace vectoriel réel

Matrice compagnon

Multiplicités d'une valeur propre

Polynôme caractéristique d'un endomorphisme

Premier lien entre polynôme minimal et polynôme caractéristique

Produit de Kronecker et diagonalisabilité

Projecteurs spectraux d'un endomorphisme diagonalisable

Propriétés diverses du polynôme caractéristique

Somme directe des sous-espaces propres

Sous-espaces caractéristiques et polynôme minimal

Sous-espaces cycliques

Sous-espaces stables d'un endomorphisme diagonalisable

Théorème de Cayley-Hamilton

Théorème des noyaux

Trigonalisabilité

Valeurs propres, espaces propres

Vision matricielle de la cyclicité

Exercice

Réduction

Exercice : critère de diagonalisabilité sur l'existence de supplémentaires stables

Exercice : le bicommutant

Exercice : polynôme caractéristique divisant une puissance du polynôme minimal

Exercice : propriétés des endomorphismes cycliques

Exercice : valuation X-adique du polynôme minimal.

Exercice : vecteur dont le polynôme minimal ponctuel est le polynôme minimal

Valeurs propres, espaces propres

Définitions, caractérisation, démonstration autour des valeurs propres et des espaces propres.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, $\lambda \in \mathbb{K}$, il y a équivalence entre

1. $\exists x_0 \in E \setminus \{0\}, u(x_0) = \lambda x_0$
2. $\ker(u - \lambda \text{id}) \neq \{0\}$
3. $u - \lambda \text{id} \notin \text{GL}(E)$

On dit alors que λ est une valeur propre de u , on appelle sous-espace propre de u pour la valeur propre λ

$$E_\lambda(u) = \{x \in E \mid u(x) = \lambda x\}$$

Démonstration

$$\begin{aligned} & \exists x_0 \in E \setminus \{0\}, u(x_0) = \lambda x_0 \\ \Leftrightarrow & \exists x_0 \in \ker(u - \lambda \text{id}) \setminus \{0\} \\ \Leftrightarrow & u - \lambda \text{id} \notin \text{GL}(E) \quad (\text{dimension finie}) \end{aligned}$$

Somme directe des sous-espaces propres

Démonstration du fait que les sous-espaces propres d'un endomorphisme sont en somme directe.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, $\lambda_1, \dots, \lambda_p \in \mathbb{K}$ ses valeurs propres deux à deux distinctes.

Soit $(x_1, \dots, x_p) \in \prod_{k=1}^p E_{\lambda_k}(u)$ tels que $\sum_{k=1}^p x_k = 0$.

Par récurrence on montre que pour tout $P(X) \in \mathbb{K}[X]$.

$$0 = \sum_{k=1}^p P(\lambda_k) x_k$$

En particulier avec $P = L_i$ pour $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ on a

$$0 = \sum_{k=1}^p L_i(\lambda_k) x_k = x_i$$

On appelle spectre de u

$$\text{Sp}(u) = \{\lambda \in \mathbb{K} \mid \lambda \text{ valeur propre}\}$$

Qui est finit ($|\text{Sp}(u)| \leq n = \dim E$).

Polynôme caractéristique d'un endomorphisme

Définitions, propriétés élémentaires et démonstrations autour du polynôme caractéristique d'un endomorphisme.

Matrices

Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$, on définit le polynôme caractéristique de A comme

$$\chi_A(X) = \det(XI_n - A)$$

Et on a

$$\chi_A(X) = \sum_{k=0}^n a_k X^k$$

$$a_n = 1 \quad (\chi_A \text{ unitaire})$$

$$a_{n-1} = -\text{tr}(A)$$

$$a_0 = (-1)^n \det(A)$$

Endomorphismes

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, e base de E , $A = \mathcal{M}_e(u)$. On définit

$$\chi_u(X) = \chi_A(X)$$

Ceci ne dépend pas de la base e choisie.

De plus

$$\text{Sp}(u) = Z_{\mathbb{K}}(\chi_u)$$

Démonstration

$$\chi_A(X) = \sum_{\sigma \in \mathfrak{S}_n} \varepsilon(\sigma) \underbrace{\prod_{j=1}^n (X\delta_{\sigma(j)j} - A_{\sigma(j)j})}_{P_{\sigma}(X)}$$

Pour tout $\sigma \in \mathfrak{S}_n$, $P_{\sigma} \in \mathbb{K}_n[X]$ donc $\chi_A \in \mathbb{K}_n[X]$. De plus

$$\deg(P_{\sigma}) = |\{k \in \llbracket 1, n \rrbracket \mid \sigma(k) = k\}|$$

$$\deg(P_{\sigma}) = n \iff \sigma = \text{id}$$

Donc $\deg \chi_A = n$ et $\text{cd } \chi_A = 1$.

Si $\sigma \neq \text{id}$, $\deg(P_{\sigma}) \leq n - 2$, donc a_{n-1} est le terme en X^{n-1} de P_{id} .

$$P_{\text{id}} = \prod_{j=1}^n (X - A_{jj})$$

$$a_{n-1} = -\sum_{j=1}^n A_{jj} = -\text{tr}(A)$$

$$a_0 = \chi_A(0) = \det(0 - A)$$

$$= (-1)^n \det(A)$$

Soient e, e' deux bases de E , $A = \mathcal{M}_e(u)$, $A' = \mathcal{M}_{e'}(u)$, $P = P_{e' \rightarrow e}$.

$$A' = PAP^{-1}$$

$$\chi_{A'}(X) = \det(XI_n - A')$$

$$= \det(XPI_nP^{-1} - PAP^{-1})$$

$$= \det(P) \det(XI_n - A) \det(P^{-1})$$

$$= \chi_A(X)$$

Multiplicités d'une valeur propre

Définitions des multiplicités d'une valeur propre.

Soit $\lambda \in \mathbb{K}$ une valeur propre de l'endomorphisme u .

- On appelle multiplicité algébrique (m_λ), ou juste multiplicité de λ sa multiplicité en tant que racine de χ_u .
- On appelle multiplicité géométrique de λ la dimension de son espace propre.

On a toujours

$$\dim E_\lambda(u) \leq m_\lambda$$

Démonstration

Soit (e_1, \dots, e_d) base de E_λ complété en $e = (e_1, \dots, e_n)$ base de E .

$$\mathcal{M}_e(u) = \left(\begin{array}{c|c} \lambda I_d & B \\ \hline 0 & C \end{array} \right)$$

$$\begin{aligned} \chi_u &= \chi_{\mathcal{M}_e(u)} \\ &= \left| \begin{array}{c|c} (X - \lambda)I_d & -B \\ \hline 0 & XI_{n-d} - C \end{array} \right| \\ &= (X - \lambda)^d \chi_C(X) \end{aligned}$$

Propriétés diverses du polynôme caractéristique

Cas particuliers de calculs du polynôme caractéristique, et lien avec les endomorphisme induit.

- Pour tout $T \in T_n(\mathbb{K})$

$$\chi_T = \prod_{k=1}^n T_{kk}$$

- Pour tout $M = \left(\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline 0 & C \end{array} \right) \in M_n(\mathbb{K})$, $A \in M_r(\mathbb{K})$, $C \in M_{n-r}(\mathbb{K})$, $B \in M_{r,n-r}(\mathbb{K})$

$$\chi_M(X) = \chi_A(X) \chi_C(X)$$

- Soient $u \in \mathcal{L}(E)$, F sev stable par u , \tilde{u} l'endomorphisme induit par u sur F , on a toujours

$$\chi_{\tilde{u}} \mid \chi_u$$

Démonstration

- L'écrire.
- L'écrire.
- Soit $e = (e_1, \dots, e_n)$ base de F complété en base de E .

$$\mathcal{M}_e(u) = \left(\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline 0 & C \end{array} \right)$$

Avec $A = \mathcal{M}_{\tilde{e}}(\tilde{u})$.

Diagonalisabilité

Définition et premier critère de diagonalisabilité.

On dit que $u \in \mathcal{L}(E)$ est diagonalisable s'il existe une base e de E tel que $\mathcal{M}_e(u)$ est diagonale.

Une tel base est par définition formée de vecteurs propres de u .

De plus

u diagonalisable

$$\Leftrightarrow E = \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp}(u)} E_{\lambda}(u)$$

$$\Leftrightarrow \sum_{\lambda \in \text{Sp}(u)} \dim E_{\lambda}(u) = \dim E$$

En particulier

- Les homothéties sont diagonales dans toutes les bases
- Les projecteurs sont diagonalisables :

$$\underbrace{\ker(p - \text{id})}_{E_1(p)} \oplus \underbrace{\ker p}_{E_0(p)} = E$$

- Les symétries sont diagonalisables :

$$\underbrace{\ker(s - \text{id})}_{E_1(s)} \oplus \underbrace{\ker s + \text{id}}_{E_{-1}(s)} = E$$

Autre critère de diagonalisabilité

Énoncer du critère de diagonalisabilité sur χ_u et les multiplicités.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$

u diagonalisable

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \chi_u \text{ scindé} \\ \forall \lambda \in \text{Sp}(u), \dim E_\lambda(u) = m_\lambda \end{cases}$$

Où m_λ est la multiplicité (algébrique) de λ .

Ainsi car $\dim E_\lambda(u) \geq 1$ pour tout $\lambda \in \text{Sp}(u)$,

$$\chi_u \text{ SARS} \Rightarrow u \text{ diagonalisable}$$

Démonstration

- Supposons u diagonalisable, notons e la base qui le diagonalise.

$$\mathcal{M}_e(u) = \begin{pmatrix} \alpha_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \alpha_n \end{pmatrix}$$

Donc χ_u est scindé

$$\begin{aligned} \chi_u(X) &= \prod_{k=1}^n (X - \alpha_k) \\ &= \prod_{k=1}^p (X - \lambda_k)^{m_{\lambda_k}} \end{aligned}$$

Ainsi

$$\begin{aligned} \deg \chi_u &= n = \sum_{k=1}^p m_{\lambda_k} \\ n &= \sum_{k=1}^p m_{\lambda_k} \geq \sum_{k=1}^p \dim E_{\lambda_k} = n \end{aligned}$$

- Supposons χ_u scindé et pour tout $\lambda \in \text{Sp}(u)$, $\dim E_\lambda(u) = m_\lambda$.

$$\chi_u = \underbrace{\prod_{\lambda \in \text{Sp}(u)} (X - \lambda)^{m_\lambda}}_{\deg = n}$$

$$n = \sum_{\lambda \in \text{Sp}(u)} m_\lambda = \sum_{\lambda \in \text{Sp}(u)} \dim E_\lambda(u)$$

Donc u est diagonalisable.

Trigonalisabilité

Définition et premiers critères de la trigonalisabilité.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$. On dit que u est trigonalisable s'il existe une base $e = (e_1, \dots, e_n)$ de E tel que $\mathcal{M}_e(u) \in T_n^+(\mathbb{K})$

Dans ce cas

- $u(e_1) = t_{11}e_1$, donc e_1 est un vecteur propre de u .
- Notons $F_k = \text{Vect}(e_1, \dots, e_k)$ le drapeau.

$$\forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket, u(F_k) \subset F_k$$

- $\chi_u(X) = \prod_{k=1}^n (X - t_{kk})$ scindé.

La réciproque est aussi vraie : χ_u scindé $\Rightarrow u$ trigonalisable.

Si $F \neq \{0\}$ est un sev stable par u et u trigonalisable, alors \tilde{u} (induit par u sur F) est trigonalisable (car $\chi_{\tilde{u}} \mid \chi_u$ scindé).

Si \mathbb{K} est algébriquement clos, toute matrice ou endomorphisme est trigonalisable.

Démonstration

Par récurrence sur $n = \dim E$.

Toute matrice de taille 1 est supérieure.

Supposons pour un $n \in \mathbb{N}$

$$\forall A \in M_n(\mathbb{K}),$$

$$\chi_A \text{ scindé} \Rightarrow A \text{ trigonalisable}$$

Soit $A \in M_{n+1}(\mathbb{K})$ tel que χ_A scindé.

χ_A a au moins une racine, donc A admet une valeur propre λ .

On dispose de $X_0 \in \mathbb{K}^{n+1}$ tel que

$$AX_0 = \lambda X_0$$

Ainsi on peut construire la base $e' = (X_0, \dots, X_n)$ de \mathbb{K}^{n+1} . Notons $P = P_{\text{can} \rightarrow e'}$.

$$A = P \left(\begin{array}{c|ccc} \lambda & * & \dots & * \\ \hline 0 & & & \\ \vdots & & \tilde{A} & \\ 0 & & & \end{array} \right) P^{-1}$$

Avec $\tilde{A} \in M_n(\mathbb{K})$ et $\chi_A = \chi_{\tilde{A}}(X - \lambda)$ d'où $\chi_{\tilde{A}}$ scindé.

Par hypothèse de récurrence \tilde{A} est trigonalisable et on peut donc construire $P_0 \in \text{GL}_{n+1}(\mathbb{K})$ tel que

$$A = P \begin{pmatrix} a_1 & & * \\ & \ddots & \\ & & a_{n+1} \end{pmatrix} P^{-1}$$

Caractérisation des endomorphismes nilpotents

Caractérisation des endomorphisme nilpotents.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, il y a équivalence entre

1. u nilpotent
2. u trigonalisable en une matrice strictement supérieure.
3. u trigonalisable et $\text{Sp}(u) = \{0\}$
4. $\chi_u = X^n$

Démonstration

- $(4 \Rightarrow 3)$ $\chi_u = X^n$ est scindé donc u est trigonalisable et $\text{Sp}(u) = Z(X^n) = \{0\}$.
- $(3 \Leftrightarrow 2)$ Évident.
- $(3 \Rightarrow 4)$ On dispose de e base de E tel que

$$\mathcal{M}_e(u) = \begin{pmatrix} 0 & & * \\ & \ddots & \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Donc } \chi_u = X^n$$

- $(2 \Rightarrow 1)$ On dispose de e base de E tel que $\mathcal{M}_e(u) \in T_n^{++}(\mathbb{K})$, notons $F_k = \text{Vect}(e_1, \dots, e_k)$.

$$u(F_k) \subseteq u(F_{k-1})$$

$$u^n(F_n = E) \subseteq F_0 = \{0\}$$

$$u^n = 0$$

- $(1 \Rightarrow 2)$ u est nilpotent d'indice d .

$$\{0\} \subsetneq \ker u \subsetneq \dots \subsetneq \ker u^d = E$$

Construisons une base adaptée

$$\left(\overbrace{e_1, \dots, e_{i_1}}^{\text{base de } \ker u^2}, \dots, \overbrace{e_{i_2}, \dots, e_{i_d}}^{\text{base de } \ker u} \right)$$

Pour tout $x \in \ker u^k$:

$$u(x) \in \ker u^{k-1}$$

Ainsi pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$ si $i_j + 1 \leq k \leq i_{j+1}$

$$e_k \in \ker u^j$$

$$u(e_k) \in \ker u^{j-1}$$

$$u(e_k) \in \text{Vect}(e_1, \dots, e_{i_{j-1}})$$

Premier lien entre polynôme minimal et polynôme caractéristique

Lien entre racines du polynôme minimal et celles du polynôme caractéristique.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, $P \in \mathbb{K}[X]$ annulateur de u .

$$\text{Sp}(u) \subseteq Z_{\mathbb{K}}(P)$$

$$Z(\chi_u) = \text{Sp}(u) = Z_{\mathbb{K}}(\Pi_u)$$

Démonstration

- Soit $\lambda \in \text{Sp}(u)$ et $x \in E_{\lambda}(u) \setminus \{0\}$:

$$P(X) = \sum_{k=0}^d a_k X^k$$

$$\begin{aligned} P(u)(x) &= \sum_{k=0}^d u^k(x) = \sum_{k=0}^d \lambda^k x \\ &= P(\lambda)x = 0 \end{aligned}$$

Or $x \neq 0$, donc $P(\lambda) = 0$.

- Π_u annule u d'où $\text{Sp}(u) \subseteq Z_{\mathbb{K}}(\Pi_u)$
- Soit $\lambda \in \mathbb{K}$ racine de Π_u

$$\Pi_u = (X - \lambda)Q(X)$$

$$0 = (u - \lambda \text{id}) \circ Q(u)$$

Donc $\text{im } Q(u) \subseteq \ker(u - \lambda \text{id})$.

Mais $Q(u) \neq 0$ car Π_u minimal, donc

$$\dim(\text{im } Q(u)) \geq 1$$

$$\text{im } Q(u) \subseteq \ker(u - \lambda \text{id}) = E_{\lambda}(u)$$

$$\lambda \in \text{Sp}(u)$$

Théorème des noyaux

Énoncé et démonstrations du théorème des noyaux.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ (\mathbb{K} -ev de dimension finie), $P \in \mathbb{K}[X]$.

Si $P = \prod_{k=1}^N P_k$ avec P_1, \dots, P_N deux à deux premiers entre eux, alors

$$\ker P(u) = \bigoplus_{k=1}^N \ker P_k(u)$$

Si de plus P annule u alors

$$E = \ker P(u) = \bigoplus_{k=1}^N \ker P_k(u)$$

$$\mathcal{M}_e(u) = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & \ddots & \\ & & A_N \end{pmatrix}$$

Où e est la base construite par concaténation de bases des $\ker P_k(u)$.

Démonstration

Par récurrence sur N .

Pour $P = P_1 P_2$ avec $P_1 \wedge P_2 = 1$:

$$P_1 V_1 + P_2 V_2 = 1$$

$$P_1(u) \circ V_1(u) + P_2(u) \circ V_2(u) = \text{id} \quad (*)$$

En évaluant on trouve

$$\ker P_1(u) \cap \ker P_2(u) = \{0\}$$

De plus

$$P_1(u) \circ P_2(u) = P_2(u) \circ P_1(u) = P(u)$$

$$\text{Donc } \begin{cases} \ker P_1(u) \subseteq \ker P(u) \\ \ker P_2(u) \subseteq \ker P(u) \end{cases}$$

$$\ker P_1(u) \oplus \ker P_2(u) \subseteq \ker P(u)$$

Soit $x \in \ker P(u)$, par (*) on a

$$x = \underbrace{V_1(u) \circ P_1(u)(x)}_{x_2} + \underbrace{V_2(u) \circ P_2(u)(x)}_{x_1}$$

$$\begin{aligned} P_1(u)(x_1) &= (P_1 V_2 P_2)(u)(x) \\ &= (V_1 P)(u)(x) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2(u)(x_2) &= (P_2 V_1 P_1)(u)(x) \\ &= (V_2 P)(u)(x) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$x = \underbrace{x_1}_{\in \ker P_1(u)} + \underbrace{x_2}_{\in \ker P_2(u)}$$

D'où $\ker P(u) = \ker P_1(u) \oplus \ker P_2(u)$.

Supposons maintenant le résultat pour tout P_1, \dots, P_N respectant les conditions.

Soient $P = P_1 \cdots P_{N+1} \in \mathbb{K}[X]$ avec P_1, \dots, P_{N+1} deux à deux premiers entre eux.

Donc $Q = P_1 P_2 \cdots P_N$ et P_{N+1} sont premiers entre eux.

Ainsi

$$\begin{aligned} \ker P(u) &= \ker(P_{N+1} Q)(u) \\ &= \underbrace{\ker Q(u) \oplus \ker P_{N+1}(u)}_{\text{cas } N=2} \\ &= \underbrace{\bigoplus_{k=1}^N \ker P_k(u) \oplus \ker P_{N+1}(u)}_{\text{H.R.}} \\ &= \bigoplus_{k=1}^{N+1} \ker P_k(u) \end{aligned}$$

Démonstration annexe du théorème des noyaux

Démonstration secondaire du théorème des noyaux dans le cas d'un polynôme annulateur.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$.

On suppose $P = \prod_{k=1}^N P_k$ annulateur de u , P_1, \dots, P_N premiers entre eux deux à deux. On pose

$$Q_k = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N P_i$$

Qui sont premiers dans leur ensemble.

$$\sum_{k=1}^N V_k Q_k = 1$$

$$\sum_{k=1}^N \underbrace{V_k(u) \circ Q_k(u)}_{\Pi_k} = \text{id} \quad (1)$$

On remarque que

$$P_k(u) \circ \Pi_k = (V_k P_k Q_k)(u) = (V_k P)(u) = 0$$

$$\text{Donc } \text{im } \Pi_k \subseteq \ker P_k(u)$$

Et pour $k \neq i$, $P \mid Q_i Q_k$ d'où

$$P \mid (V_k P_k)(V_i P_i)$$

$$\Pi_i \circ \Pi_k = 0$$

Donc par (1)

$$\sum_{i=1}^N \Pi_k \circ \Pi_i = \Pi_k \circ \Pi_k = \Pi_k$$

Donc les Π_k sont des projecteurs.

Soit $x \in \ker P_k(u)$, pour tout $i \neq k$, $\Pi_i(x) = 0$. Par (1)

$$x = \Pi_k(x)$$

$$x \in \text{im } \Pi_k$$

Ainsi

$$\ker P_k(u) = \text{im } \Pi_k$$

$$\ker P_i(u) \subseteq \ker \Pi_k$$

Les Π_k projettent sur $\ker P_k$.

Théorème des noyaux

Soient $(x_1, \dots, x_N) \in \prod_{k=1}^N \ker P_k(u)$ tels que $\sum_{k=1}^N x_k = 0$.

Pour tout $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$

$$\Pi_i \left(\sum_{k=1}^N x_k \right) = x_i = 0$$

Donc les $\ker P_k(u) = \text{im } \Pi_k$ sont en somme directe.

Soit $x \in \ker P(u) = E$, par (1)

$$x = \sum_{k=1}^N \Pi_k(x) \in \sum_{k=1}^N \ker P_k(u)$$

D'où

$$E = \bigoplus_{k=1}^N \ker P_k(u)$$

Et de plus

$$\text{im } \Pi_k = \ker P_k(u)$$

$$\ker \Pi_k = \bigoplus_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \ker P_i(u)$$

$$\Pi_k \in \mathbb{K}[u]$$

Critère de Diagonalisabilité

Démonstration d'une CNS de diagonalisabilité.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, il y a équivalence entre

1. u diagonalisable.
2. u annule un polynôme SARS.
3. Π_u est SARS

Démonstration

- $(2 \Leftrightarrow 3)$

$$\begin{aligned} & \exists P \in \mathbb{K}[X], P \text{ SARS et } P(u) = 0 \\ & \Leftrightarrow \exists P \in \mathbb{K}[X], P \text{ SARS et } \Pi_u \mid P \\ & \Leftrightarrow \Pi_u \text{ SARS} \end{aligned}$$

- $(3 \Rightarrow 1)$ Π_u SARS donc

$$\Pi_u = \prod_{\lambda \in \text{Sp}(u)}^N (X - \lambda)$$

Par le TDN

$$\begin{aligned} E &= \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp}(u)} \ker(u - \lambda \text{id}) \\ &= \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp}(u)} E_\lambda(u) \end{aligned}$$

Donc u diagonalisable.

- $(1 \Rightarrow 3)$ u diagonalisable

$$\mathcal{M}_e(u) = \underbrace{\begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \lambda_1 & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \lambda_n & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & \lambda_n \end{pmatrix}}_M$$

$$P(X) = \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k) \text{ SARS}$$

$$\begin{aligned} P(M) &= \begin{pmatrix} P(\lambda_1) & & & \\ & \ddots & & \\ & & P(\lambda_1) & \\ & & & \ddots & \\ & & & & P(\lambda_n) & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & P(\lambda_n) \end{pmatrix} \\ &= 0 \end{aligned}$$

Donc $\Pi_u \mid P$ SARS.

Diagonalisabilité d'un endomorphisme induit

Diagonalisabilité d'un endomorphisme induit.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, F un sev stable par u .

Notons \tilde{u} l'endomorphisme induit par u sur F .

- $\Pi_{\tilde{u}} \mid \Pi_u$
- Si u diagonalisable, alors \tilde{u} aussi.

Démonstration

- $\Pi_u(\tilde{u}) = 0$ donc $\Pi_{\tilde{u}} \mid \Pi_u$.
- Si u diagonalisable, Π_u est SARS, donc $\Pi_{\tilde{u}}$ aussi (car divise) donc \tilde{u} est diagonalisable.

Sous-espaces cycliques

Définition de sous-espace cyclique et base associé.

Pour un $u \in \mathcal{L}(E)$ et $x_0 \in E$ on appelle sous-espace cyclique engendré par x_0 (pour u)

$$F_{x_0} = \text{Vect}(u^k(x_0))_{k \in \mathbb{N}}$$

Cet espace admet comme base

$$(x_0, u(x_0), \dots, u^{d-1}(x_0))$$

Où $d = \deg \Pi_{u, x_0}$ le polynôme minimal ponctuel, l'unique polynôme unitaire minimal tel que

$$\text{Pour } \theta_{x_0} : \begin{cases} \mathbb{K}[X] & \rightarrow E \\ P & \mapsto P(u)(x_0) \end{cases}$$

$$\ker \theta_{x_0} = \Pi_{u, x_0} \mathbb{K}[X]$$

Démonstration

$\theta_{x_0} \in \mathcal{L}(E)$, donc $\ker \theta_{x_0}$ est un sev, donc un sous-groupe de $(\mathbb{K}[X], +)$.

Soit $P \in \ker \theta_{x_0}$, $Q \in \mathbb{K}[X]$

$$\begin{aligned} \theta_{x_0}(QP) &= Q(u)(P(u)(x_0)) \\ &= Q(u)(0) = 0 \end{aligned}$$

Donc $\ker \theta_{x_0}$ est un idéal de $\mathbb{K}[X]$, qui est principal d'où Π_{u, x_0} existe. Notons $d_{x_0} = \deg \Pi_{u, x_0}$.

Par existence et unicité de la division euclidienne on a

$$\mathbb{K}[X] = \mathbb{K}_{d_{x_0}-1}[X] \oplus \ker \theta_{x_0}$$

Donc $\theta_{x_0}|_{\mathbb{K}_{d_{x_0}-1}[X]}$ isomorphisme de $\mathbb{K}_{d_{x_0}-1}[X] \rightarrow \text{im } \theta_{x_0} = F_{x_0}$.

Donc F_{x_0} a pour base

$$\begin{aligned} &(\theta_{x_0}(1), \theta_{x_0}(X), \dots, \theta_{x_0}(X^{d_{x_0}-1})) \\ &= (x_0, u(x_0), \dots, u^{d-1}(x_0)) \end{aligned}$$

Endomorphismes cycliques

Définition, propriétés, démonstration autour des endomorphismes cycliques.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, on dit que u est cyclique si l'une des conditions équivalentes suivantes est vérifiée

1. $\exists x_0 \in E, \text{Vect}(u^k(x_0))_{k \in \mathbb{N}} = E.$
2. $\exists x_0 \in E, (x_0, u(x_0), \dots, u^{n-1}(x_0))$ base de $E.$

Propriétés en vrac (sans démonstration)

- Si u cyclique, tout endomorphisme induit l'est aussi.
- Si u cyclique, u admet un nombre fini de sev stables.
- Si \mathbb{K} est infini et u admet un nombre fini de sev stables, alors u est cyclique.

Démonstration équivalence

- $(2 \Rightarrow 1)$ Évident.
- $(1 \Rightarrow 2)$ $F_{x_0} = \text{Vect}(u^k(x_0))_{k \in \mathbb{N}}$ est le sous-espace engendré par x_0 pour u , donc

$$(x_0, u(x_0), \dots, u^{d-1}(x_0))$$

Où $d = \deg \Pi_{u, x_0}$ en est une base.

Or $F_{x_0} = E$ par hypothèse, donc $\dim F_{x_0} = n$ et $d = n.$

Vision matricielle de la cyclicité

Lien entre endomorphisme cyclique et matrices de compagnon.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, u est cyclique ss'il existe une base e de E et P unitaire de degré n tel que $\mathcal{M}_e(u) = C_P$.

Dans ce cas $\Pi_u = P$.

Démonstration

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ cyclique pour $x_0 \in E$. Notons $e = (x_0, u(x_0), \dots, u^{n-1}(x_0))$ la base associé.

On dispose alors de $a_0, \dots, a_{n-1} \in \mathbb{K}$ tels que

$$u^n(x_0) - \sum_{k=0}^{n-1} a_k u^k(x_0) = 0$$

$$P = X^n - \sum_{k=0}^{n-1} a_k X^k$$

$$P(u)(x_0) = 0$$

Et alors

$$\mathcal{M}_e(u) = \begin{matrix} & x_0 & & & \\ & u(x_0) & & & \\ & \vdots & & & \\ & u^{n-1}(x_0) & & & \end{matrix} \begin{pmatrix} u(x_0) & \dots & u^n(x_0) \\ 0 & & a_0 \\ 1 & & a_1 \\ & \ddots & 0 \\ & & 1 & a_{n-1} \end{pmatrix}$$

$$= C_P$$

Réciproquement :

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ et $e = (e_1, \dots, e_n)$ base de E tel que

$$\mathcal{M}_e(u) = \left(\begin{array}{ccc|c} 0 & & & a_0 \\ 1 & \ddots & & a_1 \\ & \ddots & 0 & \vdots \\ & & 1 & a_{n-1} \end{array} \right)$$

Alors pour $k \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$

$$u(e_k) = u(e_{k+1})$$

$$\text{Donc } e = (e_1, u(e_1), \dots, u^{n-1}(e_1))$$

Donc u est cyclique.

Ainsi :

$$P(u)(x_0) = u^n(x_0) - \underbrace{\sum_{k=0}^{n-1} a_k u^k(x_0)}_{u^n(x_0)} = 0$$

Donc pour tout $m \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$

$$P(u)(u^m(x_0)) = u^m(P(u)(x_0)) = 0$$

Ainsi $P(u)$ annule une base, d'où $\Pi_u \mid P$.

Or $\deg \Pi_{u, x_0} = n$ car u cyclique et $\Pi_{u, x_0} \mid \Pi_u$, donc

$$n \leq \deg \Pi_u \leq \deg P = n$$

Et comme Π_u et P sont unitaires

$$\Pi_u = P$$

Matrice compagnon

Définition de matrice compagnon.

Soit $P = X^d \sum_{k=0}^{d-1} a_k X^k \in \mathbb{K}[X]$ un polynôme unitaire. On appelle matrice compagnon de P la matrice

$$C_P = \left(\begin{array}{ccc|c} 0 & & & -a_0 \\ 1 & \ddots & & -a_1 \\ & \ddots & 0 & \vdots \\ & & 1 & -a_{d-1} \end{array} \right)$$

Ainsi (en développant selon la dernière colonne)

$$\chi_{C_P}(X) = P(X)$$

Exercice : vecteur dont le polynôme minimal ponctuel est le polynôme minimal

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, montrer qu'il existe $x \in E$ tel que $\Pi_{u,x} = \Pi_u$.

En déduire que u cyclique ssi $\deg \Pi_u = n$.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$.

On pose

$$\Pi_u = \prod_{k=1}^N P_k^{d_k}$$

Avec P_1, \dots, P_N irréductibles deux à deux distincts.

Démonstration \mathbb{K} quelconque

Par le TDN

$$E = \bigoplus_{k=1}^N \ker \underbrace{P_k^{d_k}(u)}_{F_k}$$

$$\ker P_k^{d_k-1}(u) \subseteq \ker P_k^{d_k}(u) = F_k$$

Supposons par l'absurde qu'on ait égalité pour un k .

$$E = \bigoplus_{j \neq k} \ker P_j^{d_j}(u) \oplus \ker P_k^{d_k-1}(u)$$

$$= \ker \left(\underbrace{P_k^{d_k-1} \prod_{j \neq k} P_j^{d_j}}_{\substack{\text{ne peut annuler } u \\ \text{car } \Pi_u \text{ minimal}}} \right)(u)$$

Donc $\ker P_k^{d_k-1}(u) \subsetneq \ker P_k^{d_k}(u)$.

Pour tout $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$ on dispose de

$$x_k \in F_k \setminus \ker P_k^{d_k-1}(u)$$

$$\text{Donc } \begin{cases} P_k^{d_k}(u)(x_k) = 0 \\ P_k^{d_k-1}(x_k) \neq 0 \end{cases}$$

$$\text{Donc } \begin{cases} \Pi_{u,x_k} \mid P_k^{d_k} \\ \Pi_{u,x_k} \nmid P_k^{d_k-1} \end{cases}$$

$$\text{Donc } \underbrace{\Pi_{u,x_k}}_{\text{car } P_k \text{ irréductible}} = P_k^{d_k}$$

On pose $x = \sum_{k=1}^N x_k$, alors pour tout $P \in \Pi_{u,x} \mathbb{K}[X]$

$$P(u)(x) = 0$$

$$\Leftrightarrow \sum_{k=1}^N P(u)(x_k) = 0$$

$$\Leftrightarrow \underbrace{\forall k \in \llbracket 1, N \rrbracket, P(u)(x_k) = 0}_{\text{somme directe}}$$

$$\Leftrightarrow \forall k \in \llbracket 1, N \rrbracket, P_k^{d_k} = \Pi_{u,x_k} \mid P$$

$$\Leftrightarrow \prod_{k=1}^N P_k^{d_k} = \Pi_u \mid P$$

$$\Leftrightarrow P \in \Pi_u \mathbb{K}[X]$$

Donc $\Pi_u \mid \Pi_{u,x} \mid \Pi_u$.

Démonstration \mathbb{K} infini

Pour tout $x \in E$, $\Pi_{u,x} \mid \Pi_u$ donc

$\Pi_{u,x} \in D = \{\text{Diviseurs unitaires de } \Pi_u\}$

$$|D| = \prod_{k=1}^N (d_k + 1)$$

$$D' = \{\Pi_{u,y} \mid y \in E\} \subseteq D$$

Et $x \in \ker \Pi_{u,x}(u)$ d'où

$$E = \bigcup_{x \in E} \ker \Pi_{u,x}(u)$$

$$= \bigcup_{\substack{P \in D' \\ \text{union finie de sev}}} \ker P(u)$$

Donc on dispose de $Q = \Pi_{u,y} \in D'$ tel que (cf. exercice union de sev dans un corps infini)

$$E = \ker Q(u)$$

Par minimalité de Π_u , $\Pi_{u,y} = \Pi_u$.

CNS de cyclicité

On sait que si u cyclique, alors on dispose de e base de E tel que

$$\mathcal{M}_e(u) = C_{\Pi_u}$$

Avec $\Pi_u \in \mathbb{K}[X]$ unitaire de degré n .

Supposons maintenant que $\deg \Pi_u = n$.

On dispose de $x_0 \in E$ tel que $\Pi_{u,x_0} = \Pi_u$, d'où

$$\deg \Pi_{u,x_0} = n = \dim \underbrace{\text{Vect}(u^k(x_0))}_{F_{x_0}}_{k \in \mathbb{N}}$$

D'où $F_{x_0} = E$ et u cyclique.

Théorème de Cayley-Hamilton

Énoncé et démonstration du théorème de Cayley-Hamilton.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, on a $\chi_u(u) = 0$ c'est à dire $\Pi_u \mid \chi_u$.

Démonstration

Soit $x_0 \in E \setminus \{0\}$, on veut montrer $\chi_u(u)(x_0) = 0$.

On pose $F_{x_0} = \text{Vect}(u^k(x_0))_{k \in \mathbb{N}}$ sev de E stable par u .

Soit \tilde{u} endomorphisme induit par u sur F_{x_0} , qui est donc cyclique.

Soit $d \in \mathbb{N}$ tel que

$$e_0 = (x_0, u(x_0), \dots, u^{d-1}(x_0))$$

Soit une base de F_{x_0} .

$$\mathcal{M}_{e_0}(\tilde{u}) = C_P = \left(\begin{array}{ccc|c} 0 & & & a_0 \\ 1 & \ddots & & \vdots \\ & \ddots & 0 & a_{n-2} \\ & & 1 & a_{n-1} \end{array} \right)$$

Où

$$\tilde{u}^d(x_0) = u^d(x_0) = \sum_{k=0}^{d-1} a_k u^k(x_0)$$

$$P(X) = X^d - \sum_{k=0}^{d-1} a_k X^k$$

$$P(u)(x_0) = 0$$

Or $P = \chi_{C_P} = \chi_{\tilde{u}} \mid \chi_u$ donc

$$\chi_u(u)(x_0) = Q(u)(P(u)(x_0)) = 0$$

Exercice : propriétés des endomorphismes cycliques

1. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ diagonalisable, CNS pour u cyclique.
2. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ nilpotent, CNS pour u cyclique.
3. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ cyclique, montrer que pour tout $\lambda \in \text{Sp}(u)$, $\dim E_\lambda(u) = 1$.
4. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ cyclique, montrer que $\text{Com } u = \mathbb{K}[u]$.

1. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ diagonalisable.

$$\Pi_u = \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)$$

Où les $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ sont deux à deux distincts (Π_u SARS).

u cyclique ssi $N = n = \dim E$.

- Si u cyclique, $\deg \Pi_u = n = N$.
- Si $\deg \Pi_u = n$

Soit $e = (e_1, \dots, e_n)$ base de vecteurs propres associés aux $\lambda_1, \dots, \lambda_n$.

Posons $x = \sum_{k=1}^n e_k$.

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_e(x_0, u(x_0), \dots, u^{n-1}(x_0)) \\ = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 & \dots & \lambda_1^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \lambda_n & \lambda_n^2 & \dots & \lambda_n^n \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Matrice de Vandermonde inversible, d'où

$(x_0, u(x_0), \dots, u^{n-1}(x_0))$ base.

2. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ nilpotent d'indice q .

$$\Pi_u = X^q$$

- Si u cyclique, alors $\deg \Pi_u = q = n$.
- Si $q = n$, $u^{n-1} \neq 0$, donc on dispose de $x_0 \in E$ tel que $u^{n-1}(x_0) \neq 0$.

Et $(x_0, u(x_0), \dots, u^{n-1}(x_0))$ est libre et donc une base.

(En évaluant $u^i(\sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k u^k(x_0))$).

3. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ cyclique, donc on dispose de e base de E tel que pour $\lambda \in \text{Sp}(u)$

$$\mathcal{M}_e(u - \lambda \text{id}) = \left(\begin{array}{ccc|c} -\lambda & & & a_0 \\ 1 & -\lambda & & a_2 \\ & 1 & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & -\lambda \\ & & & 1 \end{array} \middle| \begin{array}{c} a_0 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-2} \\ a_{n-1} - \lambda \end{array} \right)$$

Dont le quadrant inférieur gauche est une sous-matrice inversible de taille $n - 1$.

$$\text{rg}(u - \lambda \text{id}) \geq n - 1$$

$$1 \leq \dim E_\lambda(u) = \dim \ker(u - \lambda \text{id}) \leq 1$$

4. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ cyclique. On dispose de $x_0 \in E$ tel que

$$(x_0, u(x_0), \dots, u^{n-1}(x_0))$$

Est une base.

On a déjà $\mathbb{K}[u] \subseteq \text{Com}(u)$.

Soit $v \in \text{Com}(u)$. On dispose de $a_0, \dots, a_{n-1} \in \mathbb{K}$ tels que

$$v(x_0) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k u^k(x_0)$$

Soit $m \in \llbracket 0, n - 1 \rrbracket$

$$\begin{aligned} v(u^m(x_0)) &= u^m(v(x_0)) \\ &= u^m\left(\sum_{k=0}^{n-1} a_k u^k(x_0)\right) \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} a_k u^k(u^m(x_0)) \end{aligned}$$

Donc v et $\sum_{k=0}^{n-1} a_k u^k$ coïncident sur une base, d'où $v \in \mathbb{K}[u]$.

Critère de trigonalisabilité sur le polynôme minimal

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, CNS de trigonalisabilité sur Π_u .

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, u est trigonalisable ssi Π_u scindé.

Démonstration

- Supposons u trigonalisable, donc χ_u est scindé or $\Pi_u \mid \chi_u$ donc Π_u est scindé.
- Supposons Π_u scindé.

$$\Pi_u = \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{d_k}$$

Avec $\lambda_1, \dots, \lambda_N \in \mathbb{K}$ deux à deux distincts.

Par le TDN

$$E = \bigoplus_{k=1}^N \underbrace{\ker(u - \lambda_k \text{id})^{d_k}}_{F_k}$$

Pour k fixé, F_k est stable par u et $u - \lambda_k \text{id}$, posons u_k induit par u sur F_k .

$u_k - \lambda_k \text{id}$ est nilpotent, donc on dispose de e_k base de F_k tel que

$$\mathcal{M}_{e_k}(u_k - \lambda_k \text{id}) = \begin{pmatrix} 0 & & * \\ & \ddots & \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{M}_{e_k}(u_k) = A_k = \begin{pmatrix} \lambda_k & & * \\ & \ddots & \\ & & \lambda_k \end{pmatrix}$$

Notons e la base concaténant les bases e_1, \dots, e_N .

$$\mathcal{M}_e(u) = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & \ddots & \\ & & A_N \end{pmatrix}$$

Où les A_1, \dots, A_N sont triangulaires.

- (Autre méthode) Par récurrence sur n .

Cas $n = 1$ évident.

Supposons le résultat pour $n \in \mathbb{N}$. Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ où $\dim E = n + 1$ et Π_u scindé.

Π_u admet au moins une racine λ , on dispose donc de $x \in E$ vecteur propre associé.

On forme la base (x, e_1, \dots, e_{n-1}) de E .

$$\mathcal{M}_e(u) = A = \left(\begin{array}{c|ccc} \lambda & * & \dots & * \\ \hline 0 & & & \\ \vdots & & A_1 & \\ 0 & & & \end{array} \right)$$

Or

$$0 = \mathcal{M}_e(\Pi_u(u)) = \Pi_u(A)$$

$$= \left(\begin{array}{c|ccc} \Pi_u(\lambda) & * & \dots & * \\ \hline 0 & & & \\ \vdots & & \Pi_u(A_1) & \\ 0 & & & \end{array} \right)$$

D'où $\Pi_u(A_1) = 0$ donc $\Pi_{A_1} \mid \Pi_u$ et Π_{A_1} scindé, donc par hypothèse de récurrence A_1 est trigonalisable.

Exercice : polynôme caractéristique divisant une puissance du polynôme minimal

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, $n = \dim E$. Montrer que $\chi_u \mid \Pi_u^n$

Par récurrence forte sur n .

Cas $n = 1$ évident.

Supposons le résultat pour tout $m \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$.

Si u est cyclique, $\Pi_u = \chi_u$ d'où $\chi_u \mid \Pi_u^n$.

Sinon on prend $x_0 \in E \setminus \{0\}$, $k = \deg \Pi_{u, x_0} < n$ donc $(x_0, u(x_0), \dots, u^{k-1}(x_0))$ est libre, on la complète en une base e de E .

$$\mathcal{M}_e(u) = \left(\begin{array}{c|c} C_{\Pi_{u, x_0}} & * \\ \hline 0 & A \end{array} \right)$$

Donc

$$\chi_u = \underbrace{\chi_{C_{\Pi_{u, x_0}}}}_{\Pi_{u, x_0}} \chi_A$$

$$\chi_u \mid \Pi_u \chi_A$$

Or par hypothèse de récurrence $\chi_A \mid \Pi_A^{n-k}$ et

$$0 = \mathcal{M}_e(\Pi_u(u)) = \left(\begin{array}{c|c} \Pi_u(C_{\Pi_{u, x_0}}) & * \\ \hline 0 & \Pi_u(A) \end{array} \right)$$

$$\text{Donc } \Pi_A \mid \Pi_u$$

Ainsi

$$\chi_u \mid \Pi_u \Pi_A^{n-k} \mid \Pi_u^{n-k+1} \mid \Pi_u^n$$

Décomposition en sous espaces caractéristiques

Définition et démonstration de la décomposition en sous-espaces caractéristiques.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ tel que χ_u scindé, l'espace E se décompose en somme directe de sev stables par u :

$$E = \bigoplus_{k=1}^N F_k$$

Où pour tout $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$, u_k induit par u sur F_k vérifie

$$u_k = \lambda_k \text{id} + n_k$$

Où n_k est nilpotent et $\lambda_k \in \text{Sp}(u)$.

Dé plus $\dim F_k = m_k$ et $F_k = \ker(u - \lambda_k \text{id})^{m_k}$.

Cas diagonalisable

Si u est diagonalisable

$$\dim F_k = m_k = \dim E_{\lambda_k}(u)$$

$$E_{\lambda_k}(u) = \ker(u - \lambda_k \text{id})$$

$$\subseteq \ker(u - \lambda_k \text{id})^{m_k} = F_k$$

$$E_{\lambda_k}(u) = F_k$$

Démonstration

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ tel que χ_u scindé.

$$\chi_u = \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{m_k}$$

Où $\text{Sp}(u) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$.

Par le TDN on a

$$E = \bigoplus_{k=1}^N \underbrace{\ker(u - \lambda_k \text{id})^{m_k}}_{F_k}$$

Les F_k sont stables par u , on peut donc poser u_k induit par u sur F_k .

On note $n_k = u_k - \lambda_k \text{id} \in \mathcal{L}(F_k)$ qui est nilpotent d'ordre inférieur à m_k .

Soit e_k base de F_k tel que

$$\mathcal{M}_{e_k}(n_k) = N_k \in T_{\dim F_k}^{++}(\mathbb{K}).$$

$$\text{Ainsi } \mathcal{M}_{e_k}(u_k) = \lambda_k I_{\dim F_k} + N_k.$$

En concaténant les bases $(e_k)_k$ en une base e de E on trouve

$$\mathcal{M}_e(u) = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & \ddots & \\ & & A_N \end{pmatrix}$$

$$\forall k \in \llbracket 1, N \rrbracket, A_k = \begin{pmatrix} \lambda_k & & * \\ & \ddots & \\ & & \lambda_k \end{pmatrix}$$

D'où

$$\prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{m_k} = \chi_u = \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{\dim F_k}$$

$$m_k = \dim F_k$$

Sous-espaces caractéristiques et polynôme minimal

Lien entre la décomposition en sous-espaces caractéristiques et le polynôme minimal.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ tel que χ_u scindé, à fortiori, Π_u est scindé.

$$\begin{aligned}\Pi_u &= \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{d_k} \\ \chi_u &= \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{m_k}\end{aligned}$$

On peut décomposer par le TDN sur Π_u et en les espaces caractéristiques

$$\begin{aligned}E &= \bigoplus_{k=1}^N \overbrace{\ker(u - \lambda_k \text{id})^{m_k}}^{F_k} \\ &= \bigoplus_{k=1}^N \underbrace{\ker(u - \lambda_k \text{id})^{d_k}}_{G_k}\end{aligned}$$

Or $d_k \leq m_k$ (car $\Pi_u \mid \chi_u$), d'où

$$\begin{aligned}G_k &= \ker(u - \lambda_k \text{id})^{d_k} \\ &\subseteq \ker(u - \lambda_k \text{id})^{m_k} = F_k\end{aligned}$$

Mais $\bigoplus_{k=1}^N G_k = \bigoplus_{k=1}^N F_k$ donc $G_k = F_k$.

Soit $q_k \leq d_k$ l'indice de nilpotence de $n_k = (u - \lambda_k \text{id})|_{F_k}$.

$$\begin{aligned}F_k &\subseteq \ker(u - \lambda_k \text{id})^{q_k} \\ &\subseteq \ker(u - \lambda_k \text{id})^{d_k} = F_k\end{aligned}$$

Posons $Q = \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{q_k}$

$$\begin{aligned}E &= \bigoplus_{k=1}^N \ker(u - \lambda_k)^{d_k} \\ &= \bigoplus_{k=1}^N \ker(u - \lambda_k)^{q_k}\end{aligned}$$

Donc par le TDN $\ker Q(u) = E$, $\Pi_u \mid Q$ donc $d_k \leq q_k \leq d_k$.

Exercice : valuation X-adique du polynôme minimal.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, $\Pi_u = X^d Q$ avec $X \nmid Q$.

1. Montrer que

$$d = \min\{k \in \mathbb{N}^* \mid \ker u^k = \ker u^{k+1}\}$$

2. Montrer que

$$E = \ker u^d \oplus \operatorname{im} u^d$$

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, $\Pi_u = X^d Q$ avec $X \nmid Q$.

1. Notons

$$q = \min\{k \in \mathbb{N}^* \mid \ker u^k = \ker u^{k+1}\}$$

Soit \tilde{u} l'induit par u sur $\ker u^q$.

$$\begin{cases} \tilde{u}^q = 0 \\ \tilde{u}^{q-1} \neq 0 \end{cases} \text{ Donc } \Pi_{\tilde{u}} = X^q$$

$$X^q \mid \Pi_{\tilde{u}} \mid \Pi_u = X^d Q$$

$$q \leq d$$

Donc $\ker u^q = \ker u^d$

$$\ker u^d \circ Q(u) = E$$

$$\operatorname{im} Q(u) \subseteq \ker u^d = \ker u^q$$

$$\ker u^q \circ Q(u) = E$$

$$X^d Q \mid X^q Q$$

$$q \geq d$$

2. On a (TDN)

$$E = \ker u^d \oplus \ker Q(u)$$

Soit $y \in \operatorname{im} u^d$, on dispose donc de $x \in E$ tel que $y = u^d(x)$.

$$y = u^d(x)$$

$$Q(u)(y) = (X^d Q)(u)(x) = 0$$

$$\operatorname{im} u^d \subseteq \ker Q(u)$$

Or par le théorème du rang

$$\begin{aligned} \dim \operatorname{im} u^d &= \dim E - \dim \ker u^d \\ &= \dim \ker Q(u) \end{aligned}$$

D'où $\operatorname{im} u^d = \ker Q(u)$.

Décomposition de Dunford

Définition et démonstration de la décomposition de Dunford.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ tel que χ_u scindé.

On dispose de $d, n \in \mathcal{L}(E)$ tel que

- $u = d + n$
- d diagonalisable
- n nilpotent
- $d \circ n = n \circ d$

De plus cette décomposition est unique.

Démonstration

On reprend la décomposition en sous-espaces caractéristiques

$$\begin{aligned}\Pi_u &= \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{d_k} \\ \chi_u &= \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{m_k} \\ E &= \bigoplus_{k=1}^N \underbrace{\ker(u - \lambda_k \text{id})^{m_k}}_{F_k}\end{aligned}$$

$$\forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket, F_k = \ker(u - \lambda_k \text{id})^{d_k}$$

On note u_k l'endomorphisme induit par u sur F_k .

$$F_k = \ker(u - \lambda_k \text{id}_E)^{m_k}$$

$$\text{D'où } (u_k - \lambda_k \text{id}_{F_k})^{m_k} = 0_{\mathcal{L}(F_k)}$$

Posons

$$n_k = u_k - \lambda_k \text{id}_{F_k}$$

$$\text{Donc } u_k = \lambda_k \text{id}_{F_k} + n_k$$

Où n_k est nilpotent d'ordre d_k (cf démonstration sous-espaces caractéristiques).

On pose alors $d, n \in \mathcal{L}(E)$ tel que

$$\begin{aligned}\forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket, \\ d|_{F_k}^{F_k} &= \lambda_k \text{id}_{F_k} \\ n|_{F_k}^{F_k} &= n_k\end{aligned}$$

Donc d diagonalisable et n nilpotent d'ordre $\max_{k \in \llbracket 1, n \rrbracket} (d_k)$.

Matriciellement

$$\begin{aligned}\mathcal{M}_e(d) &= \begin{pmatrix} \lambda_1 I_{m_k} & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_N I_{m_k} \end{pmatrix} \in D_n(\mathbb{K}) \\ \mathcal{M}_e(n) &= \begin{pmatrix} N_1 & & \\ & \ddots & \\ & & N_N \end{pmatrix} \in T_n^{++}(\mathbb{K}) \\ DN &= \begin{pmatrix} \lambda_1 N_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_N N_N \end{pmatrix} = ND\end{aligned}$$

Unicité

On prend p_1, \dots, p_N les projecteurs associés à la décomposition (cf. démonstration du TDN)

$$E = \bigoplus_{k=1}^N F_k = \bigoplus_{k=1}^N \ker(u - \lambda_k \text{id})^{d_k}$$

On avait montrer que $p_1, \dots, p_N \in \mathbb{K}[u]$.

On a

$$\begin{aligned}d &= \sum_{k=1}^N \lambda_k p_k \in \mathbb{K}[u] \\ n &= u - d \in \mathbb{K}[u]\end{aligned}$$

Soient $d', n' \in \mathcal{L}(E)$ respectent les conditions.

Comme $u = d' + n'$, d' commute avec u et n' aussi, donc d' commute avec $d \in \mathbb{K}[u]$ et n' avec $n \in \mathbb{K}[u]$.

Ainsi d' et d sont codiagonalisables, d'où $d' - d$ est diagonalisable.

Et $n - n'$ est nilpotent (binôme de Newton).

Or $d' + n' = d + n$ d'où

$$\underbrace{d' - d}_{\text{diagonalisable}} = \underbrace{n - n'}_{\text{nilpotent}}$$

D'où $d' - d = 0$ et $n' - n = 0$.

Codiagonalisabilité

Définition et critère de codiagonalisabilité.

Soient $(u_i)_i \in \mathcal{L}(E)^I$ une famille d'endomorphismes.

On dit que les $(u_i)_i$ sont codiagonalisables s'il existe une base e de E tels que pour tout $i \in I$, $\mathcal{M}_e(u_i) \in D_n(\mathbb{K})$.

Démonstration : deux endomorphismes

Soient $u, v \in \mathcal{L}(E)$ diagonalisables tels que $u \circ v = v \circ u$.

$$E = \bigoplus_{k=1}^N E_{\lambda_k}(u) \quad \text{où} \quad \text{Sp}(u) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$$

Comme $u \circ v = v \circ u$, les $E_{\lambda_k}(u)$ sont stables par v .

Soit v_k l'induit de v sur $E_{\lambda_k}(u)$, qui est diagonalisable car v l'est.

Pour chaque $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$ on dispose de e_k base de vecteurs propres de v_k (donc de v et u).

En concaténant on obtient une base qui convient.

Démonstration famille quelconque

Par récurrence sur $n = \dim E$.

Cas $n = 1$ évident.

Supposons la propriété pour tout \mathbb{K} -ev de dimension inférieur à n .

Soit $(u_i)_i \in \mathcal{L}(E)^I$ diagonalisables commutant avec $\dim E = n + 1$.

Si tout les u_i sont des homothéties n'importe quelle base convient.

Sinon on dispose de $j \in I$ tel que u_j n'est pas une homothétie.

$$E = \bigoplus_{k=1}^N E_{\lambda_k}(u_j) \quad \text{où} \quad \text{Sp}(u_j) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$$

Pour tout $i \in I$, les $E_{\lambda_k}(u_j)$ sont stables par u_i car $u_i \circ u_j = u_j \circ u_i$.

Notons $u_{i,k}$ l'induit de u_i sur $E_{\lambda_k}(u_j)$ qui est de dimension inférieur à n car u_j n'est pas une homothétie.

Les $(u_{i,k})_i$ sont donc diagonalisables et commutent entre eux, on peut appliquer l'hypothèse de récurrence.

On dispose donc de e_k base de $E_{\lambda_k}(u_j)$ formée de vecteurs propres commun aux $(u_i)_i$. Il suffit alors de les concaténer.

Commutant d'un endomorphisme diagonalisable

Propriétés sur le commutant d'un endomorphisme diagonalisable.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ diagonalisable.

- Pour tout $v \in \mathcal{L}(E)$, $v \in \text{Com}(u)$ ssi les espaces propres de u sont stables par v .
- $\dim \text{Com}(u) = \sum_{\lambda \in \text{Sp}(u)} (\dim E_{\lambda}(u))^2$

Démonstration

- L'implication directe est évidente.

Supposons $v \in \mathcal{L}(E)$ qui stabilise les espaces propres de u .

Pour $\lambda \in \text{Sp}(u)$ soit $x \in E_{\lambda}(u)$, d'où $v(x) \in E_{\lambda}(u)$.

$$v(u(x)) = v(\lambda x) = \lambda v(x)$$

$$u(v(x)) = \lambda v(x)$$

Or u diagonalisable, donc on dispose d'une base de vecteurs propres de u .

Ainsi $u \circ v$ et $v \circ u$ coïncident sur une base d'où l'égalité.

- On note $\text{Sp}(u) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$.

On considère

$$\theta : \begin{cases} \text{Com}(u) & \rightarrow & \prod_{k=1}^N \mathcal{L}(E_{\lambda_k}(u)) \\ v & \mapsto & (v|_{E_{\lambda_1}(u)}, \dots, v|_{E_{\lambda_N}(u)}) \end{cases}$$

Qui est linéaire.

Soit $v \in \ker \theta$: pour tout $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$

$$v(E_{\lambda_k}(u)) = 0$$

$$\text{Or } E = \bigoplus_{k=1}^N E_{\lambda_k}(u)$$

$$\text{Donc } v = 0$$

Soit $(v_1, \dots, v_k) \in \prod_{k=1}^N \mathcal{L}(E_{\lambda_k}(u))$.

Pour $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$, on note e_k base de $E_{\lambda_k}(u)$.

On définit $v \in \mathcal{L}(E)$ qui coïncide avec v_k sur tout les vecteurs de e_k .

Ainsi $\theta(v) = (v_1, \dots, v_k)$, et θ isomorphisme.

$$\begin{aligned} \dim \text{Com}(u) &= \sum_{k=1}^N \dim \mathcal{L}(E_{\lambda_k}(u)) \\ &= \sum_{k=1}^N (\dim E_{\lambda_k}(u))^2 \end{aligned}$$

Exercice : le bicommutant

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ diagonalisable. On définit le bicommutant de u

$$B(u) = \left\{ w \in \mathcal{L}(E) \mid \forall v \in \text{Com}(u) \right. \\ \left. v \circ w = w \circ v \right\}$$

Montrer que $B(u) = \mathbb{K}[u]$.

Comme $u \in \text{Com}(u)$ on remarque

$$\mathbb{K}[u] \subseteq B(u) \subseteq \text{Com}(u)$$

On construit e concatenation de bases des $E_{\lambda_k}(u)$ pour $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$ et $\text{Sp}(u) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$.

Soit $w \in B(u) \subseteq \text{Com}(u)$ donc les $(E_{\lambda_k})_k$ sont stables par w .

$$M = \mathcal{M}_e(w) = \begin{pmatrix} M_1 & & \\ & \ddots & \\ & & M_N \end{pmatrix}$$

Pour tout $v \in \text{Com}(u)$, $w \circ v = v \circ w$.

$$A = \mathcal{M}_e(v) = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & \ddots & \\ & & A_N \end{pmatrix}$$

Or $AM = MA$ donc

$$\forall k \in \llbracket 1, N \rrbracket, A_k M_k = M_k A_k$$

Ainsi M_k est une matrice qui commute avec toutes les autres.

On montre facilement grâce à E_{ij} que $M_k = a_k I_{m_k}$.

Par interpolation de Lagrange on dispose de $P \in \mathbb{K}_{N+1}(X)$ tel que $P(\lambda_k) = a_k$. Or

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_e(u) &= \begin{pmatrix} \lambda_1 I_{m_1} & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_N I_{m_N} \end{pmatrix} \\ \mathcal{M}_e(P(u)) &= \begin{pmatrix} P(\lambda_1) I_{m_1} & & \\ & \ddots & \\ & & P(\lambda_N) I_{m_N} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a_1 I_{m_1} & & \\ & \ddots & \\ & & a_N I_{m_N} \end{pmatrix} \\ &= \mathcal{M}_e(w) \end{aligned}$$

D'où $w \in \mathbb{K}[u]$.

Projecteurs spectraux d'un endomorphisme diagonalisable

Définition et propriétés des projecteurs spectraux d'un endomorphisme diagonalisable.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ diagonalisable.

$$\chi_u = \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)^{m_k}$$

$$\Pi_u = \prod_{k=1}^N (X - \lambda_k)$$

Soient p_1, \dots, p_N les projecteurs associés à la décomposition

$$E = \bigoplus_{k=1}^N \underbrace{\ker(u - \lambda_k \text{id})}_{E_{\lambda_k}(u)}$$

On a alors pour tout $i, j \in \llbracket 1, N \rrbracket$

$$p_i|_{E_{\lambda_j}(u)} = \delta_{ij} \lambda_i \text{id}$$

Dans la base e diagonalisant u et pour tout $P \in \mathbb{K}[X]$ on a

$$\mathcal{M}_e(P(u)) = \begin{pmatrix} P(\lambda_1)I_{m_1} & & \\ & \ddots & \\ & & P(\lambda_N)I_{m_N} \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{M}_e(p_k) = \begin{pmatrix} 0 & & & \\ & \ddots & & \\ & & I_{m_k} & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 0 \end{pmatrix}$$

Donc $p_k = L_k(u) \in \mathbb{K}_{N-1}[u]$ avec L_k polynôme de Lagrange associés aux $(\lambda_i)_i$.

Ainsi pour tout $q \in \mathbb{N}$

$$u = \sum_{k=1}^N \lambda_k p_k$$

$$u^q = \sum_{k=1}^N \lambda_k^q p_k \in \mathbb{K}_{N-1}[u]$$

Sous-espaces stables d'un endomorphisme diagonalisable

Propriétés sur les sous-espaces stables d'un endomorphisme diagonalisable.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ diagonalisable,
 $\text{Sp}(u) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$.

1. Si G sev stable par u alors

$$G = \bigoplus_{k=1}^N G \cap E_{\lambda_k}(u)$$

2. Réciproquement si G_1, \dots, G_N
 sont des sevs de
 $E_{\lambda_1}(u), \dots, E_{\lambda_N}(u)$
 respectivement alors

$$G = \bigoplus_{k=1}^N G_k$$

Est un sev stable par u .

Démonstration

1. Soit \tilde{u} induit par u sur G donc diagonalisable.

$$\begin{aligned} G &= \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp}(\tilde{u})} E_{\lambda}(\tilde{u}) \\ &= \bigoplus_{k=1}^N \ker(\tilde{u} - \lambda_k \text{id}_G) \\ &= \bigoplus_{k=1}^N G \cap \underbrace{\ker(u - \lambda_k \text{id})}_{E_{\lambda_k}(u)} \end{aligned}$$

2. L'écrire.

Existence d'une droite ou d'un plan stable dans un espace vectoriel réel

Démonstration de l'existence d'une droite ou d'un plan stable dans un espace vectoriel réel.

Soit E un \mathbb{R} -ev et $u \in \mathcal{L}(E)$, u admet une droite ou un plan stable.

$$\Pi_u = \prod_{k=1}^N P_k^{m_k}$$

Avec P_1, \dots, P_N irréductibles deux à deux distincts.

- Si l'un des P_k est de degré 1.

$$P_k = X - \lambda$$

Et λ est racine de Π_u et est donc une valeur propre de u d'où l'existence d'une droite stable.

- Si l'un des P_k est de degré 2.

$$P_k = X^2 - aX - b$$

Supposons par l'absurde que $\ker P_k(u) = \{0\}$.

$$\Pi_u(u) = P_k(u) \circ Q(u) = 0$$

D'où $Q(u) = 0$ qui est absurde car Π_u est minimal.

On dispose donc de $x \in \ker P_k(u) \setminus \{0\}$.

$$u^2(x) = au(x) + bx$$

D'où $F = \text{Vect}(x, u(x))$ stable par u .

Si $u(x) = ax$, $a \in \mathbb{R}$.

$$a^2x = (aa + b)x$$

$$a \mid X^2 - aX - b$$

Absurde donc F est un plan.

Endomorphismes simples

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, il y a équivalence entre

1. Les seuls sev stables de u sont E et $\{0\}$.
2. χ_u irréductible.
3. u est dit simple.

1. $(2 \Rightarrow 1)$ Par contraposé

Soit F sev stable par u de dimension dans $[[1, n - 1]]$, et \tilde{u} l'endomorphisme induit.

$$\chi_{\tilde{u}} \mid \chi_u$$

Avec $\chi_{\tilde{u}} = \dim F \neq \deg \chi_u$ d'où χ_u non irréductible.

2. $(1 \Rightarrow 2)$ Par contraposé : Soit $x \in E \setminus \{0\}$ on note

$$F_x = \text{Vect}(u^k(x_0))_{k \in \mathbb{N}}$$

Qui est stable par u .

Si $\deg \Pi_{u,x} = \dim F_x \leq n - 1$, alors u possède un sev stable non trivial.

Sinon $\Pi_{u,x} \mid \Pi_u \mid \chi_u$ tous unitaires de degré n , donc égaux. Ainsi

$$\Pi_{u,x} = \chi_u = PQ$$

$$y = Q(u)(x)$$

$$\Pi_{u,y} = P$$

D'où F_y stable non trivial.

Endomorphismes semi-simples

Définition et propriétés des endomorphismes semi-simples.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, il y a équivalence entre

1. Tout sev stable par u admet un supplémentaire stable.
2. Π_u est sans carrés

$$\Pi_u = \prod_{k=1}^N P_k$$

Avec P_1, \dots, P_N irréductibles deux à deux distincts.

3. u est semi-simple.

Démonstration

1. $(1 \Rightarrow 2)$ On pose

$$\Pi_u = \prod_{k=1}^N P_k^{d_k}$$

Pour $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$, $F = \ker P_i(u)$ admet un supplémentaire stable G .

Soient u_F, u_G induit par u sur F et G .

$$\Pi_{u_F} = P_i$$

Car annule et irréductible.

De plus

$$P(u) = 0$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \forall x \in F, P(u)(x) = 0 \\ \forall x \in G, P(u)(x) = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \Pi_{u_F} \mid P \text{ et } \Pi_{u_G} \mid P$$

$$\Leftrightarrow \Pi_{u_F} \vee \Pi_{u_G} \mid P$$

$$\text{Donc } \Pi_u = \Pi_{u_F} \vee \Pi_{u_G}$$

Ainsi

$$\Pi_{u_G} \mid \prod_{k=1}^N P_k^{d_k}$$

$$\Pi_u = \Pi_{u_G} \vee P_i$$

Mais

$$G \cap F = \{0\}$$

$$G \cap \ker P_1(u) = \{0\}$$

$$0 \neq P_i(u_G) \in \text{GL}(E)$$

$$P_i \nmid \Pi_{u_G}$$

Ainsi comme $\Pi_u = P_i \vee \Pi_{u_G}$

$$d_i = 1$$

2. $(2 \Rightarrow 1)$ Cas Π_u irréductible.

On suppose Π_u irréductible de degré d .

Donc pour tout $x \in E \setminus \{0\}$

$$\Pi_{u,x} \mid \Pi_u \text{ d'où } \Pi_u = \Pi_{u,x}$$

$$\text{et } \dim F_x = d$$

Soit F sev stable par u , si $F = E$, $G = 0$ convient.

On dispose alors de $x_1 \in E \setminus F$.

Comme F et F_{x_1} sont stables par u , $F \cap F_{x_1}$ l'est.

Supposons par l'absurde qu'il existe $x \in F \cap F_{x_1} \setminus \{0\}$.

$$\underbrace{F_x}_{\dim d} \subseteq \underbrace{\overbrace{F_{x_1}}^{\dim d} \cap F}_{\dim \leq d}$$

$$F_{x_1} \subseteq F$$

$$x_1 \in F$$

Qui est absurde : $F \oplus F_{x_1} \subseteq E$.

Supposons construits x_1, \dots, x_k tels que

$$\underbrace{F \oplus \left(\bigoplus_{i=1}^k F_{x_i} \right)}_{F_k \text{ stable}} \subseteq E$$

Si $F_k = E$ on a fini.

Sinon on choisit $x_{k+1} \in E \setminus F_k$ et on répète.

$$F_{x_{k+1}} \cap F_k = \{0\}$$

$$F_k \oplus F_{x_{k+1}} \subseteq E$$

$$F \oplus \left(\bigoplus_{i=1}^{k+1} F_{x_i} \right) \subseteq E$$

Qui se termine en au plus $\lfloor \frac{n}{d} \rfloor$ étapes.

3. $(2 \Rightarrow 1)$ Cas général.

$$\Pi_u = \prod_{k=1}^N P_k$$

Par le TDN

$$E = \bigoplus_{k=1}^N \ker P_k(u)$$

Soit F sev stable par u , \tilde{u} induit par u sur F . Par TDN

$$F = \bigoplus_{k=1}^N \ker P_k(\tilde{u})$$

$$= \bigoplus_{k=1}^N \underbrace{(\ker P_k(\tilde{u})) \cap F}_{F_k}$$

F_k sev de $E_k = \ker P_k(u)$ stable par u_k induit par u sur E_k .

De plus $\Pi_{u_k} = P_k$ (annule et irréductible).

Donc par le premier cas on trouve G_k sev de E_k stable par u tel que

$$E_k = G_k \oplus F_k$$

Enfin

$$E = \bigoplus_{k=1}^N E_k$$

$$= \underbrace{\left(\bigoplus_{k=1}^N (F_k) \right)}_{F \text{ stable par } u} \oplus \underbrace{\left(\bigoplus_{k=1}^N G_k \right)}_{G \text{ stable par } u}$$

Exercice : critère de diagonalisabilité sur l'existence de supplémentaires stables

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ tel que χ_u scindé. Montrer que u est diagonalisable ssi tout sev stable par u admet un supplémentaire stable.

- Supposons u diagonalisable, soit F un sev stable par u .

On dispose donc de $f = (f_1, \dots, f_d)$ base de F et $e = (e_1, \dots, e_n)$ base de vecteurs propres de E .

On peut donc compléter la base f par des vecteurs de e :

$$(f_1, \dots, f_d, e_{i_1}, \dots, e_{i_{n-d}}) \text{ base de } E$$

Ainsi $G = \text{Vect}(e_{i_1}, \dots, e_{i_{n-d}})$ est un supplémentaire de F stable par u .

- Supposons que tout sev stable par u admettent un supplémentaire stable.

$$F = \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp}(u)} E_\lambda(u)$$

Est un sev stable, et admet donc G comme supplémentaire stable. Notons \tilde{u} l'induit sur G de u .

$$\Pi_{\tilde{u}} \mid \Pi_u \text{ scindé}$$

Donc \tilde{u} admet une valeur propre λ et un vecteur propre $x \in F \cap G = \{0\}$ qui est absurde. Donc $G = \{0\}$ et $F = E : u$ est diagonalisable.

Endomorphismes de produit de matrices

Propriétés sur les endomorphismes de la forme $M \mapsto AM$ et $M \mapsto MA$ de $\mathcal{L}(M_n(\mathbb{K}))$.

Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$. Posons

$$L_A : \begin{cases} M_n(\mathbb{K}) \rightarrow M_n(\mathbb{K}) \\ M \mapsto AM \text{ ou } MA \end{cases} \in \mathcal{L}(M_n(\mathbb{K}))$$

Pour tout $P \in \mathbb{K}[X]$ et $M \in M_n(\mathbb{K})$

$$P(L_A)(M) = \begin{cases} P(A)M \\ MP(A) \end{cases} = L_{P(A)}(M)$$

De plus $L_B = 0 \Rightarrow L_B(I_n) = B = 0$ d'où

$$P(L_A) = 0 \Leftrightarrow P(A) = 0$$

C'est à dire $\Pi_{L_A} = \Pi_A$

On en déduit

- L_A est nilpotent ssi A l'est et est de même ordre.
- L_A est diagonalisable ssi A l'est.
- $\text{Sp}(A) = \text{Sp}(L_A)$

De plus pour $\lambda \in \text{Sp}(A)$

$$\dim E_\lambda(L_A) = n \dim E_\lambda(A)$$

Démonstration

- Pour $L_A(M) = AM$

Soit $M = (C_1, \dots, C_n) \in M_n(\mathbb{K})$

$$\begin{aligned} M \in E_\lambda(L_A) &\Leftrightarrow AM = \lambda M \\ &\Leftrightarrow \forall j \in \llbracket 1, n \rrbracket, AC_j = \lambda C_j \\ &\Leftrightarrow \{C_1, \dots, C_n\} \subseteq E_\lambda(A) \end{aligned}$$

Ainsi $E_\lambda(L_A) \simeq E_\lambda(A)^n$.

- Pour $L_A(M) = MA$

Soit $M = \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_n \end{pmatrix} \in M_n(\mathbb{K})$

$$\begin{aligned} M \in E_\lambda(L_A) &\Leftrightarrow MA = \lambda M \\ &\Leftrightarrow \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, AL_i = \lambda L_i \\ &\Leftrightarrow \{L_1, \dots, L_n\} \subseteq E_\lambda(A) \end{aligned}$$

Ainsi $E_\lambda(L_A) \simeq E_\lambda(A)^n$.

Endomorphisme différence de produits de matrices

Propriétés sur l'endomorphisme
 $\varphi : M \mapsto AM - MB$ in $\mathcal{L}(M_n(\mathbb{K}))$

Soit $A, B \in M_n(\mathbb{K})$, tel que χ_A scindé et B admet au moins une valeur propre. (\mathbb{K} algébriquement clos suffit).

Posons

$$\varphi : \begin{cases} M_n(\mathbb{K}) & \rightarrow M_n(\mathbb{K}) \\ M & \mapsto AM - MB \end{cases} \in \mathcal{L}(M_n(\mathbb{K}))$$

Il y a équivalence entre

1. $\text{Sp}(A) \cap \text{Sp}(B) = \emptyset$.
2. $\chi_A(B) \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$.
3. φ injectif.
4. φ est un automorphisme.

De plus on a

- $\text{Sp}(\varphi) = \{\lambda - \mu, (\lambda, \mu) \in \text{Sp}(A) \times \text{Sp}(B)\}$

Démonstration

- $(3 \Leftrightarrow 4)$ Argument dimensionnel.

- $(1 \Rightarrow 2)$ Pour tout $\lambda \in \text{Sp}(A)$

$$\lambda \notin \text{Sp}(B)$$

$$\ker(B - \lambda I_n) = E_\lambda(B) = \{0\}$$

$$B - \lambda I_n \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$$

Ainsi

$$\chi_A(B) = \prod_{\lambda \in \text{Sp}(A)} (B - \lambda I_n)^{m_\lambda} \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$$

- $(2 \Rightarrow 3)$ Soit $M \in \ker \varphi$

$$AM = MB$$

$$\forall k \in \mathbb{N}, A^k M = MB^k$$

$$0 = \chi_A(A)M = \underbrace{\chi_A(B)}_{\in \text{GL}_n(\mathbb{K})} M$$

$$M = 0$$

- $(3 \Rightarrow 1)$ Par contraposé, supposons qu'on dispose de $\lambda \in \text{Sp}(A) \cap \text{Sp}(B)$.

On sait que $\chi_B = \chi_{B^T}$ donc toute valeur propre de B est valeur propre de B^T .

Soit X, Y vecteurs propres non nuls de A et B^T .

$$\begin{aligned} \varphi(XY^T) &= AXY^T - XY^TB \\ &= AXY^T - X(B^TY)^T \\ &= \lambda XY^T - \lambda XY^T \\ &= 0 \end{aligned}$$

Or $XY^T \neq 0$ d'où φ non injective.

- Soit $\lambda \in \text{Sp}(A), \mu \in \text{Sp}(B)$. X, Y vecteurs propres non nuls de A et B^T .

$$\begin{aligned} \varphi(XY^T) &= AXY^T - XY^TB \\ &= \lambda XY^T - \mu XY^T \\ &= (\lambda - \mu)XY^T \end{aligned}$$

D'où $\lambda - \mu \in \text{Sp}(\varphi)$

- Soit $\alpha \in \text{Sp}(\varphi)$, M vecteur propre non nul associé.

$$\begin{aligned} \varphi(M) &= AM - MB = \alpha M \\ \underbrace{(A - \alpha I_n)}_{\tilde{A}} M - MB &= 0 \end{aligned}$$

Avec $\chi_{\tilde{A}}$ scindé (pour toute valeur propre λ de A , $\lambda - \alpha$ est valeur propre de \tilde{A})

Posons $\varphi' : N \mapsto \tilde{A}N - NB$

$$\varphi'(M) = 0$$

Donc φ' non injectif d'où

$$\{\mu\} \subseteq \text{Sp}(\tilde{A}) \cap \text{Sp}(B) \neq \emptyset$$

Ainsi $\alpha + \mu \in \text{Sp}(A)$.

Endomorphisme commutateur de matrices

Propriétés sur les endomorphismes de la forme $M \mapsto AM - MA \in \mathcal{L}(M_n(\mathbb{K}))$.

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ tel que χ_A scindé.

$$\varphi_A : \begin{cases} M_n(\mathbb{K}) & \rightarrow M_n(\mathbb{K}) \\ M & \mapsto AM - MA \end{cases} \in \mathcal{L}(M_n(\mathbb{K}))$$

On a les propriétés de $M \mapsto AM - MB$, et de plus

- Si A est nilpotent alors φ_A l'est.
- Si A est diagonalisable alors φ_A aussi.

Démonstration

- Supposons A nilpotent d'ordre q . Posons

$$\begin{aligned} & M_n(\mathbb{K}) \rightarrow M_n(\mathbb{K}) \\ L_A : M & \mapsto AM \\ R_A : M & \mapsto MA \end{aligned}$$

On sait que L_A et R_A sont nilpotents d'ordre q car A l'est.

De plus $L_A \circ R_A = AMA = R_A \circ L_A$ d'où

$$\varphi_A = L_A - R_A$$

$$\varphi_A^{2q} = \sum_{k=0}^{2q} \binom{2q}{k} (-1)^k R_A^k \circ L_A^{2q-k} = 0$$

- Supposons A diagonalisable.

On sait que L_A et R_A commutent et sont diagonalisables, donc ils sont codiagonalisables :

$$\varphi_A = L_A - R_A$$

Est diagonalisable.

Endomorphismes nilpotents cycliques

Caractérisation des sev stables par un endomorphisme nilpotent cyclique.

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$ nilpotent cyclique.

Les seuls sev de E stables par u sont les $(\ker u^k)_{k \in \llbracket 0, n \rrbracket}$.

Démonstration

Ils sont stables comme \ker d'un endomorphisme commutant avec u .

Soit F sev stable par u . Soit \tilde{u} induit par u sur F qui est nilpotent car $\tilde{u}^n = 0$.

Or l'ordre de nilpotence de \tilde{u} est majoré par $d = \dim F$: $\tilde{u}^d = 0$.

Donc $F \subseteq \ker u^d$.

De plus par les noyaux itérées

$$\underbrace{\ker u}_{\dim 1} \subsetneq \cdots \subsetneq \underbrace{\ker u^d}_{\dim d} \subsetneq \cdots \subsetneq \underbrace{\ker u^n}_{\dim n}$$

D'où $F = \ker u^d$.

Produit de Kronecker et diagonalisabilité

Diagonalisabilité du produit de Kronecker de matrices
(dimension $2n$).

Soit $L = \begin{pmatrix} a & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \in M_2(\mathbb{K})$ et $A \in M_n(\mathbb{K})$.
On pose le produit de Kronecker

$$M = L \otimes A = \begin{pmatrix} aA & \beta A \\ \gamma A & \delta A \end{pmatrix} \in M_{2n}(\mathbb{K})$$

Alors

- Si L est diagonalisable, M est diagonalisable ssi A l'est.
- Si $L = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, M est diagonalisable ssi $A = 0$.

Démonstration

- On suppose L diagonalisable :

$$L = P \begin{pmatrix} \lambda & \\ & \mu \end{pmatrix} P^{-1} \quad P = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in GL_2(\mathbb{K}) \\ P^{-1} = \begin{pmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{pmatrix}$$

On remarque

$$Q = P \otimes I_n = \begin{pmatrix} aI_n & bI_n \\ cI_n & dI_n \end{pmatrix}$$

$$Q' = P \otimes I_n = \begin{pmatrix} a'I_n & b'I_n \\ c'I_n & d'I_n \end{pmatrix}$$

$$QQ' = \begin{pmatrix} I_n & \\ & I_n \end{pmatrix} = I_{2n}$$

$$Q'MQ = \begin{pmatrix} a'I_n & b'I_n \\ c'I_n & d'I_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} aA & \beta A \\ \gamma A & \delta A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} aI_n & bI_n \\ cI_n & dI_n \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \lambda A & \\ & \mu A \end{pmatrix}$$

Donc M est diagonalisable ssi A l'est.

- Pour $L = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$.

$$M^k = \begin{pmatrix} A^k & kA^k \\ 0 & A^k \end{pmatrix} \quad (\text{récurrence})$$

Donc pour tout $P \in \mathbb{K}[X]$

$$P(M) = \begin{pmatrix} P(A) & AP'(A) \\ 0 & P(A) \end{pmatrix}$$

Si M est diagonalisable, Π_M est SARS.

$$\Pi_M(M) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} \Pi_M(A) = 0 \\ A\Pi_M(A) = 0 \end{cases}$$

Comme $\Pi_M(A) = 0$, A est diagonalisable.

Or Π_M est SARS : $\Pi_M \wedge \Pi_{M'} = 1$
donc $P' \wedge \Pi_A = 1$ car $\Pi_A \mid \Pi_M$.

Donc $\Pi_{M'}(A) \in GL_n(\mathbb{K})$ et
 $A\Pi_{M'}(A) = 0$ d'où $A = 0$.

Cotrigonalisation

Critère de Cotrigonalisabilité d'une famille d'endomorphismes.

Soit $(u_i)_i \in \mathcal{L}(E)^I$ une famille d'endomorphismes trigonalisables qui commutent.

Il existe une base e de E tel que pour tout $i \in I$, $\mathcal{M}_e(u_i)$ soit triangulaire supérieure.

Démonstration : structure

On voudra toujours

1. Trouver un vecteur propre commun
2. Faire une récurrence sur la dimension.

Faisons d'abord la 2^e étape dans le cas général :

Supposons que toute famille $(u_i)_i \in \mathcal{L}(E)^I$ d'endomorphismes trigonalisables qui commutent admette un vecteur propre commun.

Cas $n = 1$ évident.

Supposons la propriété sur tout \mathbb{K} -ev de dimension strictement inférieur à n .

Soit e_1 vecteur propre commun aux éléments de $(u_i)_i$ associé aux valeurs propres $(\lambda_i)_i \in \mathbb{K}^I$.

On complète e_1 en la base (e_1, \dots, e_n) . Pour tout $i \in I$

$$\mathcal{M}_e(u_i) = \left(\begin{array}{c|c} \lambda_i & * \\ \hline 0 & A_i \end{array} \right) \quad \chi_{u_i} = \chi_{A_i}(X - \lambda)$$

Or χ_{u_i} scindé donc χ_A scindé : χ_A est trigonalisable.

De plus les $(A_i)_i$ commutent car mes $(u_i)_i$ aussi.

Par hypothèse de récurrence on conclut.

Démonstration : deux endomorphismes

Soit $u, v \in \mathcal{L}(E)$ trigonalisables qui commutent.

Soit $\lambda \in \text{Sp}(u)$, $E_\lambda(u) \neq \{0\}$ est stable par v .

Notons \tilde{v} induit par v sur $E_\lambda(u)$, qui est encore trigonalisable, et admet donc un vecteur propre e_1 .

Puis récurrence.

Démonstration : famille finie

Par récurrence sur d cardinal de la famille.

Cas 1 et 2 endomorphismes traités.

On suppose que toute famille de cardinal inférieur à d admet un vecteur propre commun.

Soit $u_1, \dots, u_{d+1} \in \mathcal{L}(E)$ trigonalisables qui comutent.

Soit x vecteur propre commun aux u_1, \dots, u_d associé aux valeurs propres $\lambda_1, \dots, \lambda_d \in \mathbb{K}$.

$$\{x\} \in F = \bigcap_{k=1}^d \underbrace{E_{\lambda_k}(u_k)}_{\text{stable par } v} \neq \emptyset$$

Donc F est stable par v , on peut donc y induire \tilde{v} qui est trigonalisable et admet donc e_1 vecteur propre commun aux

u_1, \dots, u_{d+1} .

Démonstration : famille infinie

Soit $(u_i)_i \in \mathcal{L}(E)^I$ une famille quelconque d'endomorphismes trigonalisables qui commutent.

$\text{Vect}(u_i)_{i \in I}$ est un sev de $\mathcal{L}(E)$ et admet donc une base u_{i_1}, \dots, u_{i_d} .

C'est une famille finie, donc cotrigonalisable dans une base e .

Et pour tout $i \in I$, $u_i \in \text{Vect}(u_{i_1}, \dots, u_{i_d})$ donc $\mathcal{M}_e(u_i)$ est triangulaire supérieur (comme combinaison linéaire de matrices qui le sont).