

Chapitre 6 : Théorie spectrale

I Valeurs propres, vecteurs propres, sous-espaces propres

On se donne E un K -espace vectoriel et $u \in \text{End}(E)$ un endomorphisme de E .

Définition : Soit $\lambda \in K$. On dit que λ est une **valeur propre (vp)** de u s'il existe un vecteur $x \in E \setminus \{0_E\}$ tel que $u(x) = \lambda x$. Un tel vecteur x est appelé un **vecteur propre (\vec{vp})** associé à la valeur propre λ de u .

Définition : On note E_λ le **sous-espace propre** de u associé à la valeur propre λ :

$$E_\lambda = \{x \in E \mid u(x) = \lambda x\} = \text{Ker}(u - \lambda \text{Id}_E)$$

Propriété : (admise)

On a λ est une valeur propre de u si et seulement si $E_\lambda \neq \{0_E\}$.

Ce qui est vrai si et seulement si $u - \lambda \text{Id}_E$ n'est pas inversible (autrement dit, $\det(u - \lambda \text{Id}_E) = 0$).

Vocabulaire : On dit que u est **diagonalisable** s'il existe une base de E formée de \vec{vp} de u . (vecteurs propres)

Proposition :

u est diagonalisable si et seulement si $\text{Mat}_B(u)$ est diagonale pour une certaine base B de E . (E de dimension finie)

Preuve :

Soient (x_1, \dots, x_n) une base de E formée de \vec{vp} de u avec $u(x_i) = \lambda_i x_i$. On a donc :

$$\text{Mat}_B(u) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}$$

□

Vocabulaire : On dit que u est **trigonalisable** s'il existe une base de E dans laquelle la matrice de u est triangulaire supérieure. (vecteurs propres)

Remarque : Alors x est un \vec{vp} de u . Un endomorphisme sans \vec{vp} n'est pas diagonalisable.

Exemple : Si $E = K^2$ et $\text{Mat}_B(u) = \begin{pmatrix} 5 & -1 \\ 4 & 1 \end{pmatrix}$ (B = canonique), alors u est trigonalisable pour la base $B' = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$. En effet, on a : $u\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \end{pmatrix} = 3 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$

Exemple : Si $\text{Mat}_B(u) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$, alors u est diagonalisable.

Exemple : Si $\text{Mat}_B(u) = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, n'est pas diagonalisable si $K = \mathbb{R}$ (pas de \vec{vp}), mais est diagonalisable si $K = \mathbb{C}$ (car $\lambda = i$ et $\lambda = -i$ sont des vp).

II Projections, symétries et rotations

Posons $E = F \oplus G$ avec F, G sous-espaces vectoriels de E .

Proposition : (admis)

Soit $p \in \mathcal{L}(E)$ la projection sur F parallèlement à G (i.e. $p(x+y) = x$ pour tout $(x, y) \in F \times G$). Alors les valeurs propres de p sont contenues dans $\{0, 1\}$. De plus, $F = E_1$ et $G = E_0$ et p est diagonalisable.

💬 **Note de rédaction :** cf. Laurent pour la démonstration

Proposition : (admis)

Soit $s \in \mathcal{L}(E)$ la symétrie par rapport à F parallèlement à G (i.e. $s(x+y) = x - y$ pour tout $(x, y) \in F \times G$). Alors les valeurs propres de s sont contenues dans $\{-1, 1\}$. De plus, $F = E_1$ et $G = E_{-1}$ et s est diagonalisable.

Supposons $E = \mathbb{K}^2$, $K = \mathbb{R}$.

Considérons u tel que $Mat_B(u) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ dans la base canonique B de \mathbb{R}^2 avec $\theta \in \mathbb{R} \setminus \pi\mathbb{Z}$.

Proposition : (admis)

u n'est pas diagonalisable si $K = \mathbb{R}$ (pas de \overrightarrow{vp}), mais est diagonalisable si $K = \mathbb{C}$ (car $\lambda = \cos \theta + i \sin \theta$ et $\lambda = \cos \theta - i \sin \theta$ sont des vp).

III Rappels sur les polynômes

💬 **Note de rédaction :** cf. AL2

Définition : Un polynôme P est irréductible sur K si $P = QR$ entraîne que Q ou R est de degré 0 (c'est-à-dire une constante). Cela dépend du corps K .

Définition : P est scindé sur K si P est produit de polynômes de degré 1 sur K .

💡 **Exemple :** Sur \mathbb{R} , $X^2 + 1$ est irréductible. Sur \mathbb{C} , $X^2 + 1 = (X - i)(X + i)$ est scindé.

💬 **Vocabulaire :** P est scindé à racines simples si P est scindé et si toutes ses racines sont de multiplicité 1, i.e. $P = c(X - \alpha_1)(X - \alpha_2) \dots (X - \alpha_n)$ avec α_i distincts.

Théorème d'Alembert-Gauss : (admis)

1. Si $K = \mathbb{C}$, tout polynôme de degré ≥ 1 est scindé. (i.e. \mathbb{C} est un corps algébriquement clos)
2. Si $K = \mathbb{R}$, tout polynôme de degré ≥ 1 est produit de polynômes irréductibles de degré 1 ou 2.

IV Polynôme caractéristique d'un endomorphisme

Soit E un K -espace vectoriel de dimension finie n et $u \in \text{End}(E)$.

💡 **Rappel :** Soit $\lambda \in K$. C'est une valeur propre de u si et seulement si $\det(u - \lambda Id_E) = 0$.

💡 **Exemple :** $Mat_B(u) = \begin{pmatrix} 5 & 1 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$. $E = \mathbb{R}^2$, $K = \mathbb{R}$ et B la base canonique.

On a :

$$\det(u - \lambda Id_E) = \det \begin{pmatrix} 5 - \lambda & 1 \\ 2 & 4 - \lambda \end{pmatrix} = \lambda^2 - 9\lambda + 18 = (\lambda - 6)(\lambda - 3)$$

Donc les valeurs propres de u sont 3 et 6.

Théorème : (admis)

Posons $P_u(\lambda) = \det(\lambda Id_E - u)$. C'est un polynôme de $K[\lambda]$ de degré n appelé **polynôme caractéristique** de u .

Plus précisément, on a $P_u(\lambda) = (-1)^n \lambda^n + (-1)^{n-1} \text{tr}(u) \lambda^{n-1} + \dots + \det(u)$.

💡 **Exemple :** Pour $n = 2$, on a $P_u(\lambda) = \lambda^2 - \text{tr}(u)\lambda + \det(u)$.

Corollaire : (admis)

L'endomorphisme u admet au plus n valeurs propres (distinctes).

V Polynôme caractéristique d'une matrice

Soit $A \in M_n(K)$ une matrice carrée, soit $\lambda \in K$. On dit que λ est une valeur propre de A s'il existe un vecteur $X \in K^n \setminus \{0\}$ tel que $AX = \lambda X$. On pose $E_\lambda(A) = \text{Ker}(A - \lambda I_n)$ le sous-espace propre de A associé à la valeur propre λ . Et on pose $P_A(\lambda) = \det(\lambda I_n - A)$ le polynôme caractéristique de A .

Proposition : (admis)

Soit $A, B \in M_n(K)$ tel que A et B sont semblables (i.e. il existe $P \in GL_n(K)$ tel que $B = P^{-1}AP$). Alors A et B ont même polynôme caractéristique ($P_A = P_B$) et donc les mêmes valeurs propres.

Proposition : (admis)

Supposons A triangulable (i.e. semblable à une matrice triangulaire). Alors P_A est scindé sur K .

💡 **Remarque :** La réciproque est vraie (vu plus tard), P_A scindé $\implies A$ trigonalisable.

✗ **Attention** ✗ Retenir que P_A non scindé $\implies A$ non trigonalisable.

💡 **Exemple :** Si $K = \mathbb{R}$ et $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. On a $P_A(\lambda) = \lambda^2$. Mais A n'est pas diagonalisable.

VI Étude des sous-espaces propres (sep)

Soit E un K -espace vectoriel de dimension finie n et $u \in \text{End}(E)$. Soit F un sev de E .

Définition : On dit que F est **stable** par u si $u(F) \subset F$. Alors $u|_F \in \text{End}(F)$ est la restriction de u à F .

Proposition : (admis)

Le polynôme caractéristique de $u|_F$ divise celui de u . Autrement dit : $P_{u|_F}(\lambda) | P_u(\lambda)$.
Autrement dit : $\exists Q \in K[\lambda], P_u(\lambda) = P_{u|_F}(\lambda)Q(\lambda)$.

La preuve utilise le déterminant par blocs.

Proposition : (admis)

Soit $k \leq n$ et soient $A \in M_k(K)$ et $B \in M_{k,n-k}(K)$ et $D \in M_{n-k}(K)$.

On a : $\det \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & D \end{pmatrix} = \det(A)\det(D)$.

Proposition : (admis)

Soit $\lambda \in K$. Alors E_λ est stable par u .

En effet, si $u(x) = \lambda x$, alors $u(u(x)) = u(\lambda x) = \lambda u(x)$, donc $u(x) \in E_\lambda$.

Corollaire : (admis)

Soit $\lambda \in K$, et soit $X \in E_\lambda \setminus \{0_E\}$.

On a que $u|_{E_\lambda}$ est une homothétie de rapport λ .

Donc $P_{u|_{E_\lambda}}(\lambda) = (\lambda - X)^{\dim(E_\lambda)}$

. En particulier, $P_{u|_{E_\lambda}}$ divise P_u .

💬 **Vocabulaire :** On appelle la **multiplicité** de la valeur propre λ pour u le plus grand entier m tel que $(\lambda - X)^m$ divise $P_u(X)$. On la note $m_a(\lambda)$.

💬 **Vocabulaire :** On appelle la **multiplicité géométrique** de la valeur propre λ pour u l'entier $\dim(E_\lambda)$. On la note $m_g(\lambda)$.

Proposition : (admis)

On a $1 \leq m_g(\lambda) \leq m_a(\lambda)$ si λ est une valeur propre de u .

💡 **Exemple :** Soit $A = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$. On a $P_A(\lambda) = (3 - \lambda)^3$. Donc $m_a(3) = 3$.

On a $E_3 = \text{Ker}(A - 3I_3) = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} \mid (x, y) \in K^2 \right\}$. Donc $\dim(E_3) = 2$. Donc $m_g(3) = 2$.

Proposition : Somme directe des sep (admis)

Soit $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ des valeurs propres distinctes de u .

Alors $E_{\lambda_1} + E_{\lambda_2} + \dots + E_{\lambda_k}$ est une somme directe.

i.e. $\sum_{i=1}^k E_{\lambda_i} = \bigoplus_{i=1}^k E_{\lambda_i}$.

Autrement dit, les sous-espaces propres associés à des valeurs propres distinctes sont en somme directe.

Corollaire : (admis)

Toute famille de vecteurs propres associés à des valeurs propres distinctes est libre.

Corollaire : (admis)

Si u admet n valeurs propres distinctes (avec $n = \dim(E)$), alors u est diagonalisable.

💡 **Exemple :** Soit $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 4 & 6 \\ 3 & 6 & 9 \end{pmatrix}$. On a $P_A(\lambda) = -\lambda(\lambda^2 - 15\lambda - 18)$ qui est scindé sur \mathbb{R} à racines simples. Les valeurs propres sont $0, \frac{15+\sqrt{297}}{2}, \frac{15-\sqrt{297}}{2}$, donc distinctes. Donc A est diagonalisable.

VII Diagonalisabilité

Soit E un K -espace vectoriel de dimension finie n et $u \in \text{End}(E)$. Soit F un sev de E .

Théorème : (admis)

u est diagonalisable si et seulement si $E = \bigoplus_{\lambda \text{ vp de } u} E_\lambda$.

Autrement dit, u est diagonalisable si et seulement si la somme des dimensions des sous-espaces propres de u est égale à $\dim(E)$.

Théorème : (admis)

u est diagonalisable si et seulement si le polynôme caractéristique de u est scindé et on a $m_a(\lambda) = m_g(\lambda)$ pour toute valeur propre λ de u .

Proposition : (admis)

Supposons u diagonalisable. Soit F un sev de E stable par u . Alors la restriction $u|_F \in \mathcal{L}(F)$ est diagonalisable.

Lemme : (admis)

On a $F = \bigoplus_{\lambda \text{ vp de } u} (F \cap E_\lambda)$.

Théorème : (admis)

Soit $v \in \text{End}(E)$ tel que $u \circ v = v \circ u$ (i.e. u et v commutent).
Supposons que u et v sont diagonalisables.
Alors il existe une base B de E telle que les matrices de u et v dans cette base sont diagonales.

💬 **Vocabulaire :** On dit que u et v sont **simultanément diagonalisables**.

Corollaire : (admis)

Soit $v \in \text{End}(E)$ tel que $u \circ v = v \circ u$ (i.e. u et v commutent).
Alors toute combinaison linéaire de u et v est diagonalisable.
De plus, $u \circ v$ et $v \circ u$ sont diagonalisables.

VIII Trigonalisation

Théorème : (admis)

u est trigonalisable si et seulement si le polynôme caractéristique de u est scindé.

Corollaire : (admis)

Si $K = \mathbb{C}$, tout endomorphisme de E est trigonalisable.

Exemple : Soit $\theta \in \mathbb{R} \setminus \pi\mathbb{Z}$ et u tel que $\text{Mat}_B(u) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ dans la base canonique B de \mathbb{R}^2 .

On a $P_u(\lambda) = \lambda^2 - 2 \cos \theta \lambda + 1$. Ce polynôme n'est pas scindé sur \mathbb{R} car ses racines sont $\cos \theta \pm i \sin \theta$. Donc u n'est pas trigonalisable sur \mathbb{R} . Cependant, P_u est scindé sur \mathbb{C} , donc u est trigonalisable sur \mathbb{C} .

IX Polynômes d'endomorphismes (et de matrices)

Soit K un corps. Soit E un K -espace vectoriel. Soit $P \in \mathbb{K}[X]$, $P = P(X) = \sum_{k=0}^d a_k X^k$ (où d est le degré de P). Soit $u \in \text{End}(E)$ un endomorphisme de E , et $u \circ u = u^2$. En particulier, on a $u \circ u \circ \dots \circ u = u^k$ (k fois), $u^0 = \text{Id}_E$ et $u^1 = u$.

Définition : On pose $P(u) = \sum_{k=0}^d a_k u^k \in \text{End}(E)$. C'est un polynôme en u .

L'application $\varphi_u : \begin{matrix} K[X] \rightarrow \text{End}(E) \\ P \mapsto P(u) \end{matrix}$ est linéaire.

On note $\mathbb{K}[u] = \text{Im}(\varphi_u) = \{P(u) \mid P \in K[X]\}$. C'est un sous-espace vectoriel de $\text{End}(E)$.

Définition : Soit $A \in M_n(K)$. On définit de même $P(A) = a_0 I_n + a_1 A + \dots + a_d A^d = \sum_{k=0}^d a_k A^k \in M_n(K)$.

L'application $\psi_A : \begin{matrix} K[X] \rightarrow M_n(K) \\ P \mapsto P(A) \end{matrix}$ est linéaire.

Si $A = \text{Mat}_B(u)$, alors $P(A) = \text{Mat}_B(P(u))$.

On note $\mathbb{K}[A] = \text{Im}(\psi_A) = \{P(A) \mid P \in K[X]\}$. C'est un sous-espace vectoriel de $M_n(K)$.

Proposition : Stabilité du noyau (admis)

Le sous-espace vectoriel $\text{Ker}(P(u))$ est stable par u .

Remarque : Si $u, v \in \text{End}(E)$, on a $\text{Ker}(v)$ est stable par u . Or $P(u)$ et u commutent.

Remarque : Plus généralement, pour $P, Q \in K[X]$, on a $P(u)$ et $Q(u)$ commutent.

Preuve :

Si $Q = b_0 + b_1 X + \dots + b_e X^e$, alors $P(u) \circ Q(u) = Q(u) \circ P(u)$ car :

$$\begin{aligned} P(u) \circ Q(u) &= \left(\sum_{k=0}^d a_k u^k \right) \circ \left(\sum_{l=0}^e b_l u^l \right) \\ &= \sum_{k=0}^d \sum_{l=0}^e a_k b_l u^{k+l} \\ &= \sum_{l=0}^e \sum_{k=0}^d b_l a_k u^{l+k} \\ &= Q(u) \circ P(u) \end{aligned}$$

□

Proposition : (admis)

Si $\lambda \in \text{Sp}(u)$, alors $P(\lambda) \in \text{Sp}(P(u))$.

Remarque : Il peut exister $\lambda \in K$ tq $P(\lambda) \in \text{Sp}(P(u))$ mais $\lambda \notin \text{Sp}(u)$.

Contre-Exemple : $u = \text{id}_E$, $P(X) = X^2 - 1$, $\lambda = -1$. On a $\text{Sp}(u) = \{1\}$, mais $P(-1) = 0 \in \text{Sp}(P(u))$. Mais $-1 \notin \text{Sp}(u)$.

💬 **Vocabulaire :** On dit que P est un polynôme annulateur de u si $P(u) = 0_{\text{End}(E)}$.

Proposition : Sous-groupe des polynômes annulateurs (admis)

Considérons $\text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u) = \{P \in K[X] \mid P(u) = 0\}$ l'ensemble des polynômes annulateurs de u . C'est un sous-groupe de $(K[X], +)$.

De plus, pour $Q \in K[X]$ et $P \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$, on a $QP \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$.

💬 **Vocabulaire :** On dit que $\text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$ est un idéal de l'anneau $K[X]$. (HP)

Preuve du sous groupe :

Soient $P, Q \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$. On a :

- $P + Q \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$ car $(P + Q)(u) = P(u) + Q(u) = 0 + 0 = 0$.
- $-P \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$ car $(-P)(u) = -P(u) = -0 = 0$.
- $0 \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$ car $0(u) = 0$.

□

Preuve de la stabilité par multiplication :

Soit $P \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$ et $Q \in K[X]$. On a :

$$(QP)(u) = Q(u) \circ P(u) = Q(u) \circ 0 = 0$$

□

Proposition : Unicité du polynôme (admis)

Il existe un unique $P_0 \in \mathbb{K}[X]$ unitaire (i.e. de coefficient dominant $a_d = 1$) tel que $P \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u) \Leftrightarrow \exists Q : P = QP_0$.

En particulier, $P_0 \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$ et P_0 divise tout polynôme annulateur de u .

Alors P_0 est appelé le **polynôme minimal** de u . C'est le polynôme annulateur de u unitaire de plus petit degré.

💬 **Note de rédaction :** Cette proposition gagnerait à être synthétisée et/ou divisée et améliorée en clarté.

Proposition : (admis)

Si λ est une valeur propre de u et $P \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$, alors $P(\lambda) = 0$.

Autrement dit, toute valeur propre de u est racine de son polynôme minimal.

💡 **Exemple :** Soit u une homothétie de rapport $\lambda \in K$.

On a $P(u) = 0 \Leftrightarrow a_0 I_E + a_1 u + \dots + a_d u^d = 0 \Leftrightarrow P(\lambda) \text{id}_E = 0 \Leftrightarrow P(\lambda) = 0 \Leftrightarrow (X - \lambda) \mid P$.

Donc le polynôme minimal de u est $P_0(X) = X - \lambda$.

💡 **Exemple :** $E = \mathbb{R}^3$ $\text{Mat}_{B,C}(u) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ dans les bases B, C canoniques.

$(X - 1)^2$ annule u car $\text{Mat}_{B,C}(u - \text{id}_E) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ et donc $(u - \text{id}_E)^2 = 0$.

Donc le polynôme minimal de u divise $(X - 1)^2$ ou $(X - 1)$.

Or $u \neq \text{id}_E$, donc le polynôme minimal de u est $P_0(X) = (X - 1)^2$.

Pour $A \in M_n(K)$, on définit de même le polynôme minimal de A .

Définition : Soient $P_1, P_2 \in K[X]$. On dit que P_1 et P_2 sont **premiers entre eux** s'il existe $Q_1, Q_2 \in K[X]$ tels que $Q_1 P_1 + Q_2 P_2 = 1$.

De même, pour m polynômes, on a : P_1, P_2, \dots, P_m sont premiers entre eux s'il existe $Q_1, Q_2, \dots, Q_m \in K[X]$ tels que $\sum_{i=1}^m Q_i P_i = 1$.

Cela entraîne qu'ils n'ont pas de facteur commun non constant (i.e. de degré ≥ 1).

Définition : Soit $P_1, \dots, P_m \in K[X]$. On dit que P_1, \dots, P_m sont **premiers entre eux deux à deux** si pour tout $i \neq j$, P_i et P_j sont premiers entre eux.

Théorème : Lemme des noyaux (*admis*)

Soit $u \in \text{End}(E)$ et soient $P_1, P_2, \dots, P_m \in K[X]$ des polynômes deux à deux premiers entre eux et tous non nuls.

Posons $P = \prod_{i=1}^m P_i$. Alors on a :

$$\text{Ker}(P(u)) = \bigoplus_{i=1}^m \text{Ker}(P_i(u))$$

En particulier, si $P \in \text{Ann}_{\mathbb{K}[X]}(u)$ on a $E = \bigoplus_{i=1}^m \text{Ker}(P_i(u))$. Si π_i est la projection de E sur $\text{Ker}(P_i(u))$ parallèlement aux autres $\text{Ker}(P_j(u))$ ($j \neq i$), alors $\pi_i \in \mathbb{K}[u]$ et $\sum_{i=1}^m \pi_i = \text{Id}_E$.