Réduction

TABLE DES MATIÈRES

Dans tout le chapitre, $(E,+,\cdot)$ désigne un $\mathbb{K}$-espace vectoriel où $\mathbb{K}$ est un sous-corps de $\mathbb{C}$.

I Sous-espaces stables

1 Point de vue géométrique

Définition

Si $u \in \mathscr{L}(E)$ et F est un sous-espace vectoriel de E, F est dit stable par u lorsque $u(F) \subset F$ c'est-à-dire $\forall\, x \in F,\ \ u(x) \in F$.

Lorsque c'est le cas, $u_F : \left| \begin{array}{ccc} F & \longrightarrow & F \\ x & \longmapsto & u(x) \end{array}\right.$, appelé **endomorphisme induit par** u **sur** F est bien défini.

Propriété

Si F est de dimension finie $p>0$, $\mathscr{B}=(e_1,\dots,e_p)$ une base de F, alors F est stable par u si et seulement si $\forall\, j \in [\![1,p]\!],\ \ u(e_j) \in F$.

Propriété

Si $u, v \in \mathscr{L}(E)$ commutent, l'image et le noyau de l'un sont stables par l'autre.

2 Point de vue matriciel

Soit M écrite par blocs $M = \begin{array}{cc} \begin{array}{cc} \overset{F}{\underset{p}{\leftrightarrow}} & \overset{G}{\underset{q}{\leftrightarrow}} \end{array} & \\ \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} & \begin{array}{l} p \updownarrow F \\ q \updownarrow G \end{array} \end{array} \in \mathscr{M}_{p+q}(\mathbb{K})$.

Si $u \in \mathscr{L}(E)$ est représenté par M dans une base $\mathscr{B}$, alors on peut séparer $\mathscr{B}$ de taille $p+q$ en deux sous-familles :

- les p premiers vecteurs engendrant un sous-espace F de E
- les q derniers vecteurs engendrant un sous-espace G.

Alors F et G sont supplémentaires de E ($F \oplus G = E$.)

Alors, si $x \in E$, x_F et x_G ses composantes sur F et G (donc $x = x_F + x_G$), x est représenté dans $\mathscr{B}$ par $X = \begin{array}{c} \begin{pmatrix} X_F \\ X_G \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{l} \updownarrow p \\ \updownarrow q \end{array}$ où X_F et X_G représentent x_F et x_G. Alors $u(x)$ est représenté dans $\mathscr{B}$ par

$$MX = \begin{pmatrix} AX_F + BX_G \\ CX_F + DX_G \end{pmatrix} \begin{array}{l} \updownarrow p \\ \updownarrow q \end{array}$$

représentant respectivement les composantes sur F et G de $u(x)$.

Cela se généralise à un nombre quelconque de sous-espaces.

Propriété

Soit $E = F \oplus G$ et $\mathscr{B}$ une base adaptée à cette somme directe, $u \in \mathscr{L}(E)$, $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \mathrm{Mat}_{\mathscr{B}}(u)$.

- *F est stable par u si et seulement si $C = 0$.*
- *G est stable par u si et seulement si $B = 0$.*

Propriété : Généralisation

Soit $E = \bigoplus_{i=1}^{r} E_i$ et $\mathscr{B}$ une base adaptée à cette somme directe, $u \in \mathscr{L}(E)$.

$A = \mathrm{Mat}_{\mathscr{B}}(u)$ est diagonale par blocs ($A = \begin{pmatrix} A_1 & & (0) \\ & \ddots & \\ (0) & & A_r \end{pmatrix}$) si et seulement si chaque E_i est stable par u.

On peut alors considérer l'endomorphisme induit par u sur E_i dont la matrice dans la base $\mathscr{B}_i$ (issue de $\mathscr{B}$) est A_i.

II ÉLÉMENTS PROPRES D'UN ENDOMORPHISME ET D'UNE MATRICE CARRÉE

1 Cas d'un endomorphisme

Définition

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

- On appelle **valeur propre** de u tout $\lambda \in \mathbb{K}$ tel qu'il existe $x \in E$ **non nul** tel que $u(x) = \lambda x$.
- Un tel vecteur **non nul** est appelé **vecteur propre** associé à la valeur propre λ.
- On appelle **sous-espace propre** associé à la valeur propre λ le sous-espace

$$E_\lambda(u) = \mathrm{Ker}(u - \lambda\,\mathrm{id}_E) = \{x \in E \mid u(x) = \lambda x\}.$$

- L'ensemble des valeurs propres de u est appelé son **spectre**, noté $\mathrm{Sp}\, u$ ou $\mathrm{Sp}_{\mathbb{K}}\, u$.

Propriété

Les droites stables par u sont les droites engendrées par un vecteur propre de u.

Propriété

Si $u, v \in \mathscr{L}(E)$ commutent, les sous-espaces propres de l'un sont stables par l'autre.

Propriété

Soit $u \in \mathscr{L}(E)$ et $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ des valeurs propres de u deux à deux distinctes.

Alors les sous-espaces propres $E_\lambda(u)$ sont en somme directe ie $\sum_{i=1}^{p} E_{\lambda_i}(u) = \bigoplus_{i=1}^{p} E_{\lambda_i}(u)$.

Corollaire

Des vecteurs propres de u associés à des valeurs propres deux à deux distinctes sont linéairement indépendants (forment une famille libre).

Corollaire

Si E est de dimension finie et $u \in \mathscr{L}(E)$, alors $|\operatorname{Sp} u| \leqslant \dim E$.

2 Cas d'une matrice

Soit $n \in \mathbb{N}^*$.

Définition

Soit $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$.

- On appelle **valeur propre** de A tout $\lambda \in \mathbb{K}$ tel qu'il existe $X \in \mathscr{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ **non nul** tel que $AX = \lambda X$.
- Un tel vecteur **non nul** est appelé **vecteur propre** associé à la valeur propre λ.
- On appelle **sous-espace propre** associé à la valeur propre λ le sous-espace

$$E_\lambda(A) = \operatorname{Ker}(A - \lambda I_n) = \left\{X \in \mathscr{M}_{n,1}(\mathbb{K}) \mid AX = \lambda X\right\}.$$

- L'ensemble des valeurs propres de A est appelé son **spectre**, noté $\operatorname{Sp} A$ ou $\operatorname{Sp}_{\mathbb{K}} A$.

Propriété

Si $(E, +, \cdot)$ est un $\mathbb{K}$-espace vectoriel de dimension finie $n \geqslant 1$, $\mathscr{B}$ est une base de E, et $u \in \mathscr{L}(E)$ dont la matrice dans la base $\mathscr{B}$ est A, alors $\operatorname{Sp} u = \operatorname{Sp} A$.

Et plus précisément les vecteurs propres et sous-espaces de A sont les représentations dans la base $\mathscr{B}$ de ceux de u.

3 Polynôme caractéristique

Soit $(E, +, \cdot)$ un $\mathbb{K}$-espace vectoriel de dimension finie $n \neq 0$. Si $u \in \mathscr{L}(E)$,

$$\begin{aligned}
\lambda \in \operatorname{Sp} u &\iff \exists x \neq 0_E,\quad u(x) = \lambda x \\
&\iff \exists x \neq 0_E,\quad (u - \lambda \operatorname{id}_E)(x) = 0_E \\
&\iff \operatorname{Ker}(u - \lambda \operatorname{id}_E) \neq \{0_E\} \\
&\iff u - \lambda \operatorname{id}_E \text{ non injective} \\
&\iff u - \lambda \operatorname{id}_E \text{ non bijective}
\end{aligned}$$

Propriété

Si $u \in \mathscr{L}(E)$, $\lambda \in \mathbb{K}$ est valeur propre de u si et seulement si $u - \lambda \operatorname{id}_E \notin \mathscr{GL}(E)$ si et seulement si $\det(u - \lambda \operatorname{id}_E) = 0$.

De la même manière,

Propriété

Si $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$, $\lambda \in \mathbb{K}$ est valeur propre de A si et seulement si $A - \lambda I_n \notin \mathscr{GL}_n(\mathbb{K})$ si et seulement si $\det(A - \lambda I_n) = 0$.

Comme, pour $x \in \mathbb{K}$, $\det(xI_n - A) = (-1)^n \det(A - xI_n)$ est polynomial en x, on peut définir :

Définition : Polynôme caractéristique

Soit $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$ et $u \in \mathscr{L}(E)$ où E est de dimension finie.

- On appelle **polynôme caractéristique** de A le polynôme $\chi_A = \det(XI_n - A)$.
- On appelle **polynôme caractéristique** de u le polynôme $\chi_u = \det(X \operatorname{id}_E - u)$.

Propriété

Les valeurs propres d'une matrice triangulaire sont ses cœfficients diagonaux.

Propriété

Soit $u \in \mathscr{L}(E)$, $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$.

- *Les racines de χ_A (respectivement χ_u) sont exactement les valeurs propres de A (respectivement u).*
- *Si $\mathscr{B}$ base de E tel que $A = \operatorname{Mat}_{\mathscr{B}}(u)$, alors $\chi_u = \chi_A$.*
- *χ_A est de degré n unitaire. Plus précisément,*

$$\chi_A = X^n - (\operatorname{tr} A) X^{n-1} + \cdots + (-1)^n \det A.$$

χ_u est de degré n unitaire. Plus précisément,

$$\chi_u = X^n - (\operatorname{tr} u) X^{n-1} + \cdots + (-1)^n \det u.$$

Propriété

Le polynôme caractéristique et le spectre sont des invariants de similitude.

Propriété

Soit F un sous-espace vectoriel non nul de E stable par u, u_F endomorphisme induit par u sur F.

Alors χ_{u_F} divise χ_u.

4 Multiplicité des valeurs propres

Soit $(E,+,\cdot)$ un $\mathbb{K}$-espace vectoriel de dimension finie $n \neq 0$, $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ et $u \in \mathcal{L}(E)$.

Définition : Multiplicité d'une valeur propre

La **multiplicité** d'une valeur propre λ de u (respectivement A) est sa multiplicité en tant que racine du polynôme caractéristique.

Propriété

Le nombre de valeurs propres comptées avec leur multiplicités est toujours au plus égal à n (dimension de E ou taille de la matrice).

Lorsque $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, il y a toujours égalité.

Propriété

Si λ valeur propre de u (respectivement A) d'ordre m_λ, $1 \leqslant \dim E_\lambda(u) \leqslant m_\lambda$ (respectivement $1 \leqslant \dim E_\lambda(A) \leqslant m_\lambda$).

Corollaire

Le sous-espace propre associé à une valeur propre simple est de dimension 1.

Propriété

Si χ_A est scindé, $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ les valeurs propres distinctes de A de multiplicités respectives $m_1, \dots, m_p$, alors $\chi_A = \prod_{i=1}^{p} (X - \lambda_i)^{m_i}$, $\sum_{i=1}^{p} m_i \lambda_i = \operatorname{tr} A$ et $\prod_{i=1}^{p} \lambda_i^{m_i} = \det A$.

On a un énoncé analogue pour u.

5 Cas particulier des matrices réelles

Pour $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, on note $\overline{A}$ la matrice dans laquelle on conjugue tous les cœfficients. On a facilement $\overline{A+B} = \overline{A} + \overline{B}$ et $\overline{AB} = \overline{A}\,\overline{B}$ lorsque ces opérations sont bien définies.

Propriété

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, λ valeur propre complexe de A de multiplicité m.

- *$\overline{\lambda}$ est valeur propre de A de multiplicité m.*
- *Si $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{C})$ est un vecteur propre de A associé à λ, $\overline{X}$ est vecteur propre de A associé à $\overline{\lambda}$.*
- *Si $d = \dim E_\lambda(A)$, $(e_1, \dots, e_p)$ une base de $E_\lambda(A)$, alors $(\overline{e}_1, \dots, \overline{e}_p)$ base de $E_{\overline{\lambda}}(A)$ de dimension d.*

III Diagonalisation

Soit $(E,+,\cdot)$ un $\mathbb{K}$-espace vectoriel de dimension finie $n \neq 0$, $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ et $u \in \mathcal{L}(E)$.

1 Diagonalisabilité des endomorphismes

Définition : Diagonalisabilité d'un endomorphisme

u est diagonalisable s'il existe une base de E dans laquelle la matrice de u est diagonale.

Propriété : Caractérisation 1

u est diagonalisable si et seulement s'il existe une base de E formée de vecteurs propres.

Une telle base est dite **diagonalisante**.

Propriété : Caractérisation 2

u est diagonalisable si et seulement si la somme (directe) des sous-espaces propres de u est égale à E ($E = \bigoplus_{\lambda \in \operatorname{Sp} u} E_\lambda(u)$.)

Propriété : Caractérisation 3

u est diagonalisable si et seulement si E est somme directe de sous-espaces stables sur lesquelles u induit une homothétie.

Propriété : Caractérisation 4

u est diagonalisable si et seulement si $\sum_{\lambda \in \operatorname{Sp} u} \dim E_\lambda(u) = \dim E$.

Propriété : Caractérisation 5

u est diagonalisable si et seulement si χ_u est scindé et pour tout $\lambda \in \operatorname{Sp} u$, $m_\lambda = \dim E_\lambda(u)$.

Propriété : Condition suffisante

Si χ_u est scindé simple, alors u est diagonalisable et tous les sous-espaces propres sont des droites vectorielles (ie de dimension 1).

Corollaire : Condition suffisante

Si u possède n valeurs propres distinctes en dimension n, alors u est diagonalisable.

2 Matrices carrées diagonalisables

Définition : Diagonalisabilité d'une matrice carrée

A est dite **diagonalisable** sur $\mathbb{K}$ si son endomorphisme canoniquement associé l'est.

Vu la définition de la diagonalisabilité d'un endomorphisme, on en tire immédiatement :

Propriété : Caractérisation

*A est **diagonalisable** sur $\mathbb{K}$ si et seulement si elle est semblable sur $\mathbb{K}$ à une matrice diagonale, c'est-à-dire s'il existe $P \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{K})$ et $D \in \mathcal{D}_n(\mathbb{K})$ telles que $A = PDP^{-1}$ ie $D = P^{-1}AP$.*

Propriété

Si u est n'importe quel endomorphisme représenté par A, alors A est diagonalisable si et seulement si u l'est.

Méthode : Diagonaliser une matrice diagonalisable A

1. Déterminer les valeurs propres, par exemple avec χ_A. (Parfois du bon sens (de l'observation) suffit. Essayer de sommer les colonnes, par exemple).
2. Chercher une base de chaque sous-espace propre.
   Si on a calculer χ_A par une méthode du pivot de Gauss, on peut reprendre la forme échelonnée finale et évaluer en λ pour finir la résolution du système !
3. Justifier alors que A est diagonalisable.
4. Déterminer une base de vecteurs propres : il suffit de concaténer des bases de chaque sous-espace propre vu qu'ils sont supplémentaires dans $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$.
5. Calculer P la matrice de passage de la base canonique à la base de vecteurs propres (qui sont directement les colonnes de P).
6. Poser D la matrice diagonale formée des valeurs propres associées à chaque vecteur propre de la base, dans le même ordre.
7. On a alors $A = PDP^{-1}$ (en appliquant une formule de changement de base à l'endomorphisme canoniquement associé à A.)

3 Applications de la diagonalisation

a Calculs de puissances

Méthode

Si on diagonalise $A = PDP^{-1}$, alors pour tout $n \in \mathbb{N}$, $A^n = PD^nP^{-1}$, valable dans $\mathbb{Z}$ si A est inversible c'est-à-dire si 0 n'est pas valeur propre.

b Commutant d'une matrice

Définition : Commutant d'une matrice carrée

Le **commutant** de $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est $\mathcal{C}(A) = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \mid AM = MA\}$.

Propriété

C'est un sous-espace vectoriel et même une sous-algèbre de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

Méthode : Commutant d'une matrice diagonalisable $A = PDP^{-1}$

1. Si $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, on pose $N = P^{-1}MP$ et on vérifie que M commute avec A si et seulement si N commute avec D.
   C'est facile en passant par les endomorphismes !
2. On détermine directement $\mathcal{C}(D)$ en traduisant $DN = ND$. (Rappel : il est facile de multiplier à gauche ou à droite par une matrice diagonale !)
3. On en déduit $\mathcal{C}(A)$ qui est l'ensemble des PNP^{-1}.

c Racines carrées d'une matrice

Définition

Si $M, A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, M est une racine carrée de A lorsque $M^2 = A$. On note $\mathcal{R}(A)$ l'ensemble des racines carrées de A.

Méthode : Racines carrées d'une matrice diagonalisable $A = PDP^{-1}$

Même principe que pour le commutant.

1. Si $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, on pose $N = P^{-1}MP$ et on vérifie que M racine carrée de A si et seulement si N racine carrée de D.
2. On détermine directement $\mathcal{R}(D)$ en traduisant $N \in \mathcal{C}(D)$ et $N^2 = D$.
3. On en déduit $\mathcal{R}(A)$ qui est l'ensemble des PNP^{-1}.

d Suites récurrentes

Méthode : Terme général d'une suite vérifiant une relation de récurrence linéaire homogène $u_{n+p} = \sum_{i=0}^{p-1} \alpha_i u_i$

1. On pose $X_n = \begin{pmatrix} u_n \\ \vdots \\ u_{n+p-1} \end{pmatrix}$.
2. On se ramène à $X_{n+1} = AX_n$, ce qui donne pour tout n, $X_n = A^n X_0$.
3. On peut, en diagonalisant $A = PDP^{-1}$ (si possible), s'affranchir du calcul de P^{-1} puis de celui de A^n en posant $Y_n = P^{-1}X_n$, ce qui donne $X_n = PD^n Y_0$.
4. On en déduit l'expression de u_n en fonction de n.

IV TRIGONALISATION

Soit $(E, +, \cdot)$ un $\mathbb{K}$-espace vectoriel de dimension finie $n \neq 0$, $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ et $u \in \mathcal{L}(E)$.

1 Définition

Définition : endomorphisme et matrice trigonalisable

- $u \in \mathcal{L}(E)$ est **trigonalisable** lorsqu'il existe une base $\mathcal{B}$ de E telle que $\mathrm{Mat}_{\mathcal{B}}(u) \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$.
- $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est **trigonalisable** lorsqu'elle est semblable à une matrice triangulaire supérieure, c'est-à-dire lorsqu'il existe $P \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{K})$ et $T \in \mathcal{T}_n^+(\mathbb{K})$ tel que $A = PTP^{-1}$.

Propriété

A est trigonalisable si et seulement si n'importe quel endomorphisme qu'elle représente l'est.

Propriété : Caractérisation

u (respectivement A) est trigonalisable si et seulement si son polynôme caractéristique est scindé.

Corollaire

Si $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, tous les endomorphismes et toutes les matrices sont trigonalisables.

2 Mise en pratique en dimension 2 ou 3

On peut toujours mettre en application la démonstration par récurrence constructive. Voici deux exemples particuliers.

Méthode : Trigonalisation en dimension 2

On suppose que $A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{K})$ est **trigonalisable mais non diagonalisable**, alors A admet une valeur propre double λ et $\dim E_\lambda(A) = 1$.

1. On détermine $\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$ vecteur propre associé à λ.
2. On complète en $\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}\right)$ base de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ (par exemple en piochant dans la base canonique).
3. Alors $A = P\begin{pmatrix} \lambda & \alpha \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}P^{-1}$ avec $P = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{pmatrix}$.

   On peut même se ramener à une matrice $\begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$ en cherchant $\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$ tel que $A\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \lambda\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$.

Méthode : Trigonalisation en dimension 3 avec deux valeurs propres

On suppose que $A \in \mathcal{M}_3(\mathbb{K})$ est **trigonalisable mais non diagonalisable**, et que A admet une valeur propre double λ et une valeur propre simple μ.

Alors $\dim E_\lambda(A) = \dim E_\mu(A) = 1$.

On montre que A est semblable à $T = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 1 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}$.

1. On détermine $\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$ vecteur propre associé à λ et $\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$ vecteur propre associé à μ.
2. On cherche $\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix}$ tel que $A\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} + \mu\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix}$.
3. On vérifie que $\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix}\right)$ est un base de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$.
4. Alors $A = P\begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 1 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}P^{-1}$ avec $P = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix}$.

V Polynômes d'endomorphisme et de matrices

1 Rappels

On a vu que si $u \in \mathcal{L}(E)$, $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, $P = \sum_{k=0}^{p} a_k X^k \in \mathbb{K}[X]$, on définit

- $P(u) = \sum_{k=0}^{p} a_k u^k = a_0 \mathrm{id}_E + a_1 u + \cdots + a_p u^p$
- $P(A) = \sum_{k=0}^{p} a_k A^k = a_0 I_n + a_1 A + \cdots + a_p A^p$
- $\Phi_u : \left| \begin{array}{ccc} \mathbb{K}[X] & \longrightarrow & \mathcal{L}(E) \\ P & \longmapsto & P(u) \end{array} \right.$ morphisme de $\mathbb{K}$-algèbres.
- $\Phi_A : \left| \begin{array}{ccc} \mathbb{K}[X] & \longrightarrow & \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \\ P & \longmapsto & P(A) \end{array} \right.$ morphisme de $\mathbb{K}$-algèbres.

Notation

On note $\mathbb{K}[u] = \mathrm{Im}\,\Phi_u = \{P(u),\ P \in \mathbb{K}[X]\}$ et $\mathbb{K}[A] = \mathrm{Im}\,\Phi_A = \{P(A),\ P \in \mathbb{K}[X]\}$.

Propriété

Ce sont des sous-algèbres commutatives de $\mathcal{L}(E)$ et $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ respectivement.

2 Propriétés

Propriété

Si $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, $P \in \mathbb{K}[X]$ et $Q \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{K})$, alors $P(Q^{-1}AQ) = Q^{-1}P(A)Q$.

Propriété

Si $D = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ *et* $T = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & (*) \\ & \ddots & \\ (0) & & \lambda_n \end{pmatrix}$ *et* $P \in \mathbb{K}[X]$, *alors*

(i) $P(D) = \mathrm{diag}(P(\lambda_1), \dots, P(\lambda_n))$

(ii) $P(T) = \begin{pmatrix} P(\lambda_1) & & (*) \\ & \ddots & \\ (0) & & P(\lambda_n) \end{pmatrix}$

3 Polynômes annulateur

a Définition

Définition

P est un **polynôme annulateur** de u (respectivement A) lors $P(u) = 0_{\mathscr{L}(E)}$ (respectivement $P(A) = 0_{\mathscr{M}_n(\mathbb{K})}$.

Propriété

(i) *Si E est de dimension finie,* $u \in \mathscr{L}(E)$, *il existe au moins un polynôme annulateur non nul de* u.

(ii) *Si* $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$, *il existe au moins un polynôme annulateur non nul de* A.

Méthode : Calcul de puissances à partir d'un polynôme annulateur

1. On cherche un polynôme annulateur non nul P de A.
2. Pour un polynôme $S \in \mathbb{K}[X]$, on calcule le reste de la division euclidienne de S pour P : $S = PQ + R$ où $\deg R < \deg P$. C'est plutôt facile lorsque P est scindé simple (Interpolation de Lagrange).
3. On en déduit, entre autres, pour $k \in \mathbb{N}$, avec $S = X^k$, $A^k = R(A)$.

b Polynômes annulateurs et valeurs propres

Propriété

Si $u \in \mathscr{L}(E)$, $\lambda \in \mathbb{K}$, $x \in E$ *tel que* $f(x) = \lambda x$, *alors pour tout* $k \in \mathbb{N}$, $f^k(x) = \lambda^k x$. *Plus généralement si* $P \in \mathbb{K}[X]$, $P(u)(x) = P(\lambda)(x)$.

Si $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$, $\lambda \in \mathbb{K}$, $X \in \mathscr{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ *tel que* $AX = \lambda X$, *alors pour tout* $k \in \mathbb{N}$, $A^k X = \lambda^k X$. *Plus généralement si* $P \in \mathbb{K}[X]$, $P(A)X = P(\lambda)X$.

Corollaire

Si λ *est valeur propre de* u *(respectivement* A*), alors* $P(\lambda)$ *est valeur propre de* $P(u)$ *(respectivement* $P(A)$*).*

Propriété

Si $P \in \mathbb{K}[X]$ *et* $u \in \mathscr{L}(E)$ *(respectivement* $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$*) tel que* $P(u) = 0_{\mathscr{L}(E)}$ *(respectivement* $P(A) = 0_{\mathscr{M}_n(\mathbb{K})}$*),* $\mathscr{Z}(P)$ *l'ensemble des racines de* P, *alors* $\mathrm{Sp}\, u \subset \mathscr{Z}(P)$ *(respectivement* $\mathrm{Sp}\, A \subset \mathscr{Z}(P)$*).*

L'inclusion est stricte en général.

4 Lemme de décomposition des noyaux

Théorème : Lemme de décomposition des noyaux

Soit $u \in \mathscr{L}(E)$, $P, Q \in \mathbb{K}[X]$ *tel que* $P \wedge Q = 1$. *Alors* $\mathrm{Ker}\,((PQ)(u)) = \mathrm{Ker}\,(P(u)) \oplus \mathrm{Ker}\,(Q(u))$.

Plus généralement, si $P_1, \dots, P_m$ *sont deux à deux premiers entre eux, alors* $\mathrm{Ker}\left(\left(\prod_{i=1}^{m} P_i\right)(u)\right) = \bigoplus_{i=1}^{m} \mathrm{Ker}\,(P_i(u))$.

Corollaire

(i) *Si $P \in \mathbb{K}[X]$, $\mathrm{Ker}(P(u))$ est stable par u.*

(ii) *Si $P_1, \ldots, P_m$ sont deux à deux premiers entre eux, et $P = \prod_{i=1}^{m} P_i$ est un polynôme annulateur de u, alors $E = \bigoplus_{i=1}^{m} \mathrm{Ker}\left(P_i(u)\right)$, la matrice dans une base adaptée est diagonale par blocs.*

Propriété : Caractérisation 6

Si E est de dimension fini et $u \in \mathscr{L}(E)$, u est diagonalisable si et seulement si u est annulé par un polynôme scindé à racines simples.
(s'adapte aux matrices)

Corollaire

Si u est diagonalisable, F stable par u et u_F l'endomorphisme induit, alors u_F est diagonalisable.

5 Théorème de Cayley-Hamilton

Théorème : de Cayley-Hamilton

Le polynôme caractéristique est un polynôme annulateur.

6 Polynôme minimal

On suppose E de dimension finie n.

Propriété

*L'ensemble des polynômes annulateurs de $u \in \mathscr{L}(E)$ (respectivement de $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$) est un idéal de $\mathbb{K}[X]$ non réduit à $0_{\mathbb{K}[X]}$ appelé **idéal annulateur** de u (respectivement A).*

Définition : Polynôme minimal

On appelle polynôme minimal de u (respectivement de A) l'unique générateur unitaire de cet idéal. On le notera μ_u (respectivement μ_A).

Propriété

Si A est une matrice représentant l'endomorphisme u, alors $\mu_u = \mu_A$.

Propriété

Si $d = \deg \mu_u$ (respectivement $d = \deg \mu_A$), alors $\left(\mathrm{id}_E, u, \ldots, u^{d-1}\right)$ est une base de $\mathbb{K}[u]$ (respectivement $\left(I_n, A, \ldots, A^{d-1}\right)$ est une base de $\mathbb{K}[A]$).

Propriété

Le polynôme minimal divise le polynôme caractéristique. En particulier, il est de degré au plus n.

Propriété

*Les racines du polynôme minimal sont **exactement** les valeurs propres.*

Propriété : Caractérisation 7

u est diagonalisable si et seulement si son polynôme minimal est scindé simple si et seulement si $\mu_u = \prod_{\lambda \in \mathrm{Sp}\, u} (X - \lambda)$.
(Idem avec les matrices)

Propriété

Si F est stable par u, u_F l'endomorphisme induit, alors μ_{u_F} divise μ_u.

Propriété

u est trigonalisable si et seulement si u est annulé par un polynôme scindé.

VI Endomorphismes et matrices nilpotentes

1 Définition

Définition : Endomorphisme et matrice nilpotents et indice de nilpotence

$u \in \mathscr{L}(E)$ (respectivement $A \in \mathscr{M}_n(\mathbb{K})$) est dit **nilpotent** lorsqu'il existe $p \geqslant 1$ tel que $u^p = 0_{\mathscr{L}(E)}$ (respectivement $A^p = 0_n$).

Le plus petit $p \geqslant 1$ vérifiant cette propriété est appelé **indice de nilpotence**.

2 Propriétés

Propriété : Caractérisation

u est nilpotent si et seulement si u est trigonalisable et $\operatorname{Sp} u = \{0\}$.
Idem avec des matrices.

Propriété

L'indice de nilpotence est toujours majoré par $n = \dim E$.

3 Trigonalisation d'un endomorphisme à polynôme minimal scindé

Théorème

Soit $u \in \mathscr{L}(E)$ et P polynôme annulateur scindé de u.

Alors on peut trouver des sous-espaces $F_1, \dots, F_p$ de E, stables par u, supplémentaires dans E, tels que sur chaque F_k, l'endomorphisme u_k induit par u soit la soit la somme d'une homothétie et d'un endomorphisme nilpotent ($u_k = a_k \operatorname{id}_{F_k} + n_k$).

Corollaire

Si u est trigonalisable, on peut trouver d diagonalisable et n nilpotent tels que $u = d + n$ et $nd = dn$.

VII Sous-espaces stables par un endomorphisme diagonalisable (complément)

On a déjà vu que les droites stables par u étaient exactement les droites engendrées par un vecteur propre.

Méthode : Sous-espaces stables par un endomorphisme diagonalisable

Le théorème suivant est hors-programme : il faut le redémontrer lorsqu'on en a besoin.

Théorème

Soit E de dimension finie et $u \in \mathscr{L}(E)$ diagonalisable.
Un sous-espace non nul F de E est stable par u si et seulement s'il existe une base de F formée de vecteurs propres de u.

On peut donc déterminer des sous-espaces stables soit nuls, soit ayant une base construite à partir de vecteurs propres.