

1. Réduction des endomorphismes

1.1. VALEURS ET VECTEURS PROPRES

- 1.1.1. Sous-espaces stables par un endomorphisme
- 1.1.2. Endomorphismes stabilisant les sous-espaces d'une somme directe
- 1.1.3. Polynômes d'endomorphismes ou de matrices
- 1.1.4. Vecteurs et valeurs propres. Définitions
- 1.1.5. Valeurs propres d'une matrice
- 1.1.6. Vecteurs et valeurs propres. Propriétés
- 1.1.7. Automorphismes intérieurs, matrices semblables

1.2. POLYNÔME CARACTÉRISTIQUE

- 1.2.1. Définition et premières propriétés
- 1.2.2. Polynôme caractéristique et valeurs propres
- 1.2.3. Polynôme caractéristique et sous-espaces stables

1.3. ENDOMORPHISMES ET MATRICES DIAGONALISABLES

- 1.3.1. Définitions et premières propriétés
- 1.3.2. Conditions de diagonalisabilité

1.4. DIAGONALISATION : PRATIQUE ET APPLICATIONS

- 1.4.1. Diagonalisation d'une matrice
- 1.4.2. Applications de la diagonalisation

1.5. TRIGONALISATION

1. Réduction des endomorphismes

1.1. VALEURS ET VECTEURS PROPRES

1.1.1. Sous-espaces stables par un endomorphisme

Dans tout ce chapitre, $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou $\mathbb{C}$, et E est un espace vectoriel sur $\mathbb{K}$.

Définition

- Soient f un endomorphisme de E , et F un sous-espace vectoriel de E .
 On dit que F est *stable* par f si $f(F) \subset F$.
 La restriction de f à F est alors un endomorphisme de F , dit *induit* par f sur F .

Propriétés

- Si f et g commutent dans $\mathcal{L}(E)$, alors $\text{Ker } f$ et $\text{Im } f$ sont stables par g .
- Soit $(e) = e_1, e_2, \dots, e_n$ une base de E .

Pour tout j de $\{1, \dots, n\}$, notons $F_j = \text{Vect}(e_1, \dots, e_j)$.

La matrice de f dans (e) est :

- Diagonale $\Leftrightarrow$ les droites vectorielles $\mathbb{K}e_j$ sont stables par f .
- Triangulaire supérieure $\Leftrightarrow$ les sous-espaces F_j sont stables par f .

1.1.2. Endomorphismes stabilisant les sous-espaces d'une somme directe

Proposition

- On suppose que E est de dimension finie et que $E = F \oplus G$, F et G étant distincts de $\{0\}$.
 On note (e) une base de E obtenue en *juxtaposant* une base de F puis une base de G .
 Soit M la matrice de f dans cette base.
 A et C désignent ci-dessous deux matrices carrées de tailles respectives $\dim F$ et $\dim G$.
- F est stable par f si et seulement si M s'écrit $\begin{pmatrix} A & B \\ 0 & C \end{pmatrix}$.
 - De même, F et G sont stables par f si et seulement si M s'écrit $\begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix}$.

Généralisation

On suppose que $E = F_1 \oplus F_2 \oplus \dots \oplus F_p$, où $F_1, \dots, F_p$ sont tous distincts de $\{0\}$.

On munit E d'une base (e) *adaptée* à cette somme directe, c'est-à-dire obtenue par juxtaposition des bases $(e)_1$ de F_1 , ..., $(e)_p$ de F_p .

Soit f un endomorphisme de E , de matrice M dans la base (e) .

Les sous-espaces vectoriels F_k sont stables par f si et seulement si M est diagonale par blocs, et plus précisément est formée de p blocs M_k ayant successivement les tailles $\dim F_1, \dim F_2, \dots, \dim F_p$.

Dans ces conditions, si note on g_k la restriction de f à F_k , le k -ème bloc M_k de M est la matrice de g_k dans la base $(e)_k$ de F_k , et $\det f = \det M = \prod_{k=1}^n \det g_k = \prod_{k=1}^n \det M_k$.

1.1.3. Polynômes d'endomorphismes ou de matrices

Définition (polynômes d'endomorphismes)

Soit f un endomorphisme de E .

Soit $A = a_p X^p + a_{p-1} X^{p-1} + \cdots + a_1 X + a_0 = \sum_{k=0}^p a_k X^k$ un polynôme à coefficients dans $\mathbb{K}$.

On note $A(f) = a_p f^p + a_{p-1} f^{p-1} + \cdots + a_1 f + a_0 \text{Id}_E = \sum_{k=0}^p a_k f^k$

On dit que $A(f)$ est un polynôme de l'endomorphisme f .

Par exemple, si $A = X^p$, alors $A(f) = f^p$. En particulier, si $A = 1$, $A(f) = \text{Id}_E$.

Dans les énoncés ci-dessous, f désigne un endomorphisme quelconque de E .

De même A et B sont deux polynômes quelconques à coefficients dans $\mathbb{K}$.

Propriétés

- Si un sous-espace vectoriel F de E est stable par f , alors il est stable par $A(f)$.
- $\forall \alpha, \beta \in K, (\alpha A + \beta B)(f) = \alpha A(f) + \beta B(f); (AB)(f) = A(f) \circ B(f)$.
- L'application $A \mapsto A(f)$ est un morphisme de l'algèbre $\mathbb{K}[X]$ dans l'algèbre $\mathcal{L}(E)$.
- Si f et g commutent, alors $A(f)$ et $B(g)$ commutent. En particulier $A(f)$ et $B(f)$ commutent.

$\text{Ker } A(f)$ et $\text{Im } A(f)$ sont donc stables par $B(f)$ (ou, plus simplement, par f).

Définition

Soit f un endomorphisme de E . Soit A un polynôme à coefficients dans $\mathbb{K}$.

Si $A(f) = 0$, on dit que A est un polynôme *annulateur* de f .

Définition (polynômes de matrices)

Soit M une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. Soit $A = \sum_{k=0}^p a_k X^k$ un polynôme à coefficients dans $\mathbb{K}$.

On note $A(M) = \sum_{k=0}^p a_k M^k$.

Remarque

On dispose de propriétés analogues à celles des polynômes d'endomorphismes.

En particulier :
$$\begin{cases} (\alpha A + \beta B)(M) = \alpha A(M) + \beta B(M). \\ (AB)(M) = A(M)B(M). \\ 1(M) = I_n. \end{cases}$$

Pour toute matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, l'application $A \mapsto A(M)$ est donc un morphisme d'algèbres de $\mathbb{K}[X]$ vers $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

Proposition

Soit E un K -espace vectoriel de dimension finie $n \geq 1$, muni d'une base (e) .

Soit f un endomorphisme de E , de matrice M dans la base (e) .

Soit A un polynôme de $\mathbb{K}[X]$. Alors la matrice de $A(f)$ dans la base (e) est $A(M)$.

1.1.4. Vecteurs et valeurs propres. Définitions

Définition

Soient f un endomorphisme de E , et λ un élément de $\mathbb{K}$. On dit que λ est une *valeur propre* de f s'il existe au moins un vecteur u **non nul** tel que $f(u) = \lambda u$.

Un tel vecteur est appelé *vecteur propre* de f pour la valeur propre λ .

L'ensemble des valeurs propres éventuelles de f est appelé le *spectre* de f , et noté $\text{Sp}(f)$.

Remarque et définition

Avec les notations précédentes, λ est une valeur propre de f si et seulement si $\text{Ker}(f - \lambda \text{Id}_E)$ n'est pas réduit à $\{0\}$, c'est-à-dire si et seulement si $f - \lambda \text{Id}_E$ n'est pas injectif.

$E_\lambda = \text{Ker}(f - \lambda \text{Id}_E)$ est appelé *sous-espace propre* de f pour la valeur propre λ .

Remarques

- Les vecteurs propres de f , pour la valeur propre λ , sont les éléments non nuls de E_λ .
- Cas particulier : 0 est valeur propre de f si et seulement si f est non injective.

Le sous-espace propre est alors $E_0 = \text{Ker}(f)$.

- Soit u un vecteur non nul.

Dire que u est vecteur propre de f , c'est dire que la droite vectorielle $\mathbb{K}u$ est stable par f .

- La restriction de f à E_λ est l'homothétie $u \mapsto \lambda u$.
- Soit f un endomorphisme de E et u un élément de E .

Si u est vecteur propre de f , c'est pour une seule valeur propre : l'unique λ tel que $f(u) = \lambda u$.

Mais si λ est une valeur propre de f , il existe une infinité de vecteurs propres associés à λ : ce sont tous les vecteurs non nuls de E_λ .

Trois exemples

- L'endomorphisme f de $\mathbb{K}[X]$ défini par $f(P) = XP$ n'a aucune valeur propre.
- Les valeurs propres de l'endomorphisme $f : P \mapsto XP'$ de $\mathbb{K}[X]$ sont les entiers naturels.

En effet si le terme de plus haut degré de P est $a_n X^n$, celui de XP' est $na_n X^n$.

L'égalité $f(P) = \lambda P$ n'est donc possible que si $\lambda \in \mathbb{N}$.

Réciproquement, $P_n = X^n$ est vecteur propre de f pour la valeur propre n .

- L'endomorphisme f de $\mathcal{C}^\infty(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ défini par $f(u) = u'$ admet tout réel pour valeur propre.

Pour tout réel λ , E_λ est la droite vectorielle engendrée par $u : x \mapsto \exp(\lambda x)$.

1.1.5. Valeurs propres d'une matrice

Définition

Soient M une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ et λ un élément de $\mathbb{K}$.

On dit que λ est une *valeur propre* de M s'il existe au moins un vecteur colonne U *non nul* tel que $MU = \lambda U$.

Un tel vecteur est appelé *vecteur propre* de M pour la valeur propre λ .

L'ensemble des valeurs propres éventuelles de M dans $\mathbb{K}$ est appelé le *spectre* de M dans $\mathbb{K}$, et est noté $\text{Sp}_{\mathbb{K}}(M)$.

Remarques

- Soit M un élément de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, et soit f un endomorphisme d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E de dimension n , ayant pour matrice M dans une base (e) de E .

Les valeurs propres de M sont celles de f .

Soient λ un scalaire, u un vecteur de E et U la matrice colonne de ses coordonnées dans (e) .

u est vecteur propre de f pour λ si et seulement si U est vecteur propre de M pour λ .

Ce qui précède s'applique en particulier à l'endomorphisme f de $\mathbb{K}^n$ de matrice M dans la base canonique.

- Soient M dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, et λ un élément de $\mathbb{K}$.

λ est une valeur propre de $M \iff M - \lambda I_n$ est non inversible $\iff \det(M - \lambda I_n) = 0$.

- Soit M un élément de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. On peut considérer que M appartient à $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$.

Si on note $\text{Sp}_{\mathbb{R}}(M)$ le spectre de M considérée comme matrice réelle, et $\text{Sp}_{\mathbb{C}}(M)$ le spectre de M considérée comme matrice complexe, alors $\text{Sp}_{\mathbb{R}}(M) \subset \text{Sp}_{\mathbb{C}}(M)$.

Cette inclusion peut être stricte.

Par exemple, si $M = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, alors $\text{Sp}_{\mathbb{R}}(M) = \emptyset$ et $\text{Sp}_{\mathbb{C}}(M) = \{-i, i\}$

1.1.6. Vecteurs et valeurs propres. Propriétés

Proposition

Soit $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ une famille de p valeurs propres distinctes de f .

Notons $E_1, E_2, \dots, E_p$ les sous-espaces propres correspondants.

Alors la somme $E_1 + E_2 + \dots + E_p$ est directe.

De manière équivalente : si $u_1, u_2, \dots, u_p$ est une famille de vecteurs propres de f pour p valeurs propres distinctes, alors cette famille est libre.

Propriétés

- Si $\dim(E) = n$, tout endomorphisme de E admet au plus n valeurs propres distinctes dans $\mathbb{K}$. Il en est de même pour toute matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.
- Si les endomorphismes f et g commutent, tout sous-espace propre de f est stable par g .

- Soit f dans $\mathcal{L}(E)$ et P dans $\mathbb{K}[X]$.

Si u est vecteur propre de f pour λ , alors u est vecteur propre de $P(f)$ pour la valeur propre $P(\lambda)$. On a un énoncé équivalent pour les matrices de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

Cas particulier: Si P est un polynôme annulateur de f , c'est-à-dire si $P(f) = 0$, alors les valeurs propres de f sont des racines de P .

Notamment, si f est nilpotente, $\text{Sp}(f) = \{0\}$.

1.1.7. Automorphismes intérieurs, matrices semblables

Définition (*automorphismes intérieurs*)

- || Soit a un automorphisme de E .
 || L'application $f \mapsto \varphi_a(f) = a \circ f \circ a^{-1}$ est un automorphisme de l'algèbre $\mathcal{L}(E)$.
 || Les applications φ_a sont appelées *automorphismes intérieurs* de $\mathcal{L}(E)$.

Proposition

- || Avec les notations précédentes, $\text{Sp}(\varphi_a(f)) = \text{Sp}(f)$. Plus précisément :
 || u est vecteur propre de f pour $\lambda \Leftrightarrow a(u)$ est vecteur propre de $\varphi_a(f)$ pour λ .
 || Les sous-espaces propres de $\varphi_a(f)$ sont donc les $a(E_\lambda)$, en notant E_λ les sous-espaces propres de l'application f .
 || Et puisque a est un automorphisme de E , $\dim a(E_\lambda) = \dim E_\lambda$.

Définition (*matrices semblables*)

- || Deux matrices M et N de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ sont dites *semblables* s'il existe une matrice inversible P telle que $M = PNP^{-1}$.

Propriétés

- M et N sont semblables si et seulement si elles sont susceptibles de représenter le même endomorphisme de E (avec $\dim(E) = n$), chacune dans une certaine base de E .
- Plus précisément, en reprenant les notations ci-dessus :

Si E est muni d'une base (e) , et si on note f, g, a les endomorphismes de E de matrices respectives N, M, P dans (e) , alors $g = a \circ f \circ a^{-1}$, c'est-à-dire $g = \varphi_a(f)$.

- On en déduit en particulier que $\text{Sp}(M) = \text{Sp}(N)$.

Plus précisément, X est un vecteur colonne propre de N si et seulement si PX est un vecteur colonne propre de M (et pour la même valeur propre).

- Si M et N sont semblables, il en est de même également de tM et de tN .

Cela résulte de $M = PNP^{-1} \Rightarrow {}^tM = Q {}^tN Q^{-1}$ avec $Q = {}^tP^{-1}$.

- Si M et N sont semblables, et pour tout entier naturel k , M^k et N^k sont semblables.

Cela résulte de $M = PNP^{-1} \Rightarrow M^k = P N^k P^{-1}$.

Ce résultat s'étend aux entiers k négatifs si M et donc N sont inversibles.

1.2. POLYNÔME CARACTÉRISTIQUE

Dans ce paragraphe, E est un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie $n \geq 1$.

1.2.1. Définition et premières propriétés

Définition

- || Soit M une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.
 || Le *polynôme caractéristique* de M est $\chi_M(X) = \det(M - XI_n)$.

Propriétés

- Le polynôme caractéristique de M vérifie:

$$\chi_M(X) = (-1)^n X^n + (-1)^{n-1} \text{tr}(M) X^{n-1} + \dots + \det(M).$$
- Les matrices M et ${}^t M$ ont le même polynôme caractéristique.
- Deux matrices semblables ont le même polynôme caractéristique.

Définition

- || Soit f un endomorphisme de E . On appelle polynôme caractéristique de f celui de la matrice M de f dans une base (e) quelconque de E . On le note $\chi_f(X)$.
 || D'après la propriété précédente, il ne dépend pas de la base choisie.

1.2.2. Polynôme caractéristique et valeurs propres

Proposition

- || Soient f un endomorphisme de E , M une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, et λ un élément de $\mathbb{K}$.
 || λ est valeur propre de M si et seulement si λ est racine de $\chi_M(X)$.
 || λ est valeur propre de f si et seulement si λ est racine de $\chi_f(X)$.

Conséquence

- || Toute matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, ou encore tout endomorphisme f d'un $\mathbb{C}$ -espace vectoriel de dimension $n \geq 1$, admet au moins une valeur propre.

Définition (*multiplicité d'une valeur propre*)

- || Soient f un endomorphisme de E , M une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, et λ un élément de $\mathbb{K}$.
 || On dit que λ est une valeur propre de M (resp. de f), avec la *multiplicité* k ($1 \leq k \leq n$), si λ est racine de $\chi_M(X)$ (resp. de $\chi_f(X)$), avec la multiplicité k .
 || Cette multiplicité est souvent notée $m(\lambda)$.
 || On parle ainsi de valeur propre simple, double, triple, ... si $m(\lambda) = 1, 2, 3, \dots$

Proposition (*somme et produit des valeurs propres*)

Si le polynôme caractéristique de M est scindé dans $\mathbb{C}$, c'est-à-dire se décompose en un produit de polynômes de degré 1, alors $\text{tr}(M)$ (resp. $\det(M)$) est égale à la somme (resp. au produit) des valeurs propres de M chacune comptée autant de fois que sa multiplicité.

C'est toujours le cas si $\mathbb{K} = \mathbb{C}$.

Remarque

Une matrice triangulaire a ses valeurs propres sur la diagonale, chacune figurant autant de fois que son ordre de multiplicité.

Proposition (*valeurs propres d'une matrice réelle*)

Soit M une matrice carrée d'ordre n , à coefficients réels.

On considère ses valeurs propres dans $\mathbb{C}$.

Si le nombre complexe λ est une valeur propre de M alors $\bar{\lambda}$ est aussi une valeur propre de M , et avec la même multiplicité.

De plus, si le vecteur colonne X vérifie $MX = \lambda X$, alors on a l'égalité $M\bar{X} = \bar{\lambda}\bar{X}$.

1.2.3. Polynôme caractéristique et sous-espaces stables**Proposition**

Soit f un endomorphisme de E .

On suppose que $E = F_1 \oplus F_2 \oplus \cdots \oplus F_p$, les F_k étant non réduits à $\{0\}$.

On suppose que chaque F_k est stable par f , et on note g_k la restriction de f à F_k .

Alors $\chi_f(X) = \chi_{g_1}(X)\chi_{g_2}(X) \cdots \chi_{g_p}(X)$.

Conséquence

Soit f un endomorphisme de E . Soit λ une valeur propre de f .

Si on note $m(\lambda)$ sa multiplicité et $d(\lambda)$ la dimension du sous-espace propre E_λ , alors on a la double inégalité : $1 \leq d(\lambda) \leq m(\lambda)$.

En particulier, le sous-espace vectoriel propre associé à une valeur propre simple, c'est-à-dire de multiplicité 1, est nécessairement une droite vectorielle.

1.3. ENDOMORPHISMES ET MATRICES DIAGONALISABLES

Dans ce paragraphe, E est un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie $n \geq 1$.

1.3.1. Définitions et premières propriétés

Proposition et définition

Soit f un endomorphisme de E . Les conditions suivantes sont équivalentes :

- E est la somme, nécessairement directe, des sous-espaces propres de f .
- Il existe une base de E dans laquelle la matrice de f est diagonale.
- Le polynôme caractéristique $\chi_f(X)$ est scindé dans $\mathbb{K}[X]$ et pour toute valeur propre λ (toute racine de χ_f) la multiplicité $m(\lambda)$ est égale à la dimension $d(\lambda)$ du sous-espace propre E_λ .
- La somme des dimensions des sous-espaces propres de f est égale à $\dim(E)$.

Si ces conditions sont réunies, on dit que f est *diagonalisable*.

Définition (*matrices diagonalisables*)

Soit M un élément de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

On dit que M est *diagonalisable* si M est semblable à une matrice diagonale D , c'est-à-dire s'il existe une matrice inversible P telle que $D = P^{-1}MP$.

On dit alors que D est une *réduite diagonale* de M .

Remarque

Avec les notations ci-dessus, les coefficients de la diagonale de D sont les valeurs propres de M , chacune figurant autant de fois que son ordre de multiplicité.

Dans l'égalité $D = P^{-1}MP$, P est la matrice de passage de la base canonique de $\mathbb{K}^n$ à une base de vecteurs propres de M .

Propriétés : Soit M un élément de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

- M est diagonalisable si et seulement si tout endomorphisme f d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E de dimension n dont la matrice est M dans une base (e) de E est diagonalisable, et en particulier l'endomorphisme de $\mathbb{K}^n$ de matrice M dans la base canonique.
- Si M est diagonalisable et si N est semblable à M , alors N est diagonalisable.
- Soit M un élément de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

Si M est diagonalisable "dans $\mathbb{R}$ " alors M est diagonalisable "dans $\mathbb{C}$ ", avec les mêmes valeurs et vecteurs propres et la même égalité $D = P^{-1}MP$, les matrices P et D étant à coefficients réels.

- En revanche, toujours avec M dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, M peut être diagonalisable dans $\mathbb{C}$ sans l'être dans $\mathbb{R}$, si des valeurs propres sont complexes mais non réelles.

Dans l'égalité $D = P^{-1}MP$, P et D sont alors à coefficients complexes.

1.3.2. Conditions de diagonalisabilité

Proposition (*une condition suffisante*)

|| Soit f un endomorphisme de E (on rappelle que $\dim E = n \geq 1$).
 || Si f admet n valeurs propres distinctes dans $\mathbb{K}$, alors f est diagonalisable, et les sous-espaces propres sont des droites vectorielles.

Remarques

La condition précédente n'est pas nécessaire.

Par exemple si f est une homothétie de rapport λ , alors f est diagonalisable et pourtant f n'a pour seule valeur propre que λ , avec la multiplicité n .

Inversement, si f n'a qu'une valeur propre λ , de multiplicité $n = \dim E$, f est diagonalisable si et seulement si f est l'homothétie de rapport λ .

De même si M (élément de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$) n'a que la valeur propre λ (ce qui est le cas par exemple si M est triangulaire avec des λ sur la diagonale), alors M est diagonalisable si et seulement si $M = \lambda I_n$.

Proposition (*une condition nécessaire et suffisante*)

|| Soit f un endomorphisme de E . f est diagonalisable si et seulement si f est annulée par un polynôme scindé à racines simples.

Exemple

Si l'application f vérifie $(f - 2Id) \circ (f + 3Id) = 0$, alors $E = E_2 \oplus E_{-3}$.

Si l'un des deux sous-espaces E_2 ou E_{-3} est réduit à $\{0\}$, c'est que f est une homothétie, de rapport -3 ou 2 respectivement.

Sinon le spectre de f est exactement égal à $\{-3, 2\}$.

Proposition

|| Soit f un endomorphisme de E .
 || Si f est diagonalisable, alors la restriction de f à un sous-espace stable F est un endomorphisme diagonalisable de F .

1.4. DIAGONALISATION : PRATIQUE ET APPLICATIONS

1.4.1. Diagonalisation d'une matrice

Soit à diagonaliser une matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

- On calcule le polynôme caractéristique $\chi_M(X)$ de la matrice M puis les racines dans $\mathbb{K}$ de ce polynôme.
- Si le polynôme χ_M n'est pas scindé dans $\mathbb{K}$, alors M n'est pas diagonalisable dans $\mathbb{K}$.
- Si au contraire χ_M est scindé alors pour chaque racine λ on résout le système homogène $(M - \lambda I_n)X = 0$, où X est une matrice colonne de $\mathbb{K}^n$.

L'ensemble des solutions de ce système est le sous-espace propre E_λ .

La résolution conduit à une base $(e)_\lambda$ de E_λ , donc à $\dim(E_\lambda)$.

- Si, pour l'un des λ , on a $\dim(E_\lambda) < m(\lambda)$, où $m(\lambda)$ est la multiplicité de λ comme racine de χ_M , alors M n'est pas diagonalisable.
- Sinon M est diagonalisable, et la juxtaposition des bases $(e)_\lambda$ donne une base de $\mathbb{K}^n$, formée de vecteurs propres. On en déduit la matrice de passage P de la base canonique à la base (e) , et l'égalité $D = P^{-1}MP$, où D est diagonale : ses coefficients diagonaux sont les valeurs propres de M , dans l'ordre des vecteurs propres de la base (e) .

Les calculs précédents peuvent s'effectuer avec la méthode du pivot :

- On part de la matrice $A_\lambda = M - \lambda I_n$ que l'on transforme, par des opérations sur les lignes, en une matrice triangulaire B_λ .
- Les valeurs propres de M sont les λ tels que B_λ est non inversible c'est-à-dire les valeurs qui annulent au moins un coefficient diagonal de B_λ .
- Pour chacune de ces valeurs, le sous espace propre est obtenu en résolvant le système $B_\lambda X = 0$, qui est équivalent au système $(M - \lambda I_n)X = 0$.

1.4.2. Applications de la diagonalisation

Calcul des puissances d'une matrice

Si une matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est diagonalisable, l'égalité $D = P^{-1}MP$, où D est diagonale, permet d'écrire $M = PDP^{-1}$ puis pour tout entier naturel k , $M^k = PD^kP^{-1}$.

On peut généraliser aux entiers relatifs k si M est inversible.

Systèmes de suites récurrentes de pas 1

Soient $(u_p)_{p \geq 0}$, $(v_p)_{p \geq 0}$, $\dots$, $(w_p)_{p \geq 0}$ des suites de $\mathbb{K}$.

On pose $X_p = (u_p, v_p, \dots, w_p)$.

On suppose qu'il existe une matrice M telle que, pour tout $p \geq N$, $X_{p+1} = MX_p$.

Dans ces conditions, pour tout $p \geq N$, $X_{p+1} = M^{p-N}X_p$, ce qui nécessite le calcul des puissances successives de M : on est donc ramené au cas précédent...

Etude d'une récurrence linéaire de pas n

Soit une suite (u_p) définie par une relation de récurrence du type :

$$\forall p \geq N, u_{p+n} = \alpha u_{p+n-1} + \beta u_{p+n-2} + \dots + \gamma u_p.$$

Posons $X_p = (u_{p+n}, u_{p+n-1}, \dots, u_{p+1})$.

$$\text{On a alors } X_{p+1} = MX_p, \text{ où } M = \begin{pmatrix} \alpha & \beta & \dots & \dots & \gamma \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Le polynôme caractéristique de M est $\chi_M = (-1)^n [X^n - \alpha X^{n-1} - \beta X^{n-2} - \dots - \gamma]$.

On est donc encore ramené au problème précédent.

1.5. TRIGONALISATION

Définition

Soit f un endomorphisme d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E de dimension finie $n \geq 1$.
On dit que f est *trigonalisable* s'il existe une base (e) de E dans laquelle la matrice T de f est triangulaire supérieure.

Définition

Une matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est dite trigonalisable si elle est semblable à une matrice triangulaire supérieure T , c'est-à-dire s'il existe une matrice inversible P telle que $T = P^{-1}MP$.

Remarque

Dire que M est trigonalisable, c'est dire que tout endomorphisme f d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E de dimension n ayant pour matrice M dans une certaine base est lui-même trigonalisable.

Proposition (*CNS de trigonalisabilité*)

Une matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ (ou un endomorphisme f d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension n) est trigonalisable si et seulement si son polynôme caractéristique est scindé dans $\mathbb{K}$.
En particulier toute matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, ou encore tout endomorphisme f d'un $\mathbb{C}$ -espace vectoriel de dimension finie $n \geq 1$, est trigonalisable.

Proposition (*une conséquence de la trigonalisabilité*)

Soit M dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, trigonalisable.
Soient $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ses valeurs propres, non nécessairement distinctes.
Alors les valeurs propres de M^p , pour tout p de $\mathbb{N}$, sont $\lambda_1^p, \lambda_2^p, \dots, \lambda_n^p$.
Cet énoncé se généralise aux entiers relatifs p si M est inversible.