

Réduction des endomorphismes

M. Calciano

Dans ce chapitre, E désigne, sauf mention du contraire, un espace vectoriel de dimension quelconque sur un corps $\mathbb{K}$ désignant $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{C}$.

Malgré tout, beaucoup des exercices traités et des théorèmes abordés le seront dans le cadre de la dimension finie.

I. Sous-espaces stables

I.1. Définition

Soit u un endomorphisme de E . Un sous-espace F de E est **stable par u** lorsque $u(F) \subset F$.

On peut alors définir la **restriction** de u à F , appelée endomorphisme induit par u sur F , notée $u_F : F \rightarrow F$, $u_F(x) = u(x)$.

Remarque. Si D est une droite stable par u , alors l'endomorphisme induit par u sur D est une homothétie.

Exemple. Pour tout endomorphisme u , $\text{Ker}(u)$ et $\text{Im}(u)$ sont stables par u .

Exercice : Si u et v sont deux endomorphismes qui commutent, alors $\text{Im}(u)$ et $\text{Ker}(u)$ sont stables par v . (*Démonstration : II. 3a*)

I.2. Proposition

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie n , u un endomorphisme de E , et F un sous-espace vectoriel de E de dimension r .

- Si F est stable par u , alors si $\mathcal{B}$ est une base de E adaptée à F , la matrice de u dans la base $\mathcal{B}$ est de la forme :

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = \begin{pmatrix} A & C \\ 0_{n-r,r} & D \end{pmatrix} \quad \text{avec } A \in \mathcal{M}_r(\mathbb{K}), D \in \mathcal{M}_{n-r}(\mathbb{K}), C \in \mathcal{M}_{r,n-r}(\mathbb{K}).$$

- Réciproquement, s'il existe une base $\mathcal{B}$ de E adaptée à F dans laquelle la matrice de u est de la forme précédente, alors F est stable par u .

I.3. Corollaire

Soit E un espace vectoriel de dimension finie, u un endomorphisme de E , et $\mathcal{B} = (e_i)_{1 \leq i \leq n}$ une base fixée de E . La matrice de u dans la base $\mathcal{B}$ est diagonale si et seulement si chaque droite vectorielle $\mathbb{K}e_i$ est stable par u .

Exemple. Tout projecteur p et toute symétrie $s = 2p - \text{Id}_E$ a une matrice diagonale dans une base adaptée à $E = \text{Im}(p) \oplus \text{Ker}(p)$.

I.4. Proposition

Soient $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, $D \in \mathcal{M}_p(\mathbb{K})$ et $C \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K})$, alors :

$$\det \begin{pmatrix} A & C \\ 0 & D \end{pmatrix} = \det(A) \det(D).$$

Démonstration : On écrit $\begin{pmatrix} A & C \\ 0 & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_n & 0 \\ 0 & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & C \\ 0 & I_p \end{pmatrix}$. En développant $\det \begin{pmatrix} I_n & 0 \\ 0 & D \end{pmatrix}$ par rapport à la première ligne, on obtient $\det(D)$. En développant $\det \begin{pmatrix} A & C \\ 0 & I_p \end{pmatrix}$ par rapport à la dernière ligne, on obtient $\det(A)$. □

I.5. Proposition

Soit E un espace vectoriel de dimension finie, u un endomorphisme de E , et $\mathcal{B} = (e_i)_{1 \leq i \leq n}$ une base fixée de E . La matrice de u est triangulaire supérieure dans la base $\mathcal{B}$ si et seulement si chacun des sous-espaces $\text{Vect}(e_1, \dots, e_i)$, pour $i \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$, est stable par u .

II. Éléments propres

II.1. Éléments propres d'un endomorphisme

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

Définition. • On dit que $\lambda \in \mathbb{K}$ est **valeur propre** de u s'il existe un vecteur **non nul** $x \in E$ tel que $u(x) = \lambda x$.

- On dit que $x \in E$ est un **vecteur propre** de u associé à la valeur propre λ , s'il est non nul et vérifie $u(x) = \lambda x$.
- Si $\lambda \in \mathbb{K}$ est valeur propre de u , on appelle **sous-espace propre** associé à λ , noté $E_\lambda(u)$, l'ensemble $\text{Ker}(u - \lambda \text{Id}_E) = \{x \in E, u(x) = \lambda x\}$.

Remarques. • Un vecteur propre n'est associé qu'à une seule valeur propre.

- $E_\lambda(u)$ est non réduit à $\{0\}$ si et seulement si λ est valeur propre de u .
- **Lien avec le noyau :** u admet 0 comme valeur propre si et seulement si u n'est pas injectif. De plus $E_0(u) = \text{Ker}(u)$.
- En dimension finie, l'ensemble des valeurs propres d'un endomorphisme u , appelé **spectre** de u , se note $\text{Sp}(u)$.

Chercher les éléments propres d'un endomorphisme revient à en déterminer le spectre et les espaces propres correspondants.

II.2. Une question importante : un endomorphisme admet-il toujours une valeur propre ?

Soit $E = \mathbb{R}[X]$ et $u \in \mathcal{L}(E)$ défini par $u(P) = X \cdot P$. Montrer que $\forall \lambda \in \mathbb{K}$, l'égalité $XP = \lambda P$ est impossible. Répondre à la question initiale.

II.3. Exemples d'éléments propres pour des endomorphismes remarquables

Homothétie. Tout vecteur non nul est vecteur propre de l'homothétie λId pour la valeur propre λ . Cette homothétie admet λ comme unique valeur propre.

Projecteur. De façon générale, tout sous-espace propre associé à une valeur propre non nulle est inclus dans $\text{Im}(u)$.

Démonstration : Si $x \in \text{Ker}(u - \lambda \text{Id}_E)$, alors $x = u(\frac{x}{\lambda}) \in \text{Im}(u)$. Ainsi, si λ est une valeur propre non nulle d'un projecteur p , alors $E_\lambda(p) \subset \text{Im}(p)$. Or la restriction de p à $\text{Im}(p)$ est l'identité, donc $\lambda = 1$. $\square$

Il ne peut donc y avoir que deux valeurs propres possibles : 1 et 0. On vérifie que $E_0(p) = \text{Ker}(p)$ et $E_1(p) = \text{Ker}(p - \text{Id}_E) = \text{Im}(p)$.

II.4. Propriétés

Proposition (Proposition 1). Si deux endomorphismes commutent, les sous-espaces propres de l'un sont conservés par l'autre.

Démonstration : Soit λ une valeur propre de u , et $x \in \text{Ker}(u - \lambda \text{Id}_E)$. Montrons que $v(x) \in \text{Ker}(u - \lambda \text{Id}_E)$. On a $u(v(x)) = v(u(x))$ car u et v commutent. Or $v(u(x)) = v(\lambda x) = \lambda v(x)$, donc $u(v(x)) - \lambda v(x) = 0$, soit $v(x) \in \text{Ker}(u - \lambda \text{Id}_E)$. $\square$

Proposition (Proposition 2). Si F est un sous-espace de E stable par u , alors les valeurs propres de l'endomorphisme induit u_F sont les valeurs propres de u telles que $E_\lambda(u) \cap F \neq \{0\}$. On a alors : $E_\lambda(u_F) = E_\lambda(u) \cap F$.

Remarque. On a ainsi : $\text{Sp}(u_F) \subset \text{Sp}(u)$.

Proposition (Proposition 3). Si $(\lambda_i)_{i \in I}$ est une famille finie de valeurs propres de u , deux à deux distinctes, alors les sous-espaces propres associés $E_{\lambda_i}(u)$, $i \in I$, sont en somme directe.

Démonstration : On raisonne par récurrence sur le nombre p de valeurs propres distinctes.

Initialisation : pour $p = 1$, c'est évident.

Hérédité : supposons le résultat vrai jusqu'au rang p . Soient $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_p$ valeurs propres deux à deux distinctes. Soit $(x_0, x_1, \dots, x_p) \in E_{\lambda_0} \times \dots \times E_{\lambda_p}$ tel que $x_0 + \dots + x_p = 0$.

En appliquant u : $\lambda_0 x_0 + \dots + \lambda_p x_p = 0$.

Par soustraction de λ_0 fois la première équation : $\sum_{i=1}^p (\lambda_i - \lambda_0) x_i = 0$.

Par hypothèse de récurrence appliquée à $E_{\lambda_1}, \dots, E_{\lambda_p}$: $(\lambda_i - \lambda_0) x_i = 0$ pour tout $i \in \llbracket 1, p \rrbracket$. Comme $\lambda_i \neq \lambda_0$, on a $x_i = 0$. Puis $x_0 = 0$.

Ainsi $x_0 = x_1 = \dots = x_p = 0$, et les sous-espaces propres sont en somme directe. $\square$

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

Remarque. Le sous-espace propre associé à une valeur propre ne contient pas que des vecteurs propres : le vecteur nul n'est pas un vecteur propre !

II.5. Cas de la dimension finie

Proposition (Proposition 1). Si E est de dimension finie et si $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ sont les valeurs propres de u , deux à deux distinctes, alors :

$$\sum_{i=1}^p \dim(E_{\lambda_i}(u)) \leq \dim(E).$$

Démonstration : Évident puisque les $E_{\lambda_i}(u)$ sont en somme directe. $\square$

Proposition (Proposition 2). Le spectre d'un endomorphisme d'un espace vectoriel de dimension finie n a au plus n éléments.

Démonstration : Une famille libre maximale est de taille au plus n . Or toute famille de vecteurs propres associés à des valeurs propres distinctes est libre, donc de rang inférieur à n . $\square$

II.6. Éléments propres d'une matrice

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

- On dit que $\lambda \in \mathbb{K}$ est **valeur propre** de A s'il existe $X \in \mathbb{K}^n$ non nul tel que $AX = \lambda X$.
- On dit que $X \in \mathbb{K}^n$ est un **vecteur propre** de A associé à λ s'il est non nul et vérifie $AX = \lambda X$.
- Si λ est valeur propre de A , le **sous-espace propre** associé est $E_\lambda(A) = \text{Ker}(A - \lambda I_n) = \{X \in \mathbb{K}^n, AX = \lambda X\}$.

Remarques. • Le scalaire λ est valeur propre de A si et seulement si $A - \lambda I_n$ est non inversible.

- Si $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, alors A admet au plus n valeurs propres.

Exemple. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ triangulaire supérieure. Montrer que les valeurs propres de A sont les éléments diagonaux.

Démonstration : Soit $\lambda \in \mathbb{K}$. La matrice $A - \lambda I_n$ est triangulaire avec diagonale $(a_{11} - \lambda, \dots, a_{nn} - \lambda)$, dont le déterminant est $(a_{11} - \lambda) \cdots (a_{nn} - \lambda)$. Celui-ci est nul si et seulement si $\lambda \in \{a_{11}, \dots, a_{nn}\}$. $\square$

Proposition. Soit A une matrice représentant un endomorphisme u dans une base $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$. On a $\text{Sp}(u) = \text{Sp}(A)$ et pour tout $\lambda \in \text{Sp}(u)$:

$$x = \sum_{i=1}^n x_i e_i \in E_\lambda(u) \iff X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in E_\lambda(A).$$

Remarque. On a $\text{Sp}(u) = \text{Sp}(A)$ mais $E_\lambda(u) \neq E_\lambda(A)$, en effet $E_\lambda(u) \subset E$ et $E_\lambda(A) \subset \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$.

Corollaire. Deux matrices semblables ont le même spectre et les sous-espaces propres associés sont de même dimension.

Démonstration : En réalité, deux matrices semblables représentent le même endomorphisme. $\square$

Exemple (Étude d'un exemple). Soit $A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$. Déterminer $\text{Sp}_{\mathbb{R}}(A)$ et $\text{Sp}_{\mathbb{C}}(A)$.

On calcule $\det(\lambda I_2 - A) = \lambda^2 + 1$, donc $\text{Sp}_{\mathbb{R}}(A) = \emptyset$ et $\text{Sp}_{\mathbb{C}}(A) = \{i, -i\}$.

III. Polynôme caractéristique

III.1. Polynôme caractéristique d'une matrice

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

Proposition. Il existe un unique polynôme, appelé **polynôme caractéristique** de A , noté χ_A , tel que :

$$\forall \lambda \in \mathbb{K}, \quad \chi_A(\lambda) = \det(\lambda I_n - A).$$

Remarque. Si A est une matrice réelle, son polynôme caractéristique est identique, que l'on voie A comme matrice réelle ou complexe.

Proposition. On a : $\chi_A = \chi_{A^T}$.

Démonstration : Il suffit de remarquer qu'une matrice et sa transposée ont le même déterminant. $\square$

Proposition (Développement partiel — petit théorème de Cayley-Hamilton).

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

Corollaire : Pour $A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{K})$, $\chi_A = X^2 - (\text{tr } A)X + \det(A)$.

Démonstration : Par récurrence sur n , avec la convention qu'un déterminant de taille nulle vaut 1. $\square$

Proposition. Deux matrices semblables ont même polynôme caractéristique.

Démonstration : $\chi_{P^{-1}AP}(X) = \det(XI_n - P^{-1}AP) = \det(P^{-1}) \det(XI_n - A) \det(P) = \det(XI_n - A)$. $\square$

Exemple. Soit $A = \begin{pmatrix} 3 & 5 & -6 \\ 4 & 7 & -9 \\ 3 & 6 & -7 \end{pmatrix}$. Déterminer le polynôme caractéristique de A .

III.2. Polynôme caractéristique et spectre

Proposition. Un scalaire $\lambda \in \mathbb{K}$ est valeur propre de A si et seulement s'il est racine du polynôme caractéristique de A .

Exemple. Avec $A = \begin{pmatrix} 3 & 5 & -6 \\ 4 & 7 & -9 \\ 3 & 6 & -7 \end{pmatrix}$, déterminer $\text{Sp}_{\mathbb{C}}(A)$ et les éléments propres sur $\mathbb{R}$.

Remarque. Nous avons vu qu'en dimension quelconque un endomorphisme n'a pas forcément de valeur propre, et qu'en dimension finie n il en a au plus n distinctes.

- **Sur $\mathbb{C}$:** tout endomorphisme d'un espace de dimension finie possède *au moins* une valeur propre (théorème de d'Alembert-Gauss).
- **Sur $\mathbb{R}$, n impair :** un endomorphisme possède au moins une valeur propre (théorème des valeurs intermédiaires).

III.3. Polynôme caractéristique d'un endomorphisme

On suppose E de dimension finie et $u \in \mathcal{L}(E)$.

Définition. On appelle **polynôme caractéristique de u** l'unique polynôme vérifiant :

$$\forall \lambda \in \mathbb{K}, \quad \chi_u(\lambda) = \det(\lambda \text{Id}_E - u).$$

Remarque. Le polynôme caractéristique d'un endomorphisme correspond à celui de sa matrice dans n'importe quelle base. La notion n'a aucun sens si E n'est pas de dimension finie.

Proposition. Un scalaire $\lambda \in \mathbb{K}$ est valeur propre de u si et seulement s'il est racine de χ_u .

Démonstration : Par définition, λ est valeur propre de u si et seulement si $u - \lambda \text{Id}_E$ n'est pas inversible, c'est-à-dire $\det(\lambda \text{Id}_E - u) = 0$. $\square$

III.4. Ordre de multiplicité d'une valeur propre

Définition. On appelle **ordre de multiplicité** d'une valeur propre λ de u , son ordre de multiplicité en tant que racine du polynôme caractéristique de u . On le note $m(\lambda)$. On parle de valeur propre simple, double, triple, etc.

Proposition. Pour $\lambda \in \text{Sp}(u)$, on a :

$$1 \leq \dim(E_\lambda(u)) \leq m(\lambda).$$

Corollaire : Si λ est valeur propre simple de u , alors $\dim(E_\lambda(u)) = 1$.

Démonstration : Posons $n(\lambda) = \dim(E_\lambda(u))$. Comme $E_\lambda(u) \neq \{0\}$, on a $1 \leq n(\lambda)$. De plus, $E_\lambda(u)$ est stable par u , donc la restriction de u à $E_\lambda(u)$ est l'homothétie λId , de polynôme caractéristique $(X - \lambda)^{n(\lambda)}$, qui divise χ_u . Donc $n(\lambda) \leq m(\lambda)$. $\square$

Remarque. Si $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ désignent les valeurs propres distinctes de u , alors :

$$\chi_u = Q \prod_{i=1}^p (X - \lambda_i)^{m(\lambda_i)},$$

où $Q \in \mathbb{K}[X]$ n'a pas de racine dans $\mathbb{K}$.

IV. Diagonalisation

Dans ce paragraphe, E est de dimension finie.

Définition. L'endomorphisme u est dit **diagonalisable** s'il existe une base $\mathcal{B}$ de E dans laquelle la matrice représentative de u est diagonale.

Une matrice A est dite **diagonalisable** si elle est semblable à une matrice diagonale, c'est-à-dire s'il existe une matrice D diagonale et une matrice P inversible telles que $A = PDP^{-1}$.

Proposition. Soit u un endomorphisme de E et A une matrice représentant u . Alors u est diagonalisable si et seulement si A l'est.

Terminologie et exemple. Diagonaliser u (ou A), c'est déterminer une base dans laquelle la matrice de u est diagonale (ou une matrice semblable à A et diagonale).

Exemple. Soit $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 4 \end{pmatrix}$. Déterminer une base de $\mathbb{R}^2$ dans laquelle la matrice représentative de A est diagonale.

IV.1. Premières conditions de diagonalisabilité

Proposition. Si E est de dimension n et si $u \in \mathcal{L}(E)$ possède n valeurs propres distinctes, alors u est diagonalisable (et chaque sous-espace propre est de dimension 1).

Remarque. Il ne s'agit que d'une condition *suffisante* et non nécessaire.

Exemple. Montrer que $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 6 \end{pmatrix}$ est diagonalisable.

Exemple. Montrer que $B = \begin{pmatrix} \pi & 1 & 2 \\ 0 & \pi & 3 \\ 0 & 0 & \pi \end{pmatrix}$ n'est pas diagonalisable.

Ce raisonnement est très commode pour démontrer qu'un endomorphisme ne possédant qu'une seule valeur propre n'est pas diagonalisable.

Proposition.

$$u \text{ diagonalisable} \iff \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp}(u)} E_{\lambda}(u) = E \iff \sum_{\lambda \in \text{Sp}(u)} \dim(E_{\lambda}(u)) = \dim(E).$$

$$A \text{ diagonalisable} \iff \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp}(A)} E_{\lambda}(A) = \mathbb{K}^n \iff \sum_{\lambda \in \text{Sp}(A)} \dim(E_{\lambda}(A)) = n.$$

Exemple. Soit $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$. Montrer que A est diagonalisable.

IV.2. Diagonalisation et polynôme caractéristique

Proposition. <https://youtu.be/5kFv1-nhXjk>

Si le polynôme caractéristique de u (resp. A) est scindé à racines simples, alors u (resp. A) est diagonalisable.

Remarque. Il s'agit d'une condition suffisante.

Démonstration : Supposons que u admette n valeurs propres distinctes $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. Pour chaque $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, il existe $e_i \in E_{\lambda_i}$. La famille $(e_1, \dots, e_n)$ est libre (vecteurs propres associés à des valeurs propres distinctes) et donc forme une base de E . Or les espaces propres sont en somme directe, donc :

$$n \leq \sum_{i=1}^n \dim(E_{\lambda_i}) \leq \dim(E) = n.$$

Donc pour tout i , E_{λ_i} est une droite vectorielle. □

Proposition (Critère de diagonalisabilité). L'endomorphisme u est diagonalisable si et seulement si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

C1 : Le polynôme caractéristique de u est **scindé** sur $\mathbb{K}$.

C2 : Pour toute valeur propre de u , la dimension du sous-espace propre associé est égale à la multiplicité :

$$\forall \lambda \in \text{Sp}(u), \quad \dim(E_{\lambda}(u)) = m(\lambda).$$

Remarques. • Le résultat reste valide pour les matrices.

- Si le polynôme caractéristique n'est pas scindé, l'endomorphisme n'est pas diagonalisable.
- **Théorème admis dans ce cours (trigonalisabilité) :** tout endomorphisme d'un $\mathbb{C}$ -espace vectoriel de dimension finie est trigonalisable, c'est-à-dire sa matrice est semblable à une matrice triangulaire supérieure.

Démonstration : Soit $\chi_u = Q \prod_{\lambda \in \text{Sp}(u)} (X - \lambda)^{m(\lambda)}$ avec Q sans racine sur $\mathbb{K}$. On a :

$$\sum_{\lambda \in \text{Sp}(u)} \dim(E_{\lambda}(u)) \leq \sum_{\lambda \in \text{Sp}(u)} m(\lambda) = \dim(E) - \deg(Q).$$

Or u est diagonalisable si et seulement si $\sum_{\lambda \in \text{Sp}(u)} \dim(E_{\lambda}(u)) = \dim(E)$, ce qui est équivalent à $\deg(Q) = 0$ et $\dim(E_{\lambda}(u)) = m(\lambda)$ pour tout λ . □

V. Applications

V.1. Calcul de puissances

On donne $A = \begin{pmatrix} 0 & 2 & -1 \\ 3 & -2 & 0 \\ -2 & 2 & 1 \end{pmatrix}$.

- a) Diagonaliser A .
- b) Construire la matrice de passage P telle que $A = PDP^{-1}$ avec D diagonale.
- c) Calculer A^n pour $n \in \mathbb{N}$.

Démonstration : Le polynôme caractéristique est $(X-1)(X-2)(X+4)$. Il reste à écrire $A = PDP^{-1}$, puis $A^n = PD^nP^{-1}$. □

V.2. Résolution de systèmes ou de suites récurrentes

Déterminer les trois suites (u_n) , (v_n) et (w_n) définies par $u_0 = 1$, $v_0 = w_0 = 0$ et :

$$\begin{cases} u_{n+1} = 2u_n + 4w_n \\ v_{n+1} = 3u_n - 4v_n + 12w_n \\ w_{n+1} = u_n - 2v_n + 5w_n \end{cases}$$

Démonstration : La matrice associée au système a pour polynôme caractéristique $X(X-2)(X-1)$. Les vecteurs propres sont respectivement $(-4, 3, 2)$, $(2, 1, 0)$ et $(-4, 0, 1)$. On construit la matrice de passage P . $\square$

V.3. Résolution de systèmes d'équations différentielles

Exemple n°1. Résoudre le système différentiel :

$$\begin{cases} x' = 4x - 2y \\ y' = x + y \end{cases}$$

Démonstration : Le polynôme caractéristique est $(X-2)(X-3)$. Des vecteurs propres possibles : $(1, 1)$ et $(2, 1)$. On construit la matrice de passage P . $\square$

Exemple n°2. Résoudre le système différentiel :

$$\begin{cases} x' = x + 8y + e^t \\ y' = 2x + y + e^{-3t} \end{cases}$$

Démonstration : Le polynôme caractéristique est $(X-5)(X+3)$. Des vecteurs propres possibles : $(2, 1)$ et $(-2, 1)$. On construit la matrice de passage P . $x(t) = 2A e^{5t} - \left(2B + t + \frac{1}{4}\right) e^{-3t}$

$$y(t) = A e^{5t} + \left(B + \frac{t}{2}\right) e^{-3t} - \frac{1}{8} e^t$$

$\square$

VI. Exercices

Exercice n°1

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ une matrice à coefficients positifs telle que la somme des coefficients de chaque ligne est égale à 1.

- Montrer que 1 est valeur propre de A , associée par exemple au vecteur propre X dont chaque coordonnée est 1.
- Montrer que si $\lambda \in \mathbb{C}$ est valeur propre de A , alors $|\lambda| \leq 1$.
Il pourra être judicieux d'évaluer $AX = \lambda X$ avec $X = (x_1, \dots, x_n)$ et d'exploiter la ligne i_0 correspondant à $|x_{i_0}| = \sup(|x_1|, \dots, |x_n|)$.

Exercice n°2

Une matrice $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est dite *pseudo-magique* s'il existe un réel $S(A)$ tel que : $\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$,

$$\sum_{k=1}^n a_{ik} = \sum_{k=1}^n a_{kj} = S(A).$$

Soit $\mathcal{E}$ l'ensemble des matrices pseudo-magiques de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et J la matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ dont tous les coefficients sont égaux à 1.

- Vérifier que $\mathcal{E}$ est un sous-espace vectoriel de $(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}), +, \cdot)$.
- Montrer que A est pseudo-magique si et seulement s'il existe un réel μ tel que $AJ = JA = \mu J$.
- Soit $A \in \mathcal{E}$ inversible. Montrer que $S(A) \neq 0$ et que $A^{-1} \in \mathcal{E}$. Que vaut $S(A^{-1})$?
- Soit $A \in \mathcal{E}$. Montrer que $S(A)$ est valeur propre de A .

Exercice n°3 (oral de concours)

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ vérifiant $\text{rg}(A) = 1$. Montrer qu'il existe $\lambda \in \mathbb{K}$ tel que $A^2 = \lambda A$, et que ce scalaire est valeur propre de A .

Exercice n°4 (oral de concours)

Soient $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. On veut montrer que $\chi_{AB} = \chi_{BA}$.

- a) Établir l'égalité quand $A \in GL_n(\mathbb{C})$.
- b) Pour $A \notin GL_n(\mathbb{C})$, justifier que pour $t \neq 0$ suffisamment petit, $A + tI_n \in GL_n(\mathbb{C})$, et en déduire l'égalité en général.

Exercice n°5

Montrer que $A = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 2 \\ -2 & 5 & 2 \\ 2 & -3 & 0 \end{pmatrix}$ est diagonalisable, et la diagonaliser.

Exercice n°6

Diagonaliser $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -2 \\ 2 & 1 & -2 \\ 2 & 2 & -3 \end{pmatrix}$.

Exercice n°7 (les deux questions sont indépendantes)

- a) Soit $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ et $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ ses valeurs propres complexes (distinctes ou non). Montrer que :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{i,j} a_{j,i}.$$

- b) Soit $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$, $B \in \mathcal{M}_{p,n}(\mathbb{R})$ et $x \in \mathbb{R}^*$. En utilisant les produits par blocs :

$$\begin{pmatrix} I_n & -A \\ 0 & I_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} xI_n & A \\ B & I_p \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} I_n & 0 \\ -\frac{1}{x}B & I_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} xI_n & A \\ B & I_p \end{pmatrix}.$$

comparer les polynômes caractéristiques de AB et BA .

Exercice n°8 <https://youtu.be/RpKMeILyHis>

u un endomorphisme d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E tel que tout vecteur non nul en soit un vecteur propre. Montrer que u est une homothétie vectorielle.

Exercice n°9

- a) Soit f un endomorphisme d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E de dimension finie. Montrer que $0 \notin \text{Sp}(f)$ est équivalent à f surjectif.
- b) Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel, u un endomorphisme de E , $a \in \text{GL}(E)$ et $v = a \circ u \circ a^{-1}$. Comparer $\text{Sp}(u)$ et $\text{Sp}(v)$ d'une part, et $a(E_\lambda(u))$ et $E_\lambda(v)$ d'autre part.

Exercice n°10

Soit f un endomorphisme d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel et n un entier naturel non nul. On suppose que $0 \in \text{Sp}(f^n)$. Montrer que $0 \in \text{Sp}(f)$.

Exercice n°11

Soit u un automorphisme d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E . Établir que $\text{Sp}(u^{-1}) = \{\lambda^{-1} \mid \lambda \in \text{Sp}(u)\}$.

Exercice n°12

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ inversible de polynôme caractéristique χ_A .

- a) Exprimer $\det(A)$ en fonction de $\chi_A(0)$.
- b) Déterminer, pour $x \neq 0$, $\chi_{A^{-1}}(x)$ en fonction de χ_A , $\chi_A(0)$ et x^n .

Exercice n°13

Soit $A = \begin{pmatrix} 11 & -5 & 5 \\ -5 & 3 & -3 \\ 5 & -3 & 3 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_3(\mathbb{R})$. Déterminer $B \in \mathcal{M}_3(\mathbb{R})$ telle que $B^2 = A$.

Exercice n°14

Soient u et v deux endomorphismes d'un $\mathbb{C}$ -espace vectoriel E de dimension finie. On suppose que u et v commutent. Démontrer que u et v ont un vecteur propre commun.

Exercice n°15 <https://youtu.be/G-d5aiZbp4o>

Soit φ l'endomorphisme de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ défini par $\varphi(M) = {}^t M$.

- Montrer que φ est diagonalisable.
- Préciser les espaces propres de φ .
- Calculer la trace et le déterminant de φ .

Exercice n°16 (oraux de concours) Soit l'application $u : P \in \mathbb{R}_n[X] \mapsto P' - XP''$.

- Montrer que u est un endomorphisme de $\mathbb{R}_n[X]$.
- Trouver la seule valeur propre possible λ de u .
- L'endomorphisme u est-il diagonalisable ? inversible ?
- Calculer le sous-espace propre associé à λ .

Exercice n°17

Soit E un $\mathbb{C}$ -espace vectoriel de dimension finie.

- Justifier que tout endomorphisme de E possède au moins une valeur propre.
- Observer que l'endomorphisme φ de $\mathbb{C}[X]$ défini par $P(X) \mapsto (X-1)P(X)$ n'a pas de valeur propre.

Exercice n°18 (oral de concours) <https://youtu.be/lPh-a9sEb9o>

On considère $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

- Justifier que A est diagonalisable.
- Déterminer les valeurs propres et une base de vecteurs propres.
- Résoudre le système différentiel
$$\begin{cases} x' = x + 2z \\ y' = y \\ z' = 2x + z \end{cases}$$
 en utilisant la question 1.

Exercice n°19

Soit $A = \begin{pmatrix} 0 & -8 & 6 \\ -1 & -8 & 7 \\ 1 & -14 & 11 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_3(\mathbb{R})$. Montrer que A est inversible et calculer A^k pour tout $k \in \mathbb{Z}$.

Exercice n°20 <https://youtu.be/hpbagnXYCLI>

Résoudre le système différentiel :

$$\begin{cases} x' = y + z \\ y' = x \\ z' = x + y + z \end{cases}$$

Exercice n°21 (oraux Écricome) <https://youtu.be/JJyOn7EuH0E>

On considère la matrice $A = \begin{pmatrix} 7 & 2 \\ -4 & 1 \end{pmatrix}$.

- (a) Calculer les valeurs propres de A .
(b) Déterminer les sous-espaces propres de A .
- En déduire qu'il existe une matrice inversible P et une matrice diagonale D telles que $A = PDP^{-1}$.
- Exprimer, pour tout entier naturel n , A^n sous forme de tableau matriciel.
- Soit (u_n) et (v_n) les suites définies par : $u_0 = 1$, $v_0 = 1$ et pour tout entier naturel n :

$$\begin{cases} u_{n+1} = 7u_n + 2v_n \\ v_{n+1} = -4u_n + v_n \end{cases}$$

- On note $X_n = \begin{pmatrix} u_n \\ v_n \end{pmatrix}$. Exprimer X_{n+1} en fonction de A et X_n .
- En déduire l'expression, pour tout entier naturel n , de u_n et v_n en fonction de n .

Exercice n°22

Soient $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})^2$ tels que $\text{Sp}(A) \cap \text{Sp}(B) = \emptyset$.

- Montrer que $\chi_A(B)$ est inversible.
- Montrer que pour tout $X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$: $AX = XB \iff X = 0_n$.
- Montrer que pour tout $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, il existe une unique $X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ telle que $M = AX - XB$.

Exercice n°23

On suppose que $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ possède n valeurs propres deux à deux distinctes.

- Montrer que si $B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ commute avec A , alors A et B sont diagonalisables via la même matrice de passage.
- On veut résoudre $X^2 = A$.

- Montrer que les solutions commutent avec A .
- En déduire les solutions, exprimées en fonction des valeurs propres de A .

$$\text{c) Résoudre } X^2 = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 8 & 4 & 0 \\ 5 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Exercice n°24 (Oral PC ENS 2024)

Soit $J = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$. Résoudre dans $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$ l'équation $A^2 + A = J$. (*Indication : procéder en analyse-synthèse. On utilisera $\chi_A = X^2 - (\text{tr } A)X + \det(A)$ et on admettra le grand théorème de Cayley-Hamilton permettant d'affirmer que $\chi_A(A) = 0$.*)