

Valeurs propres, vecteurs propres

Dans ce chapitre, nous allons définir et étudier les valeurs propres et les vecteurs propres d'une matrice. Ce chapitre peut être vu comme un cours minimal pour comprendre la diagonalisation ou comme une introduction à la théorie de la réduction des endomorphismes.

Notations.

\mathbb{K} est un corps. Dans les exemples de ce chapitre, \mathbb{K} sera \mathbb{R} ou \mathbb{C} . Les matrices seront des éléments de $M_n(\mathbb{K})$, c'est-à-dire des matrices carrées, de taille $n \times n$, à coefficients dans \mathbb{K} .

1. Valeurs propres et vecteurs propres

1.1. Motivation

Voici deux transformations simples définies par une matrice :

1.

$$h : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2x \\ 2y \end{pmatrix}$$

L'application h est une homothétie de \mathbb{R}^2 (centrée à l'origine). Si D est une droite passant par l'origine, alors elle est globalement invariante par cette transformation, c'est-à-dire si $P \in D$ alors $h(P) \in D$ (mais on n'a pas $h(P) = P$). On retient ici que n'importe quel vecteur $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ est envoyé sur son double $2\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$.

2.

$$k : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2x \\ 3y \end{pmatrix}$$

L'application k n'est plus une homothétie. Cependant l'axe (Ox) est globalement invariant par k ; de même, l'axe (Oy) est globalement invariant. On retient qu'un vecteur du type $\begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix}$ est envoyé sur son double $2\begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix}$, alors qu'un vecteur du type $\begin{pmatrix} 0 \\ y \end{pmatrix}$ est envoyé sur son triple $3\begin{pmatrix} 0 \\ y \end{pmatrix}$.

Pour une matrice quelconque, il s'agit de voir comment on se ramène à ces situations géométriques simples. C'est ce qui nous amène à la notion de vecteurs propres et valeurs propres.

1.2. Définitions

Définition 1.

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

- λ est dite **valeur propre** de la matrice A s'il existe un vecteur non nul $X \in \mathbb{K}^n$ tel que

$$AX = \lambda X.$$

- Le vecteur X est alors appelé **vecteur propre** de A associé à la valeur propre λ .

1.3. Exemples

Exemple 1.

Soit $A \in M_3(\mathbb{R})$ la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ -2 & 11 & -2 \\ 8 & -7 & 6 \end{pmatrix}.$$

- Vérifions que $X_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ est vecteur propre de A .

En effet,

$$AX_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ -2 & 11 & -2 \\ 8 & -7 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} = -2 \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = -2X_1.$$

Donc X_1 est un vecteur propre de A associé à la valeur propre $\lambda_1 = -2$.

- Vérifions que $X_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$ est vecteur propre de A .

On calcule AX_2 et on vérifie que :

$$AX_2 = 13X_2$$

Donc X_2 est un vecteur propre de A associé à la valeur propre $\lambda_2 = 13$.

- Vérifions que $\lambda_3 = 7$ est valeur propre de A .

Il s'agit donc de trouver un vecteur $X_3 = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$ tel que $AX_3 = 7X_3$.

$$\begin{aligned} AX_3 = 7X_3 &\iff \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ -2 & 11 & -2 \\ 8 & -7 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = 7 \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \\ &\iff \begin{pmatrix} x_1 + 3x_2 + 3x_3 \\ -2x_1 + 11x_2 - 2x_3 \\ 8x_1 - 7x_2 + 6x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7x_1 \\ 7x_2 \\ 7x_3 \end{pmatrix} \\ &\iff \begin{cases} -6x_1 + 3x_2 + 3x_3 = 0 \\ -2x_1 + 4x_2 - 2x_3 = 0 \\ 8x_1 - 7x_2 - x_3 = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

On résout ce système linéaire et on trouve comme ensemble de solutions : $\left\{ \begin{pmatrix} t \\ t \\ t \end{pmatrix} \mid t \in \mathbb{R} \right\}$. Autrement dit,

les solutions sont engendrées par le vecteur $X_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

On vient de calculer que $AX_3 = 7X_3$. Ainsi X_3 est un vecteur propre de A associé à la valeur propre $\lambda_3 = 7$.

Exemple 2.

Soit

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

Le réel $\alpha = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ est une valeur propre de A . En effet :

$$A \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha \end{pmatrix}$$

Exemple 3.

Soit

$$A_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

la matrice de la rotation de l'espace d'angle θ et d'axe (Oz) . Soit $X_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Alors $A_\theta X_3 = X_3$. Donc X_3 est un vecteur propre de A_θ et la valeur propre associée est 1.

Exemple 4.

Soit

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

Le complexe $j = -\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{i\frac{2\pi}{3}}$ est une valeur propre de A . En effet :

$$A \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix} = j \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}$$

1.4. Cas d'une matrice diagonale

Le cas idéal est celui d'une matrice diagonale. Il est en effet très facile de lui trouver des valeurs propres et des vecteurs propres. C'est le but de la « diagonalisation » de se ramener à ce cas !

Exemple 5 (Cas d'une matrice diagonale).

Soit A la matrice diagonale

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{n-1} & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix}.$$

Alors les scalaires $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ sont des valeurs propres de A , admettant respectivement comme vecteurs propres associés :

$$X_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad \cdots \quad X_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

La preuve est immédiate. Le vecteur $X_i = \begin{pmatrix} \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix}$ (où toutes les coordonnées sont nulles, sauf 1 en position i)

vérifie en effet

$$AX_i = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{n-1} & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots \\ 0 \\ \lambda_i \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix} = \lambda_i X_i.$$

Conclusion : les éléments diagonaux sont des valeurs propres de A ! On verra plus loin dans ce chapitre qu'il n'y a pas d'autres valeurs propres.

1.5. Les vecteurs propres forment une famille libre

Théorème 1.

Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$. Soient $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ des valeurs propres distinctes de A , et soit X_i un vecteur propre associé à λ_i (pour $1 \leq i \leq r$). Alors les vecteurs X_1, X_2, \dots, X_r sont linéairement indépendants.

Démonstration. Raisonnons par récurrence sur r , le nombre de valeurs propres.

- **Initialisation.** Pour $r = 1$, la famille constituée du seul vecteur $\{X_1\}$ est toujours une famille libre, car X_1 est non nul.
- **Hérédité.** Supposons que X_1, X_2, \dots, X_{r-1} soient des vecteurs propres linéairement indépendants (où $r \geq 2$ est fixé). Soit λ_r une autre valeur propre, et soit X_r un vecteur propre associé. Soient $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{r-1}, \alpha_r \in \mathbb{K}$ tels que

$$\alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_{r-1} X_{r-1} + \alpha_r X_r = 0. \quad (1)$$

Ainsi

$$A(\alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_{r-1} X_{r-1} + \alpha_r X_r) = 0$$

donc

$$\alpha_1 A X_1 + \alpha_2 A X_2 + \dots + \alpha_{r-1} A X_{r-1} + \alpha_r A X_r = 0.$$

Comme les X_i sont des vecteurs propres, alors

$$\alpha_1 \lambda_1 X_1 + \alpha_2 \lambda_2 X_2 + \dots + \alpha_{r-1} \lambda_{r-1} X_{r-1} + \alpha_r \lambda_r X_r = 0. \quad (2)$$

À partir des équations (1) et (2), on calcule l'expression (2) - λ_r (1) :

$$\alpha_1 (\lambda_1 - \lambda_r) X_1 + \alpha_2 (\lambda_2 - \lambda_r) X_2 + \dots + \alpha_{r-1} (\lambda_{r-1} - \lambda_r) X_{r-1} = 0 \quad (3)$$

(le vecteur X_r n'apparaît plus dans cette identité). Comme la famille $\{X_1, X_2, \dots, X_{r-1}\}$ est une famille libre, alors la combinaison linéaire nulle (3) implique que tous ses coefficients sont nuls :

$$\alpha_1 (\lambda_1 - \lambda_r) = 0 \quad \alpha_2 (\lambda_2 - \lambda_r) = 0 \quad \dots \quad \alpha_{r-1} (\lambda_{r-1} - \lambda_r) = 0$$

Mais comme les valeurs propres sont distinctes alors $\lambda_i - \lambda_r \neq 0$ (pour $i = 1, \dots, r-1$). Ainsi

$$\alpha_1 = 0 \quad \alpha_2 = 0 \quad \dots \quad \alpha_{r-1} = 0.$$

En se souvenant qu'un vecteur propre n'est pas le vecteur nul, alors l'équation (1) implique en plus

$$\alpha_r = 0.$$

Bilan : on vient de prouver que la famille $\{X_1, X_2, \dots, X_r\}$ est une famille libre.

- **Conclusion.** Par le principe de récurrence, des vecteurs propres associés à des valeurs propres distinctes sont linéairement indépendants. □

Mini-exercices.

1. Soit $A = \begin{pmatrix} 2 & 5 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$. Montrer que $X_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ et $X_2 = \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \end{pmatrix}$ sont des vecteurs propres de A . Quelles sont les valeurs propres associées ? Même question avec $A = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 3 \end{pmatrix}$, $X_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ \sqrt{5}-1 \end{pmatrix}$, $X_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ -\sqrt{5}-1 \end{pmatrix}$.
2. Soit $A = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$. Montrer que $\lambda_1 = -2$, $\lambda_2 = -1$ et $\lambda_3 = 0$ sont valeurs propres de A . Pour chaque valeur propre, trouver un vecteur propre associé.
3. Quelles sont les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice identité I_n ? Et de la matrice nulle 0_n ?
4. Montrer qu'une matrice $A \in M_n(\mathbb{K})$ a au plus n valeurs propres distinctes (utiliser un résultat du cours).
5. Soit $A = \begin{pmatrix} 5 & -7 & 7 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 7 & -2 \end{pmatrix}$. Montrer que les vecteurs $X_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$, $X_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$, $X_3 = \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ sont vecteurs propres de A . Montrer que $\{X_1, X_2, X_3\}$ ne forme pas une famille libre. Est-ce que cela contredit un résultat du

⟨ cours ?

2. Polynôme caractéristique

Comment trouver les valeurs propres d'une matrice parmi tous les éléments de \mathbb{K} ?

2.1. Caractérisation des valeurs propres

Voici le résultat fondamental pour déterminer les valeurs propres.

Proposition 1.

Soient $A \in M_n(\mathbb{K})$ et $\lambda \in \mathbb{K}$. Alors :

$$\lambda \text{ est une valeur propre de } A \iff \det(A - \lambda I_n) = 0.$$

Rappel : I_n est la matrice identité de taille $n \times n$; quel que soit le vecteur $X \in \mathbb{K}^n$, $I_n \cdot X = X$.

Démonstration.

$$\begin{aligned} \lambda \text{ est une valeur propre de } A &\iff \exists X \in \mathbb{K}^n \setminus \{0\}, \quad AX = \lambda X \\ &\iff \exists X \in \mathbb{K}^n \setminus \{0\}, \quad (A - \lambda I_n)X = 0 \\ &\iff \text{Ker}(A - \lambda I_n) \neq \{0\} \\ &\iff A - \lambda I_n \text{ n'est pas injective} \\ &\iff A - \lambda I_n \text{ n'est pas inversible} \\ &\iff \det(A - \lambda I_n) = 0. \end{aligned}$$

□

2.2. Polynôme caractéristique

Nous transformons la caractérisation précédente en un outil pratique :

Définition 2.

Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$. Le **polynôme caractéristique** de A est

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

La proposition 1 devient alors :

$$\lambda \text{ valeur propre de } A \iff \chi_A(\lambda) = 0$$

Remarque.

- La matrice $A - XI_n$ est à coefficients dans $\mathbb{K}[X]$, donc son déterminant $\chi_A(X)$ appartient à $\mathbb{K}[X]$.
- On notera aussi souvent $\chi_A(\lambda) = \det(A - \lambda I_n)$ comme un polynôme en λ , plutôt que $\chi_A(X)$.
- Pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$, $\det(\lambda I_n - A) = (-1)^n \chi_A(\lambda)$.

La matrice A étant de taille $n \times n$, alors le polynôme caractéristique de A est un polynôme de degré n . Cela conduit aux propriétés suivantes :

Corollaire 1.

- Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$. Alors A admet au plus n valeurs propres.
- Si le corps $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, alors toute matrice $A \in M_n(\mathbb{C})$ admet au moins une valeur propre.

En effet, nous savons qu'un polynôme de degré n a au plus n racines. Et sur \mathbb{C} un polynôme non constant admet toujours au moins une racine.

Proposition 2.

Deux matrices semblables ont le même polynôme caractéristique. Autrement dit, si $B = P^{-1}AP$ alors $\chi_A(X) = \chi_B(X)$.

Démonstration. On écrit

$$B - XI_n = P^{-1}AP - X(P^{-1}I_nP) = P^{-1}(A - XI_n)P.$$

Mais on sait que le déterminant vérifie $\det(MN) = \det(M) \cdot \det(N)$ pour toutes matrices M et N et $\det(M^{-1}) = \frac{1}{\det(M)}$ pour une matrice M inversible. Donc

$$\chi_B(X) = \det(B - XI_n) = \frac{1}{\det(P)} \cdot \det(A - XI_n) \cdot \det(P) = \det(A - XI_n) = \chi_A(X).$$

□

2.3. Exemples

Reprenons les exemples du début de ce chapitre et traitons-les en utilisant le polynôme caractéristique.

Exemple 6.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ -2 & 11 & -2 \\ 8 & -7 & 6 \end{pmatrix}$$

Alors

$$\begin{aligned} \chi_A(X) &= \det(A - XI_3) \\ &= \det \left(\begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ -2 & 11 & -2 \\ 8 & -7 & 6 \end{pmatrix} - X \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right) \\ &= \begin{vmatrix} 1-X & 3 & 3 \\ -2 & 11-X & -2 \\ 8 & -7 & 6-X \end{vmatrix} \\ &= \dots \\ &= -X^3 + 18X^2 - 51X - 182 \\ &= -(X+2)(X-7)(X-13). \end{aligned}$$

Donc les valeurs propres sont :

$$-2, 7 \text{ et } 13.$$

Exemple 7.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Alors

$$\chi_A(X) = \begin{vmatrix} 0-X & 1 \\ 1 & 1-X \end{vmatrix} = X^2 - X - 1 = \left(X - \frac{1-\sqrt{5}}{2}\right) \left(X - \frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)$$

donc les valeurs propres sont :

$$\frac{1-\sqrt{5}}{2} \quad \text{et} \quad \frac{1+\sqrt{5}}{2}.$$

Exemple 8.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Alors :

$$\chi_A(X) = \begin{vmatrix} 0-X & 1 \\ -1 & -1-X \end{vmatrix} = X^2 + X + 1 = (X - j)(X - \bar{j})$$

où $j = -\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}$. Bilan :

- sur $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, la matrice A n'a aucune valeur propre,
- sur $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, la matrice A a deux valeurs propres : j et \bar{j} .

Exemple 9.

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Alors :

$$\chi_A(X) = \begin{vmatrix} \cos \theta - X & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta - X \end{vmatrix} = X^2 - 2 \cos(\theta)X + 1 = (X - e^{i\theta})(X - e^{-i\theta}).$$

Sur \mathbb{C} , les valeurs propres sont $e^{-i\theta}$ et $e^{i\theta}$.

Exemple 10 (Cas des matrices triangulaires).

Soit A une matrice triangulaire supérieure

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & \cdots & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Alors

$$\chi_A(X) = \begin{vmatrix} a_{11}-X & a_{12} & \cdots & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22}-X & \cdots & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & a_{nn}-X \end{vmatrix} = \prod_{i=1}^n (a_{ii} - X) = (-1)^n \prod_{i=1}^n (X - a_{ii}).$$

Le calcul de ce déterminant se fait d'abord en développant la première colonne, puis par récurrence. L'ensemble des valeurs propres est donc $\{a_{ii} \mid 1 \leq i \leq n\}$. On retient :

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

2.4. Coefficients du polynôme caractéristique

La somme et le produit des valeurs propres peuvent se calculer facilement à partir de la matrice.

Proposition 3.

Si une matrice $A \in M_n(\mathbb{K})$ admet n valeurs propres alors :

La somme des valeurs propres vaut $\text{tr } A$.

Le produit des valeurs propres vaut $\det A$.

Rappel : la **trace** de A , $\text{tr} A$, est la somme des coefficients diagonaux de A .

Cette proposition est évidente pour une matrice diagonale. Elle se démontre aussi facilement si la matrice est diagonalisable. Nous allons ici déduire cette proposition d'un résultat plus général sur les coefficients du polynôme caractéristique.

Proposition 4.

Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$. Soit $\chi_A(X)$ son polynôme caractéristique. C'est un polynôme de degré n qui vérifie :

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

Exemple 11.

Voici le cas $n = 2$. Soit $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$. On a

$$\chi_A(X) = \begin{vmatrix} a-X & b \\ c & d-X \end{vmatrix} = (a-X)(d-X) - bc = X^2 - \underbrace{(a+d)}_{\text{tr} A} X + \underbrace{ad-bc}_{\det A}.$$

Exemple 12.

Si $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$ sont les valeurs propres de A , alors le polynôme caractéristique s'écrit aussi

$$\chi_A(X) = (-1)^n (X - \lambda_1)(X - \lambda_2) \cdots (X - \lambda_n).$$

En développant cette expression, on trouve

$$\chi_A(X) = (-1)^n \left(X^n - (\lambda_1 + \cdots + \lambda_n) X^{n-1} + \cdots + (-1)^n (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdots \lambda_n) \right).$$

En identifiant ce polynôme avec l'expression de la proposition 4, on obtient la proposition 3.

Voici les grandes lignes de la preuve de la proposition 4 (on reviendra sur cette preuve dans le chapitre suivant « Diagonalisation »).

Démonstration. Si $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$, on a

$$\chi_A(X) = \begin{vmatrix} a_{11}-X & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22}-X & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn}-X \end{vmatrix}.$$

On a alors :

- Le polynôme $\chi_A(X)$ est de degré n .
- Les termes de degré n et $n-1$ proviennent du produit

$$(a_{11} - X) \cdots (a_{nn} - X) = (-1)^n X^n + (-1)^{n-1} (\text{tr} A) X^{n-1} + \cdots$$

- Le terme constant, quant à lui, est donné par $\chi_A(0) = \det A$.

□

2.5. Matrice compagnon

Est-ce que n'importe quel polynôme peut être réalisé comme polynôme caractéristique ? La réponse est oui !

Proposition 5.

Soit $P(X) = X^n + c_{n-1}X^{n-1} + \cdots + c_1X + c_0 \in \mathbb{K}[X]$. Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$ la **matrice compagnon** du polynôme

$P :$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & \cdots & 0 & -c_0 \\ 1 & \ddots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -c_{n-1} \end{pmatrix}$$

Alors

$$\chi_A(X) = (-1)^n P(X).$$

Démonstration. La preuve est par récurrence sur $n \geq 1$.

Initialisation. Si $n = 1$ alors la matrice compagnon est la matrice $A = (-c_0)$, de taille 1×1 . Ainsi $\det(A - XI_1) = \det(-c_0 - X) = -X - c_0 = -P(X)$.

Hérédité. Fixons $n \geq 2$ et supposons la formule vraie pour des matrices compagnons de taille $(n-1) \times (n-1)$. Alors :

$$\begin{aligned} \chi_A(X) &= \det(A - XI_n) \\ &= \begin{vmatrix} -X & 0 & \cdots & 0 & -c_0 \\ 1 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & -X & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -X - c_{n-1} \end{vmatrix} && \text{on développe par rapport à la première ligne :} \\ &= (-X) \underbrace{\begin{vmatrix} -X & 0 & \cdots & 0 & -c_1 \\ 1 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & -X & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -X - c_{n-1} \end{vmatrix}}_{\text{polynôme caractéristique associé à une matrice compagnon de taille } (n-1) \times (n-1)} + (-1)^n c_0 \underbrace{\begin{vmatrix} 1 & -X & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & -X \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{vmatrix}}_{=1} \\ &= (-X) \left((-1)^{n-1} (X^{n-1} + c_{n-1}X^{n-2} + \cdots + c_1) \right) + (-1)^n c_0 \times 1 && \text{par hypothèse de récurrence} \\ &= (-1)^n (X^n + c_{n-1}X^{n-1} + \cdots + c_1X + c_0) \\ &= (-1)^n P(X) \end{aligned}$$

Conclusion. Par le principe de récurrence, la proposition est vérifiée pour tout $n \geq 1$. □

Exemple 13.

Soit A la matrice :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & \ddots & & \vdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \in M_n(\mathbb{C})$$

Alors $\chi_A(X) = (-1)^n (X^n - 1)$. Les valeurs propres de A sont donc les racines n -ièmes de l'unité.

Mini-exercices.

1. Calculer le polynôme caractéristique des matrices suivantes, et en déduire leurs valeurs propres :
 $A = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 7 & 4 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} -6 & 3 & -7 \\ 5 & 0 & 5 \\ 5 & -1 & 6 \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} -3 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 5 & 2 \end{pmatrix}$.
2. Calculer, à la main, les coefficients du polynôme caractéristique d'une matrice A de taille 3×3 :
 $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$.
3. Trouver plusieurs matrices de taille 2×2 dont la somme des valeurs propres fait 6 et le produit des valeurs propres fait 2.
4. Trouver une matrice, ni diagonale ni triangulaire, dont le polynôme caractéristique est $(X - 1)^2(X^2 + X + 1)$. Trouver une matrice, ni diagonale ni triangulaire, dont l'ensemble des valeurs propres est $\{0, 1, -1, i, -i\}$.

3. Diagonaliser à la main

Nous avons vu qu'une matrice A et une matrice semblable $P^{-1}AP$ ont le même polynôme caractéristique, donc les mêmes valeurs propres. Nous allons voir un critère simple (mais pas le plus général) pour obtenir une matrice $P^{-1}AP$ qui est diagonale, les coefficients diagonaux étant les valeurs propres de A .

3.1. Matrice diagonalisable

Définition 3.

Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$. On dit que A est **diagonalisable** sur \mathbb{K} s'il existe une matrice $P \in M_n(\mathbb{K})$ inversible telle que $P^{-1}AP$ soit une matrice diagonale.

Il y a beaucoup d'intérêt à se ramener à une matrice diagonale. Voici juste une application.

Exemple 14.

Soient

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & -4 \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -3 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad P^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{7} & -\frac{2}{7} \\ \frac{6}{7} & \frac{2}{7} \end{pmatrix}.$$

Alors

$$D = P^{-1}AP = \begin{pmatrix} -5 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \quad \text{donc} \quad D^k = \begin{pmatrix} (-5)^k & 0 \\ 0 & 2^k \end{pmatrix}.$$

La matrice D étant diagonale, la matrice A est diagonalisable. Calculons maintenant A^k .

Comme $D = P^{-1}AP$ alors $A = PDP^{-1}$, donc

$$A^k = (PDP^{-1})^k = \underbrace{(PDP^{-1})(PDP^{-1}) \cdots (PDP^{-1})}_{k \text{ occurrences}} = PD^kP^{-1}.$$

D'où

$$A^k = \begin{pmatrix} \frac{6}{7} \times 2^k + \frac{1}{7} \times (-5)^k & \frac{2}{7} \times 2^k - \frac{2}{7} \times (-5)^k \\ \frac{3}{7} \times 2^k - \frac{3}{7} \times (-5)^k & \frac{1}{7} \times 2^k + \frac{6}{7} \times (-5)^k \end{pmatrix}.$$

3.2. Un critère pour diagonaliser

Comment trouver cette matrice P qui permet de diagonaliser ?

Nous allons donner une méthode sous l'hypothèse que la matrice admette n valeurs propres distinctes. Nous verrons des critères plus puissants dans les chapitres suivants.

Proposition 6.

Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$ une matrice. Supposons que A admette n valeurs propres distinctes $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$. Soient X_1, \dots, X_n des vecteurs propres associés. Alors :

- La matrice A est diagonalisable.
- Si on note P la matrice dont les vecteurs colonnes sont les (X_1, \dots, X_n) , alors $D = P^{-1}AP$ est la matrice diagonale formée des valeurs propres de A .

Démonstration.

- Par le théorème 1, la famille (X_1, \dots, X_n) est une famille libre, car les valeurs propres sont distinctes. Comme cette famille possède n éléments, c'est une base de \mathbb{K}^n .
- La matrice P est inversible car ses vecteurs colonnes forment une base de \mathbb{K}^n . On pose $D = P^{-1}AP$.
- Notons (Y_1, \dots, Y_n) la base canonique de \mathbb{K}^n : $Y_i = \begin{pmatrix} \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix}$ (où le 1 est en position i). On remarque que la multiplication MY_i renvoie la i -ème colonne de la matrice M . En particulier, $PY_i = X_i$ et donc $Y_i = P^{-1}X_i$. Calculons DY_i pour chaque $1 \leq i \leq n$:

$$\begin{aligned} DY_i &= (P^{-1}AP)Y_i = (P^{-1}A)PY_i \\ &= (P^{-1}A)X_i = P^{-1}(AX_i) \\ &= P^{-1}(\lambda_i X_i) = \lambda_i P^{-1}X_i \\ &= \lambda_i Y_i \end{aligned}$$

Nous avons utilisé le fait que X_i est un vecteur propre associé à la valeur propre λ_i . Ainsi on vient de

prouver que la i -ème colonne de D , qui est DY_i , est aussi $\lambda_i Y_i = \begin{pmatrix} \vdots \\ 0 \\ \lambda_i \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix}$.

La matrice D est donc bien la matrice diagonale dont les coefficients sont les λ_i :

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix}$$

□

3.3. Méthode pour diagonaliser

Soit $A \in M_n(\mathbb{K})$ une matrice carrée $n \times n$. Pour essayer de la diagonaliser :

1. On calcule d'abord son polynôme caractéristique $\chi_A(X)$.
2. On cherche les racines de $\chi_A(X)$: ce sont les valeurs propres de A .

On suppose ici que l'on a trouvé n valeurs propres distinctes : $\lambda_1, \dots, \lambda_n$.

3. Pour chaque valeur propre λ_i de A , on cherche un vecteur propre X_i .
4. Soit P la matrice dont les vecteurs colonnes sont les (X_1, \dots, X_n) . Alors $D = P^{-1}AP$ est la matrice diagonale :

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix}$$

3.4. Exemples

Exemple 15.

Diagonalisons la matrice

$$A = \begin{pmatrix} 4 & -2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

1. Pour cela, on détermine ses valeurs propres :

$$\det(A - \lambda I) = \begin{vmatrix} 4 - \lambda & -2 \\ 1 & 1 - \lambda \end{vmatrix} = (4 - \lambda)(1 - \lambda) + 2 = \lambda^2 - 5\lambda + 6 = (\lambda - 2)(\lambda - 3).$$

2. Ainsi, la matrice A admet deux valeurs propres distinctes, qui sont $\lambda_1 = 2$ et $\lambda_2 = 3$. Par la proposition 6, elle est diagonalisable.

3. Déterminons une base de vecteurs propres. Tout d'abord pour $\lambda_1 = 2$:

$$\begin{pmatrix} 4 & -2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2x \\ 2y \end{pmatrix} \iff x = y,$$

d'où le vecteur propre $X_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ associé à la valeur propre $\lambda_1 = 2$. Pour la valeur propre $\lambda_2 = 3$:

$$\begin{pmatrix} 4 & -2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3x \\ 3y \end{pmatrix} \iff x = 2y,$$

d'où le vecteur propre $X_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ associé à la valeur propre $\lambda_2 = 3$.

4. Dans la base (X_1, X_2) , la matrice s'écrit

$$D = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

Plus précisément $D = P^{-1}AP$, où

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad P^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Exemple 16.

Soit

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 5 & -4 & 0 \\ 6 & -6 & 2 \end{pmatrix}.$$

Démontrons que A est diagonalisable et trouvons une matrice P telle que $P^{-1}AP$ soit diagonale.

1. Commençons par calculer le polynôme caractéristique de A :

$$\chi_A(X) = \begin{vmatrix} 1 - X & 0 & 0 \\ 5 & -4 - X & 0 \\ 6 & -6 & 2 - X \end{vmatrix} = -(X - 1)(X + 4)(X - 2)$$

2. Les racines du polynôme caractéristique, et donc les valeurs propres de A , sont les réels $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = -4$ et $\lambda_3 = 2$. Il y a trois valeurs propres distinctes, et donc par la proposition 6, la matrice est diagonalisable.

3. Déterminons des vecteurs propres associés. Par exemple, pour $\lambda_2 = -4$:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 5 & -4 & 0 \\ 6 & -6 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4x \\ -4y \\ -4z \end{pmatrix} \iff \begin{cases} 5x = 0 \\ 5x = 0 \\ 6x - 6y + 6z = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} x = 0 \\ y = z \end{cases}$$

L'ensemble des solutions est donc $\left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ t \\ t \end{pmatrix} \mid t \in \mathbb{R} \right\}$. D'où le vecteur propre $X_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ associé à la valeur propre $\lambda_2 = -4$.

De même, on trouve X_1 (associé à $\lambda_1 = 1$) et X_3 (associé à $\lambda_3 = 2$) :

$$X_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad X_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad X_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

4. La base (X_1, X_2, X_3) diagonalise la matrice A , c'est-à-dire $D = P^{-1}AP$ avec

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad P^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Mini-exercices.

1. Soit $A = \begin{pmatrix} -4 & 5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -7 & 7 & 3 \end{pmatrix}$. Calculer les valeurs propres de A . Trouver un vecteur propre pour chaque valeur propre. Trouver une matrice P telle que $D = P^{-1}AP$ soit une matrice diagonale. Calculer P^{-1} . Calculer D^k ($k \in \mathbb{N}$). En déduire A^k .
2. Même exercice avec $A = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & -3 & 1 \end{pmatrix}$.
3. Dans le cas d'une matrice $A \in M_n(\mathbb{K})$ ayant n valeurs propres distinctes, donner une nouvelle preuve des assertions : « La somme des valeurs propres vaut $\text{tr} A$. » et « Le produit des valeurs propres vaut $\det A$. »
4. Soit T une matrice triangulaire, non diagonale, dont les coefficients sur la diagonale sont tous 1. Montrer qu'elle n'est pas diagonalisable. Indications : (a) Quelles sont les valeurs propres de T ? (b) Si T était diagonalisable en une matrice D , que vaudrait D ? (c) À quoi pourrait être semblable cette matrice D ?

Auteurs du chapitre

D'après un cours de Sandra Delaunay et un cours d'Alexis Tchoudjem.

Revu et augmenté par Arnaud Bodin.

Relu par Stéphanie Bodin et Vianney Combet.