ENDOMORPHISMES D'UN ESPACE EUCLIDIEN

Plan du cours

Dans ce chapitre, E désigne un espace euclidien de dimension $n \in \mathbb{N}^*$ dont le produit scalaire et la norme associée sont notés respectivement $(\cdot\,|\,\cdot)$ et $\|\cdot\|$.

I. Isométries vectorielles

Définition 1 – *Isométrie vectorielle*

Soit $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ une endomorphisme de E.
On dit que u est une *isométrie vectorielle* s'il conserve la norme, c'est-à-dire si :

$$\forall x \in \mathrm{E}, \quad \|u(x)\| = \|x\|$$

Exercice 1

On se donne $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ une isométrie de E.
Déterminer les valeurs propres possibles d'une isométrie vectorielle.

Proposition 1 – *Bijectivité des isométries vectorielles*

Toute isométrie vectorielle $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ est un automorphisme de E.

PROPOSITION 2 – *Caractérisation des isométries par le produit scalaire*

Soit $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ une endomorphisme de E.
Alors u est une isométrie vectorielle si et seulement s'il conserve le produit scalaire, c'est-à-dire si et seulement si on a :

$$\forall x, y \in \mathrm{E}, \quad (u(x) \mid u(y)) = (x \mid y)$$

VOCABULAIRE Étant donnés les deux résultats précédents, une isométrie vectorielle est également parfois appelée *automorphisme orthogonal* (la proposition précédente montre qu'une isométrie vectorielle est un endomorphisme qui conserve l'orthogonalité).

EXEMPLES 2

(1) On rappelle qu'une homothétie de E est un endomorphisme de E pouvant s'écrire $\lambda \,\mathrm{id}_{\mathrm{E}}$ avec $\lambda \in \mathbb{R}$. Déterminer les homothéties de E qui sont des isométries vectorielles.

(2) Déterminer les projections orthogonales de E qui sont des isométries vectorielles.

PROPOSITION 3 – *Caractérisation des isométries par l'image d'une base orthonormée*

Soient $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ un endomorphisme de E et $\mathscr{B}$ une base orthonormée de E.
Alors u est une isométrie vectorielle si et seulement si l'image par u de $\mathscr{B}$ est une base orthonormée de E.

PROPOSITION 4 – *Opérations sur les isométries*

Soient $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ et $v \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ deux isométries vectorielles de E. Alors :

- **Composition :** $u \circ v$ est une isométrie vectorielle.
- **Réciproque :** u^{-1} est une isométrie vectorielle.

DÉFINITION 2 – *Groupe orthogonal* $\mathrm{O}(\mathrm{E})$

L'ensemble des isométries vectorielles de E est noté $\mathrm{O}(\mathrm{E})$ et est appelé *groupe orthogonal* de E.

PROPOSITION 5 – *Stabilité de l'orthogonal d'un sous-espace stable*

Soient $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ une isométrie vectorielle de E et F un sous-espace vectoriel de E.
Si F est stable par u alors $\mathrm{F}^{\perp}$ est stable par u.

II. MATRICES ORTHOGONALES

DÉFINITION 3 – *Matrice orthogonale*

Soit $\mathrm{M} \in \mathscr{M}_n(\mathbb{R})$ une matrice.
On dit que M est une matrice *orthogonale* si l'endomorphisme de $\mathbb{R}^n$ (muni du produit scalaire canonique) qui lui est canoniquement associé est une isométrie vectorielle.

PROPOSITION 6 – *Caractérisation des matrices orthogonales*

Soit $\mathrm{M} \in \mathscr{M}_n(\mathbb{R})$ une matrice.
Les assertions suivantes sont équivalentes :

(1) M est une matrice orthogonale.

(2) $\mathrm{M}^t\mathrm{M} = \mathrm{I}_n$.

(3) M est inversible et $\mathrm{M}^{-1} = {}^t\mathrm{M}$.

(4) ${}^t\mathrm{M}\mathrm{M} = \mathrm{I}_n$.

(5) Les vecteurs colonnes de M forment une base orthonormée de $\mathbb{R}^n$.

(6) Les vecteurs lignes de M forment une base orthonormée de $\mathbb{R}^n$.

REMARQUES

- Lorsqu'une matrice est orthogonale, il est facile de calculer son inverse puisqu'il suffit de la transposer.
- Pour vérifier qu'une matrice est orthogonale, le critère **(5)** précédent montre qu'il suffit de vérifier que les n normes des colonnes sont égales à 1 et que les $n(n-1)/2$ produits scalaires des colonnes prises deux à deux sont égaux à 0.

EXEMPLE 3

Vérifier que la matrice $\mathrm{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 0 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix}$ est orthogonale.

PROPOSITION 7 – *Caractérisation comme matrices de changement de base orthonormée*

Soient $\mathscr{B}$ une base orthonormée de E et $\mathscr{B}'$ une base de E.
Alors la base $\mathscr{B}'$ est orthonormée si et seulement si la matrice de passage de $\mathscr{B}$ à $\mathscr{B}'$ est orthogonale.
Ainsi une matrice M est orthogonale si et seulement si c'est une matrice de passage entre deux bases orthonormées de $\mathbb{R}^n$.

PROPOSITION 8 – *Caractérisation des isométries vectorielles*

Soient $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ un endomorphisme de E et $\mathscr{B}$ une base orthonormée de E.
Alors u est une isométrie vectorielle si et seulement si sa matrice dans la base $\mathscr{B}$ est orthogonale.

PROPOSITION 9 – *Opérations sur les matrices orthogonales*

Soient $\mathrm{M} \in \mathscr{M}_n(\mathbb{R})$ et $\mathrm{N} \in \mathscr{M}_n(\mathbb{R})$ deux matrices orthogonales. Alors :

- **Produit :** MN est une matrice orthogonale.
- **Inverse :** M^{-1} est une matrice orthogonale.

DÉFINITION 4 – *Groupe orthogonal* $\mathrm{O}_n(\mathbb{R})$

L'ensemble des matrices orthogonales est noté $\mathrm{O}_n(\mathbb{R})$ ou $\mathrm{O}(n)$ et est appelé *groupe orthogonal.*

Proposition 10 – *Déterminant d'une matrice orthogonale*

Soit $\mathrm{M} \in \mathscr{M}_n(\mathbb{R})$ une matrice orthogonale.
Alors $\det \mathrm{M} = \pm 1$.

Remarque La caractérisation des isométries vectorielles à l'aide de leurs matrices dans une base orthonormée donne que le déterminant d'une isométrie vectorielle est, lui aussi, égal à ± 1.

Exercice 4

> Montrer que la réciproque de la proposition précédente est fausse dès que $n \geqslant 2$.

Définition 5 – *Groupe spécial orthogonal* $\mathrm{SO}_n(\mathbb{R})$

L'ensemble des matrices orthogonales de déterminant 1 est noté $\mathrm{SO}_n(\mathbb{R})$ ou $\mathrm{SO}(n)$ et est appelé *groupe spécial orthogonal*.

Vocabulaire

- Une matrice orthogonale de déterminant 1 (resp. de déterminant -1) est appelée *matrice orthogonale positive* (resp. *matrice orthogonale négative*).
- Une isométrie vectorielle de déterminant 1 (resp. -1) est appelée *isométrie vectorielle directe* (resp. *isométrie vectorielle indirecte*).

Remarque On peut montrer que $\mathrm{SO}_n(\mathbb{R})$ est stable par produit et passage à l'inverse, ce qui n'est pas le cas de l'ensemble des matrices orthogonales de déterminant -1.

III. Espaces euclidiens orientés

III. 1. Orientation

Définition 6 – *Bases définissant la même orientation*

Soient $\mathscr{B}$ et $\mathscr{B}'$ deux bases orthonormées de E.
On dit que $\mathscr{B}$ et $\mathscr{B}'$ *définissent la même orientation* si la matrice de passage de $\mathscr{B}$ à $\mathscr{B}'$ appartient à $\mathrm{SO}_n(\mathbb{R})$.

Remarques

- On a déjà montré que la matrice de passage de $\mathscr{B}$ à $\mathscr{B}'$ appartient à $\mathrm{O}_n(\mathbb{R})$ et on impose donc ici qu'elle soit de déterminant 1.
- On peut montrer que la relation « *définir la même orientation* » est une relation d'équivalence sur l'ensemble des bases orthonormées de E.

Définition 7 – *Orientation d'un espace euclidien*

On dit que l'on *oriente l'espace* E lorsque l'on choisit une base orthonormée $\mathscr{B}_0$ de E et qu'on la décrète *directe*.
Dès lors, si $\mathscr{B}$ est une base orthonormée de E :

- La base $\mathscr{B}$ est dite *directe* si elle définit la même orientation que la base $\mathscr{B}_0$;
- La base $\mathscr{B}$ est dite *indirecte* sinon.

Remarque Il n'y a donc que deux orientations possibles sur l'espace E.

Exemple Sur $\mathbb{R}^n$ muni de son produit scalaire canonique, on oriente très souvent l'espace en décrétant que la base canonique est directe.

III. 2. Produit mixte

Proposition 11 – *Déterminant dans une base orthonormée directe*

On suppose l'espace E orienté et on se donne $\mathscr{B}$ et $\mathscr{B}'$ deux bases orthonormées directes de E.
Alors on a :

$$\forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathrm{E}^n, \quad \det_{\mathscr{B}}(x_1, \dots, x_n) = \det_{\mathscr{B}'}(x_1, \dots, x_n)$$

Définition 8 – *Produit mixte*

On suppose l'espace E orienté et on se donne $x_1, \dots, x_n$ une famille de n vecteurs de E.
On appelle *produit mixte des n vecteurs $x_1, \dots, x_n$* leur déterminant dans n'importe quel base orthonormée directe de E. On le note $[x_1, \dots, x_n]$.

Remarque La bonne définition du produit mixte découle de la proposition précédente.

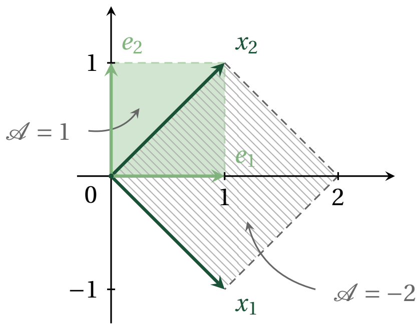
Remarque – *Interprétation géométrique du produit mixte*

Dans le plan $\mathbb{R}^2$ muni du produit scalaire canonique, on note e_1 et e_2 les vecteurs de la base canonique que l'on suppose directe. On a, en calculant le produit mixte dans la base canonique $\mathscr{B}_c = (e_1, e_2)$ qui est orthonormée directe :

$$[e_1, e_2] = \det_{\mathscr{B}_c}(e_1, e_2) = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1$$

qui représente l'aire algébrique du parallélogramme construit sur les vecteurs e_1 et e_2 (dans cet ordre). De même, si $x_1 = (1, -1)$ et $x_2 = (1, 1)$ alors on a :

$$[x_2, x_1] = \det_{\mathscr{B}_c}(x_2, x_1) = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = -2$$



qui représente l'aire algébrique du parallélogramme construit sur les vecteurs x_2 et x_1 (dans cet ordre).
Dans le plan, le produit mixte correspond donc géométriquement à une aire algébrique d'un parallélogramme.
Le même type d'interprétation peut être faite dans l'espace $\mathbb{R}^3$ pour des volumes algébriques de parallélépipèdes.

III. 3. Produit vectoriel en dimension 3

Dans cette sous-partie, E est supposé orienté et de dimension $n = 3$.

Proposition 12 – *Produit vectoriel*

Soient u et v deux vecteurs de E.
Il existe un unique vecteur de E, noté $u \wedge v$ et appelé *produit vectoriel des vecteurs u et v*, tel que :

$$\forall w \in \mathrm{E}, \quad [u, v, w] = (u \wedge v \mid w)$$

Exercice 5

Si u et v sont deux vecteurs de E, démontrer que $u \wedge v = -v \wedge u$.

Proposition 13 – *Propriétés du produit vectoriel*

Soient u et v deux vecteurs de E. Alors :

- On a $u \wedge v = 0$ si et seulement si u et v sont colinéaires.
- Le produit vectoriel $u \wedge v$ est orthogonal aux vecteurs u et v.
- Si (u, v) est orthonormée, alors $(u, v, u \wedge v)$ est une base orthonormée directe de E.

Exemple Dans l'espace $\mathbb{R}^3$ muni du produit scalaire canonique et orienté pour rendre la base canonique directe, on se donne deux vecteurs i et j unitaires et orthogonaux. Alors $(i, j, i \wedge j)$ est une base orthonormée directe de $\mathbb{R}^3$ et $(i, j, -i \wedge j) = (i, j, j \wedge i)$ une base orthonormée indirecte de $\mathbb{R}^3$.

Proposition 14 – *Calcul du produit vectoriel*

Soient u et v deux vecteurs de E, muni d'une base orthonormée directe $\mathscr{B} = (e_1, e_2, e_3)$. On note u_1, u_2, u_3 et v_1, v_2, v_3 les coordonnées de u et v dans la base $\mathscr{B}$. Alors :

$$u \wedge v = \begin{vmatrix} u_2 & v_2 \\ u_3 & v_3 \end{vmatrix} e_1 - \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_3 & v_3 \end{vmatrix} e_2 + \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{vmatrix} e_3$$

Remarque On retrouve les composantes du produit vectoriel dans toute base orthonormée directe utilisées couramment en sciences physiques et industrielles.

IV. Isométries vectorielles d'un plan euclidien

Dans cette partie, E est un espace euclidien orienté de dimension 2.

Proposition 15 – *Description de* $O_2(\mathbb{R})$

Soit M une matrice de $\mathscr{M}_2(\mathbb{R})$. Alors :

- M appartient à $SO_2(\mathbb{R})$ si et seulement si il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que :

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

- M appartient à $O_2(\mathbb{R}) \setminus SO_2(\mathbb{R})$ si et seulement si il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que :

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

Vocabulaire Pour $\theta \in \mathbb{R}$, la matrice $R_\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$ est appelée *matrice de rotation d'angle* θ.

Exemple 6

On pose $X = {}^t(1 \;\; 0) \in \mathscr{M}_{2,1}(\mathbb{R})$. Pour des valeurs « remarquables » de l'angle θ, calculer $R_\theta X$ et observer en quoi la dénomination « rotation d'angle θ » est cohérente.

Proposition 16 – *Produit de deux rotations*

Pour $(\theta, \theta') \in \mathbb{R}^2$, on a : $R_\theta R_{\theta'} = R_{\theta+\theta'}$.

Exemples 7

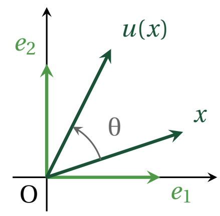
(1) Monter que deux matrices de $SO_2(\mathbb{R})$ commutent toujours.

(2) Pour $\theta \in \mathbb{R}$, montrer que R_θ est inversible et donner son inverse.

Proposition 17 – *Description des isométries directes du plan*

Soient u un endomorphisme de E et $\mathscr{B}$ une base orthonormée directe de E.
Alors u appartient à SO(E) si et seulement si il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que la matrice de u dans la base $\mathscr{B}$ soit :

$$M_{\mathscr{B}}(u) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} = R_\theta$$



Le réel θ, unique à 2π près, est le même pour toute base orthonormée directe $\mathscr{B}'$.
On dit alors que u est la *rotation d'angle* θ et que θ est *l'angle de la rotation* u.

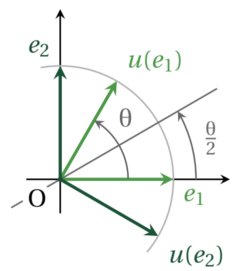
Remarques

- Les résultats précédents montrent que si deux endomorphismes u et v de SO(E) sont des rotations d'angles respectifs θ et θ' alors $u \circ v = v \circ u$ est une rotation d'angle $\theta + \theta'$.
- Dans toutes les bases orthonormées indirectes, on peut montrer que la matrice représentant u devient $R_{-\theta}$.

Proposition 18 – *Description des isométries indirectes du plan*

Soient u un endomorphisme de E et $\mathscr{B} = (e_1, e_2)$ une base orthonormée de E.
Alors u appartient à $O(E) \setminus SO(E)$ si et seulement si il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que la matrice de u dans la base $\mathscr{B}$ soit :

$$M_{\mathscr{B}}(u) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{pmatrix}$$



L'endomorphisme u est alors la symétrie (ou réflexion) orthogonale par rapport à la droite D_θ engendrée par le vecteur $d_\theta = \cos(\theta/2)e_1 + \sin(\theta/2)e_2$ et parallèlement à $D_\theta^\perp$.

Remarque Dans ce cas, le réel θ dépend de la base orthonormée choisie.

Classification des isométries du plan

Soit u une isométrie de E. On introduit l'ensemble $E_1 = \{x \in E,\ u(x) = x\}$ des points fixes de u qui n'est autre que l'espace propre E_1 de u associé à la valeur propre 1. Dès lors, les différents types d'isométries du plan que l'on peut obtenir sont :

- **Si $\dim(E_1) = 0$**
  u est une rotation dont on peut déterminer l'angle en se rappelant que dans toute base orthonormée directe, la première colonne de la matrice de u donne $\cos\theta$ et $\sin\theta$ (isométrie directe).
- **Si $\dim(E_1) = 1$**
  u est une symétrie orthogonale par rapport à la droite E_1 parallèlement à la droite $E_1^\perp$ (isométrie indirecte).
- **Si $\dim(E_1) = 2$**
  u est l'identité (isométrie directe).

Exemples 8

Vérifier que les matrices suivantes sont orthogonales et déterminer la nature géométrique de l'endomorphisme du plan $\mathbb{R}^2$, muni du produit scalaire canonique, qui leur est canoniquement associé :

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

(2) $B = \dfrac{1}{2}\begin{pmatrix} -\sqrt{3} & 1 \\ 1 & \sqrt{3} \end{pmatrix}$

V. Isométries vectorielles d'un espace euclidien de dimension 3

Dans cette partie, E est un espace euclidien orienté de dimension 3.

Proposition 19 – *Expression matricielle des isométries en dimension 3*

Soit u une isométrie de E.

- Si $u \in \mathrm{SO(E)}$, il existe une base orthonormée directe dans laquelle la matrice de u est :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \qquad \text{avec } \theta \in \mathbb{R}$$

- Si $u \in \mathrm{O(E)} \setminus \mathrm{SO(E)}$, il existe une base orthonormée directe dans laquelle la matrice de u est :

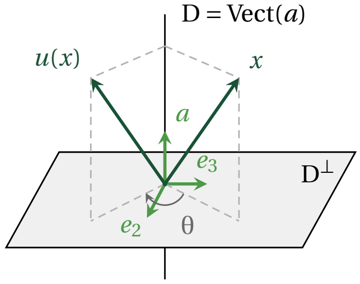
$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \qquad \text{avec } \theta \in \mathbb{R}$$

Proposition 20 – *Description des isométries directes en dimension* 3

Soit u un endomorphisme de E.
Alors u appartient à SO(E) si et seulement si il existe une base orthonormée directe $\mathscr{B}$ de E dans laquelle la matrice de u s'écrit :

$$\mathrm{M}_{\mathscr{B}}(u) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

En notant a un vecteur non nul de même sens que le premier vecteur de $\mathscr{B}$, le réel θ, unique à 2π près, est le même pour toute base orthonormée directe $\mathscr{B}'$ commençant par $a/\|a\|$. On dit alors que u est la *rotation d'angle* θ *et d'axe dirigé par* a.



Remarques

- La rotation d'angle θ et d'axe dirigé par a est également la rotation d'angle $-\theta$ et d'axe dirigé par $-a$.
- Le vecteur a qui dirige et oriente l'axe de rotation n'est pas unique puisque tout vecteur λa pour $\lambda > 0$ convient aussi.

Classification des isométries de l'espace

Soit u une isométrie de E. On introduit l'ensemble $\mathrm{E}_1 = \{x \in \mathrm{E},\ u(x) = x\}$ des points fixes de u qui n'est autre que l'espace propre E_1 de u associé à la valeur propre 1. Dès lors, les différents types d'isométries de l'espace que l'on peut obtenir sont :

- **Si $\dim(\mathrm{E}_1) = 0$**
  Cette situation sort du cadre du programme mais on peut prouver que u est la composée (commutative) d'une symétrie orthogonale par rapport à un plan et d'une rotation d'axe orthogonal à ce plan (isométrie indirecte).
- **Si $\dim(\mathrm{E}_1) = 1$**
  u est une rotation d'angle θ et d'axe dirigé par un vecteur engendrant E_1 ; on verra plus loin comment déterminer précisément l'axe et l'angle de la rotation (isométrie directe).
- **Si $\dim(\mathrm{E}_1) = 2$**
  u est une symétrie orthogonale par rapport au plan E_1 parallèlement à la droite $\mathrm{E}_1^{\perp}$ (isométrie indirecte).
- **Si $\dim(\mathrm{E}_1) = 3$**
  u est l'identité (isométrie directe).

MÉTHODE — *Déterminer les éléments caractéristiques d'une rotation*

On suppose donnée la matrice M dans une base orthonormée directe d'une isométrie vectorielle positive, c'est-à-dire telle que $\det(\mathrm{M}) = 1$. D'après l'étude précédente, cette matrice représente forcément une rotation u dont on va chercher à déterminer l'axe et l'angle.

(1) On détermine l'axe en cherchant la droite invariante, c'est-à-dire en explicitant l'ensemble E_1 des points fixes de u, qui n'est rien d'autre que l'espace propre E_1 de u associé à la valeur propre 1. On en choisit alors un vecteur directeur a ;

(2) Par le résultat qui précède, dans toute base orthonormée directe $\mathscr{B}$ commençant par le vecteur $a/\|a\|$, la matrice de u est :

$$\mathrm{M}_{\mathscr{B}}(u) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

de sorte que l'on a la relation $\mathrm{Tr}\,\mathrm{M} = 1 + 2\cos\theta$;

(3) On détermine alors l'angle de la rotation autour de l'axe dirigé par a en utilisant le résultat qui suit qui affirme que $\sin\theta$ est du signe de $[a, x, u(x)]$ pour tout vecteur x non colinéaire à a.

PROPOSITION 21 — *Un résultat permettant de déterminer le signe de l'angle d'une rotation*

Soit u un endomorphisme de E. On suppose que u est la rotation d'angle θ et d'axe dirigé par a.
Alors $\sin\theta$ est du signe de $[a, x, u(x)]$ pour tout vecteur x non colinéaire à a.

EXEMPLE 9

Montrer que la matrice suivante est orthogonale et déterminer la nature géométrique de l'endomorphisme de l'espace $\mathbb{R}^3$, muni du produit scalaire canonique, qui lui est canoniquement associé :

$$\mathrm{M} = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 2 & 1 & 2 \\ -2 & 2 & 1 \\ -1 & -2 & 2 \end{pmatrix}$$

MÉTHODE — *Déterminer la matrice d'une rotation*

À l'inverse, on suppose donnés l'angle θ et un vecteur directeur a de l'axe d'une rotation u de E et on cherche à retrouver la matrice de la rotation dans la base canonique $\mathscr{B}_c$ de $\mathbb{R}^3$.

(1) On crée une base orthonormée directe dont le premier vecteur est colinéaire à a. Typiquement, on prend x un vecteur orthogonal à a et, en posant $a^* = a/\|a\|$ et $x^* = x/\|x\|$, on considère la base orthonormée directe $\mathscr{B} = (a^*, x^*, a^* \wedge x^*)$.

(2) Dans cette base orthonormée directe, la matrice de u est :

$$\mathrm{M}_{\mathscr{B}}(u) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

(3) On explicite la matrice de passage P de la base canonique $\mathscr{B}_c$ vers la base $\mathscr{B}$ et on conclut en écrivant que $\mathrm{M}_{\mathscr{B}_c}(u) = \mathrm{P}\mathrm{M}_{\mathscr{B}}(u)\mathrm{P}^{-1}$.

EXEMPLE 10

Déterminer la matrice dans la base canonique de $\mathbb{R}^3$ de la rotation u d'angle $\pi/2$ et d'axe dirigé par le vecteur $a = (1, 1, 2)$.

VI. Endomorphismes et matrices symétriques

Dans cette partie, E est de nouveau un espace euclidien de dimension $n \in \mathbb{N}^*$.

Définition 9 – *Endomorphisme symétrique*

Soit $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ une endomorphisme de E.
On dit que u est *symétrique* s'il vérifie :

$$\forall x, y \in \mathrm{E}, \quad (u(x) \mid y) = (x \mid u(y))$$

Notation L'ensemble des endomorphismes symétriques de E est noté $\mathrm{S}(\mathrm{E})$.

Exemples 11

Montrer que toute homothétie de E est un endomorphisme symétrique.

Exercice 12

Soient u un endomorphisme symétrique de E et λ et μ deux valeurs propres distinctes de u.
Montrer que les sous-espaces propres $\mathrm{E}_\lambda(u)$ et $\mathrm{E}_\mu(u)$ sont orthogonaux.

Proposition 22 – *Structure de* $\mathrm{S}(\mathrm{E})$

L'ensemble $\mathrm{S}(\mathrm{E})$ est un sous-espace vectoriel de $\mathscr{L}(\mathrm{E})$.

Proposition 23 – *Matrices des endomorphismes symétriques*

Soient $u \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ un endomorphisme de E et $\mathscr{B}$ une base orthonormée de E.
Alors u est un endomorphisme symétrique si et seulement si sa matrice dans la base $\mathscr{B}$ est symétrique.

Remarque 1 Le fait que la base $\mathscr{B}$ soit orthonormée est important.

Proposition 24 – *Isomorphisme entre* $\mathrm{S}(\mathrm{E})$ *et* $\mathrm{S}_n(\mathbb{R})$

Soit $\mathscr{B}$ une base orthonormée de E. Alors l'application :

$$\begin{array}{ccc} \mathrm{S}(\mathrm{E}) & \longrightarrow & \mathrm{S}_n(\mathbb{R}) \\ u & \longmapsto & \mathrm{M}_{\mathscr{B}}(u) \end{array}$$

est un isomorphisme. En particulier, la dimension de $\mathrm{S}(\mathrm{E})$ est $n(n+1)/2$.

Théorème 1 – *Théorème spectral*

Soit u un endomorphisme symétrique de E.
Alors il existe une base orthonormée de E constituée de vecteurs propres de u.

Remarques

- Autrement dit, tout endomorphisme symétrique est diagonalisable dans une base orthonormée.
- Le résultat équivaut au fait que E est la somme directe orthogonale des sous-espaces propres de u.

Théorème 2 – *Interprétation matricielle du théorème spectral*

Soit $A \in S_n(\mathbb{R})$ une matrice symétrique réelle.
Alors il existe une matrice diagonale réelle D et une matrice orthogonale $P \in O_n(\mathbb{R})$ telles que $P^{-1}AP = D$.

Remarques

- En d'autres termes, toute matrice symétrique réelle est diagonalisable dans une base orthonormée.
- On rappelle que, puisque $P \in O_n(\mathbb{R})$, on a $P^{-1} = {}^tP$.
- Le fait que la matrice A soit réelle est important comme le montre l'exemple suivant.

Exemple 13

Étudier la diagonalisabilité de $M = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & -1 \end{pmatrix}$.

Méthode – *Diagonalisation d'une matrice symétrique réelle*

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ une matrice symétrique réelle. On souhaite diagonaliser A dans une base orthonormée.

(1) On commence par indiquer que A est symétrique réelle de sorte que A est diagonalisable dans une base orthonormée par le théorème spectral.

(2) On détermine les valeurs propres $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ de A en calculant son polynôme caractéristique et en déterminant ses racines. On détermine ensuite des bases des sous-espaces propres $E_{\lambda_1}, \dots, E_{\lambda_p}$ de A en résolvant, pour $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$, les systèmes $AX = \lambda X$ pour λ dans $\{\lambda_1, \dots, \lambda_p\}$.

(3) On utilise alors l'algorithme de Gram-Schmidt afin de rendre les bases des sous-espaces propres orthonormées, si elles ne le sont pas déjà.

(4) Enfin, on conclut :

- On donne la matrice de passage P de la base orthonormée de départ vers une base orthonormée formée de vecteurs propres de A que l'on constitue en concaténant les bases orthonormées des sous-espaces propres $E_{\lambda_1}, \dots, E_{\lambda_p}$ trouvées à l'étape **(3)**. À noter que les vecteurs propres associés à des valeurs propres distinctes sont automatiquement orthogonaux en vertu de l'**Exercice 12**.

  Remarque La matrice P est bien orthogonale puisque c'est une matrice de passage d'une base orthonormée vers une autre.

- On donne la matrice D diagonale vérifiant $P^{-1}AP = D$. Les éléments diagonaux de D sont les valeurs propres de A énumérées avec leurs ordres de multiplicité.

  Remarque Les valeurs propres de A sur la diagonale de D apparaissent dans le même ordre que celui utilisé pour concaténer les bases des sous-espaces propres de A.

Exemple 14

Étudier si la matrice $M = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & -2 \\ 2 & -2 & 0 \end{pmatrix}$ est diagonalisable dans une base orthonormée.

Exercice 15 – *Matrices symétriques positives*

On note $S_n^+(\mathbb{R})$ l'ensemble des matrices $S \in S_n(\mathbb{R})$ symétriques réelles qui vérifient :

$$\forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), \quad {}^tXSX \geqslant 0$$

Montrer que $S \in S_n^+(\mathbb{R})$ si et seulement si $\mathrm{sp}_{\mathbb{R}}(S) \subset \mathbb{R}_+$.
Pour le sens indirect, on pourra utiliser le théorème spectral.