

Endomorphismes des espaces euclidiens

Extrait du programme officiel :

L'objectif de cette section est double :

- approfondir dans le cadre euclidien la thématique de la réduction des endomorphismes, à travers l'étude des endomorphismes autoadjoints et des isométries ;
- introduire la notion d'endomorphisme symétrique positif, notamment en vue du calcul différentiel d'ordre 2.

La notion de produit scalaire hermitien est hors programme.

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Adjoint d'un endomorphisme

Représentation des formes linéaires sur un espace euclidien.

Adjoint d'un endomorphisme d'un espace euclidien.

Notation u^* .

Linéarité de $u \mapsto u^*$, adjoint d'une composée, involutivité du passage à l'adjoint.

Matrice de l'adjoint en base orthonormée.

Si le sous-espace F est stable par u , alors F^\perp est stable par u^* .

b) Matrices orthogonales

Matrice orthogonale : définition par $A^T A = I_n$, caractérisation par le caractère orthonormal de la famille des colonnes, des lignes.

Interprétation comme matrice de changement de base orthonormée. Matrices orthogonalement semblables.

Groupe orthogonal.

Notations $O_n(\mathbb{R})$, $O(n)$.

Matrice orthogonale positive ou directe, négative ou indirecte.

Notations $SO_n(\mathbb{R})$, $SO(n)$.

Orientation d'un espace vectoriel réel de dimension finie.

Pour E euclidien orienté et e et e' bases orthonormées directes de E , égalité des applications \det_e et $\det_{e'}$.

c) Isométries vectorielles d'un espace euclidien

Isométrie vectorielle : définition par la conservation des normes.

Par définition, une isométrie vectorielle est linéaire. On mentionne la terminologie « automorphisme orthogonal » tout en lui préférant « isométrie vectorielle ».

Exemples : symétrie orthogonale, réflexion.

Caractérisations des isométries de E parmi les endomorphismes de E : par la conservation du produit scalaire, par l'image d'une base orthonormée, par la relation $u^* = u^{-1}$.

Groupe orthogonal.

Notation $O(E)$.

Déterminant d'une isométrie. Isométrie directe, indirecte.

Groupe spécial orthogonal.

Notation $SO(E)$.

d) Isométries vectorielles en dimension 2

Description des matrices orthogonales directes et indirectes de taille 2.

Rotation vectorielle d'un plan euclidien orienté.

On introduit à cette occasion, sans soulever de difficulté sur la notion d'angle, la notion de mesure d'un angle orienté de vecteurs.

Morphisme $t \mapsto \begin{pmatrix} \cos(t) & -\sin(t) \\ \sin(t) & \cos(t) \end{pmatrix}$ de \mathbb{R} dans $SO_2(\mathbb{R})$; surjectivité et noyau.

Isomorphisme de \mathbb{U} sur $SO_2(\mathbb{R})$. Le groupe $SO_2(\mathbb{R})$ est commutatif.

Classification des isométries d'un plan euclidien.

e) Réduction des isométries

Stabilité de l'orthogonal d'un sous-espace stable.



CONTENUS

Réduction d'une isométrie en base orthonormée.
 Cas particulier : réduction d'une isométrie vectorielle directe d'un espace euclidien de dimension 3.

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

Interprétation matricielle.
 La forme réduite justifie la terminologie « rotation ». La pratique du calcul des éléments géométriques d'un élément de $SO_3(\mathbb{R})$ n'est pas un attendu du programme.

f) Endomorphismes autoadjoints d'un espace euclidien

Endomorphisme autoadjoint : définition par $u^* = u$.
 Stabilité de l'orthogonal d'un sous-espace stable.
 Caractérisation du caractère autoadjoint par la matrice en base orthonormée.

On mentionne la terminologie « endomorphisme symétrique », tout en lui préférant « endomorphisme autoadjoint ». Notation $\mathcal{S}(E)$.

Les projecteurs orthogonaux sont les projecteurs autoadjoints.
 Théorème spectral : si u est un endomorphisme d'un espace euclidien E , alors u est autoadjoint si et seulement si E est somme orthogonale des sous-espaces propres de u ou, de manière équivalente, s'il existe une base orthonormée diagonalisant u .

Interprétation matricielle : une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ appartient à $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ si et seulement si elle est orthogonalement diagonalisable.

g) Endomorphismes autoadjoints positifs, définis positifs

Endomorphisme autoadjoint positif, défini positif.
 Matrice symétrique positive, définie positive.

Caractérisation spectrale. Notations $\mathcal{S}^+(E), \mathcal{S}^{++}(E)$.
 Caractérisation spectrale. Notations $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R}), \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

Table des matières

23 Endomorphismes des espaces euclidiens	1
I Préliminaire : matrice d'un endomorphisme dans une base orthonormale : expression à l'aide du produit scalaire	3
II Adjoint d'un endomorphisme	3
1 Définition	3
2 Propriétés	4
III Matrices orthogonales	6
1 Définition	6
2 Caractérisations	7
3 Structure	8
4 Matrices de passage orthogonales et changement de base orthonormale	8
5 Matrices orthogonales positives et négatives	9
IV Isométries vectorielles d'un espace euclidien	10
1 Définition	10
2 Caractérisations	11
3 Isométries directes et indirectes	13
V Réduction des isométries vectorielles et des matrices orthogonales	14
1 Isométries en dimension 2	14
a Matrices orthogonales	14
b Rotations du plan orienté	15
c Classifications des isométries du plan	17
2 Cas général	17
3 Isométries en dimension 3	19
VI Endomorphismes autoadjoints	22
1 Définition	22
2 Caractérisation matricielle en base orthonormale	22
3 Cas des projections	22
4 Sous-espaces stables	23
5 Réduction des endomorphismes et des matrices symétriques : théorème spectral	23
6 Positivité, défini-positivité	24
7 Annexe classique (HP) : formules variationnelles, norme subordonnée et rayon spectral	27

Tous les espaces vectoriels de ce chapitre, souvent notés E , sont des espaces vectoriels euclidiens : \mathbb{R} -espaces vectoriels de dimension finie munis d'un produit scalaire.

PRÉLIMINAIRE : MATRICE D'UN ENDOMORPHISME DANS UNE BASE ORTHONORMALE : EXPRESSION À L'AIDE DU PRODUIT SCALAIRE

Voici une propriété qui nous sera utile tout au long de ce chapitre.

**Propriété 1 : matrice d'un endomorphisme dans une base orthonormale**

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$, $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base **orthonormale** de E , (E_1, \dots, E_n) les vecteurs de la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$. Les coefficients de la matrice $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(u)$ sont donnés par

$$\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, \quad a_{i,j} = (e_i | u(e_j)) = E_i^T A E_j.$$

Démonstration

$a_{i,j}$ est la coordonnée de $u(e_j)$ selon le vecteur e_i de la base orthonormale \mathcal{B} . ■

II ADJOINT D'UN ENDOMORPHISME

Nous allons enfin pouvoir donner une interprétation géométrique à la seule opération matricielle pour laquelle on ne l'avait pas encore fait.

1 Définition

Commençons par rappeler un résultat vu dans un chapitre précédent.

Théorème 1 : de représentation de Riesz

Soit $a \in E$ euclidien et $\Phi_a : x \in E \mapsto (a|x)$. Alors

$$\Psi : \begin{cases} E & \longrightarrow & \mathcal{L}(E, \mathbb{R}) \\ a & \longrightarrow & \Phi_a \end{cases}$$

est un isomorphisme.

Ainsi, pour toute forme linéaire $\varphi \in \mathcal{L}(E, \mathbb{R})$, il existe un unique élément $a \in E$ tel que $\varphi = (a|\cdot)$.

Démonstration

C'est une application linéaire entre deux espaces de même dimension finie et elle est injective : si pour tout $x \in E$, $(a|x) = (b|x)$ alors $(a-b|x) = 0$ donc $a = b$.

C'est donc un isomorphisme. ■

Corollaire 1

Soit E un espace euclidien et $u \in \mathcal{L}(E)$.

Alors il existe un unique endomorphisme $v \in \mathcal{L}(E)$ tel que

$$\forall x, y \in E, \quad (u(x)|y) = (x|v(y)).$$

Démonstration

- Soit $y \in E$. L'application $\varphi_y : x \mapsto (u(x)|y)$ étant une forme linéaire sur E , d'après le théorème précédent, il existe un unique vecteur que l'on notera $v(y) \in E$ plutôt que a , tel que $\varphi_y = (v(y)|\cdot)$, c'est-à-dire, pour tout $x \in E$, $(u(x)|y) = (v(y)|x) = (x|v(y))$.

On définit ainsi de manière unique une application $v : E \rightarrow E$.

- Montrons la linéarité de v . Soient $y, y' \in E$ et $\lambda \in \mathbb{R}$.

$$\forall x \in E, \quad (v(y + \lambda y') - v(y) - \lambda v(y')|x) = (v(y + \lambda y')|x) - (v(y)|x) - \lambda(v(y')|x) = (y + \lambda y'|u(x)) - (y|u(x)) - \lambda(y'|u(x)) = 0$$

Donc $v(y + \lambda y') - v(y) - \lambda v(y') \in E^\perp = \{0_E\}$ et donc $v(y + \lambda y') = v(y) + \lambda v(y')$. ■

Définition 1 : Adjoint d'un endomorphisme

Soit E un espace euclidien et $u \in \mathcal{L}(E)$. On appelle **adjoint de u** , l'unique endomorphisme $u^* \in \mathcal{L}(E)$ tel que

$$\forall x, y \in E, (u(x)|y) = (x|u^*(y)).$$

Exemple

¶1 – Adjoint de l'identité, de l'endomorphisme nul et plus généralement d'une homothétie.

2 Propriétés**Propriété 2 : Linéarité et adjoint d'une composée**

Soient E euclidien et $u, v \in \mathcal{L}(E)$, $\lambda \in \mathbb{R}$. Alors

$$(u \circ v)^* = v^* \circ u^*$$

$$(u + \lambda v)^* = u^* + \lambda v^*.$$

Démonstration

On écrit, pour tout $x, y \in E$,

$$(u(v(x))|y) = (v(x)|u^*(y)) = (x|v^*(u^*(y)))$$

et on invoque l'unicité définissant l'adjoint. ■

Propriété 3 : Involutivité

Soient E euclidien et $u \in \mathcal{L}(E)$. Alors

$$(u^*)^* = u.$$

Démonstration

On écrit, pour tout $x, y \in E$,

$$(u^*(x)|y) = (x|u(y))$$

et on invoque l'unicité définissant l'adjoint. ■

Propriété 4 : Matrice de l'adjoint en base orthonormée

Soient E euclidien, $u \in \mathcal{L}(E)$, \mathcal{B} base **orthonormée** de E , $M = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(u)$. Alors

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u^*) = (\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u))^T = M^T.$$

Démonstration

Notons $M^* = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(u^*)$.

Alors, pour tout $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$,

$$m_{i,j}^* = (e_i|u^*(e_j)) = (u(e_i)|e_j) = m_{j,i}$$

car \mathcal{B} est orthonormale. Donc $M^* = M^T$. ■

Remarque

¶1 – Si la base n'est pas orthonormée, il n'y a aucune raison pour que la matrice de u^* soit la transposée de celle de u .



R2 – Permet de retrouver très facilement les résultats précédents!

Corollaire 2 : Caractéristiques communes

Un endomorphisme et son adjoint ont même trace, même déterminant, même polynôme caractéristique, même idéal annulateur, même polynôme minimal, même spectre (mais pas mêmes vecteurs propres en général), même rang, même dimension de sous-espaces propres (mais sous-espaces propres différents en général).

Démonstration

Ce sont les caractéristiques communes entre une matrice et sa transposée. ■

Propriété 5 : Sous-espace stable

Solent E euclidien, $u \in \mathcal{L}(E)$, F un sous-espace de E . Si F est stable par u , alors F^\perp est stable par u^ .*

Démonstration

Si $x \in F^\perp$ et $y \in F$,

$$(u^*(x)|y) = (x|u(y)) = 0$$

car $u(y) \in F$ et $x \in F^\perp$. ■

Remarque

R3 – La réciproque est bien sûr vraie.

Exercice 1 : Ultra classique : montrer que $\text{Ker } u^* = (\text{Im } u)^\perp$ et $\text{Im } u^* = (\text{Ker } u)^\perp$.

$$x \in \text{Ker } u^* \iff u^*(x) = 0_E \iff \forall y \in E, (u^*(x)|y) = 0 \iff \forall y \in E, (x|u(y)) = 0 \iff x \in (\text{Im } u)^\perp$$

On en déduit, comme $(u^*)^* = u$, que $\text{Ker } u = \text{Ker } (u^*)^* = (\text{Im } u^*)^\perp$ donc $\text{Im } u^* = (\text{Ker } u)^\perp$ car on travaille en dimension finie.

Exercice 2 : CCINP 63 : caractérisation des endomorphismes normaux



MATRICES ORTHOGONALES

1

Définition

Définition 2 : Matrice orthogonale

Une matrice carrée A de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ ($n \in \mathbb{N}^*$) est dite **orthogonale** si et seulement si $A^T A = I_n$.

On note $\mathcal{O}(n)$ ou $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ l'ensemble des matrices orthogonales de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

2 Caractérisations

Propriété 6 : Caractérisations des matrices orthogonales

Soient $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ ($n \in \mathbb{N}^*$).

Les propriétés suivantes sont équivalentes :

- (i) $A \in \mathcal{O}(n)$ ie $A^T A = I_n$
- (ii) A est inversible et $A^{-1} = A^T$
- (iii) $AA^T = I_n$
- (iv) $A^T \in \mathcal{O}(n)$
- (v) Les colonnes de A forment une famille orthonormale pour le produit scalaire usuel
- (vi) Les lignes de A forment une famille orthonormale pour le produit scalaire usuel

Démonstration

- (i) \Leftrightarrow (ii) \Leftrightarrow (iii) \Leftrightarrow (iv) : Facile.
- (i) \Leftrightarrow (v) : pour tout (i, j) , $(A^T A)_{i,j} = C_i^T C_j = (C_i | C_j)$ donne immédiatement l'équivalence.
- (iv) \Leftrightarrow (vi) s'obtient en transposant. ■

Remarque

R4 –  La matrice est ortho**G**onale si et seulement si ses colonnes sont ortho**N**ormales.

Exemple

E2 –

$$M = \begin{pmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{3}/3 & -\sqrt{6}/6 \\ 0 & \sqrt{3}/3 & \sqrt{6}/3 \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{3}/3 & \sqrt{6}/6 \end{pmatrix}$$

$$(C_1 | C_2) = \sqrt{2}/2 \cdot \sqrt{3}/3 - \sqrt{2}/2 \cdot \sqrt{3}/3 = 0.$$

$$(C_2 | C_3) = -\sqrt{3}/3 \cdot \sqrt{6}/6 + \sqrt{3}/3 \cdot \sqrt{6}/3 - \sqrt{3}/3 \cdot \sqrt{6}/6 = 0.$$

$$(C_1 | C_3) = -\sqrt{2}/2 \cdot \sqrt{6}/6 + \sqrt{2}/2 \cdot \sqrt{6}/6 = 0.$$

$$\|C_1\|^2 = (\sqrt{2}/2)^2 + (\sqrt{2}/2)^2 = 1/2 + 1/2 = 1.$$

$$\|C_2\|^2 = (\sqrt{3}/3)^2 + (\sqrt{3}/3)^2 + (\sqrt{3}/3)^2 = 1/3 + 1/3 + 1/3 = 1.$$

$$\|C_3\|^2 = (\sqrt{6}/6)^2 + (\sqrt{6}/3)^2 + (\sqrt{6}/6)^2 = 1/6 + 4/6 + 1/6 = 1.$$

Donc $M \in \mathcal{O}(3)$.

Exercice 3 : $\mathcal{O}(n)$ est compact.

Voir chapitre précédent.



3 Structure

Propriété 7 : Structure du groupe orthogonal

Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $(\mathcal{O}(n), \times)$ est un groupe appelé **groupe orthogonal d'ordre n** . C'est même un sous-groupe de $\mathcal{GL}_n(\mathbb{R})$.

Démonstration

On montre facilement que $I_n \in \mathcal{O}(n)$, et si $M, N \in \mathcal{O}(n)$, $MN^{-1} = MN^T \in \mathcal{O}(n)$ car

$$(MN^T)^T MN^T = (N^T)^T M^T MN^T = N(M^T M)N^T = NI_n N^T = NN^T = I_n. \quad \blacksquare$$

4 Matrices de passage orthogonales et changement de base orthonormale

Propriété 8 : Matrice de passage en bon

Soient, dans un espace euclidien E , \mathcal{B} une b.o.n., \mathcal{B}' une base de E et $P = P_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}$ la matrice de passage de \mathcal{B} à \mathcal{B}' .

\mathcal{B}' est une b.o.n. de E si et seulement si P est orthogonale.

Démonstration

si \mathcal{B}' est un b.o.n., on a déjà vu que $P^{-1} = P^T$, et réciproquement, si P est orthogonale, le fait que les colonnes de P soient orthonormales et que \mathcal{B} soit une b.o.n. donne l'orthonormalité de \mathcal{B}' . \blacksquare

Remarque

R5 – Rappel : Changement de b.o.n. Si \mathcal{B} et \mathcal{B}' sont deux b.o.n. de E euclidien, $P = P_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}$ et $f \in \mathcal{L}(E)$:

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}'}(f) = P^T \text{Mat}_{\mathcal{B}}(f) P$$

Définition 3 : Matrices orthogonalement semblables

Deux matrices carrées $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ sont dites **orthogonalement semblables** lorsqu'il existe une matrice orthogonale $P \in \mathcal{O}(n)$ telle que

$$A = PBP^T.$$

Remarque

R6 – Cela signifie donc que A et B représentent un même endomorphisme dans des bases **orthonormales** éventuellement différentes.

Exercice 4 : Classique : décomposition QR

Soit $A \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{R})$.

1. **Montrer l'existence d'une matrice $Q \in \mathcal{O}(n)$ et d'une matrice R triangulaire supérieure inversible telles que $A = QR$.**

On pourra interpréter A comme matrice de passage de la base canonique de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ à la base formée des vecteurs colonnes de A et orthonormaliser cette dernière.

2. **Si (Q_0, R_0) est un couple qui convient, trouver tous les couples solution.**

1. Si (C_1, \dots, C_n) est la famille des vecteurs colonnes de A , A est la matrice de passage de la base canonique \mathcal{B}_c de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ à la base $\mathcal{C} = (C_1, \dots, C_n)$. On munit $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ du produit scalaire canonique (pour lequel, donc, \mathcal{B}_c est orthonormale). Soit \mathcal{B} une base orthonormale de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ obtenue à partir de \mathcal{C} par le procédé de Schmidt. On a alors, avec des notations habituelles :

$$P_{\mathcal{B}_c}^{\mathcal{C}} = P_{\mathcal{B}_c}^{\mathcal{B}} P_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}$$

Mais $P_{\mathcal{B}_c}^{\mathcal{B}}$, matrice de passage d'une base orthonormale à une base orthonormale, est orthogonale. Et l'algorithme de Schmidt garantit que, pour tout k ,

$$C_k \in \text{Vect}(e_1, \dots, e_k)$$

où l'on note $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ (on a en effet, pour tout k ,

$$\text{Vect}(e_1, \dots, e_k) = \text{Vect}(C_1, \dots, C_k)$$

ce qui permet de conclure.

2. À quelle condition a-t-on $QR = Q_0R_0$ où Q et Q_0 sont orthogonales, R et R_0 triangulaires supérieures inversibles ? On remarque que l'égalité étudiée équivaut à

$$Q_0^{-1}Q = R_0R^{-1}$$

où le premier membre est une matrice orthogonale, le second une matrice triangulaire supérieure.

Le problème est donc : quelles sont les matrices à la fois orthogonales et triangulaires supérieures ?

Construisons une telle matrice M : M est triangulaire supérieure donc son inverse M^{-1} l'est aussi. Or $M^{-1} = M^T$ est triangulaire inférieure donc M est nécessairement diagonale. Comme les colonnes de M sont normées, les coefficients diagonaux valent ± 1 . Réciproquement, de telles matrices sont bien orthogonales et triangulaires supérieures.

Autre argument possible : le premier vecteur colonne de M est unitaire et seule le premier coefficient est

possiblement non nul, donc vaut $\begin{pmatrix} \pm 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$.

Son deuxième vecteur colonne est orthogonal au premier, son premier coefficient est donc nul. Donc seule son deuxième coefficient est non nul, et vaut nécessairement ± 1 car il est unitaire. Il vaut donc $\begin{pmatrix} 0 \\ \pm 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$. Ainsi de

suite...

Bref,

$$\mathcal{O}(n) \cap \mathcal{T}_n^+(\mathbb{R}) = \{D_\varepsilon, \varepsilon \in \{-1, 1\}^n\}$$

où, si $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$, $D_\varepsilon = \text{diag}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$. On conclut que

$$QR = Q_0R_0 \iff \exists \varepsilon \in \{-1, 1\}^n \quad R = D_\varepsilon R_0 \text{ et } Q = Q_0 D_\varepsilon$$

(on s'est servi du fait que D_ε était sa propre inverse).

Grosso modo, cela signifie que dans deux décompositions QR , au signe près on retrouve les mêmes coefficients.

5 Matrices orthogonales positives et négatives

Propriété 9 : Déterminant d'une matrice orthogonale

Les matrices orthogonales sont de déterminant ± 1 . **La réciproque est fautive.**

Remarque

R7 – Une erreur classique est de considérer que la réciproque est vraie.

**Démonstration**

$\det(A^T A) = 1$.

Contre exemple : $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

Définition 4 : Groupe spécial orthogonal

On appelle **groupe spécial orthogonal d'ordre** $n \in \mathbb{N}^*$, noté $\mathcal{SO}(n)$ ou $\mathcal{SO}_n(\mathbb{R})$ le groupe des matrices orthogonales de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ de déterminant positif (+1), dites **matrices orthogonales positives** ou **directes**. Il est parfois noté $\mathcal{O}^+(n)$ (Notation HP).

Les matrices orthogonales de déterminant négatif sont appelées **matrices orthogonales négatives** ou **indirectes**. Les ensemble est $\mathcal{O}^-(n) = \mathcal{O}(n) \setminus \mathcal{SO}(n)$ (Notation HP).

Démonstration : groupe

noyau du déterminant.

Remarque

R8 – Attention, il ne suffit pas d'être de déterminant 1. $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ n'est pas une matrice orthogonale positive.

**Méthode 1 : Connaître le signe d'une matrice de $\mathcal{O}(3)$**

Si $M \in \mathcal{O}(3)$, il suffit de calculer son déterminant pour savoir si elle est positive ou négative.

Mais on peut s'épargner ce calcul : on sait que les colonnes de M forment une base orthonormale de $\mathcal{M}_{3,1}(\mathbb{R})$.

Donc, nécessairement, $C_1 \wedge C_2 = \pm C_3$ (base directe ou non).

Il suffit donc de connaître une composante non nulle de $C_1 \wedge C_2$ pour savoir si $M \in \mathcal{SO}(3)$ (signe +) ou si $M \in \mathcal{O}^-(3)$ (signe -).

Seul problème : le produit vectoriel n'est plus au programme de mathématiques... Mais il est au programme de physique...

IV**ISOMÉTRIES VECTORIELLES D'UN ESPACE EUCLIDIEN****1 Définition****Définition 5 : Isométrie vectorielle**

Soit $(E, | \cdot |)$ un espace euclidien, $\| \cdot \|$ la norme euclidienne associée.

On appelle **isométrie vectorielle** (ou **automorphisme orthogonal**, dénomination non privilégiée par le programme) de E tout endomorphisme $u \in \mathcal{L}(E)$ qui conserve la norme euclidienne, c'est-à-dire :

$$\forall x \in E, \|u(x)\| = \|x\|.$$

On note $\mathcal{O}(E)$ l'ensemble des isométries vectorielles de E . (La notation vient de la dénomination « orthogonal »).

Propriété 10 : Les isométries sont des automorphismes

Soit E un espace euclidien. Les isométries vectorielles de E sont des automorphismes. Autrement dit, $\mathcal{O}(E) \subset \mathcal{GL}(E)$.

Démonstration

Si $u \in \mathcal{O}(E)$ et $x \in \text{Ker } u$, alors $\|x\| = \|u(x)\| = 0$, donc $x = 0_E$. u est ainsi un endomorphisme de E injectif avec E de dimension finie, donc bijectif. ■

Remarque

- R 9 – En particulier, pour tout $(x, y) \in E^2$, $d(u(x), u(y)) = d(x, y)$: u conserve les distances.
- R 10 – Pour être tout-à-fait précis, il faudrait noter $\mathcal{O}(E, | \cdot |)$ cet ensemble, car les isométries ne sont pas les mêmes suivant le produit scalaire que l'on choisit.
- R 11 – Une symétrie orthogonale est un automorphisme orthogonal, alors qu'une projection orthogonale non triviale ne l'est pas (si $F \neq E$ et $x \in F^\perp \setminus \{0\}$, $\|p_F(x)\| = 0 \neq \|x\|$ (p_F n'est pas injectif).) Attention donc au vocabulaire !

2 Caractérisations

Propriété 11 : Caractérisations des isométries

Soient $(E, | \cdot |)$ un espace euclidien, $\| \cdot \|$ la norme euclidienne associée et $u \in \mathcal{L}(E)$. Les assertions suivantes sont équivalentes :

- (i) u est une isométrie vectorielle,
- (ii) u conserve le produit scalaire :

$$\forall x, y \in E, (u(x)|u(y)) = (x|y),$$
- (iii) u transforme TOUTE b.o.n. en une b.o.n.
- (iv) u transforme UNE b.o.n. en une b.o.n.
- (v) Dans TOUTE b.o.n., la matrice de u est orthogonale
- (vi) Il existe UNE b.o.n. dans laquelle la matrice de u est orthogonale
- (vii) $u \in \mathcal{GL}(E)$ et $u^* = u^{-1}$ (ie $u^* \circ u = \text{id}_E$).

Démonstration

On a déjà facilement $(ii) \implies (i)$ et $(iii) \implies (iv)$.

■ $(i) \implies (ii)$: Si u est une isométrie vectorielle, alors pour tout vecteurs x et y de E ,

$$\begin{aligned} (u(x)|u(y)) &= \frac{1}{4} \left(\|u(x) + u(y)\|^2 - \|u(x) - u(y)\|^2 \right) \\ &= \frac{1}{4} \left(\|u(x + y)\|^2 - \|u(x - y)\|^2 \right) \\ &= \frac{1}{4} \left(\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2 \right) \quad (\text{car } u \text{ conserve la norme}) \\ &= (x|y) \end{aligned}$$

■ $(ii) \implies (iii)$: On suppose que u conserve le produit scalaire. Soit (e_1, \dots, e_n) une base orthonormale de E . Alors $\forall i, j \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $(u(e_i)|u(e_j)) = (e_i|e_j) = \delta_{i,j}$, donc $(u(e_1), \dots, u(e_n))$ est une famille orthonormale, donc libre, de vecteurs de E , et est constituée de n vecteurs en dimension n : c'est une base orthonormale de E .

■ $(iv) \implies (i)$: On suppose que u transforme une b.o.n. $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ en une b.o.n. de E .

Soit $x \in E$, alors $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i$ et $\|x\|^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2$.

Comme $u(\mathcal{B})$ est orthonormale et $u(x) = \sum_{i=1}^n x_i u(e_i)$,

$$\|u(x)\|^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 = \|x\|^2.$$

u est donc bien une isométrie vectorielle.



- (ii) \Rightarrow (v) : Si u conserve le produit scalaire, $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ base orthonormale, pour tout (i, j) ,

$$(A^T)_{i,j} = a_{j,i} = (e_j | u(e_i)) = (u(u^{-1}(e_j)) | u(e_i)) = (u^{-1}(e_j) | e_i) = (A^{-1})_{i,j}$$

Donc $A^{-1} = A^T$: A est orthogonale.

Autre justification possible via (iii) : A est la matrice de passage de la b.o.n. \mathcal{B} à la b.o.n. $u(\mathcal{B})$.

- (v) \Rightarrow (vi) : évident.
- (vi) \Rightarrow (ii) : S'il existe une base orthonormale \mathcal{B} dans laquelle la matrice A de u est orthogonale, alors

$$\forall x, y \in E, (u(x) | u(y)) = X^T A^T A Y = X^T Y = (x | y).$$

- (vi) \Leftrightarrow (vii) : vu la matrice de l'adjoint en base orthonormale. ■

Remarque

R 12 – Un exercice classique consiste à montrer qu'une application qui conserve les distances et telle que $u(0_E) = 0_E$ est automatiquement linéaire.

R 13 – Un automorphisme u est une isométrie si et seulement si $\forall x, y \in E, (u(x) | y) = (x | u^{-1}(y))$.

R 14 – Si A est la matrice dans une b.o.n. de $u \in \mathcal{O}(E)$, alors la matrice de u^{-1} dans cette même base est $A^{-1} = A^T$.

R 15 – Être représenté par une matrice orthogonale en base *orthogonale* seulement ne suffit pas : dans \mathbb{R}^2 muni du produit scalaire usuel et de sa base canonique (e_1, e_2) , l'endomorphisme de matrice $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ dans la base $(e_1, 2e_2)$ n'est pas orthogonal (il ne conserve pas la norme !) bien que A soit une matrice orthogonale.

Propriété 12 : Structure

L'ensemble $\mathcal{O}(E)$ des isométries (automorphismes orthogonaux) de E est un groupe pour la loi \circ , appelé **groupe orthogonal de E** .

Démonstration

Comme $\mathcal{O}(E) \subset \mathcal{GL}(E)$, on va en fait montrer que $\mathcal{O}(E)$ est un sous-groupe de $(\mathcal{GL}(E), \circ)$.

- Comme on l'a déjà vu, $id_E \in \mathcal{O}(E)$.

- Soit u et v deux isométries vectorielles. Montrons que $u \circ v^{-1} \in \mathcal{O}(E)$.

$u \circ v^{-1} \in \mathcal{L}(E)$ et si $x \in E, \|u \circ v^{-1}(x)\| = \|v^{-1}(x)\|$ car u est une isométrie vectorielle.

Mais comme v est aussi une isométrie, $\|x\| = \|v(v^{-1}(x))\| = \|v^{-1}(x)\|$.

Finalement, pour tout $x \in E, \|u \circ v^{-1}(x)\| = \|x\|$, et $u \circ v^{-1} \in \mathcal{O}(E)$.

C'est aussi l'image réciproque par le morphisme $u \in \mathcal{GL}_n(E) \mapsto \text{Mat}_{\mathcal{B}}(u)$ du groupe $\mathcal{O}(n)$, \mathcal{B} étant une base orthonormale fixée. ■

Exercice 5 : CCINP 78

Propriété 13 : Image de l'orthogonal d'un sous-espace

Soient E un espace euclidien, $u \in \mathcal{O}(E)$ et F un sous-espace vectoriel de E .

$$u(F^\perp) = (u(F))^\perp.$$

Démonstration

Si $x \in u(F^\perp)$, il existe $y \in F^\perp$ tel que $x = u(y)$.

Alors, pour tout $z \in F, (x | u(z)) = (u(y) | u(z)) = (y | z) = 0$ car $y \in F^\perp$.

Donc $u(F^\perp) \subset u(F)^\perp$, et on obtient l'égalité en regardant les dimension et en utilisant la bijectivité de u :

$$\dim u(F^\perp) = \dim F^\perp = \dim E - \dim F = \dim E - \dim u(F) = \dim u(F)^\perp. \blacksquare$$

Propriété 14 : Stabilité par une isométrie

Soient E un espace euclidien, $u \in \mathcal{O}(E)$ et F un sous-espace vectoriel de E . Si F est stable par u , alors F^\perp l'est aussi.

Démonstration

$u(F) \subset F$ donc $F^\perp \subset u(F)^\perp = u(F^\perp)$, or ils ont même dimension par bijectivité de u , donc $u(F^\perp) = F^\perp$. \blacksquare

3 Isométries directes et indirectes

Propriété 15 : Déterminant

Une isométrie vectorielle est de déterminant ± 1 . La réciproque est fausse.

Définition 6 : Rotations et isométries indirectes

Si E espace euclidien, on appelle **groupe spécial orthogonal de E** , noté $\mathcal{SO}(E)$ le groupe des isométries de E de déterminant positif ($+1$), appelées **isométries positives** ou **isométries directes** ou **rotations de E** . Il est parfois noté $\mathcal{O}^+(E)$.

Les isométries de déterminant négatif sont appelées **isométries négatives** ou **indirectes**.

Propriété 16 : Structure

L'ensemble $\mathcal{SO}(E)$ est un sous-groupe de $(\mathcal{O}(E), \circ)$.

Propriété 17 : Caractérisation des rotations

Soit E euclidien orienté, $u \in \mathcal{L}(E)$. Sont équivalentes :

- (i) u isométrie directe (rotation) de E .
- (ii) u transforme toute bord en bord.
- (iii) u transforme une bord en bord.

Démonstration

(i) \Rightarrow (ii) : u transforme une bord \mathcal{B} en bon car orthogonal. Puis $\det_{\mathcal{B}}(u(\mathcal{B})) > 0$.

(iii) \Rightarrow (i) : u orthogonale et $\det u = \det_{\mathcal{B}}(u(\mathcal{B})) > 0$. \blacksquare

Propriété 18 : Cas des réflexions

Toute réflexion d'un espace euclidien est une isométrie indirecte.

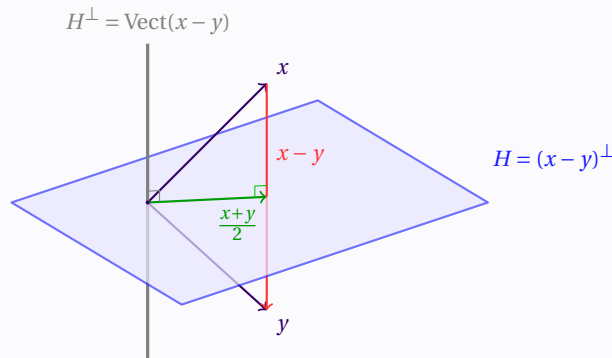
Remarque

R 16 – Soit s une réflexion. La bijection $\begin{matrix} \mathcal{SO}(E) & \longrightarrow & \mathcal{O}^-(E) \\ r & \longmapsto & r \circ s \end{matrix}$ de réciproque $\begin{matrix} \mathcal{O}^-(E) & \longrightarrow & \mathcal{SO}(E) \\ u & \longmapsto & u \circ s \end{matrix}$ permet de ramener l'étude de $\mathcal{O}^-(E)$ à celle du groupe $\mathcal{SO}(E)$.



Exercice 6 : Écrit Mines 2026 – Si $x \neq y$ sont des vecteurs de E euclidien tel que $\|x\| = \|y\|$, montrer qu'il existe une unique réflexion échangeant x et y .

Avec ces hypothèses, un dessin incite à considérer la réflexion s par rapport à $H = (x - y)^\perp$ (autrement dit l'hyperplan médiateur de x et y).



Comme

$$x = \frac{1}{2}(x + y) + \frac{1}{2}(x - y)$$

avec $\frac{1}{2}(x - y) \in H^\perp$ par définition de H et $\frac{1}{2}(x + y) \in H$ car $(x - y) \perp (x + y) = \|x\|^2 - \|y\|^2 = 0$, on a

$$s(x) = \frac{1}{2}(x + y) - \frac{1}{2}(x - y) = y.$$

Réciproquement, si une réflexion s convient, alors $x - y = (p_H(x) + p_{H^\perp}(x)) - (p_H(x) - p_{H^\perp}(x)) = 2p_{H^\perp}(x) \in H^\perp$ et comme c'est un vecteur non nul, nécessairement, $H = (x - y)^\perp$.

V RÉDUCTION DES ISOMÉTRIES VECTORIELLES ET DES MATRICES ORTHOGONALES

1 Isométries en dimension 2

a Matrices orthogonales

Propriété 19 : Description de $\mathcal{O}(2)$

$\mathcal{O}(2) = \mathcal{SO}(2) \sqcup \mathcal{O}^-(2)$ avec

$$\mathcal{SO}(2) = \left\{ R_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \theta \in \mathbb{R} \right\}$$

et

$$\mathcal{O}^-(2) = \left\{ S_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix}, \theta \in \mathbb{R} \right\}$$

Remarque

R 17 – L'écriture est de plus unique si on suppose en outre $\theta \in]-\pi, \pi]$.

Démonstration

Les matrices R_θ et S_θ appartiennent bien à ces ensembles.

Réciproquement, si $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ est orthogonale alors $a^2 + c^2 = b^2 + d^2 = 1$. On peut donc trouver θ, ϕ tels que $a = \cos\theta, c = \sin\theta, b = \sin\phi$ et $d = \cos\phi$.
 Mais comme $ab + cd = 0, \sin(\theta + \phi) = 0$ donc $\phi \equiv -\theta \pmod{2\pi}$. Il vient deux cas possibles :

- Soit $\phi \equiv -\theta \pmod{2\pi}$ et $A = R_\theta$,
- Soit $\phi \equiv \pi - \theta \pmod{2\pi}$ et $A = S_\theta$.

Propriété 20 : Écriture complexe d'une isométrie vectorielle

- \mathbb{C} étant vu comme un \mathbb{R} -espace vectoriel euclidien de base canonique $(1, i)$,
- L'écriture complexe d'une isométrie directe, de matrice dans la base canonique R_θ est $z' = e^{i\theta} z$,
 - L'écriture complexe d'une isométrie indirecte, de matrice dans la base canonique S_θ est $z' = e^{i\theta} \bar{z}$.

Démonstration

- $z' = (\cos\theta x - \sin\theta y) + i(\sin\theta x + \cos\theta y) = (\cos\theta + i \sin\theta)(x + iy)$.
- $z' = (\cos\theta x + \sin\theta y) + i(\sin\theta x - \cos\theta y) = (\cos\theta + i \sin\theta)(x - iy)$.

Corollaire 3 : Opérations sur les matrices orthogonales

Soit $\theta, \phi \in \mathbb{R}$

- | | |
|---|---|
| (i) $R_\theta = R_\phi \iff \theta \equiv \phi \pmod{2\pi}$. | (v) $S_\theta^2 = I_2$ |
| (ii) $R_\theta R_\phi = R_{\theta+\phi}$. | (vi) $S_\theta \times S_\phi = R_{\theta-\phi}$ |
| (iii) $R_\theta^{-1} = R_{-\theta}$. | (vii) $S_\theta \times R_\phi = S_{\theta-\phi}$ |
| (iv) $\forall k \in \mathbb{Z}, R_\theta^k = R_{k\theta}$ | (viii) $R_\theta \times S_\phi = S_{\theta+\phi}$ |

Remarque

R 18 – À savoir retrouver dans la pratique.

b

Rotations du plan orienté

Propriété 21 : Description des rotation en dimension 2

Soit E euclidien orienté de dimension 2, $r \in \mathcal{SO}(E)$. Il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que dans toute base orthonormale **directe**, la matrice de r soit $R_\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$.
 On dit que r est la **rotation vectorielle d'angle de mesure θ** .

Démonstration

Si R_θ et R_ϕ sont des matrices de r en base orthonormale, alors on a $P \in \mathcal{SO}(2)$ tel que $R_\theta = PR_\phi P^{-1}$. Comme $\mathcal{SO}(2)$ est commutatif, $R_\theta = R_\phi$.

**Propriété 22 : Structure**

$(\mathcal{SO}(2), \times)$ est un groupe abélien.

$\varphi : \begin{cases} \mathbb{R} & \longrightarrow \mathcal{SO}(2) \\ \theta & \longmapsto R_\theta \end{cases}$ est un morphisme de groupes surjectif de noyau $2\pi\mathbb{R}$.

$\psi : \begin{cases} \mathbb{U} & \longrightarrow \mathcal{SO}(2) \\ z & \longmapsto R_\theta \text{ où } \theta \text{ est un argument de } z \end{cases}$ est un isomorphisme de groupes.

Remarque

R 19 – La commutativité ne tient plus en dimension > 2 .

Propriété 23 : Unique rotation entre deux vecteurs unitaires

Soit x, y deux vecteurs non nuls de E . Il existe une unique rotation vectorielle transformant $\frac{x}{\|x\|}$ et $\frac{y}{\|y\|}$.

Démonstration

Il suffit de passer par les complexes dans une base. ■

Définition 7 : Angle orienté

On appelle **angle orienté** des vecteurs x et y non nuls de E euclidien orienté de dimension 2, l'angle de cette rotation, noté $\widehat{(x, y)}$. Cela revient à se donner un nombre réel modulo 2π .

Propriété 24 : Expression du produit scalaire et du produit mixte

Soient x, y des vecteurs non nuls de E euclidien orienté de dimension 2.

$$(x|y) = \|x\| \|y\| \cos \widehat{(x, y)} \quad [x, y] = \|x\| \|y\| \sin \widehat{(x, y)}$$

Propriété 25 : Effet sur les angles orientés

Les isométries directes conservent les angles orientés tandis que les isométries indirectes les changent en leur opposé.

Démonstration

Avec le produit scalaire et le produit mixte. ■

C Classifications des isométries du plan

Propriété 26 : Isométries du plan

Soit E euclidien orienté de dimension 2.

- Les isométries directes sont les rotations vectorielles d'angle de mesure $\theta \in \mathbb{R}$, de matrice dans toute base orthonormale directe

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

et d'écriture complexe dans une telle base $z' = e^{i\theta} z$.

- Les isométries indirectes sont les réflexions. Dans une base orthonormale directe, la matrice d'une telle application est

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

où θ dépend de la base, son écriture complexe est $z' = e^{i\theta} \bar{z}$ et son axe est dirigé par le vecteur d'affixe $e^{i\theta/2}$ dans cette base.

Démonstration

- $z' = e^{i\theta} z$ s'interprète comme une rotation vectorielle.
- $z' = e^{i\theta} \bar{z}$ est une involution donc une symétrie vectorielle.

$$z' = z \iff e^{-i\theta/2} z \in \mathbb{R} \iff z \in \text{Re}^{i\theta/2}$$

et

$$z' = -z \iff e^{-i\theta/2} z \in i\mathbb{R} \iff z \in \text{Re}^{i(\theta/2+\pi/2)} = \left(\text{Re}^{i\theta/2}\right)^\perp$$

Donc il s'agit de la symétrie orthogonale par rapport à la droite (donc réflexion) dirigée par $(\cos \theta/2, \sin \theta/2)$. ■

Remarque

R 20 – Le fait que les isométries indirectes sont exactement les réflexions est **très spécifique** à la dimension 2.

R 21 – Une rotation est la composée de deux réflexions d'axes distincts.



Méthode 2 : Étudier une isométrie en dim. 2...

...donnée par sa matrice en base orthonormale directe. C'est une matrice orthogonale (les colonnes sont ortho**NORM**ées).

Elle est nécessairement de la forme R_θ ou S_θ .

- Soit elle est de la forme R_θ , c'est une rotation et on a directement l'angle de la rotation en lisant les coefficients.
- Soit elle est de la forme S_θ et on sait que c'est une réflexion. Le plus simple est de retrouver son axe en calculant les vecteurs invariants.

2 Cas général

Propriété 27 : Rappel

Si u est une isométrie de E et F stable par u , alors F^\perp l'est.

bien de la forme voulue.

Si $\dim E = 2$,

Soit $u \in \mathcal{SO}(E)$ et la matrice dans toute base orthonormale de u est de la forme R_θ , donc de la forme voulue.

soit $u \notin \mathcal{SO}(E)$ et u est une réflexion (car on est en dimension 2) sur D , qui se représente dans une base orthonormale directe adaptée à $D^\perp \oplus D = E$ comme $\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ qui est aussi de la forme voulue.

Hérédité : Soit $n \geq 3$ tel que le théorème soit vrai pour des espaces euclidiens de dimension $n - 1$ ou $n - 2$, et soit E un espace euclidien de dimension n , $u \in \mathcal{O}(E)$. On utilise le premier lemme pour raisonner par disjonction de cas.

Soit u possède une droite stable, on pose e_1 vecteur propre unitaire associé à une valeur propre, nécessairement ± 1 , $D = \text{Vect } e_1$, et D^\perp est encore stable par u .

Alors $E = D^\perp \oplus D$ et dans une base adaptée (que l'on peut choisir orthonormale), la matrice de u est de la forme

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = \begin{pmatrix} & & 0 \\ & A & \\ 0 & & \pm 1 \end{pmatrix}$$

où A est la matrice dans une base orthonormale de D^\perp de l'endomorphisme \tilde{u} induit par u sur D^\perp qui est encore une isométrie car conserve toujours la norme.

On peut donc appliquer l'hypothèse de récurrence au rang $n - 1$ à l'isométrie $\tilde{u} \in \mathcal{O}(D^\perp)$ et choisir la base en question de telle manière que $A \in \mathcal{O}(n - 1)$ est la forme voulue.

Soit u possède un plan P stable, et, comme P^\perp est encore stable par u , dans une base orthonormale adaptée à la décomposition $P \oplus P^\perp = E$, la matrice de u est de la forme

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u) = \begin{pmatrix} A & O_{2,n-2} \\ O_{n-2,2} & B \end{pmatrix}$$

où, comme dans le cas précédent, $A \in \mathcal{O}(2)$ et $B \in \mathcal{O}(n - 2)$ sont de la forme voulue en appliquant le cas $n = 2$ et l'hypothèse de récurrence au rang $n - 2$ aux isométries induites par u sur P et P^\perp .

Reste à éventuellement réordonner les vecteurs de la base pour réordonner les blocs diagonaux. ■

3 Isométries en dimension 3

Propriété 28 : Description des isométries en dimension 3

Si $u \in \mathcal{O}(E)$ où E est un espace vectoriel euclidien orienté de dimension 3, il existe une base orthonormale de E dans laquelle la matrice de u est de la forme

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & \pm 1 \end{pmatrix}.$$

(I) Soit $u = r \in \mathcal{SO}(E)$ (rotation) et $r \neq \text{id}_E$, et alors $\dim \text{Ker}(r - \text{id}) = 1$ et $D = \text{Ker}(r - \text{id})$ est appelé **axe de la rotation**.

On fixe a unitaire dirigeant D et (e_1, e_2) une base orthonormale de $P = D^\perp$.

(e_1, e_2) est dite directe lorsque (e_1, e_2, a) l'est. On dit que D **est dirigée et orientée par a** .

On a $\theta \in \mathbb{R}$ tel que dans toute base orthonormale directe (e_1, e_2, a) adaptée à la décomposition

$$E = D^\perp \oplus D, \text{ la matrice de } r \text{ est } \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

On dit que θ **est une mesure de l'angle de la rotation r (modulo 2π)**.



(ii) (Hors-Programme) Soit $u \in \mathcal{O}^-(E)$ et $u \neq -\text{id}_E$, de matrice en base orthonormale de la forme

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \text{ composée commutative d'une rotation de matrice } \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et d'une}$$

réflexion de matrice $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$ par rapport à un plan orthogonal à l'axe de la rotation (on parle d'anti-rotation).

Remarque

R 25 – Et finalement, les isométries sont id_E , les rotations, les anti-rotations dont les réflexions font partie, et $-\text{id}_E$ (symétrie centrale).

Démonstration

On utilise le théorème de réduction des isométries.

Comme on est en dimension impaire, il y a nécessairement une valeur propre réelle, donc nécessairement ± 1 .

On a alors nécessairement une base orthonormale dans laquelle la matrice est $\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & \pm 1 \end{pmatrix}$ (le bloc

haut-gauche pouvant être éventuellement $\pm I_2$).

Si $u = r$ rotation, son déterminant vaut 1 et la matrice devient $\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, et 1 est valeur propre d'ordre 1

ou 3 (car $\chi_r \in \mathbb{R}[X]$).

Si $r \neq \text{id}_E$, $\text{Ker}(r - \text{id}_E)$ est donc bien de dimension 1, et $\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$ est la matrice dans n'importe quelle base orthonormale directe de la rotation induite par r sur $P = D^\perp$ (c'est toujours une isométrie, elle est de déterminant 1). D'où la bonne définition de l'angle de la rotation. ■

Propriété 29 : Caractéristiques d'une rotation en dimension 3

Soit r est une rotation de E espace euclidien orienté de dimension 3 distincte de id_E .

- Son axe est l'ensemble de ses vecteurs invariants.
- Si θ est une mesure de son angle, alors $\text{tr } r = 2 \cos\theta + 1$.
- Le signe de $\sin\theta$ est celui du produit mixte $[x, r(x), a]$ où a est un vecteur directeur orientant l'axe (non nécessairement unitaire) et x un vecteur n'appartenant pas à l'axe (en général pris dans la base canonique).

Démonstration

Les deux premiers points sont faciles.

Pour le troisième, dans une base orthonormale directe $(e_1, e_2, a/\|a\|)$,

$$[x, r(x), a] = \begin{vmatrix} x_1 & \cos(\theta)x_1 - \sin(\theta)x_2 & 0 \\ x_2 & \sin(\theta)x_1 + \cos(\theta)x_2 & 0 \\ x_3 & x_3 & \|a\| \end{vmatrix} = \|a\| (x_1^2 + x_2^2) \sin(\theta) \quad \blacksquare$$



Méthode 3 : Étude d'isométries en dimension 3

- Reconnaître une matrice orthogonale en étudiant l'orthonormalité de ses colonnes ou de ses lignes.
- Pour savoir si c'est une matrice orthogonale positive ou négative, une astuce simple permettant d'éviter le recours au déterminant : les colonnes étant orthonormées, on a nécessairement $C_1 \wedge C_2 = \pm C_3$ où \pm est le signe de l'isométrie. Il suffit alors de calculer une composante de ce produit vectoriel pour conclure.
- Si elle est positive, c'est une rotation (sans doute différente de l'identité). On détermine l'axe en cherchant les vecteurs invariants, et on l'oriente à l'aide d'un vecteur directeur, puis on cherche l'angle en utilisant la propriété précédente.
- Si elle est négative, c'est $-id_E$ ou une réflexion, sinon c'est hors-programme. Dans le deuxième cas, cela se voit matriciellement en base orthonormale avec une matrice orthogonale symétrique (voir TD). Il suffit alors de calculer ses vecteurs invariants pour la caractériser.
- Ne pas oublier qu'on ne travaille pas toujours dans \mathbb{R}^3 : après une étude matricielle, revenir à l'espace initial.

Exercice 7 : Déterminer la matrice dans la base canonique de \mathbb{R}^3 munit de sa structure euclidienne canonique et de son orientation habituelle de la rotation d'axe $D : x = y = z$ et d'angle de mesure $\theta = \frac{2\pi}{3}$.

$a = (1, 1, 1)$ dirige l'axe de la rotation.

Son orthogonal est $P : x + y + z = 0$ dirigé par $b = (1, 0, -1)$ et $c = (1, -2, 1)$, ils sont orthogonaux.

D'où une base orthonormale adaptée de \mathbb{R}^3 : $(\frac{1}{\sqrt{2}}b, \frac{1}{\sqrt{6}}c, \frac{1}{\sqrt{3}}a)$.

Dans cette base, la matrice de la rotation est $M = \begin{pmatrix} -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ \sqrt{3}/2 & -1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

La matrice recherchée est alors $PMPT$ où $P = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{3} \\ 0 & -2/\sqrt{6} & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{3} \end{pmatrix}$ est la matrice de passage de la base canonique à $(\frac{1}{\sqrt{2}}b, \frac{1}{\sqrt{6}}c, \frac{1}{\sqrt{3}}a)$.

La matrice recherchée est alors $\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

Exercice 8 : Étudier l'endomorphisme canoniquement associé à $M = -\frac{1}{9} \begin{pmatrix} 7 & 4 & 4 \\ -4 & 8 & -1 \\ 4 & 1 & -8 \end{pmatrix}$.

Les colonnes sont orthonormés $C_1 \wedge C_2 = +C_3$ avec la première coordonnée : c'est une matrice de rotation.

On calcule les vecteurs invariants, on trouve $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -4 \end{pmatrix}$ donc $a = (1, 0, -4)$ dirige et oriente l'axe de la rotation.

Puis $\text{tr} M = -7/9 = 2 \cos \theta + 1$ donc $\cos \theta = -8/9$.

Et le signe de $\sin \theta$ est celui de $\begin{vmatrix} 1 & -7 & 1 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & -4 & -4 \end{vmatrix} < 0$.

Donc rotation d'angle $-\text{Arccos}(-8/9)$.



VI ENDOMORPHISMES AUTOADJOINTS

1 Définition

Définition 8 : Endomorphisme autoadjoint

Soit $(E, (\cdot|\cdot))$ un espace euclidien. On dit que $u \in \mathcal{L}(E)$ est **autoadjoint** (ou **symétrique**) lorsque

$$\forall (x, y) \in E^2 \quad (u(x)|y) = (x|u(y))$$

L'ensemble des endomorphismes autoadjoins est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{L}(E)$, noté $\mathcal{S}(E)$.

Exercice 9 : $\mathcal{S}(E)$ a une structure de \mathbb{R} -espace vectoriel.

Conséquence de la linéarité de $u \mapsto u^*$.

Remarque

R 26 – Ne pas confondre endomorphisme symétrique et symétrie !

R 27 – La linéarité est en fait automatique (exercice).

Exercice 10 : Montrer que si u est autoadjoint, alors $\text{Ker } u \oplus \text{Im } u = E$

Comme u est autoadjoint, $\text{Im } u = \text{Im } u^* = (\text{Ker } u)^\perp$ classiquement, ce qui permet de conclure.

2 Caractérisation matricielle en base orthonormale

Propriété 30 : Matrice en bon d'un endomorphisme autoadjoint

Soit \mathcal{B} une base **orthonormale** de l'espace euclidien E , $u \in \mathcal{L}(E)$.
 u est autoadjoint si et seulement si $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(u)$ est symétrique.

Démonstration

Si $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(u)$, pour tout (i, j) , $a_{i,j} = (e_i|u(e_j))$.

3 Cas des projections

Propriété 31 : CNS pour qu'un projecteur soit orthogonal

Soit $p \in \mathcal{L}(E)$ un projecteur ($p \circ p = p$). Alors p est un projecteur orthogonal (i.e. $\text{Ker } p \perp \text{Im } p$) si et seulement s'il est autoadjoint (symétrique).

Remarque

R 28 – P la matrice de p en **base orthonormale**. Alors p projection orthogonale si et seulement si $P^2 = P$ et $P \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.

Démonstration

Si p est orthogonal, $x, y \in E$, alors $(p(x)|y) = (p(x)|p(y)) + (p(x)|y - p(y)) = (p(x)|p(y)) = (p(y)|x) = (x|p(y))$ par symétrie des rôles de x et y .
 Si p est un projecteur symétrique, $x \in \text{Ker } p$ et $y = p(x') \in \text{Im } p$, $(x|y) = (x|p(x')) = (p(x)|x') = (0_E|x') = 0$ donc p projecteur orthogonal. ■

4 Sous-espaces stables

Propriété 32 : Stabilité de l'orthogonal d'un sous-espace stable

Si F stable par $u \in \mathcal{S}(E)$, alors F^\perp l'est aussi.

Démonstration

F^\perp stable par $u^* = u$. ■

5 Réduction des endomorphismes et des matrices symétriques : théorème spectral

E désigne un espace euclidien. Trois énoncés équivalents du théorème spectral :

Théorème 4 : spectral (version 1)

$u \in \mathcal{S}(E)$ si et seulement si $E = \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp } u} E_\lambda(u)$ où les $E_\lambda(u) = \text{Ker}(u - \lambda \text{id}_E)$ sont les sous-espaces propres de u .

Théorème 5 : spectral (version 2)

Un endomorphisme est autoadjoint si et seulement s'il est diagonalisable en base orthonormale : $u \in \mathcal{S}(E)$ si et seulement s'il existe une base orthonormale de E formée de vecteurs propres de u .

Théorème 6 : spectral (version 3)

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ si et seulement si elle est orthodiagonalisable : il existe $P \in \mathcal{O}(n)$ et $D \in \mathcal{D}_n(\mathbb{R})$ telles que

$$A = PDP^T = PDP^{-1}.$$

Remarque

R 29 – P est la matrice de passage de la base canonique de \mathbb{R}^n à une base orthonormale de vecteurs propres de l'endomorphisme canoniquement associé à A .

Démonstration

Remarquons déjà que le fait que des sous-espaces propres associés à des valeurs propres distinctes soient orthogonaux va être une conséquence de l'orthodiagonalisabilité, mais peut se voir aussi directement : si $\lambda, \mu \in \text{Sp } u$ avec $\lambda \neq \mu$, $x \in E_\lambda(u)$ et $y \in E_\mu(u)$.

Alors $\lambda(x|y) = (\lambda x|y) = (u(x)|y) = (x|u(y)) = (x|\mu y) = \mu(x|y)$ et comme $\lambda \neq \mu$, $(x|y) = 0$.

Précisons aussi que le sens réciproque est clair, par exemple avec la version matricielle : une matrice orthodiagonalisable est bien symétrique.

Passons maintenant aux choses sérieuses : supposons $u \in \mathcal{S}(E)$.

**Lemme 3**

Soit $u \in \mathcal{S}(E)$. Alors $\text{Sp } u \neq \emptyset$.

Démonstration

On sait que u admet une valeur propre complexe λ . Soit \mathcal{B} une base orthonormale de E et $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ la matrice de u dans cette base.

On a donc $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{C}) \setminus \{0\}$ tel que $AX = \lambda X$.

On remarque astucieusement que $X^T \bar{X} = \sum_{i=1}^n |x_i|^2 > 0$.

On calcule ensuite $\lambda X^T \bar{X} = (\lambda X)^T \bar{X} = AX^T \bar{X} = X^T A^T \bar{X} = X^T A \bar{X} = X^T \bar{A} \bar{X} = \bar{\lambda} X^T \bar{X}$ et donc $\lambda = \bar{\lambda} \in \mathbb{R}$. ■

Et on démontre le théorème en raisonnant par récurrence sur la dimension de E .

Initialisation Si E est de dimension 1, il n'y a rien à faire.

Hérédité Soit $n \geq 2$. Supposons que tout endomorphisme symétrique d'un espace de dimension $n-1$ soit orthodagonalisable. Soit E un espace de dimension n et $u \in \mathcal{S}(E)$.

On sait que u admet une valeur propre et donc un vecteur propre $x \in E \setminus \{0_E\}$.

Soit $D = \text{Vect } x$. Alors D est stable par u et donc $H = D^\perp$ l'est aussi d'après une propriété vu précédemment.

Soit u_H l'endomorphisme induit par u sur H , espace euclidien de dimension $n-1$ (hyperplan).

La symétrie de u se transmet à u_H par restriction.

Donc u_H est orthodagonalisable par hypothèse de récurrence.

Soit (e_1, \dots, e_{n-1}) une base orthonormale de vecteurs propres de u_H . Ce sont aussi des vecteurs propres de u .

Enfin, $(e_1, \dots, e_{n-1}, \frac{1}{\|x\|} x)$ est une base adaptée à la décomposition $E = D \oplus H$, orthonormale, formée de vecteurs propres de u , ce qui établit la récurrence. ■

Remarque

R 30 – C'est faux pour une matrice complexe : $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 2i \end{pmatrix}$ symétrique complexe non diagonalisable.

C'est vrai dans \mathbb{C} pour des matrices telles que $A^T = \bar{A}$ mais c'est hors-programme.

Exercice 11 : CCINP 68**6 Positivité, défini-positivité****Définition 9 : Endomorphisme autoadjoint positif, défini-positif**

On dit que $u \in \mathcal{S}(E)$ est **positif** lorsque

$$\forall x \in E, (x|u(x)) \geq 0$$

On note $\mathcal{S}^+(E)$ de tels endomorphismes.

On dit que $u \in \mathcal{S}(E)$ est **défini positif** lorsque

$$\forall x \in E, (x|u(x)) > 0$$

On note $\mathcal{S}^{++}(E)$ de tels endomorphismes.

Définition 10 : Matrice symétrique positive, défini-positive

On dit que $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est **positive** lorsque

$$\forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), X^T A X \geq 0$$

On note $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ de telles matrices.

On dit que $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est **défini-positive** lorsque

$$\forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), X^T A X > 0$$

On note $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ de telles matrices.

Remarque

R31 – Ce ne sont pas des espaces vectoriels, mais il y a stabilité par +.

R32 – Les matrices symétriques positives (respectivement défini-positives) sont les matrices en **base orthonormale** de endomorphismes autoadjoints positifs (respectivement défini-positifs).

Propriété 33 : Caractérisation spectrale

- $u \in \mathcal{S}(E)$ est positif ssi $\text{Sp } u \subset \mathbb{R}^+$.
- $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est positive ssi $\text{Sp } A \subset \mathbb{R}^+$
- $u \in \mathcal{S}(E)$ est défini-positif ssi $\text{Sp } u \subset \mathbb{R}_*^+$.
- $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est défini-positive ssi $\text{Sp } A \subset \mathbb{R}_*^+$.

Démonstration

Soit $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. Par théorème spectral, il existe $P \in \mathcal{O}(n)$ et D diagonale dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telles que

$$A = P D P^{-1} = P D P^T$$

Alors

$$\begin{aligned} \forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}) \quad X^T A X \geq 0 &\iff \forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), X^T P D P^T X \geq 0 \\ &\iff \forall Y \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), Y^T D Y \geq 0 \end{aligned}$$

car l'application $X \mapsto P^T X$ est une bijection de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ dans lui-même (un automorphisme, même), de réciproque $Y \mapsto P Y$. Or, avec des notations « évidentes »,

$$Y^T D Y = \sum_{i=1}^n d_i y_i^2$$

et $\text{Sp}(A) = \{d_i ; 1 \leq i \leq n\}$. Si tous les d_i sont positifs, alors $\forall Y \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), Y^T D Y \geq 0$, et réciproquement, en prenant les Y dans la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$.

Pour la défini-positivité, c'est quasiment la même preuve que pour la caractérisation de la positivité, quelques inégalités strictes à la place d'inégalités larges, seulement. ■

Exercice 12 : CCINP 66

Exercice 13 : [Très Classique!] Racines carrées et décomposition polaire

1. **Racine carrée** : si A est symétrique positive, montrer qu'il existe B symétrique positive telle que $B^2 = A$.
Que dire de B si A est supposée définie positive ?
On montre l'unicité de B géométriquement dans la question suivante.
2. Soit u un endomorphisme autoadjoint positif.
 - (a) Établir l'existence d'un endomorphisme h symétrique positif tel que $h^2 = u$.
 - (b) En utilisant le fait que, si $h^2 = u$, h et u commutent, démontrer l'unicité de h . Que peut-on dire de h si u est défini positif ?



3. Montrer que si $A \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$, il existe $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telle que $A = M^T M$.
4. **Décomposition polaire** : soit $A \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{R})$. Montrer que $A^T A$ est une matrice symétrique définie positive puis qu'il existe un unique couple $(Q, S) \in \mathcal{O}(n) \times \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ telles que $A = QS$.
C'est l'analogue de forme trigonométrique des complexes : une matrice symétrique défini-positive s'écrivant sous forme d'exponentielle (pourquoi?)
5. Montrer que $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ est fermé.
6. Étendre le résultat d'existence de la décomposition polaire à toute matrice carrée réelle (mais sans unicité) en utilisant les résultats classiques de densité de $\mathcal{GL}_n(\mathbb{R})$ dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et de compacité de $\mathcal{O}(n)$.

1. **Racine carrée** : Par théorème spectral, il existe $P \in \mathcal{O}(n)$ et $D \in \mathcal{D}_n(\mathbb{R})$ (i.e. diagonale) telles que

$$A = PDP^T = PDP^{-1}$$

Et $D = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ où les λ_i sont les valeurs propres de D , donc de A . Donc les λ_i sont positifs, et, en posant $D' = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_n})$ et $B = PD'P^{-1} = PD'P^T$, on obtient une matrice symétrique (deuxième forme) et à valeurs propres positives (première forme) telle que $B^2 = A$.

Si A est définie positive, elle est dans $GL_n(\mathbb{R})$ (elle n'a pas 0 pour valeur propre), donc B aussi (prendre le déterminant, ou encore dire que $A^{-1}BB = I_n$), donc B , étant déjà positive, est définie positive.

2. (a) Conséquence de la question 1. On peut aussi par le théorème spectral, se donner $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base orthodiagonalisante de u avec pour tout i , $u(e_i) = \lambda_i e_i$ et poser v l'unique endomorphisme tel que pour tout i , $u(e_i) = \sqrt{\lambda_i} e_i$. Vu la matrice de v dans la base \mathcal{B} , il convient.
- (b) u est un polynôme en h , donc commute avec. Comme dans le classique de la diagonalisation simultanée, on considère $E_\lambda(u)$ un sous-espace propre de u , stable par h , qui induit dessus un endomorphisme h_λ autoadjoint donc diagonalisable.
Mais comme h_λ est positif et $h_\lambda^2 = u_\lambda = \lambda \text{id}_{E_\lambda(u)}$, nécessairement $h_\lambda = \sqrt{\lambda} \text{id}_{E_\lambda(u)}$ car si μ valeur propre de h_λ , $\mu^2 = \lambda$ et $\mu \geq 0$ donc $\mu = \sqrt{\lambda}$. Et comme h_λ est diagonalisable avec une seule valeur propre, on a bien $h_\lambda = \sqrt{\lambda} \text{id}_{E_\lambda(u)}$.
Comme $E = \bigoplus_{\lambda \in \text{Sp } u} E_\lambda(u)$ (car u est diagonalisable), h est bien unique.

3. $M = D'P^T$ où D' comme ci-dessus convient.

4. **Décomposition polaire** : Une analyse permet de voir que si on a une telle décomposition $A = QS$, alors $A^T = S^T Q^T = SQ^{-1}$ donc $A^T A = S^2$.

Or $A^T A$ est assez facilement une matrice symétrique. Et, si $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$,

$$X^T (A^T A) X = Y^T Y \quad \text{où } Y = AX$$

Or, si $X \neq (0)$, $Y = AX \neq (0)$ car A est inversible, donc $Y^T Y = \|Y\|^2 > 0$.

En utilisant les questions précédentes, il existe S symétrique définie positive telle que

$$S^2 = A^T A$$

Posons $Q = AS^{-1}$; on calcule

$$Q^T Q = (S^{-1})^T A^T AS^{-1} = S^{-1} S^2 S^{-1} = I_n$$

Donc Q est orthogonale.

L'unicité repose, d'après la remarque initiale, sur le fait qu'une matrice symétrie définie-positive a une unique racine carrée définie positive.

5. On a $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R}) = \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \cap \mathcal{P}$ avec $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ fermé en tant que sous-espace de dimension finie et $\mathcal{P} = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}), \forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), X^T M X \geq 0\} = \bigcap_{X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})} f_X^{-1}([0, +\infty[)$ où pour tout $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, $f_X : M \mapsto X^T M X$ est continue car linéaire sur un espace de dimension finie, donc $f_X^{-1}([0, +\infty[)$ est fermée, donc \mathcal{P} l'est donc $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ l'est.

On peut aussi prendre une suite $(M_n)_n$ convergente vers M de matrices de $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$, et, par continuité de la transposition et des f_X , passer à la limite dans $M_n^T = M_n$ et $X^T M_n X \geq 0$ pour en déduire que $M \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$.

6. Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Par densité, on a une suite (A_n) de matrices inversibles telles que $A_n \rightarrow A$. On peut donc trouver des suites (Q_n) et (S_n) de matrices respectivement orthogonales et symétriques telles que pour tout $n \in \mathbb{N}$, $A_n = Q_n S_n$.

Par compacité de $\mathcal{O}(n)$, on a une extractrice φ telle que $Q_{\varphi(n)} \rightarrow Q \in \mathcal{O}(n)$.

Alors $S_{\varphi(n)} = Q_{\varphi(n)}^{-1} A_{\varphi(n)} \rightarrow S = Q^{-1} A$ (la continuité de $M \mapsto M^{-1}$ vient de la formule de la comatrice) et comme $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ est fermé, $S \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$.

Finalement, $A = QS$ avec $Q \in \mathcal{O}(n)$ et $S \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$.

7 Annexe classique (HP) : formules variationnelles, norme subordonnée et rayon spectral

E est un espace euclidien, $(\cdot | \cdot)$ son produit scalaire, $\|\cdot\|$ la norme euclidienne associée, $\|\cdot\|$ la norme de $\mathcal{L}(E)$ subordonnée à $\|\cdot\|$.

Les notions suivantes ne sont pas au programme mais se retrouvent très fréquemment dans des sujets d'écrit.

Propriété 34 : Caractérisation de la norme euclidienne

$$\text{Pour tout } x \in E, \|x\| = \max_{\|y\|=1} (x|y) = \max_{\|y\| \leq 1} (x|y).$$

Démonstration

Pour $x = 0_E$, c'est facile.

Sinon, par inégalité de Cauchy-Schwarz, pour tout $y \in S(0_E, 1)$, $(x|y) \leq |(x|y)| \leq \|x\| \|y\| = \|x\|$.

De plus, ce majorant est atteint pour $y = \frac{1}{\|x\|} x \in S(0_E, 1)$.

$$\text{Donc } \|x\| = \max_{\|y\|=1} (x|y) = \sup_{\|y\|=1} (x|y).$$

Remarque : la fonction $y \mapsto (x|y)$ est continue (linéaire sur E de dimension finie) et $S(0_E, 1)$ est compacte (fermé borné en dimension finie) donc elle atteint un maximum sur $S(0_E, 1)$.

Pour la deuxième expression, il suffit de travailler de même avec le compact $\bar{B}(0_E, 1)$ (ou dans la preuve directe, de voir que $\frac{1}{\|x\|} x \in \bar{B}(0_E, 1)$.) ■

Propriété 35 : Norme subordonnée de l'adjoint

$$\text{Pour tout } u \in \mathcal{L}(E), \| \|u\| = \| \|u^*\|.$$

Démonstration

Soit $u \in \mathcal{L}(E)$. Pour tout $x \in E$, à l'aide de l'inégalité de Cauchy-Schwarz,

$$\| \|u(x)\|^2 = (u(x)|u(x)) = (x|u^* \circ u(x)) \leq \| \|u^* \circ u(x)\| \|x\| \leq \| \|u^* \circ u\| \cdot \|x\|^2 \leq \| \|u^*\| \cdot \| \|u\| \cdot \|x\|^2$$

car $\| \| \cdot \|$ est une norme d'algèbre. Donc $\| \|u\|^2 \leq \| \|u^*\| \cdot \| \|u\|$.

Alors soit $\| \|u\| = 0$ et alors $u = 0_{\mathcal{L}(E)} = u^*$ et donc $\| \|u\| = 0 = \| \|u^*\|$, soit $\| \|u\| \neq 0$ et alors $\| \|u\| \leq \| \|u^*\|$. Puis, symétriquement, $\| \|u^*\| \leq \| \| (u^*)^* \| = \| \|u\|$. ■

Propriété 36 : Formules variationnelles

Soit $u \in \mathcal{S}(E)$. Alors $x \mapsto \frac{(x|u(x))}{\|x\|^2}$ atteint sur $E \setminus \{0_E\}$ un minimum et un maximum qui sont respectivement $\min(\text{Sp } u)$ et $\max(\text{Sp } u)$.

Soit $S \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. Alors $X \mapsto \frac{X^T S X}{X^T X}$ atteint sur $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}) \setminus \{(0)\}$ un minimum et un maximum qui sont respectivement $\min(\text{Sp } S)$ et $\max(\text{Sp } S)$.

Démonstration

Par théorème spectral, on a une base orthonormale (e_1, \dots, e_n) de vecteurs propres de u associés aux valeurs propres $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ respectivement.

Si $x = \sum_{k=1}^n x_k e_k$, $(x|u(x)) = \sum_{k=1}^n \lambda_k x_k^2 \in [\min(\text{Sp } u) \|x\|^2, \max(\text{Sp } u) \|x\|^2]$, les bornes étant atteinte pour des vecteurs e_i d'indice correspondant respectivement à la plus petite et à la plus grande valeur propre.

Pour montrer la version matricielle directement, on écrit le théorème spectral : $S = P D P^T$ avec $P \in \mathcal{O}(n)$ et D



diagonale et on obtient, pour $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ et en posant $Y = P^T X$ ie $X = PY$,

$$\frac{X^T S X}{X^T X} = \frac{X^T P D P^T X}{X^T X} = \frac{Y^T D Y}{Y^T P^T P Y} = \frac{Y^T D Y}{Y^T Y} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i y_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2}$$

avec des notations évidentes et $D = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ ce qui permet de conclure comme dans la version géométrique. ■

Définition 11 : Rayon spectral

Le **rayon spectral** de $u \in \mathcal{L}(E)$ est $\rho(u) = \max_{\lambda \in \text{Sp} u} |\lambda|$.

Propriété 37 : Norme subordonnée et rayon spectral, cas autoadjoint

Si $u \in \mathcal{S}(E)$, alors $\rho(u) = \|u\|$.

Démonstration

On suppose $u \in \mathcal{S}(E)$. Comme dans la preuve précédente, pour tout $x \in E$, $\|u(x)\|^2 = \sum_{k=1}^n \lambda_k^2 x_k^2 \leq (\rho(u))^2 \|x\|^2$ atteint pour x vecteur propre associé à une valeur propre de valeur absolue égale à $\rho(u)$.

Donc $\|u\| = |\rho(u)| = \rho(u) \geq 0$. ■

Propriété 38 : Norme subordonnée et rayon spectral, cas général

Si $u \in \mathcal{L}(E)$, alors $\|u\|^2 = \|u^* \circ u\| = \rho(u^* \circ u)$.

Démonstration

On a déjà $u^* \circ u \in \mathcal{S}(E)$ (et même $\mathcal{S}^+(E)$ car pour tout $x \in E$, $(x|u^* \circ u(x)) = (u(x)|u(x)) \geq 0$.)

D'après la propriété précédente, $\rho(u^* \circ u) = \|u^* \circ u\| \leq \|u^*\| \cdot \|u\| = \|u\|^2$.

Puis, pour tout $x \in E$, $\|u(x)\|^2 = (u(x)|u(x)) = (x|u^* \circ u(x)) \leq \|x\| \cdot \|u^* \circ u(x)\| \leq \|u^* \circ u\| \cdot \|x\|^2$ par inégalité de Cauchy-Schwarz et définition de la norme subordonnée.

Finalement, $\|u\|^2 \leq \|u^* \circ u\|$. ■