

" Le lever de coude est la meilleure façon
de ne pas baisser les bras "

Teddy et Adrien

Notations

Dans tout le problème, n désigne un entier naturel non nul ($n \in \mathbb{N}^*$).

— Dans $\mathcal{E}_n = \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ espace vectoriel réel de dimension n , on utilisera le produit scalaire canonique défini par

$$\forall U, V \in \mathcal{E}_n, (U|V) = U^T V$$

— On notera $\mathcal{M}_n = \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, l'espace vectoriel des matrices carrées de taille n à coefficients réels.

— Pour $A \in \mathcal{M}_n$, on notera $\ker(A)$ le noyau de A vu comme endomorphisme de \mathcal{E}_n .

— Dans \mathcal{M}_n , on notera 0_n la matrice nulle et I_n la matrice unité. Le déterminant est noté \det .

— $\mathcal{G}_n = GL_n(\mathbb{R}) = \{M \in \mathcal{M}_n, \det(M) \neq 0\}$ désigne le groupe linéaire des matrices inversibles de \mathcal{M}_n .

— $\mathcal{O}_n = \{M \in \mathcal{M}_n, M^T M = I_n\}$ désigne le groupe orthogonal d'indice n , formé des matrices orthogonales de \mathcal{M}_n .

— On sera enfin amené à utiliser des décompositions par blocs. On rappelle en particulier que si $A, B, C, D, A', B', C', D' \in \mathcal{M}_n$ on a alors dans \mathcal{M}_{2n} :

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AA' + BC' & AB' + BD' \\ CA' + DC' & CB' + DD' \end{pmatrix}$$

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

1 Le groupe symplectique

Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et soit J_n ou simplement J la matrice de \mathcal{M}_{2n} définie par

$$J = \begin{pmatrix} 0_n & -I_n \\ I_n & 0_n \end{pmatrix}$$

On note

$$\mathcal{S}_{p_{2n}} = \{M \in \mathcal{M}_{2n}, M^T J M = J\}$$

1. Calculer J^2 et J^T en fonction de I_{2n} et J . Montrer que J est inversible et identifier son inverse.
2. Vérifier que $J \in \mathcal{S}_{p_{2n}}$ et que pour tout réel α ,

$$K(\alpha) = \begin{pmatrix} I_n & 0_n \\ -\alpha I_n & I_n \end{pmatrix} \in \mathcal{S}_{p_{2n}}$$

3. Pour tout $U \in \mathcal{G}_n$, vérifier que $L_U = \begin{pmatrix} U & 0_n \\ 0_n & (U^{-1})^T \end{pmatrix}$ est dans $\mathcal{S}_{p_{2n}}$.
4. Si $M \in \mathcal{S}_{p_{2n}}$, préciser les valeurs possibles de $\det(M)$.
5. Montrer que le produit de deux éléments de $\mathcal{S}_{p_{2n}}$ est un élément de $\mathcal{S}_{p_{2n}}$.
6. Montrer qu'un élément de $\mathcal{S}_{p_{2n}}$ est inversible et que son inverse appartient à $\mathcal{S}_{p_{2n}}$.

7. Montrer que si $M \in \mathcal{S}_{p_{2n}}$ alors $M^T \in \mathcal{S}_{p_{2n}}$.

Soit M une matrice de \mathcal{M}_{2n} écrite sous la forme

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \text{ avec } A, B, C, D \in \mathcal{M}_n$$

8. Déterminer les relations sur A, B, C, D caractérisant l'appartenance de M à $\mathcal{S}_{p_{2n}}$.

2 Centre de $\mathcal{S}_{p_{2n}}$

On s'intéresse ici au centre \mathcal{Z} de $\mathcal{S}_{p_{2n}}$ c'est à dire

$$\mathcal{Z} = \{M \in \mathcal{S}_{p_{2n}}, \forall N \in \mathcal{S}_{p_{2n}}, MN = NM\}$$

9. Justifier l'inclusion suivante : $\{-I_{2n}, I_{2n}\} \subset \mathcal{Z}$.

Réciproquement, soit $M \in \mathcal{Z}$ écrite sous la forme

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \text{ avec } A, B, C, D \in \mathcal{M}_n$$

10. En utilisant $L = \begin{pmatrix} I_n & I_n \\ 0_n & I_n \end{pmatrix}$ et sa transposée, obtenir $B = C = 0_n$ et $D = A$, A étant inversible.

11. Soit $U \in \mathcal{G}_n$. En utilisant $L_U = \begin{pmatrix} U & 0_n \\ 0_n & (U^{-1})^T \end{pmatrix}$, montrer que A commute avec toute matrice $U \in \mathcal{G}_n$.

12. Conclure que $A \in \{-I_n, I_n\}$ et $\mathcal{Z} = \{-I_{2n}, I_{2n}\}$. *Indication : on montrera d'abord que les matrices $I_n + E_{i,j}$ commutent avec A , où $(E_{i,j}, 1 \leq i, j \leq n)$ est la base canonique de \mathcal{M}_n .*

3 Déterminant d'une matrice symplectique

Soit M dans $\mathcal{S}_{p_{2n}}$ que l'on décompose sous forme de matrice blocs

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \tag{1}$$

avec $A, B, C, D \in \mathcal{M}_n$. Dans toute cette partie, les matrices A, B, C, D sont les matrices de cette décomposition.

On suppose dans les questions 13 et 14 que D est inversible.

13. Montrer qu'il existe quatre matrices Q, U, V, W de \mathcal{M}_n telles que

$$\begin{pmatrix} I_n & Q \\ 0_n & I_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U & 0_n \\ V & W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

14. En utilisant la question 8, vérifier que BD^{-1} est symétrique, puis que

$$\det(M) = \det(A^T D - C^T B) = 1$$

Soient $P, Q \in \mathcal{M}_n$ telles que $P^T Q$ soit symétrique et Q non inversible. On suppose qu'il existe deux réels différents s_1, s_2 et deux vecteurs V_1, V_2 non nuls dans \mathcal{E}_n tels que

$$(Q - s_1 P)V_1 = (Q - s_2 P)V_2 = 0$$