

Chapitre 30

Déterminant

30 Déterminant	1
30.4 Exemple	2
30.11 Détermination d'une application n -linéaire sur une base	2
30.18 Caractérisation par les transpositions	2
30.19 Une forme alternée change de signe par transposition	3
30.21 Image d'une famille liée par une forme alternée	3
30.22 Forme n -linéaire d'un espace de dimension n	4
30.25 Exemple	4
30.26 Description du déterminant par les coordonnées	5
30.28 Effet d'un changement de base sur le déterminant	5
30.30 Caractérisation des bases par le déterminant	5
30.36 Déterminant d'un produit	6
30.40 Expression des déterminants classiques	6
30.41 Invariance du déterminant par transposée	7
30.42 Déterminant d'un endomorphisme	7
30.44 Déterminant et conjugaison	7
30.45 Déterminant d'une matrice triangulaire	7

30.4 Exemple

Exemple 30.4

On considère l'application :

$$\delta : \mathbb{K}^2 \times \mathbb{K}^2 \rightarrow \mathbb{K}; ((a, b), (c, d)) \mapsto ad - bc$$

Montrer que cette application est bien 2-linéaire.

$$\begin{aligned} \delta \left(\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} c' \\ d' \end{pmatrix} \right) &= \delta \left(\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c + \lambda c' \\ d + \lambda d' \end{pmatrix} \right) \\ &= a(d + \lambda d') - b(c + \lambda c') \\ &= ad - bc + \lambda(ad' - bc') \\ &= \delta \left(\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \right) + \lambda \delta \left(\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c' \\ d' \end{pmatrix} \right) \end{aligned}$$

30.11 Détermination d'une application n-linéaire sur une base

Proposition 30.11

Soit pour tout $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $(e_{i,j})_{1 \leq j \leq d}$ une base de E_i et pour tout $(j_1, \dots, j_n) \in \llbracket 1, d_1 \rrbracket \times \dots \times \llbracket 1, d_n \rrbracket$, $f_{j_1, \dots, j_n} \in F$.

Alors il existe une unique application n -linéaire $f : E_1 \times \dots \times E_n \rightarrow F$ telle que :

$$\forall (j_1, \dots, j_n) \in \llbracket 1, d_1 \rrbracket \times \dots \times \llbracket 1, d_n \rrbracket, \varphi(e_{1,j_1}, \dots, e_{n,j_n}) = f_{j_1, \dots, j_n}$$

Si $(e_{i,j})_{1 \leq j \leq d}$ est une base de E_i alors $((e_{1,2}, 0, \dots, 0, \dots, e_{1,d}, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 0, e_{n,1}, \dots, (0, \dots, 0, e_{n,d})))$ est une base de $E_1 \times \dots \times E_n$. (22.16), théorème de rigidité.

30.18 Caractérisation par les transpositions

Lemme 30.18

Pour qu'une forme f soit antisymétrique, il faut et il suffit que l'échange de deux variables quelconques provoque un changement de signe.

Par hypothèse, si τ est une transposition alors $\varphi(x_{\tau_1}, \dots, x_{\tau_n}) = -\varepsilon(\tau)\varphi(x_1, \dots, x_n)$.
Soit $\sigma \in S_n$. On écrit $\sigma = \tau_1 \circ \dots \circ \tau_k$ avec τ_i des transpositions. Alors :

$$\begin{aligned} \varphi(x_{\sigma_1}, \dots, x_{\sigma_n}) &= \varphi(x_{\tau_1 \circ \dots \circ \tau_k(1)}, \dots, x_{\tau_1 \circ \dots \circ \tau_k(n)}) \\ &= \varepsilon(\tau_1) \varphi(x_{\tau_2 \circ \dots \circ \tau_k(1)}, \dots, x_{\tau_2 \circ \dots \circ \tau_k(n)}) \\ &= \varepsilon(\tau_1 \circ \dots \circ \tau_k) \varphi(x_1, \dots, x_n) \\ &= \varepsilon(\sigma) \varphi(x_1, \dots, x_n) \end{aligned}$$

30.19 Une forme alternée change de signe par transposition

Lemme 30.19

Soit φ une forme alternée. Alors pour tout $(x_1, \dots, x_n) \in E^n$ et tout $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$ avec $i \neq j$:

$$\varphi(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n) = -\varphi(x_1, \dots, x_j, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

Cela revient à dire que pour toute transposition $\tau \in S_n$, on a :

$$\varphi(x_1, \dots, x_n) = -\varepsilon(\tau)\varphi(x_{\tau_1}, \dots, x_{\tau_n})$$

Réciproquement, si cette condition est satisfaite et si \mathbb{K} n'est pas de caractéristique 2, alors φ est alternée.

Soit φ alternée.

Soit $(x_1, \dots, x_n) \in E^n$.

$$\begin{aligned} 0 &= \varphi(x_1, \dots, x_i + x_j, \dots, x_j + x_i, \dots, x_n) \\ &= \varphi(x_1, \dots, x_i, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ &\quad + \varphi(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ &\quad + \varphi(x_1, \dots, x_j, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ &\quad + \varphi(x_1, \dots, x_j, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ &= \varphi(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) + \varphi(x_1, \dots, x_j, \dots, x_i, \dots, x_n) \end{aligned}$$

On suppose que $\text{carac}(\mathbb{K}) \neq 2$.

On a :

$$\varphi(x_1, \dots, x_i, \dots, x_i, \dots, x_n) = \varphi(x_1, \dots, x_i, \dots, x_i, \dots, x_n) \text{ (antisymétrie)}$$

Donc :

$$2\varphi(x_1, \dots, x_i, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0$$

Donc :

$$\varphi(x_1, \dots, x_i, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0$$

30.21 Image d'une famille liée par une forme alternée

Proposition 30.21

Soit (x_1, \dots, x_n) une famille liée et φ une forme alternée. Alors :

$$\varphi(x_1, \dots, x_n) = 0$$

Si (x_1, \dots, x_n) est liée, alors on peut écrire par exemple :

$$x_1 = \sum_{i=2}^n \lambda_i x_i$$

Donc :

$$\begin{aligned} \varphi(x_1, \dots, x_n) &= \varphi\left(\sum_{i=2}^n \lambda_i x_i, x_2, \dots, x_n\right) \\ &= \sum_{i=2}^n \lambda_i \varphi(x_i, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

30.22 Forme n -linéaire d'un espace de dimension n

Théorème 30.22

Soit E un espace vectoriel de dimension n non nulle et (e_1, \dots, e_n) une base de E .

1. Il existe une unique forme n -linéaire φ sur E telle que $\varphi(e_1, \dots, e_n) = 1$.
2. Cette forme n -linéaire est entièrement décrite sur les vecteurs de la base par :

$$\begin{cases} \varphi(e_{i_1}, \dots, e_{i_n}) = 0 & \text{s'il existe } j \neq k \text{ tel que } i_j = i_k \\ \varphi(e_{\sigma(1)}, \dots, e_{\sigma(n)}) = \varepsilon(\sigma) & \text{où } \sigma \in \mathcal{S}_n \end{cases}$$

3. Toute autre forme n -linéaire alternée sur E est de la forme $\lambda\varphi$, où $\lambda \in \mathbb{K}$.

1, 2

On utilise le théorème de rigidité des applications n -linéaires (30.11) en fixant l'image de chaque $(e_{i_1}, \dots, e_{i_n})$ avec $(i_1, \dots, i_n) \in \llbracket 1, n \rrbracket^n$.

- $\varphi(e_{i_1}, \dots, e_{i_n}) = 0$ s'il existe $i_j = i_k$ avec $j \neq k$.
- $\varphi(\underbrace{e_{\sigma(1)}, \dots, e_{\sigma(n)}}_{(i_1, \dots, i_n) \text{ fournit alors une permutation } \sigma \in \mathcal{S}_n}) = \varepsilon(\sigma) \times \underbrace{1}_{\varphi(e_1, \dots, e_n)}$.

Le théorème nous fournit l'existence de la forme alternée et l'unicité.

3

Soit ψ une forme n -linéaire alternée. On pose $\lambda = \psi(e_1, \dots, e_n)$.

- si $\lambda = 0$, par alternance (et antisymétrie) on a $\psi(e_{i_1}, \dots, e_{i_n}) = 0$ pour tout i_1, \dots, i_n .
Par rigidité, $\psi = 0 = 0 \times \varphi$.
- si $\lambda \neq 0$, alors $\frac{1}{\lambda}\psi(e_1, \dots, e_n) = 1$.
Par unicité (1), $\frac{1}{\lambda}\psi = \varphi$.
Donc $\psi = \lambda\varphi$.

30.25 Exemple

Exemple 30.25

On considère $E = \mathbb{R}^2$, muni de sa base canonique $e = (e_1, e_2) = ((1, 0), (0, 1))$. Soit $((a, b), (c, d)) \in E^2$.
Montrer que :

$$\det_e((a, b), (c, d)) = ad - bc$$

$e = ((1, 0), (0, 1))$.
 $((a, b), (c, d)) \in (E)^2$.

$$\begin{aligned} \det_e((a, b), (c, d)) &= \det_e(ae_1 + be_2, ce_1 + de_2) \\ &= ac \times \cancel{\det_e(e_1, e_1)} + ad \times \det_e(e_1, e_2) + bc \times \det_e(e_2, e_1) + bd \times \cancel{\det_e(e_2, e_2)} \\ &= ad \times \det_e(e_1, e_2) - bc \times \det_e(e_1, e_2) \\ &= (ad - bc) \end{aligned}$$

30.26 Description du déterminant par les coordonnées

Théorème 30.26

Soit E un espace vectoriel de dimension n non nulle et $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base de E . Soit (x_1, \dots, x_n) une famille d'éléments de E , dont les coordonnées sont :

$$\forall j \in \llbracket 1, n \rrbracket, x_j = \sum_{i=1}^n a_{i,j} e_i \quad \text{donc} \quad \text{Mat}_{\mathcal{B}}(x_j) = \begin{pmatrix} a_{1,j} \\ \vdots \\ a_{n,j} \end{pmatrix}$$

On a alors :

$$\det_{\mathcal{B}}(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} \varepsilon(\sigma) a_{\sigma(1),1} \cdots a_{\sigma(n),n} = \sum_{\tau \in \mathcal{S}_n} \varepsilon(\tau) a_{1,\tau(1)} \cdots a_{n,\tau(n)}$$

$$\begin{aligned} \det_{\mathcal{B}}(x_1, \dots, x_n) &= \det_{\mathcal{B}} \left(\sum_{i=1}^n a_{i,1} e_{i_1}, \dots, \sum_{i=1}^n a_{i,n} e_{i_n} \right) \\ &= \sum_{i_1=1}^n \cdots \sum_{i_n=1}^n a_{i_1,1} \cdots a_{i_n,n} \det_{\mathcal{B}}(e_{i_1}, \dots, e_{i_n}) \quad (\text{multilinéarité}) \\ &= \sum_{\{i_1, \dots, i_n\} = \llbracket 1, n \rrbracket} a_{i_1,1} \cdots a_{i_n,n} \det_{\mathcal{B}}(e_{i_1}, \dots, e_{i_n}) \quad (\text{alternance}) \\ &= \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} a_{\sigma(1),1} \cdots a_{\sigma(n),n} \underbrace{\det_{\mathcal{B}}(e_{\sigma(1)}, \dots, e_{\sigma(n)})}_{=\varepsilon(\sigma)} \quad (\text{reformulation}) \\ &= \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} \varepsilon(\sigma) a_{1,\sigma^{-1}(1)} \cdots a_{n,\sigma^{-1}(n)} \\ &= \sum_{\tau \in \mathcal{S}_n} \varepsilon(\tau) a_{1,\tau(1)} \cdots a_{n,\tau(n)} \end{aligned}$$

30.28 Effet d'un changement de base sur le déterminant

Proposition 30.28

Soit \mathcal{B} et \mathcal{B}' deux bases de E . Alors :

$$\det_{\mathcal{B}'} = \det_{\mathcal{B}}(\mathcal{B}') \times \det_{\mathcal{B}}$$

D'après le corollaire (30.27), on écrit :

$$\det_{\mathcal{B}'} = \lambda \det_{\mathcal{B}} \quad \text{avec } \lambda \in \mathbb{K}$$

En particulier :

$$\det_{\mathcal{B}'}(\mathcal{B}) = \lambda \det_{\mathcal{B}}(\mathcal{B}) = \lambda$$

30.30 Caractérisation des bases par le déterminant

Proposition 30.30

Soit E un espace vectoriel de dimension n non nulle, muni d'une base \mathcal{B} . Une famille \mathcal{F} de cardinal n est une base si et seulement si $\det_{\mathcal{B}}(\mathcal{F}) \neq 0$.

D'après (30.29), si \mathcal{F} est une base alors $\det_{\mathcal{B}}(\mathcal{F}) \neq 0$.

Si \mathcal{F} n'est pas une base, alors elle est liée ($|\mathcal{F}| = n$)

Donc $\det_{\mathcal{B}}(\mathcal{F}) = 0$ (30.21).

30.36 Déterminant d'un produit

Théorème 30.36

Soit A et B dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. Alors :

$$\det(AB) = \det(A) \det(B) = \det(BA)$$

Soit A, B dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. On note A_1, \dots, A_n les colonnes de A et B_1, \dots, B_n les colonnes de B .
On considère l'application :

$$\varphi : (\mathbb{K}^n)^n \rightarrow \mathbb{K}; (X_1, \dots, X_n) \mapsto \det_{\mathcal{B}_C}(AX_1, \dots, AX_n)$$

φ est une forme n -linéaire alternée.

On choisit donc $\lambda \in \mathbb{K}$ tel que $\varphi = \lambda \det_{\mathcal{B}_C}$. On a :

$$\begin{aligned} \varphi(\mathcal{B}_C) &= \lambda \det_{\mathcal{B}_C}(\mathcal{B}_C) \\ &= \lambda \\ &= \det_{\mathcal{B}_C} \left(A \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, A \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \right) \\ &= \det_{\mathcal{B}_C}(A_1, \dots, A_n) \\ &= \det(A) \end{aligned}$$

Ainsi $\varphi = \det(A) \det_{\mathcal{B}_C}$.

Donc :

$$\begin{aligned} \det(A) \det(B) &= \det(A) \det_{\mathcal{B}_C}(\mathcal{B}_1, \dots, \mathcal{B}_n) \\ &= \varphi(\mathcal{B}_1, \dots, \mathcal{B}_n) \\ &= \det_{\mathcal{B}_C}(AB_1, \dots, AB_n) \\ &= \det(AB) \end{aligned}$$

30.40 Expression des déterminants classiques

Proposition 30.40

1. On a :

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} = ad - bc$$

2.

$$\begin{vmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{vmatrix} = aei + bfg + cdh - gec - hfa - idb$$

Soit : diagonales descendantes moins les diagonales ascendantes.

2. $\mathcal{S}_3 = \{\text{id}, (1 \ 2 \ 3), (1 \ 3 \ 2), (1 \ 2), (1 \ 3), (2 \ 3)\}$

$$\begin{aligned} \det(A) &= \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_3} \varepsilon(\sigma) a_{1,\sigma(1)} a_{2,\sigma(2)} a_{3,\sigma(3)} \\ &= a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} \end{aligned}$$

30.41 Invariance du déterminant par transposée

Théorème 30.41

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

$$\det({}^t A) = \det(A)$$

RAF avec (30.34)

30.42 Déterminant d'un endomorphisme

Théorème 30.42

Soit $f \in \mathcal{L}(E)$, où E est un espace vectoriel de dimension finie non nulle. Soit \mathcal{B} une base de E . Le scalaire $\det(\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f))$ ne dépend pas de la base \mathcal{B} choisie. On appelle ce scalaire **déterminant de f** et est noté $\det(f)$.

Si \mathcal{B} et \mathcal{B}' sont deux bases de E , alors $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$ et $\text{Mat}_{\mathcal{B}'}(f)$ sont semblables, donc elles ont le même déterminant (30.37).

30.44 Déterminant et conjugaison

Proposition 30.44

Soit $\psi : E \rightarrow F$ un isomorphisme d'espaces vectoriels de dimension finie non nulles et $u \in \mathcal{L}(E)$. Alors :

$$\det(\underbrace{\psi \circ u \circ \psi^{-1}}_{\in \mathcal{L}(F)}) = \det(u)$$

Soit e une base de E et f une base de F .

$$\begin{aligned} \det(\psi \circ u \circ \psi^{-1}) &= \det(\text{Mat}_f(\psi \circ u \circ \psi^{-1})) \quad (30.42) \\ &= \det(\text{Mat}_{e,f}(\psi) \times \text{Mat}_e(u) \times \text{Mat}_{f,e}(\psi^{-1})) \quad (28.42) \\ &= \det(\text{Mat}_{e,f}(\psi)) \times \det(\text{Mat}_e(u)) \times \det(\text{Mat}_{f,e}(\psi^{-1})) \quad (30.36) \\ &= \det(\underbrace{\text{Mat}_{\psi} \times \text{Mat}_{f,e}(\psi^{-1})}_{I_n}) \times \det(\text{Mat}_e(u)) \quad (30.36) \\ &= \det(\text{Mat}_e(u)) \end{aligned}$$

30.45 Déterminant d'une matrice triangulaire

Proposition 30.45

Le déterminant d'une matrice triangulaire est égal au produit de ses coefficients diagonaux.

Soit T une matrice triangulaire supérieure (on passe à la transposée sinon).
Ainsi :

$$\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2, i > j \Rightarrow t_{i,j} = 0$$

D'après la formule sur les coefficients (30.34) :

$$\begin{aligned}\det(T) &= \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} \varepsilon(\sigma) \prod_{i=1}^n t_{\sigma(i),i} \\ &= \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n, \sigma(i) \leq i \equiv \text{id}} \varepsilon(\sigma) \prod_{i=1}^n t_{\sigma(i),i} \\ &= \sigma(\text{id}) \prod_{i=1}^n t_{ii}\end{aligned}$$