

Chapitre 30

Déterminant

30 Déterminant	1
30.4 Exemple	2
30.11Détermination d’une application n -linéaire sur une base	2
30.18Caractérisation par les transpositions	2
30.19Une forme alternée change de signe par transposition	3
30.21Image d’une famille liée par une forme alternée	3
30.22Forme n -linéaire d’un espace de dimension n	4

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 $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $(e_{i,j})_{1 \leq j \leq d_i}$ 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 $(e_{i,j})_{1 \leq j \leq d_i}$ 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 anisymétrie) 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 $\psi = \lambda\varphi$.