

Résumé de cours :  
Semaine 29, du 11 au 13 mai.

# Fin de l'algèbre linéaire.

## 1 Sous-espaces propres (fin)

**Notation.** On fixe un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel  $E$  et  $u \in L(E)$ .

**Théorème.** La somme d'un nombre fini de sous-espaces propres de  $u$  est toujours directe.  
Il faut savoir le démontrer.

**Corollaire.** Si  $(x_i)_{i \in I}$  est une famille de vecteurs propres de  $u$  associés à des valeurs propres deux à deux distinctes, alors cette famille est libre.

**Exemple.** Supposons que  $E \neq \{0\}$ .

Soient  $F$  et  $G$  deux sous-espaces vectoriels supplémentaires non nuls dans  $E$ .

- Si  $u$  est une homothétie de rapport  $\lambda$ , où  $\lambda \in \mathbb{K}$ ,  $Sp(u) = \{\lambda\}$  et  $E_\lambda = E$ .
- Si  $u$  est le projecteur sur  $F$  parallèlement à  $G$ ,  $Sp(u) = \{0, 1\}$ ,  $E_1 = F$  et  $E_0 = G$ .
- Si  $u$  est la symétrie par rapport à  $F$  parallèlement à  $G$ ,  $Sp(u) = \{1, -1\}$ ,  $E_1 = F$  et  $E_{-1} = G$ .

**Propriété.** Si  $v \in L(E)$  commute avec  $u$ , les sous-espaces propres de  $u$  sont stables par  $v$ .  
Il faut savoir le démontrer.

**Propriété.** Soit  $F$  un sous-espace vectoriel de  $E$  stable par  $u$ .

Alors  $Sp(u|_F) \subset Sp(u)$  et pour tout  $\lambda \in Sp(u|_F)$ ,  $E_\lambda^{u|_F} = E_\lambda^u \cap F$ .

## 2 Changement de base

**Notation.** On fixe un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel  $E$  de dimension finie égale à  $n \in \mathbb{N}^*$ .

**Propriété.** Soit  $e = (e_1, \dots, e_n)$  une base de  $E$  et  $f = (f_j)_{1 \leq j \leq n} \in E^n$  une famille de  $n$  vecteurs de  $E$ . Pour tout  $j \in \mathbb{N}_n$ , on pose  $p_{i,j} = e_i^*(f_j)$  : c'est la  $i^{\text{ème}}$  coordonnée dans la base  $e$  du  $j^{\text{ème}}$  vecteur de la famille  $f$ . Alors  $f$  est une base si et seulement si la matrice  $P = (p_{i,j})$  est inversible. Dans ce cas,  $P$  est noté  $P_e^f$  (ou bien  $P_{e \rightarrow f}$ ) et on dit que  $P_e^f = (p_{i,j})$  est la **matrice de passage** de la base  $e$  vers la base  $f$ .

**Interprétation tabulaire :** Avec les notations précédentes,

$$P_e^f = \begin{pmatrix} f_1 & \cdots & f_n \\ p_{1,1} & \cdots & p_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{n,1} & \cdots & p_{n,n} \end{pmatrix} \begin{matrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{matrix} .$$

**Remarque.** Si  $f = (f_j)_{1 \leq j \leq p}$  est une famille de  $p$  vecteurs de  $E$ , on pose

$\text{mat}_e^f \triangleq (e_i^*(f_j))_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq p}} \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K})$ . Alors  $\text{rg}(\text{mat}_e^f) = \text{rg}(f)$ .

**Propriété.** Soit  $e$  une base de  $E$  :

Pour toute matrice  $P$  inversible d'ordre  $n$ , il existe une unique base  $f$  de  $E$  telle que  $P = P_e^f$ .

**Propriété.** Soit  $e$  et  $e'$  deux bases de  $E$ . Alors  $P_e^{e'} = \text{mat}(Id_E, e', e) = \text{mat}(Id_E)_e^{e'}$ .

Il faut savoir le démontrer.

**Formule de changement de base pour les vecteurs :**

Soit  $e$  et  $e'$  deux bases de  $E$ . Soit  $x \in E$ . On pose  $X \triangleq \text{mat}(x)_e$  le vecteur colonne des coordonnées de  $x$  dans la base  $e$ . De même on pose  $X' = \text{mat}(x)_{e'}$ .

Alors,  $\boxed{X = P_e^{e'} X'}$ , ou encore  $\text{mat}(x)_e = P_e^{e'} \text{mat}(x)_{e'}$ .

Il faut savoir le démontrer.

**Formule.** Si  $e, e'$  et  $e''$  sont trois bases de  $E$ ,  $\boxed{P_e^{e''} = P_e^{e'} P_{e'}^{e''}}$  et  $\boxed{(P_e^{e'})^{-1} = P_{e'}^e}$ .

**Formule de changement de bases pour les applications linéaires :**

Soient  $E$  et  $F$  deux  $\mathbb{K}$ -espaces vectoriels de dimensions finies.

On suppose que  $e$  et  $e'$  sont deux bases de  $E$  et que  $f$  et  $f'$  sont deux bases de  $F$ .

Soit  $u \in L(E, F)$ . Notons  $M = \text{mat}(u)_f^e$ ,  $M' = \text{mat}(u)_{f'}^{e'}$ ,  $P = P_e^{e'}$  et  $Q = Q_f^{f'}$ .

Alors,  $\boxed{M' = Q^{-1} M P}$  c'est-à-dire  $\boxed{\text{mat}(u)_{f'}^{e'} = P_{f'}^f \times \text{mat}(u)_f^e \times P_e^{e'}}$ .

Il faut savoir le démontrer.

**Formule de changement de bases pour les endomorphismes :**

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie et  $u \in L(E)$ . On suppose que  $e$  et  $e'$  sont deux bases de  $E$ . Notons  $M = \text{mat}(u, e)$ ,  $M' = \text{mat}(u, e')$  et  $P = P_e^{e'}$ . Alors,  $\boxed{M' = P^{-1} M P}$ .

### 3 Diagonalisation et trigonalisation

**Définition.** Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $u \in L(E)$ .

On dit que  $u$  est **diagonalisable** si et seulement si il vérifie l'une des propriétés suivantes :

- i) Il existe une base  $e$  de  $E$  telle que  $\text{mat}(u, e)$  est diagonale.
- ii) Il existe une base de  $E$  constituée de vecteurs propres de  $u$ .
- iii)  $E = \bigoplus_{\lambda \in Sp_{\mathbb{K}}(u)} E_{\lambda}^u$ .

iv)  $n = \sum_{\lambda \in Sp_{\mathbb{K}}(u)} \dim(E_{\lambda}^u)$ .

Il faut savoir le démontrer.

**Propriété.** les homothéties, les projecteurs et les symétries sont diagonalisables.

**Définition.** Soit  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ . On dit que  $M$  est diagonalisable si et seulement si son endomorphisme canoniquement associé est diagonalisable.

**Propriété.**  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  est diagonalisable si et seulement si il existe  $P \in GL_n(\mathbb{K})$  telle que  $P^{-1} M P$  est une matrice diagonale.

Il faut savoir le démontrer.

**Définition.** Soit  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  une matrice diagonalisable. "diagonaliser"  $M$ , c'est déterminer une matrice diagonale  $D$  et une matrice inversible  $P$  telles que  $M = P D P^{-1}$ .

**Définition.** Un endomorphisme  $u$  est **trigonalisable** si et seulement s'il existe une base dans laquelle la matrice de  $u$  est triangulaire supérieure.

**Définition.**  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  est trigonalisable si et seulement si l'endomorphisme canoniquement associé à  $M$  est trigonalisable, c'est-à-dire si et seulement si il existe  $P \in GL_n(\mathbb{K})$  telle que  $P^{-1}MP$  est triangulaire supérieure.

**Définition.** Soit  $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ . “**Trigonaliser**”  $M$ , c'est déterminer si  $M$  est trigonalisable, et dans ce cas, c'est calculer  $P \in GL_n(\mathbb{K})$  et  $T$  triangulaire supérieure telles que  $M = PTP^{-1}$ .

## 4 Trace d'un endomorphisme

**Définition.**

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie. La quantité  $\text{Tr}(\text{mat}(u, e))$  ne dépend pas du choix de la base  $e$  de  $E$ . On la note  $\text{Tr}(u)$ . C'est la trace de l'endomorphisme  $u$ .

**Propriété.** Si  $u, v \in L(E)$ , alors  $\text{Tr}(uv) = \text{Tr}(vu)$ .

**Propriété.** Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie. Si  $p$  est un projecteur de  $E$ , alors  $\text{Tr}(p) = \text{rg}(p)$ .

**Il faut savoir le démontrer.**

## 5 Matrices équivalentes et matrices semblables

### 5.1 Matrices équivalentes

**Définition.** Deux matrices  $M$  et  $M'$  de  $\mathcal{M}_{\mathbb{K}}(n, p)$  sont *équivalentes* si et seulement s'il existe  $P \in GL_p(\mathbb{K})$  et  $Q \in GL_n(\mathbb{K})$  telles que  $M' = QMP^{-1}$ . On définit ainsi une relation d'équivalence sur  $\mathcal{M}_{\mathbb{K}}(n, p)$ .

**Propriété.** Deux matrices sont équivalentes si et seulement si elles représentent une même application linéaire dans des bases différentes, autant pour la base de départ que pour la base d'arrivée.

**Propriété.** Deux matrices sont équivalentes si et seulement si il est possible de transformer l'une en l'autre par une succession d'opérations élémentaires portant sur les lignes ou sur les colonnes.

**Il faut savoir le démontrer.**

**Théorème.** Soient  $E$  et  $F$  deux  $\mathbb{K}$ -espaces vectoriels de dimensions respectives  $p > 0$  et  $n > 0$ , et soit  $u \in L(E, F)$ . Notons  $r$  le rang de  $u$ . Il existe une base  $e$  de  $E$  et une base  $f$  de  $F$  telles que  $\text{mat}(u, e, f)$  admet la décomposition en blocs suivante :  $\text{mat}(u, e, f) = \begin{pmatrix} I_r & 0_{r, p-r} \\ 0_{n-r, r} & 0_{n-r, p-r} \end{pmatrix} \triangleq J_{n, p, r}$ .

**Il faut savoir le démontrer.**

**Propriété.** Si  $M \in \mathcal{M}_{\mathbb{K}}(n, p)$ ,  $M$  est équivalente à  $J_{n, p, r}$ , où  $r$  désigne le rang de  $M$ .

**Corollaire.** Deux matrices sont équivalentes si et seulement si elles ont le même rang.

**Il faut savoir le démontrer.**

### 5.2 Propriétés du rang d'une matrice

**Propriété.** Pour toute matrice  $M \in \mathcal{M}_{\mathbb{K}}(n, p)$ ,  $\text{rg}(M) = \text{rg}({}^tM)$ .

On en déduit que le rang de  $M$  est aussi le rang de la famille de ses vecteurs lignes.

**Il faut savoir le démontrer.**

**Propriété.** Si l'on effectue une série de manipulations élémentaires sur une matrice, on ne modifie pas le rang de cette matrice.

**Remarque.** Pour déterminer le rang d'une matrice, une méthode consiste donc à transformer cette matrice en une matrice dont on connaît le rang par une succession d'opérations élémentaires portant sur les lignes ou sur les colonnes. On peut en particulier utiliser l'algorithme du pivot.

**Propriété.** Le rang d'une matrice est égal au nombre d'étapes dans la méthode du pivot global.

**Propriété.** Soit  $M \in \mathcal{M}_{\mathbb{K}}(n, p)$ . Si  $P$  est une matrice extraite de  $M$ , alors  $\text{rg}(P) \leq \text{rg}(M)$ .

**Propriété.** Soit  $A \in \mathcal{M}_{\mathbb{K}}(n, p)$  une matrice non nulle.  
 $\text{rg}(A)$  est égal à la taille maximale des matrices inversibles extraites de  $A$ .

Il faut savoir le démontrer.

### 5.3 Matrices semblables

**Définition.** Deux matrices carrées  $M$  et  $M'$  dans  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$  sont **semblables** si et seulement si il existe  $P \in GL_n(\mathbb{K})$  tel que  $M' = PMP^{-1}$ . On définit ainsi une seconde relation d'équivalence sur  $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ , appelée relation de similitude.

**Propriété.** Deux matrices sont semblables si et seulement si elles représentent un même endomorphisme dans des bases différentes, en imposant de prendre une même base au départ et à l'arrivée.

**Propriété.** Soient  $(M, M') \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})^2$  et  $P \in GL_n(\mathbb{K})$  tels que  $M' = PMP^{-1}$ .  
 Alors, pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,  $M'^n = PM^nP^{-1}$  et pour tout  $Q \in \mathbb{K}[X]$ ,  $Q(M') = PQ(M)P^{-1}$ .  
 Si  $M'$  et  $M$  sont inversibles, pour tout  $n \in \mathbb{Z}$ ,  $M'^n = PM^nP^{-1}$ .

## 6 Les hyperplans

Dans tout ce chapitre, on fixe un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel  $E$ , où  $\mathbb{K}$  est un corps.

### 6.1 En dimension quelconque

**Définition.** Soit  $H$  un sous-espace vectoriel de  $E$ . On dit que  $H$  est un hyperplan si et seulement si il existe une droite vectorielle  $D$  telle que  $H \oplus D = E$ .

**Propriété.** Soit  $H$  un hyperplan et  $D$  une droite non incluse dans  $H$ . Alors  $H \oplus D = E$ .

**Propriété.** Soit  $H$  une partie de  $E$ .  $H$  est un hyperplan de  $E$  si et seulement si il est le noyau d'une forme linéaire non nulle. De plus, si  $H = \text{Ker}(\varphi) = \text{Ker}(\psi)$ , alors  $\varphi$  et  $\psi$  sont colinéaires.

Il faut savoir le démontrer.

**Définition.** Soient  $H$  un hyperplan de  $E$  et  $\varphi \in L(E, \mathbb{K}) \setminus \{0\}$  tel que  $H = \text{Ker}(\varphi)$ .  
 Alors  $x \in H \iff [(E) : \varphi(x) = 0]$ . On dit que  $(E)$  est **équation de  $H$** .

### 6.2 En dimension finie

**Notation.** On suppose que  $E$  est un espace de dimension finie notée  $n$ , avec  $n > 0$ .

Si  $e = (e_1, \dots, e_n)$  est une base de  $E$ , pour tout  $i \in \{1, \dots, n\}$ , on note  $e_i^*$  l'application qui associe à tout vecteur  $x$  de  $E$  sa  $i^{\text{ème}}$  coordonnée dans la base  $e$ .

**Propriété.** Avec les notations précédentes, la famille  $e^* = (e_i^*)_{1 \leq i \leq n}$  est une base de  $L(E, \mathbb{K}) = E^*$ , que l'on appelle la base duale de  $e$ .

Il faut savoir le démontrer.

**Remarque.** Les hyperplans de  $E$  sont les sous-espaces vectoriels de  $E$  de dimension  $n - 1$ .

**Définition.** Soit  $e = (e_1, \dots, e_n)$  une base de  $E$  et  $H$  un hyperplan de  $E$ .

Si  $H = \text{Ker}(\psi)$ , où  $\psi \in E^*$ , en notant  $\psi = \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i^*$ , l'équation de l'hyperplan  $H$  devient

$$x = \sum_{i=1}^n x_i e_i \in H \iff \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i = 0 : \text{c'est une équation cartésienne de } H.$$

**Exemple.** Dans un plan vectoriel rapporté à une base  $(\vec{i}, \vec{j})$ , une droite vectorielle  $D$  a une équation cartésienne de la forme :  $\vec{v} = x\vec{i} + y\vec{j} \in D \iff ax + by = 0$ , où  $(a, b) \in \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ .

**Exemple.** Dans un espace vectoriel de dimension 3 rapporté à une base  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , un plan vectoriel  $P$  a une équation cartésienne de la forme :  $\vec{v} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} \in P \iff ax + by + cz = 0$ , où  $(a, b, c) \in \mathbb{R}^3 \setminus \{0\}$ .

### 6.3 Les hyperplans affines

**Notation.** Soit  $\mathcal{E}$  un espace affine de direction  $E$ . On fixe un point  $O \in \mathcal{E}$ .

**Définition.** Un hyperplan affine est un sous-espace affine dirigé par un hyperplan de  $E$ .

**Propriété.** Soit  $\mathcal{H}$  une partie de  $\mathcal{E}$ .  $\mathcal{H}$  est un hyperplan affine de  $\mathcal{E}$  si et seulement si il existe  $\varphi \in L(E, \mathbb{K}) \setminus \{0\}$  et  $a \in \mathbb{K}$  tel que, pour tout  $M \in \mathcal{E}$ ,  $[M \in \mathcal{H} \iff \varphi(\overrightarrow{OM}) = a]$ .

Dans ce cas, la condition  $\varphi(\overrightarrow{OM}) = a$  est appelée une équation de  $\mathcal{H}$ .

De plus, la direction de  $\mathcal{H}$  est l'hyperplan  $\text{Ker}(\varphi)$ , d'équation  $\varphi(x) = 0$  en l'inconnue  $x \in E$ .

**Il faut savoir le démontrer.**

**Remarque.** Dans le cas particulier où  $\mathcal{E} = E$  et où  $O = \vec{0}$ , l'équation devient  $\varphi(M) = a$ , donc les hyperplans affines de  $E$  sont exactement les  $\varphi^{-1}(\{a\})$ , avec  $\varphi \in L(E, \mathbb{K}) \setminus \{0\}$  et  $a \in \mathbb{K}$ .

**Propriété.** Supposons que  $E$  est de dimension finie égale à  $n \in \mathbb{N}^*$  et que  $E$  est muni d'une base  $e = (e_1, \dots, e_n)$ , dont la base duale est notée  $e^* = (e_1^*, \dots, e_n^*)$ . Soit  $\mathcal{H}$  un hyperplan affine de  $\mathcal{E}$ , dont une équation est  $\Psi(\overrightarrow{OM}) = a$ . Notons  $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  les coordonnées de  $\Psi$  dans  $e^*$ . Si  $M$  a pour

coordonnées  $(x_1, \dots, x_n)$  dans le **repère affine**  $(O, e)$ , alors  $M \in \mathcal{H} \iff \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i = a$ .

C'est la forme générale d'une équation cartésienne d'hyperplan affine en dimension  $n$ .

### 6.4 Application aux systèmes linéaires

**Notation.** On fixe  $(n, p) \in \mathbb{N}^{*2}$  et on considère un système linéaire de  $n$  équations à  $p$  inconnues de la forme :  $\forall i \in \mathbb{N}_n, \sum_{j=1}^p \alpha_{i,j} x_j = b_i$ , où, pour tout  $i, j, \alpha_{i,j} \in \mathbb{K}$ , pour tout  $i, b_i \in \mathbb{K}$ , les  $p$  inconnues étant  $x_1, \dots, x_p$ , éléments de  $\mathbb{K}$ .

**Propriété.** Notons  $M$  la matrice de  $(S)$ . Ainsi  $(S) \iff MX = B$ , où  $B = (b_i) \in \mathbb{K}^n$ .

Si  $(S)$  est compatible, l'ensemble des solutions de  $(S)$  est un sous-espace affine de  $\mathbb{K}^p$  dimension  $p - r$ , où  $r$  désigne le rang de  $M$  et dont la direction est  $\text{Ker}(M)$ .

**Propriété.** Soient  $E$  et  $F$  des  $\mathbb{K}$ -espaces vectoriels de dimensions  $p$  et  $n$  munis de bases  $e = (e_1, \dots, e_p)$  et  $f = (f_1, \dots, f_n)$ . On note  $u$  l'unique application linéaire de  $L(E, F)$  telle que  $\text{mat}(u, e, f) = M$ ,  $x$  le vecteur de  $E$  dont les coordonnées dans  $e$  sont  $X$  et  $b$  le vecteur de  $F$  dont les coordonnées dans  $f$  sont  $B$ . Alors  $(S) \iff u(x) = b$ . Avec ces notations, l'ensemble des solutions de  $(S)$  est soit vide, soit un sous-espace affine de  $E$  de direction  $\text{Ker}(u)$ .

**Quatrième interprétation d'un système linéaire :** *A l'aide de formes linéaires.*

Notons  $e^* = (e_1^*, \dots, e_p^*)$  la base duale de  $e$ . Pour tout  $i \in \{1, \dots, n\}$ , posons  $l_i = \sum_{j=1}^p \alpha_{i,j} e_j^*$ .

Les  $l_i$  sont des formes linéaires telles que  $(S) \iff [\forall i \in \{1, \dots, n\} \ l_i(x) = b_i]$ .

L'ensemble des solutions de  $(S)$  est  $\bigcap_{i=1}^n l_i^{-1}(\{b_i\})$ . C'est une intersection d'hyperplans affines.

**Propriété.** Si  $E$  est un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension  $p$ , l'intersection de  $r$  hyperplans vectoriels de  $E$  est un sous-espace vectoriel de dimension supérieure à  $p - r$ .

Réciproquement tout sous-espace vectoriel de  $E$  de dimension  $p - r$  où  $r \geq 1$  est une intersection de  $r$  hyperplans de  $E$ , donc est caractérisé par un système de  $r$  équations linéaires.

**Il faut savoir le démontrer.**

**Propriété.** Tout sous-espace affine de  $\mathcal{E}$  peut être caractérisé par un système d'équations linéaires. Tout sous-espace affine différent de  $\mathcal{E}$  est une intersection d'un nombre fini d'hyperplans affines.

## Les déterminants

**Notation.**  $\mathbb{K}$  désigne un corps quelconque.

### 7 Applications multilinéaires

**Définition.** Soient  $p \in \mathbb{N}^*$  et  $(E_1, \dots, E_p)$  une famille de  $p$   $\mathbb{K}$ -espaces vectoriels.

Soient  $F$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel et  $f$  une application de  $E_1 \times \dots \times E_p$  dans  $F$ .

$f$  est une **application  $p$ -linéaire** si et seulement si, pour tout  $j \in \mathbb{N}_p$

et pour tout  $(a_1, \dots, a_{j-1}, a_{j+1}, \dots, a_p) \in E_1 \times \dots \times E_{j-1} \times E_{j+1} \times \dots \times E_p$ ,

l'application 
$$\begin{array}{ccc} E_j & \longrightarrow & F \\ x_j & \longmapsto & f(a_1, \dots, a_{j-1}, x_j, a_{j+1}, \dots, a_p) \end{array}$$
 est linéaire.

**Définition.** Une **application bilinéaire** est une application 2-linéaire.

**Notation.**

—  $L_p(E_1, \dots, E_p; F)$  désigne l'ensemble des applications  $p$ -linéaires de  $E_1 \times \dots \times E_p$  dans  $F$ .

C'est un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{F}(E_1 \times \dots \times E_p, F)$ .

— On note  $L_p(E, F) = L_p(\underbrace{E, \dots, E}_{p \text{ fois}}; F)$  et  $L_p(E) = L_p(E, \mathbb{K})$ .

Les éléments de  $L_p(E)$  sont appelés des **formes  $p$ -linéaires** sur  $E$ .

**Notation.** On fixe  $p \in \mathbb{N}^*$  et deux  $\mathbb{K}$ -espaces vectoriels  $E$  et  $F$ .

**Propriété.** Soit  $u_1, \dots, u_p$   $p$  applications linéaires de  $E$  dans  $\mathbb{K}$ .

Alors l'application 
$$u : \begin{array}{ccc} E^p & \longrightarrow & \mathbb{K} \\ (x_1, \dots, x_p) & \longmapsto & \prod_{i=1}^p u_i(x_i) \end{array}$$
 est une forme  $p$ -linéaire.

**Définition.** Soient  $\sigma \in \mathcal{S}_p$  et  $f \in L_p(E, F)$ . On note  $\sigma(f) : \begin{array}{ccc} E^p & \longrightarrow & F \\ (x_1, \dots, x_p) & \longmapsto & f(x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(p)}) \end{array}$

**Définition.** Soit  $f \in L_p(E, F)$ .  $f$  est une application  $p$ -linéaire symétrique (resp : antisymétrique) si et seulement si pour tout  $\sigma \in \mathcal{S}_p$ ,  $\sigma(f) = f$  (resp :  $\sigma(f) = \varepsilon(\sigma)f$ , où  $\varepsilon(\sigma)$  désigne la signature de la permutation  $\sigma$ ).

**Propriété.** Soit  $f \in L_p(E, F)$ .

$f$  est symétrique si et seulement si pour toute transposition  $\tau$  de  $\mathcal{S}_p$ ,  $\tau(f) = f$ .

$f$  est antisymétrique si et seulement si pour toute transposition  $\tau$  de  $\mathcal{S}_p$ ,  $\tau(f) = -f$ .

**Il faut savoir le démontrer.**

**Définition.** Soit  $f \in L_p(E, F)$ .  $f$  est **une application  $p$ -linéaire alternée** si et seulement si elle annule tout  $p$ -uplet de vecteurs de  $E$  contenant au moins deux vecteurs égaux.

**Propriété.** Soit  $f \in L_p(E, F)$ .

Si  $f$  est alternée, alors elle est antisymétrique.

Lorsque  $\text{car}(\mathbb{K}) \neq 2$ , alternée  $\iff$  antisymétrique.

**Il faut savoir le démontrer.**

**Propriété.**  $f \in L_p(E, F)$  est alternée si et seulement si pour tout  $(x_1, \dots, x_p) \in E^p$ ,  $f(x_1, \dots, x_p)$  ne varie pas lorsque l'on ajoute à l'un des  $x_i$  une combinaison linéaire des autres  $x_j$ , ou encore si et seulement si l'image par  $f$  de toute famille liée de vecteurs est nulle.

**Corollaire.** Si  $E$  est de dimension  $n \in \mathbb{N}^*$  et si  $p > n$ , toute forme  $p$ -linéaire alternée sur  $E$  est nulle.

## 8 Déterminant d'un système de $n$ vecteurs

Au sein de ce paragraphe,  $E$  désignera un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie égale à  $n$ , avec  $n > 0$ .

### 8.1 Définition du déterminant

**Définition.** Soit  $e = (e_1, \dots, e_n)$  une base de  $E$  et  $x = (x_1, \dots, x_n) \in E^n$ .

Le **déterminant de  $x$**  dans la base  $e$  est le scalaire  $\det_e(x_1, \dots, x_n) \triangleq \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} \varepsilon(\sigma) \prod_{j=1}^n e_{\sigma(j)}^*(x_j)$ .

**Théorème.** Soit  $e$  une base de  $E$ . Si  $f$  est une forme  $n$ -linéaire alternée sur  $E$ , alors  $f = f(e)\det_e$ .

**Il faut savoir le démontrer.**

**Propriété.**  $\det_e(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} \varepsilon(\sigma) \prod_{j=1}^n e_{\sigma(j)}^*(x_j) = \sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} \varepsilon(\sigma) \prod_{j=1}^n e_j^*(x_{\sigma(j)})$ .

**Il faut savoir le démontrer.**