

Cours Mathématiques 3 (MAT2012L) L2 PCSI 2024-2025

Léon Matar Tine¹

Automne 2024

1 Introduction générale sur le cours

2 Espaces vectoriels

- Définition, propriétés
- Sous-espaces vectoriels
- Familles génératrices, familles libres, bases
- Applications linéaires
 - Définitions, propriétés
 - Image et noyau

Introduction

Ce cours de Mathématiques 3 est destiné aux étudiants de niveau licence 2 de la filière PCSI (Physique-Chimie et Sciences de l'ingénieur).

Trois chapitres sont développés dans ce cours

- Algèbre linéaire (Espaces vectoriels, Applications linéaires, Matrices, Déterminants, Systèmes linéaires, Réduction des endomorphismes, Espace vectoriel muni d'un produit scalaire : Diagonalisation des matrices symétriques et hermitiennes),
- Suites et Séries numériques et de fonctions : Suites et séries numériques, Séries entières.
- Séries entières – Équations différentielles.

Les notions seront présentées dans un esprit pratique sans grand développement théorique.

L'UE compte pour 6 crédits. Deux contrôles continus (60% de la note) et un examen final (40% de la note) sont prévus.

https://licence-math.univ-lyon1.fr/doku.php?id=a24:s3_maths3:page

Dans la suite, $\mathbb{K}$ désigne le corps des **nombre réels** ou le corps des **nombre complexes**. Les éléments de $\mathbb{K}$ sont appelés des **scalaires**.

Espace vectoriel

Un **espace vectoriel** est un ensemble d'éléments, appelés **vecteurs**, qu'on peut **additionner** et **multiplier par des scalaires**.

Pour que ceci ait un sens, l'addition et la multiplication par des scalaires doivent satisfaire certaines propriétés.

Définition 1

Soit E un ensemble non vide muni d'une **loi de composition interne**, autrement dit d'une application

$$\begin{aligned} E \times E &\rightarrow E \\ (\vec{u}, \vec{v}) &\mapsto \vec{u} + \vec{v} \end{aligned}$$

et d'une **loi de composition externe**, autrement dit d'une application

$$\begin{aligned} \mathbb{K} \times E &\rightarrow E \\ (\lambda, \vec{u}) &\mapsto \lambda \cdot \vec{u} \end{aligned}$$

On dit que E , muni de ces opérations, est un **$\mathbb{K}$ -espace vectoriel** si :

(1) $(E, +)$ est un *groupe commutatif*, autrement dit :

- *commutativité* : $\vec{u} + \vec{v} = \vec{v} + \vec{u}$; (pour tous $\vec{u}, \vec{v} \in E$) ;
- *associativité* : $\vec{u} + (\vec{v} + \vec{w}) = (\vec{u} + \vec{v}) + \vec{w}$ (pour tous $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w} \in E$) ;
- *il existe un élément* $\vec{0}_E \in E$, appelé **élément neutre**, tel que $\vec{0}_E + \vec{u} = \vec{u} + \vec{0}_E = \vec{u}$ (pour tout $\vec{u} \in E$) ;
- pour tout $\vec{u} \in E$, il existe $\vec{u}^* \in E$ vérifiant $\vec{u} + \vec{u}^* = \vec{0}_E$; l'élément $\vec{u}^*$ est appelé le **symétrique** ou **l'opposé** de u et est noté $-\vec{u}$.

(2) Pour tous $\vec{u}, \vec{v} \in E$, pour tous $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$:

- $\lambda \cdot (\vec{u} + \vec{v}) = \lambda \cdot \vec{u} + \lambda \cdot \vec{v}$;
- $(\lambda + \mu) \cdot \vec{u} = \lambda \cdot \vec{u} + \mu \cdot \vec{u}$;
- $\lambda \cdot (\mu \cdot \vec{u}) = (\lambda\mu) \cdot \vec{u}$;
- $1 \cdot \vec{u} = \vec{u}$.



On appelle :

- **Addition** la loi de composition interne

$$\begin{array}{ccc} E \times E & \rightarrow & E \\ (\vec{u}, \vec{v}) & \mapsto & \vec{u} + \vec{v} \end{array}$$

et **multiplication par des scalaires** la loi de composition externe

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{K} \times E & \rightarrow & E \\ (\lambda, \vec{u}) & \mapsto & \lambda \cdot \vec{u} \end{array}$$

- **Vecteurs** les éléments de E ;
- **Scalars** les éléments de $\mathbb{K}$;
- **Vecteur nul** le vecteur $\vec{0}_E$.

Exemple 1

Sur $\mathbb{R}^2$, on définit l'addition par

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + x' \\ y + y' \end{pmatrix}$$

et la multiplication par des scalaires $\lambda \in \mathbb{R}$ par

$$\lambda \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda x \\ \lambda y \end{pmatrix}.$$

Alors $\mathbb{R}^2$, muni de ces deux opérations, est un $\mathbb{R}$ -espace vectoriel.

Exemple 2

Plus généralement, sur $\mathbb{R}^n$, on définit l'addition par

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2 + y_2 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix}$$

et la multiplication par des scalaires $\lambda \in \mathbb{R}$ par

$$\lambda \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda x_1 \\ \lambda x_2 \\ \vdots \\ \lambda x_n \end{pmatrix}.$$

Alors $\mathbb{R}^n$, muni de ces deux opérations, est un $\mathbb{R}$ -espace vectoriel.

De même, sur $\mathbb{C}^n$, on définit l'addition par

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2 + y_2 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix}$$

et la multiplication par des scalaires $\lambda \in \mathbb{C}$ par

$$\lambda \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda x_1 \\ \lambda x_2 \\ \vdots \\ \lambda x_n \end{pmatrix}.$$

Alors $\mathbb{C}^n$, muni de ces deux opérations, est un $\mathbb{C}$ -espace vectoriel.

Exemple 3

Soit $E = \mathbb{R}_n[X]$ l'ensemble des polynômes de degré inférieur ou égal à n à coefficients réels. On munit $\mathbb{R}_n[X]$ de l'addition des polynômes

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}_n[X] \times \mathbb{R}_n[X] & \rightarrow & \mathbb{R}_n[X] \\ (P, Q) & \mapsto & P + Q \end{array} \quad \text{où } (P + Q)(X) = P(X) + Q(X)$$

et de la multiplication par des scalaires $\lambda \in \mathbb{R}$

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R} \times \mathbb{R}_n[X] & \rightarrow & \mathbb{R}_n[X] \\ (\lambda, P) & \mapsto & \lambda P \end{array} \quad \text{où } (\lambda P)(X) = \lambda P(X).$$

Alors $\mathbb{R}_n[X]$ est un $\mathbb{R}$ -espace vectoriel.

Son vecteur nul est le polynôme nul.

De même, l'ensemble $\mathbb{C}_n[X]$ des polynômes de degré inférieur ou égal à n à coefficients complexes est un $\mathbb{C}$ -espace vectoriel.

Propriétés (Règles de calcul)

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel. Pour tous $\vec{u}, \vec{v} \in E$ et pour tous $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$, on a :

- $\lambda \cdot \vec{u} = \vec{0}_E \Leftrightarrow (\lambda = 0 \text{ ou } \vec{u} = \vec{0}_E)$;
- $\lambda \cdot (\vec{u} - \vec{v}) = \lambda \cdot \vec{u} - \lambda \cdot \vec{v}$;
- $(\lambda - \mu) \cdot \vec{u} = \lambda \cdot \vec{u} - \mu \cdot \vec{u}$;
- $(-\lambda) \cdot (-\vec{u}) = \lambda \cdot \vec{u}$.

Propriété Importante

$\lambda \cdot \vec{u} = \vec{0}_E$ si et seulement si $\lambda = 0$ ou $\vec{u} = \vec{0}_E$

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel et soit $F \subseteq E$.

On peut se poser la question de savoir quand est-ce que F , quand il est muni par l'addition de E et la multiplication par des scalaires, est lui-même un espace vectoriel.

Il s'avère qu'il suffit que F soit stable par l'addition et la multiplication par les scalaires.

Définition 2

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel et F un sous-ensemble non vide de E . On dit que F est un **sous-espace vectoriel** de E si

- pour tous $\vec{u}, \vec{v} \in F$, $\vec{u} + \vec{v} \in F$;
- pour tout $\vec{u} \in F$ et pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$, $\lambda \vec{u} \in F$.

Dans ce cas F , muni de l'addition et de la multiplication par des scalaires,

$$\begin{array}{ccc} F \times F & \rightarrow & F \\ (\vec{u}, \vec{v}) & \mapsto & \vec{u} + \vec{v} \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} \mathbb{K} \times F & \rightarrow & F \\ (\lambda, \vec{u}) & \mapsto & \lambda \vec{u} \end{array}$$

est lui-même un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel.

Abréviation

Sous-espace vectoriel = s.e.v

Proposition 1

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel et F un sous-ensemble de E . Alors F est un **sous-espace vectoriel** de E si et seulement si ces deux propriétés sont satisfaites

- $\vec{0} \in F$;
- pour tous $\vec{u}, \vec{v} \in F$ et pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$, $\lambda\vec{u} + \vec{v} \in F$.

Preuve

Supposons que F soit un s.e.v de E . Alors comme F n'est pas vide, il contient un vecteur $\vec{u}$. Alors $-\vec{u} \in F$ et $\vec{u} - \vec{u} = \vec{0} \in F$.

Pour la seconde propriété, soient $\vec{u}, \vec{v} \in F$ et $\lambda \in \mathbb{K}$. Alors $\lambda\vec{u} \in F$ et donc $\lambda\vec{u} + \vec{v} \in F$.

Exercice : montrer l'implication réciproque. □

Exemples immédiats : E et $\{\vec{0}\}$ sont des s.e.v de E .

Exemple 1

Dans $\mathbb{R}^2$, toute droite passant par l'origine est un s.e.v. En effet toute droite passant par l'origine a comme équation $ax + by = 0$ où $a, b \in \mathbb{R}$ et on vérifie aisément qu'il s'agit bien d'un s.e.v (exercice).

Exemple 2

Dans $\mathbb{R}^3$, tout plan passant par l'origine est un s.e.v. Un plan $\mathcal{P}$ passant par l'origine est donné par une équation de la forme

$$ax + by + cz = 0 \quad \text{où } a, b, c \in \mathbb{R}.$$

Vérifions que $\mathcal{P}$ est un s.e.v de $\mathbb{R}^3$. Comme $\mathcal{P}$ passe par l'origine, on a

$\vec{0} \in \mathcal{P}$. Soient $\vec{u} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathcal{P}$, $\vec{v} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \in \mathcal{P}$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On doit

montrer que $\lambda\vec{u} + \vec{v} \in \mathcal{P}$. On a

$$\lambda\vec{u} + \vec{v} = \begin{pmatrix} \lambda x + x' \\ \lambda y + y' \\ \lambda z + z' \end{pmatrix} \quad \text{et } ax + by + cz = 0, \quad ax' + by' + cz' = 0.$$

D'où $a(\lambda x + x') + b(\lambda y + y') + c(\lambda z + z') = 0$. Donc $\lambda\vec{u} + \vec{v} \in \mathcal{P}$.

Exercice

Soit $\mathcal{F}(\mathbb{R})$ l'ensemble des applications de $\mathbb{R}$ à valeurs dans $\mathbb{R}$. On définit l'addition et la multiplication par les scalaires par

$$(f + g)(x) = f(x) + g(x); \quad (\lambda f)(x) = \lambda f(x).$$

- 1 Vérifier que $\mathcal{F}(\mathbb{R})$ est un $\mathbb{R}$ -espace vectoriel.
- 2 Soit $C^1(\mathbb{R})$ le sous-ensemble de $\mathcal{F}(\mathbb{R})$ des applications de classe C^1

$$C^1(\mathbb{R}) = \{f \in \mathcal{F}(\mathbb{R}) \mid f \text{ est dérivable et } f' \text{ est continue}\}.$$

Montrer que $C^1(\mathbb{R})$ est un s.e.v de $\mathcal{F}(\mathbb{R})$.

Notation

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel et $(F_i)_{i \in I}$ une famille de s.e.v de E . Alors l'intersection $\bigcap_{i \in I} F_i$ est définie par

$$\bigcap_{i \in I} F_i = \{x \in E \mid x \in F_i, \text{ pour tout } i \in I\}.$$

Par exemple, si $F_1, F_2, \dots, F_n$ sont des sous-ensembles de E , alors leur intersection $F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_n$ est l'ensemble des éléments $x \in E$ tel que $x \in F_k$ pour tout $k \in \{1, \dots, n\}$.

Proposition 2

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel et $(F_i)_{i \in I}$ une famille de s.e.v de E . Alors l'intersection

$$F = \bigcap_{i \in I} F_i = \{x \in E \mid x \in F_i, \text{ pour tout } i \in I\}$$

est un s.e.v de E .

Preuve

- (Pour tout $i \in I$, $\vec{0} \in F_i$) $\implies \vec{0} \in \bigcap_{i \in I} F_i$;
- Soient $\vec{u}, \vec{v} \in F$ et $\lambda \in \mathbb{K}$. Alors pour tout $i \in I$, $\lambda \vec{u} + \vec{v} \in F_i$. Donc $\lambda \vec{u} + \vec{v} \in F$. □

Corollaire 1

- Si F et G sont des s.e.v, alors leur intersection $F \cap G$ est un s.e.v.
- Si $F_1, F_2, \dots, F_n$ sont des s.e.v, alors leur intersection $F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_n$ est un s.e.v.

Exemple

Soient $\mathcal{P}_1$ et $\mathcal{P}_2$ deux plans de $\mathbb{R}^3$ passants par l'origine. Alors leur intersection $\mathcal{P}_1 \cap \mathcal{P}_2$, qui est une droite, est un s.e.v de $\mathbb{R}^3$.

Définition 3

Soient U et V deux s.e.v du $\mathbb{K}$ -e.v E .

- On appelle **somme** de U et V l'ensemble défini par

$$U + V = \{\vec{u} + \vec{v} \mid \vec{u} \in U, \vec{v} \in V\}.$$

- On dit que la somme $U + V$ est **directe** si $U \cap V = \{\vec{0}\}$.
- On dit du s.e.v F qu'il est la **somme directe** de U et V si
 - $F = U + V$;
 - $U \cap V = \{\vec{0}\}$.

On écrit **$F = U \oplus V$** .

Exemple

Considérons dans $\mathbb{R}^2$ deux vecteurs $\vec{u}, \vec{v}$ non nuls et non colinéaires. Soient

$$U = \{\lambda \vec{u} \mid \lambda \in \mathbb{R}\}, \quad V = \{\lambda \vec{v} \mid \lambda \in \mathbb{R}\}.$$

(U est la droite vectorielle dirigée par $\vec{u}$, V est la droite vectorielle dirigée par $\vec{v}$.)

Alors U et V sont des s.e.v de $\mathbb{R}^2$ et $\mathbb{R}^2 = U \oplus V$ (exercice).

Soient E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel et $\vec{u}, \vec{v}$ deux vecteurs de E . Alors on peut fabriquer de nouveaux vecteurs en combinant les deux vecteurs $\vec{u}, \vec{v}$

$$\alpha\vec{u} + \beta\vec{v}$$

où $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$.

Un tel nouveau vecteur est appelé une **combinaison linéaire** de $\vec{u}$ et $\vec{v}$.

Plus généralement ...

Définition 4

Soient $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n$ des vecteurs d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E . Tout vecteur de E de la forme

$$\lambda_1 \vec{u}_1 + \dots + \lambda_n \vec{u}_n$$

où $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$, est appelé une **combinaison linéaire** des vecteurs $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n$.

Exemple 1

Dans $\mathbb{R}^2$ le vecteur

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} -1 \\ 16 \end{pmatrix}$$

est bien une combinaison linéaire des deux vecteurs

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix}$$

car $\vec{w} = 3\vec{u} + 2\vec{v}$.

Exemple 2

Dans $\mathbb{R}^3$, soient

$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Un vecteur quelconque $\vec{u} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ de $\mathbb{R}^3$ s'écrit

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix} = x \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + y \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= x\vec{e}_1 + y\vec{e}_2 + z\vec{e}_3. \end{aligned}$$

Donc $\vec{u}$ est une combinaison linéaire de $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$.

Proposition 2

Soit E un $\mathbb{K}$ -e.v et $A \subseteq E$. Il existe un plus petit s.e.v de E contenant A . Il est unique et on l'appelle le **sous-espace vectoriel engendré** par A . On le note **$\text{Vect}(A)$** .

Preuve

E est un s.e.v de E contenant A . Donc il existe des s.e.v de E qui contiennent A . L'intersection F de ces s.e.v est un s.e.v de E contenant A . Il est le plus petit s.e.v qui contient A . En effet, si $A \subseteq H$, où H est un s.e.v de E , alors $F \subseteq H$. □

Proposition 3

Soit E un $\mathbb{K}$ -e.v et $A \subseteq E$, $A \neq \emptyset$. Alors $\text{Vect}(A)$ est l'ensemble des combinaisons linéaires des vecteurs de A , autrement dit

$$\text{Vect}(A) = \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i \vec{u}_i \mid n \in \mathbb{N}, \lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}, \vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n \in A \right\}.$$

Remarque

Donc un vecteur $\vec{u} \in E$ est dans $\text{Vect}(A)$, si et seulement si, il existe $n \in \mathbb{N}$, il existe $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n \in A$ et des scalaires $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$ tels que $\vec{u} = \lambda_1 \vec{u}_1 + \dots + \lambda_n \vec{u}_n$.

Exemple

Considérons dans $\mathbb{R}^2$ deux vecteurs $\vec{u}, \vec{v}$ non nuls et non colinéaires. Soient

$$U = \{\lambda \vec{u} \mid \lambda \in \mathbb{R}\}, \quad V = \{\lambda \vec{v} \mid \lambda \in \mathbb{R}\}.$$

Alors $U = \text{Vect}(\{\vec{u}\})$ et $V = \text{Vect}(\{\vec{v}\})$.

Exercice

Montrer que $U + V = \text{Vect}(U \cup V)$.

Définition 5

Soit F un s.e.v du $\mathbb{K}$ -e.v E et $S \subseteq E$.

- On dit que S est une **partie génératrice** de F si

$$F = \text{Vect}(S).$$

- On dit que S est **libre**, ou que les vecteurs de S sont **linéairement indépendants**, si

pour tous $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$, pour tous $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n \in S$,

$$\lambda_1 \vec{u}_1 + \dots + \lambda_n \vec{u}_n = \vec{0} \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = 0.$$

- On dit que S est une **base** de E , si elle est génératrice et libre.

Exemples

Soit F un s.e.v du $\mathbb{K}$ -e.v E et $S \subseteq E$.

- Dans $\mathbb{R}^2$, l'espace vectoriel F engendré par les deux vecteurs

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix}$$

vérifie $\text{Vect}(\vec{u}, \vec{v}) = \text{Vect}(\vec{u}, 2\vec{u}) = \text{Vect}(\vec{u})$ et donc la famille $\{\vec{u}\}$ est génératrice de F .

- Dans $\mathbb{R}^2$, la famille $\{\vec{u}, \vec{v}\}$ est libre où

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix}.$$

- $\mathbb{R}^3 = \text{Vect}(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$.

Théorème 1

Tout $\mathbb{K}$ -espace vectoriel non nul admet une base. Toutes les bases ont la même cardinalité : si B_1 et B_2 sont deux bases, alors il existe une bijection entre B_1 et B_2 .

Définition 6

On dit d'un $\mathbb{K}$ -e.v E qu'il est de **dimension finie** s'il admet une base finie. Le cardinal (le nombre d'éléments) d'une base est appelé la **dimension** de E et est noté **$\dim(E)$** .

Exemple 1

Dans $\mathbb{R}^n$, considérons la famille $\mathcal{B} = \{\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n\}$ où pour $1 \leq i \leq n$

$$\vec{e}_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Alors $\mathcal{B}$ est une base de $\mathbb{R}^n$ appelée la **base canonique** de $\mathbb{R}^n$. On a donc $\dim(\mathbb{R}^n) = n$.

Exemple 2

Dans $\mathbb{R}_n[X]$, le $\mathbb{R}$ -e.v des polynômes de degré inférieur ou égal à n , la famille des polynômes

$$P_0(X) = 1, P_1(X) = X, P_2(X) = X^2, \dots, P_n(X) = X^n$$

forme une base. Donc $\dim(\mathbb{R}_n[X]) = n + 1$.

Théorème de la base incomplète

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel. Soient L une partie libre et G une partie génératrice de E . Alors on peut compléter L par des éléments de G pour former une base de E .

Autrement dit, il existe $F \subseteq G \setminus L$ tel que $L \cup F$ soit une base de E .

Théorème de la base incomplète (version en dimension finie)

Soit E un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie. Soit $\mathcal{U} = \{\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n\}$ une **famille libre** de E et soit $\mathcal{G} = \{\vec{g}_1, \dots, \vec{g}_m\}$ une **famille génératrice** de E .

Alors il existe $\vec{g}_{i_1}, \dots, \vec{g}_{i_p}$ de $\mathcal{G}$ telle que la famille $\{\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n, \vec{g}_{i_1}, \dots, \vec{g}_{i_p}\}$ forme une base de E .

Proposition 4

Soit E un $\mathbb{K}$ -e.v de dimension finie n . Alors :

- Toute famille libre de E a au plus n éléments.
- Toute famille génératrice de E a au moins n éléments.
- Toute famille libre peut être complétée en une base de E .

Proposition 5

Soit B une famille de vecteurs d'un $\mathbb{K}$ -e.v E de dimension finie n . Les propriétés suivantes sont équivalentes :

- B est une base de E ;
- B est une famille libre à n éléments ;
- B est une famille génératrice à n éléments.

Exemple récapitulatif sur la base incomplète

Exemple récapitulatif

Considérons dans $\mathbb{R}^3$ la famille $\mathcal{U}$ des deux vecteurs

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Alors $\mathcal{U}$ est une famille libre. En effet, soient $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ tels que $\alpha\vec{u} + \beta\vec{v} = \vec{0}$. Alors

$$\alpha\vec{u} + \beta\vec{v} = \vec{0} \Leftrightarrow \alpha \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} 2\alpha + 3\beta = 0 \\ \alpha - \beta = 0 \\ -\alpha + \beta = 0 \end{cases}$$

Donc $\alpha = \beta$ et $5\alpha = 0$. Par conséquent $\alpha = \beta = 0$.

Exemple récapitulatif sur la base incomplète

suite de l'exemple

On peut compléter la famille libre $\mathcal{U}$ par des éléments de *la base canonique* $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ de $\mathbb{R}^3$ pour former une base de E .

On peut choisir par exemple $\vec{e}_1$. Vérifions si $\{\vec{u}, \vec{v}, \vec{e}_1\}$ est libre. Soient $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}$ tels que $\alpha\vec{u} + \beta\vec{v} + \gamma\vec{e}_1 = \vec{0}$. On obtient $2\alpha + 3\beta + \gamma = 0$ et $\alpha = \beta$. Donc $\gamma = -5\alpha$ et $\alpha = \beta$. Par conséquent la famille $\{\vec{u}, \vec{v}, \vec{e}_1\}$ n'est pas libre.

Choisissons $\vec{e}_2$. Vérifions si $\{\vec{u}, \vec{v}, \vec{e}_2\}$ est libre. Soient $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}$ tels que $\alpha\vec{u} + \beta\vec{v} + \gamma\vec{e}_2 = \vec{0}$. On obtient $2\alpha + 3\beta = 0$, $\alpha - \beta + \gamma = 0$ et $\alpha = \beta$. Donc $\alpha = \beta = \gamma = 0$, par conséquent la famille $\{\vec{u}, \vec{v}, \vec{e}_2\}$ est libre.

Comme $\dim(\mathbb{R}^3) = 3$ et comme $\{\vec{u}, \vec{v}, \vec{e}_2\}$ est une famille libre constituée de trois vecteurs, elle forme une base.

Définition 7

Si $\mathcal{B} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ est une base d'un $\mathbb{K}$ -espace vectoriel E , alors pour tout $\vec{u} \in E$, il existe des uniques scalaires $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$ tels que

$$\vec{u} = \lambda_1 \vec{u}_1 + \dots + \lambda_n \vec{u}_n$$

qui sont appelés les **composantes** de $\vec{u}$ dans la base $\mathcal{B}$.

Proposition 6 (Formule de Grassmann)

Soient F et G deux s.e.v d'un $\mathbb{K}$ -e.v de dimension finie. On a

$$\dim(F + G) = \dim(F) + \dim(G) - \dim(F \cap G).$$

Applications linéaires

Définition 8

Soient E et F deux $\mathbb{K}$ -e.v et $f : E \rightarrow F$ une application. On dit que f est **linéaire** si

- $f(\vec{0}_E) = \vec{0}_F$;
- Pour tous $\vec{u}, \vec{v} \in E$, pour tout $\lambda \in \mathbb{K}$, $f(\lambda\vec{u} + \vec{v}) = \lambda f(\vec{u}) + f(\vec{v})$.

Exemple 1

Soit $\alpha \in \mathbb{K}$ et $f : E \rightarrow E$ l'homothétie de rapport α

$$\vec{u} \mapsto f(\vec{u}) = \alpha \vec{u}.$$

Alors f est linéaire. En effet :

- $f(\vec{0}) = \alpha \cdot \vec{0} = \vec{0}$.
- Soient $\vec{u}, \vec{v} \in E$ et $\lambda \in \mathbb{K}$. Alors

$$\begin{aligned} f(\lambda \vec{u} + \vec{v}) &= \alpha(\lambda \vec{u} + \vec{v}) \\ &= \lambda \alpha \vec{u} + \alpha \vec{v} \\ &= \lambda f(\vec{u}) + f(\vec{v}). \end{aligned}$$

Exemple 2

Soit $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ définie par

$$f(x, y) = (x - y, x + y).$$

Alors f est linéaire. En effet, pour tous $\vec{u}, \vec{v} \in \mathbb{R}^2$, pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$, on a :

$$\begin{aligned} f(\lambda\vec{u} + \vec{v}) &= f(\lambda x + x', \lambda y + y') = ((\lambda x + x') - (\lambda y + y'), (\lambda x + x') + (\lambda y + y')) \\ &= (\lambda x - \lambda y, \lambda x + \lambda y) + (x' - y', x' + y') = \lambda f(\vec{u}) + f(\vec{v}). \end{aligned}$$

Exemple 3

Soit E l'espace vectoriel des applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$ de classe C^∞ .

L'application

$$D : E \rightarrow E, D(f) = f'$$

est une application linéaire. En effet :

- $D(\vec{0}) = \vec{0}$.
- Soient $f, g \in E$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. Alors

$$\begin{aligned} D(\lambda f + g) &= (\lambda f + g)' \\ &= \lambda f' + g' \\ &= \lambda D(f) + D(g). \end{aligned}$$

Exemple 4

Une rotation R d'un angle θ autour de l'origine dans $\mathbb{R}^2$ est une application linéaire. En effet, on a

$$\text{pour } \vec{u} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, R(\vec{u}) = \begin{pmatrix} x \cos \theta - y \sin \theta \\ x \sin \theta + y \cos \theta \end{pmatrix}.$$

et donc

$$\begin{aligned} R(\vec{u} + \vec{v}) &= R\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} (x + x') \cos \theta - (y + y') \sin \theta \\ (x + x') \sin \theta + (y + y') \cos \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x \cos \theta - y \sin \theta \\ x \sin \theta + y \cos \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x' \cos \theta - y' \sin \theta \\ x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{pmatrix} = R(\vec{u}) + R(\vec{v}). \end{aligned}$$

De même on a $R(\lambda \vec{u}) = \lambda R(\vec{u})$.

Proposition 7

Soient E et F deux $\mathbb{K}$ -e.v. Alors l'ensemble des applications linéaires de E dans F , noté $\mathcal{L}(E, F)$, munit des opérations

$$(f, g) \mapsto (f + g)(x) = f(x) + g(x); \quad (\lambda, f) \mapsto (\lambda f)(x) = \lambda f(x)$$

est un $\mathbb{K}$ -e.v.



Définition 9

- Une application linéaire de E dans E est appelé un **endomorphisme**. Le $\mathbb{K}$ -e.v $\mathcal{L}(E, E)$ est noté $\mathcal{L}(E)$.
- Une application linéaire bijective est appelée un **isomorphisme**.
- Un endomorphisme bijective est appelé un **automorphisme**.

Rappel

Soit $f : E \rightarrow F$ une application.

- L'image directe par f d'une partie $A \subseteq E$ est :

$$f(A) = \{f(x) \mid x \in A\}.$$

- L'image réciproque d'une partie $B \subseteq F$ est :

$$f^{-1}(B) = \{x \in E \mid f(x) \in B\}.$$

Proposition 8

Soit $f : E \rightarrow F$ une application linéaire.

- Si H est un s.e.v de E , alors $f(H)$ est un s.e.v de F .
- Si G est un s.e.v de F , alors $f^{-1}(G)$ est un s.e.v de E .

Définition 10

Soit $f : E \rightarrow F$ une application linéaire.

On appelle :

- **Image de f** , le s.e.v de E :

$$\text{Im}(f) = f(E) = \{f(x) \mid x \in E\}$$

- **Noyau de f** , le s.e.v de E :

$$\text{Ker}(f) = f^{-1}(\vec{0}) = \{\vec{u} \in E \mid f(\vec{u}) = \vec{0}\}$$

Exemple

Soit $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ définie par

$$f(x, y) = (x - y, x + y).$$

Alors f est linéaire (Exercice). On a $\text{Ker}(f) = \{\vec{0}\}$ et $\text{Im}(f) = \mathbb{R}^2$. En effet :

- $\vec{u} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \text{Ker}(f) \Leftrightarrow f(\vec{u}) = \vec{0} \Leftrightarrow x - y = 0 \text{ et } x + y = 0 \Leftrightarrow x = y = 0.$
- $\vec{v} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \text{Im}(f) \Leftrightarrow \exists (a, b) \in \mathbb{R}^2 \text{ tels que } x - y = a \text{ et } x + y = b \Leftrightarrow x = \frac{a+b}{2} \text{ et } y = \frac{b-a}{2}.$

Propriété

Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$. Soit $\mathcal{B} = (\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n)$ une base de E . Alors
 $\text{Im}(f) = \text{Vect}(f(\vec{u}_1), \dots, f(\vec{u}_n))$.

Proposition 10

Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$.

Les propriétés suivantes sont équivalentes :

- f est injective ;
- $\text{Ker}(f) = \{\vec{0}\}$;
- Pour tout $\vec{u} \in E$, $f(\vec{u}) = \vec{0} \Rightarrow \vec{u} = \vec{0}$.

Les propriétés suivantes sont équivalentes :

- f est surjective ;
- $\text{Im}(f) = F$.

Définition 11

Soient E et F deux $\mathbb{K}$ -e.v et $f \in \mathcal{L}(E, F)$. La dimension de $\text{Im}(f)$ est appelée le **rang de f** et est notée $\text{rg}(f)$.

Théorème (Théorème du rang)

Soient E et F deux $\mathbb{K}$ -e.v de dimension finie et $f \in \mathcal{L}(E, F)$. On a

$$\dim(E) = \text{rg}(f) + \dim(\text{Ker}(f)).$$

Terminologie à retenir

- Une application linéaire de E dans E est appelée un **endomorphisme**.
Le $\mathbb{K}$ -e.v $\mathcal{L}(E, E)$ est noté $\mathcal{L}(E)$.
- Une application linéaire bijective est appelée un **isomorphisme**.
- Un endomorphisme bijectif est appelé un **automorphisme**.