

Cours Mathématiques 3 (MAT2012L) L2 PCSI

2025-2026

Léon Matar Tine¹

Automne 2025

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
- Les matrices
 - Opérations sur les matrices
- Matrice de passage
- Matrice d'une application linéaire
- Matrices inversibles
 - Matrices inversibles et bases
 - Matrices inversibles et matrices de passage
 - Matrices inversibles et applications linéaires
- Déterminants

3 Systèmes d'équations linéaires

4 Réduction des endomorphismes

- Définition, propriétés

- Vecteurs propres, valeurs propres
- Sous-espaces propres
- Polynôme caractéristique
- Diagonalisation
- Théorème de Cayley-Hamilton

5 Espace vectoriel muni d'un produit scalaire, diagonalisation des matrices symétriques et hermitiennes

- Produit scalaire

- Produit scalaire réel
- Produit scalaire complexe
- Propriétés géométriques
- Orthogonalité
- Projection orthogonale
- Bases orthonormées, orthonormalisation
- Orthonormalisation de Gram-Schmidt

6 Suites et séries numériques

- Suites numériques
- Séries numériques
- Séries alternées
- Séries entières

7 Séries entières – Équations différentielles.

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 développement théorique.

L'UE compte pour 6 crédits. Un contrôle partiel (45% de la note) et un contrôle terminal (55% de la note) sont prévus.

Page de l'UE

[https://licence-math.univ-lyon1.fr/doku.php?id=a25:
s3_maths3:page](https://licence-math.univ-lyon1.fr/doku.php?id=a25:s3_maths3:page)

Espaces vectoriels

Dans la suite, \mathbb{K} désigne le corps des **nombres réels** ou le corps des **nombres 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 ;
- **Scalaires** 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

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

Sous-espaces vectoriels

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.

Abréviaction

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 aisement 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

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

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

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

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

- ➊ Vérifier que $\mathcal{F}(\mathbb{R})$ est un \mathbb{R} -espace vectoriel.

Soit $C^1(\mathbb{R})$ le sous-ensemble de $\mathcal{F}(\mathbb{R})$ des applications de classe C^1

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

- ➋ 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).

Familles génératrices, familles libres, bases

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

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

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

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

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 $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n \in S$,

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

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

Exemples

- 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 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

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

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

Applications linéaires : Définitions, propriétés

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 $\lambda \in \mathbb{K}$, $f(\lambda\vec{u} + \vec{v}) = \lambda f(\vec{u}) + f(\vec{v})$.

Applications linéaires : Exemples

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

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

Applications linéaires : Exemples

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 :

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

Applications linéaires : Exemples

Exemple 3

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

L'application

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

est une application linéaire. En effet :

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

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

Applications linéaires : Exemples

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

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

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

Applications linéaires

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.



Applications linéaires

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**.

Applications linéaires : Image et noyau

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 :

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

Applications linéaires : Image et noyau

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 .

Applications linéaires : Image et noyau

Définition 10

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

On appelle :

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

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

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

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

Applications linéaires : Image et noyau

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 :

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

Applications linéaires : Image et noyau

Propriété

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

Applications linéaires : Image et noyau

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

Applications linéaires : Image et noyau

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 $rg(f)$.

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

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

Applications linéaires : Rappel terminologie

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**.

Les matrices

Matrices

Les matrices

Définition

On appelle **matrice** tout tableau de la forme

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix}$$

où a_{ij} sont des scalaires (des éléments de \mathbb{K}).

- On note

$$M = (a_{ij})_{1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m},$$

a_{ij} est le coefficient : intersection de la i -ème ligne et de la j -ème colonne.

- M est dite de **taille $n \times m$** (elle a n lignes et m colonnes).

Les matrices

Exemples

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1 & 5 & 7 \\ 13 & 10 & 8 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} i & 3 \\ 25 & 1+i \\ 21 & 11 \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 6 \end{pmatrix}.$$

A est une matrice à coefficients dans \mathbb{R} (**mais dans \mathbb{C} aussi**) ; B est une matrice à coefficients dans \mathbb{C} .

Les matrices

Définition

On dit que M est une matrice

- **colonne** si elle a une seule colonne ($m = 1$).
- **ligne** si elle a une seule ligne ($n = 1$).
- **carrée** si elle a le même nombre de lignes que de colonnes ($n = m$).

Exemples

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1 & 5 & 7 \\ 13 & 10 & 8 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} i & 3 & 5 \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 6 \end{pmatrix}.$$

A est une matrice carrée

B est une matrice ligne

C est une matrice colonne

Remarques & notations

- Une matrice à n lignes et m colonnes est aussi appelée matrice de type (n, m) ou encore matrice $n \times m$.
- On note $\mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{K})$ l'ensemble des matrices $n \times m$.
- On note $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ l'ensemble des matrices carrées $n \times n$.

Les matrices

Remarques & notations

- La matrice identité $I_n \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est la matrice carrée dont tous les coefficients diagonaux valent 1 et les autres coefficients valent 0.

Exemple :

$$I_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

- La matrice nulle $O_{n,m} \in \mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{K})$ est la matrice dont tous les coefficients sont nuls.

Exemple :

$$O_{3,2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Opérations sur les matrices

Définition 6 (Somme de deux matrices)

Soient $A, B \in \mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{K})$, $A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m}$, $B = (b_{ij})_{1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m}$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{pmatrix}$$

On définit la **somme** $A + B$, une matrice de $\mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{K})$, par

$$A + B = (a_{ij} + b_{ij})_{1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m}$$

$$A + B = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} & \cdots & a_{1m} + b_{1m} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} & \cdots & a_{2m} + b_{2m} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} + b_{n1} & a_{n2} + b_{n2} & \cdots & a_{nm} + b_{nm} \end{pmatrix}$$

Opérations sur les matrices

Exemple

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}$$

$$A + B = \begin{pmatrix} 1+5 & 2+6 \\ 3+7 & 4+8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & 8 \\ 10 & 12 \end{pmatrix}$$

Opérations sur les matrices

Remarque

On ne somme que des **matrices de même taille.**

Opérations sur les matrices

Définition (Multiplication par un scalaire)

Soient $A \in \mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{K})$, $A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m}$ et $\lambda \in \mathbb{K}$,

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix}.$$

On définit la matrice λA , une matrice de $\mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{K})$, par

$$\lambda A = (\lambda a_{ij})_{1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m}$$

$$\lambda A = \begin{pmatrix} \lambda a_{11} & \lambda a_{12} & \cdots & \lambda a_{1m} \\ \lambda a_{21} & \lambda a_{22} & \cdots & \lambda a_{2m} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \lambda a_{n1} & \lambda a_{n2} & \cdots & \lambda a_{nm} \end{pmatrix}$$

Opérations sur les matrices

Exemples

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}$$

$$2A = \begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 6 & 8 \end{pmatrix}; \quad \pi B = \begin{pmatrix} 5\pi & 6\pi \\ 7\pi & 8\pi \end{pmatrix}$$

Opérations sur les matrices

Proposition 4

L'ensemble $\mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{K})$ muni de l'addition des matrices $(A, B) \mapsto A + B$ et de la multiplication par des scalaires $(\lambda, A) \mapsto \lambda A$ est un \mathbb{K} -espace vectoriel de **dimension finie $n \times m$** .

Le vecteur nul de cet espace est la matrice nulle $O_{n,m}$.

Opérations sur les matrices

Exemple & exercice

Dans $\mathcal{M}_2(\mathbb{K})$ on considère la famille $\mathcal{B} = (A_1, A_2, A_3, A_4)$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; A_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; A_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Montrer que \mathcal{B} est une base de $\mathcal{M}_2(\mathbb{K})$.

Opérations sur les matrices

Définition (Produit de deux matrices)

Soient $A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq p}$ une matrice $n \times p$ et $B = (b_{ij})_{1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq m}$ une matrice $p \times m$.

Le **produit** de A et B est la matrice $n \times m$, notée $A \cdot B$, dont les coefficients c_{ij} sont définis par : c_{ij} est le produit scalaire de la $i^{\text{ème}}$ ligne de A par la $j^{\text{ème}}$ colonne de B

$$c_{ij} = \left(\begin{array}{cccc} a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ip} \end{array} \right) \begin{pmatrix} b_{1j} \\ b_{2j} \\ \vdots \\ b_{pj} \end{pmatrix} = a_{i1}b_{1j} + a_{i2}b_{2j} + \cdots + a_{ip}b_{pj}$$

Opérations sur les matrices

Exemple

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} = (1 \times 4 + 2 \times 5 + 3 \times 6) = (32).$$

Opérations sur les matrices

Exemple

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 6 \\ 4 & 14 \\ 6 & 22 \end{pmatrix}$$

$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \times 0 + 2 \times 1 & 1 \times 2 + 2 \times 2 \\ 3 \times 0 + 4 \times 1 & 3 \times 2 + 4 \times 2 \\ 5 \times 0 + 6 \times 1 & 5 \times 2 + 6 \times 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 6 \\ 4 & 14 \\ 6 & 22 \end{pmatrix}$

Opérations sur les matrices

Remarques

- (1) Pour que le produit de A par B ait un sens il faut que le nombre de colonnes de A soit le même que le nombre de lignes de B .
- (2) Le produit d'une matrice de type (n, p) par une matrice de type (p, m) est une matrice de type (n, m) .

Opérations sur les matrices

Remarques

(1) On a

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Ce qui prouve qu'en général $A \cdot B \neq B \cdot A$ et $A \cdot B = O$ n'implique pas forcément $A = O$ ou $B = O$ (O désigne la matrice nulle).

(2) Pour tout $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ on a (exercice)

$$A \cdot I_n = I_n \cdot A = A.$$

Opérations sur les matrices

Propriétés

Les propriétés suivantes sont vraies sous hypothèse que les produits considérés ont un sens :

- $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$;
- $(A + B) \cdot C = A \cdot C + B \cdot C$;
- $A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$;
- $\lambda(A \cdot B) = (\lambda A) \cdot B = A \cdot (\lambda B)$.

Opérations sur les matrices

Notations & conventions

Pour tout $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$

$$A^0 = I_n, \quad A^1 = A, \quad A^n = \underbrace{A \cdot A \cdots A}_{n \text{ fois}}.$$

Opérations sur les matrices

Remarque

On a

$$(A + B)^2 = A^2 + AB + BA + B^2$$

et si $AB \neq BA$ alors

$$(A + B)^2 \neq A^2 + 2AB + B^2.$$

Proposition 5 (Formule du binôme pour les matrices)

Soient $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ tels que $\textcolor{red}{AB = BA}$.

Alors pour tout $n \geq 0$ on a

$$(A + B)^n = \sum_{k=0}^{k=n} \binom{n}{k} A^{n-k} B^k$$

où $\binom{n}{k}$ est le coefficient binomial : $\binom{n}{k} = C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$

Matrice de passage

Matrice de passage

Matrice de passage

Définition

Soit E un \mathbb{K} -e.v de dimension finie n et soit $\mathcal{B}_1 = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ une base de E . Soit $\vec{u} \in E$ ayant comme composantes dans la base \mathcal{B}_1 , $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$. (Donc $\vec{u} = \lambda_1 \vec{e}_1 + \dots + \lambda_n \vec{e}_n$).

On appelle **matrice des composantes du vecteur \vec{u} dans la base \mathcal{B}** , la matrice colonne

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix}$$

On écrit

$$M_{\mathcal{B}}(\vec{u}) = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \vec{u} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix}_{\mathcal{B}}$$

Matrice de passage

Définition (suite)

Plus généralement, soit $(\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_m)$ une famille de vecteurs de E .

On appelle **matrice des composantes de la famille $(\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_m)$ dans la base \mathcal{B}** , la matrice $n \times m$ dont les colonnes sont $M_{\mathcal{B}}(\vec{u}_1), \dots, M_{\mathcal{B}}(\vec{u}_m)$.
Elle est notée $M_{\mathcal{B}}(\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_m)$.

Matrice de passage

Exemple

Soit $\mathcal{B} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ la base canonique de \mathbb{R}^n . Alors

$$M_{\mathcal{B}}(\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} = I_n.$$

Matrice de passage

Définition

Soit E un \mathbb{K} -e.v de dimension finie n . Soient $\mathcal{B}_1 = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ et $\mathcal{B}_2 = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_n)$ deux bases de E .

On appelle **matrice de passage** de la base \mathcal{B}_1 à la base \mathcal{B}_2 , la matrice carrée $n \times n$, $M_{\mathcal{B}_1}(\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_n)$.

Elle est notée $P_{\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2}$.

Donc c'est la matrice dont la $j^{\text{ème}}$ colonne est formée des composantes de \vec{f}_j dans la base \mathcal{B}_1 .

C'est donc la matrice carrée $n \times n$, $A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n}$ tel que pour tout $j \in \{1, \dots, n\}$

$$\vec{f}_j = a_{1j} \vec{e}_1 + \cdots + a_{nj} \vec{e}_n.$$

Matrice de passage

Exemple

Dans \mathbb{R}^2 considérons les deux bases $\mathcal{B}_1 = (\vec{u}, \vec{v})$ et $\mathcal{B}_2 = (\vec{w}, \vec{r})$ où

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \end{pmatrix}, \quad \vec{w} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}, \quad \vec{r} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Calculons la matrice $P_{\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2}$. Les composantes de \vec{w} et \vec{r} dans \mathcal{B}_1 sont
(exercice)

$$\vec{w} = \frac{1}{2}\vec{u} + \frac{1}{2}\vec{v}; \quad \vec{r} = -\vec{u} + \vec{v}.$$

Donc

$$M_{\mathcal{B}_1}(\vec{w}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix}, \quad M_{\mathcal{B}_1}(\vec{r}) = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad P_{\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -1 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix}.$$

Matrice de passage

Proposition

Soit E un \mathbb{K} -e.v de dimension finie et soient \mathcal{B}_1 et \mathcal{B}_2 deux bases de E .
Alors pour tout $\vec{u} \in E$

$$M_{\mathcal{B}_1}(\vec{u}) = P_{\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2} \cdot M_{\mathcal{B}_2}(\vec{u}).$$

Matrice de passage

Exemple

Reprendons l'exemple précédent : $\mathcal{B}_1 = (\vec{u}, \vec{v})$, $\mathcal{B}_2 = (\vec{w}, \vec{r})$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \end{pmatrix}, \quad \vec{w} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}, \quad \vec{r} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

On avait trouvé

$$P_{\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2} = \begin{pmatrix} 1/2 & -1 \\ 1/2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Soit $\vec{f} = \vec{w} + \vec{r}$ et calculons ses composantes dans la base \mathcal{B}_1 . On a

$$M_{\mathcal{B}_2}(\vec{f}) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad M_{\mathcal{B}_1}(\vec{f}) = \begin{pmatrix} 1/2 & -1 \\ 1/2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/2 \\ 3/2 \end{pmatrix}$$

Matrice d'une application linéaire

Matrice d'une application linéaire

Matrice d'une application linéaire

Définition

Soient E et F des \mathbb{K} -e.v munis respectivement des bases $\mathcal{B} = (\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n)$ et $\mathcal{C} = (\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_p)$. Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$ une application linéaire.

On appelle **matrice de f** , par rapport aux bases \mathcal{B} et \mathcal{C} , la matrice

$$M_{\mathcal{C}}(f(\vec{u}_1), \dots, f(\vec{u}_n)).$$

Elle est notée $M_{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(f)$.

Matrice d'une application linéaire

Exemple

On munit \mathbb{R}^3 de la base canonique, notée ici $\mathcal{B} = (\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3)$ et \mathbb{R}^2 de la base canonique, notée ici $\mathcal{C} = (\vec{v}_1, \vec{v}_2)$. Soit $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ l'application linéaire définie par

$$f(x, y, z) = (x + 2y - z, x - y).$$

On a

$$f(\vec{u}_1) = (1, 1) = \vec{v}_1 + \vec{v}_2, \quad f(\vec{u}_2) = (2, -1) = 2\vec{v}_1 - \vec{v}_2,$$

$$f(\vec{u}_3) = (-1, 0) = -\vec{v}_1 + 0 \cdot \vec{v}_2.$$

Donc

$$M_{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(f) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Matrice d'une application linéaire

Proposition

Soient E et F des \mathbb{K} -e.v (de dimension finie) munis respectivement des bases \mathcal{B} et \mathcal{C} . Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$ une application linéaire. Alors pour tout $\vec{u} \in E$

$$M_{\mathcal{C}}(f(\vec{u})) = M_{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(f) \cdot M_{\mathcal{B}}(\vec{u}).$$

Remarque

Autrement dit, si Y désigne la matrice colonne des composantes de $f(\vec{u})$ dans la base \mathcal{C} et X désigne la matrice colonne des composantes de \vec{u} dans la base \mathcal{B} , alors

$$Y = AX, \text{ où } A = M_{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(f).$$

Matrice d'une application linéaire

Exemple

En reprenant l'exemple précédent, par rapport aux bases canoniques,

$$f(x, y, z) = (x + 2y - z, x - y), \quad M_{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(f) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix},$$

on a

$$\begin{pmatrix} x + 2y - z \\ x - y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Matrice d'une application linéaire

Définition

Soient E et F deux \mathbb{K} -e.v de dimension respectives n et m . Soient $\mathcal{B} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ une base de E et $\mathcal{C} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_m)$ une base de F .

Soit $A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n} \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{K})$. L'application linéaire associée à A , relative aux bases \mathcal{B} et \mathcal{C} , est l'application définie par : au vecteur $\vec{u} \in E$ de composantes (x_1, \dots, x_n) dans \mathcal{B} , elle associe le vecteur \vec{v} dont les composantes (y_1, \dots, y_m) dans la base \mathcal{C} sont données par

$$y_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \cdots + a_{in}x_n$$

Autrement dit

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Matrice d'une application linéaire

Exemple

Soit

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}.$$

L'application linéaire associée à A , relativement à la base canonique de \mathbb{R}^2 ,
 $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ est

$$f(x, y) = A \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + 2y \\ 3x + 4y \end{pmatrix}$$

Matrice d'une application linéaire

Théorème

Soit E (respectivement F) un \mathbb{K} -e.v de dimension finie n (respectivement m), muni d'une base \mathcal{B} (respectivement \mathcal{C}). L'application

$$\mathcal{M} : \mathcal{L}(E, F) \rightarrow \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{K}); f \mapsto \mathcal{M}(f) = M_{\mathcal{B},\mathcal{C}}(f)$$

est un isomorphisme de \mathbb{K} -e.v.

Remarque

Donc fondamentalement en dimension finie, une fois que les bases sont fixées, il n'existe pas de différence réelle entre applications linéaires et matrices.

Matrice d'une application linéaire

Proposition

Soient E, F, G trois \mathbb{K} -e.v de dimension finie, munis respectivement des bases $\mathcal{B}, \mathcal{C}, \mathcal{D}$. Pour tout $f \in \mathcal{L}(E, F)$ et $g \in \mathcal{L}(F, G)$, on a

$$M_{\mathcal{B}, \mathcal{D}}(g \circ f) = M_{\mathcal{C}, \mathcal{D}}(g) \cdot M_{\mathcal{B}, \mathcal{C}}(f).$$

Matrices inversibles

Matrices inversibles

Matrices inverses

Définition

Une matrice **carrée** $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est dite **inversible** s'il existe une matrice $B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ vérifiant $A \cdot B = B \cdot A = I_n$.

Cette matrice est alors **unique**, est appelée **l'inverse** de A et est notée A^{-1} .

Exemple

On a

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & -\frac{3}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = I_2$$

et donc $A = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ est inversible, d'inverse

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{3}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}.$$

Matrices inverses

Proposition

Soient $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

- Si A et B sont inversibles, il en de même de $A \cdot B$ et on a

$$(A \cdot B)^{-1} = B^{-1} \cdot A^{-1}.$$

- Si A est inversible, alors A^{-1} est inversible et $(A^{-1})^{-1} = A$.