

Dimension

Aperçu

1. Espaces vectoriels de dimension finie
2. Dimension et sous-espace vectoriel
3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n
4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

1. Espaces vectoriels de dimension finie

1.1 Dimension d'un espace vectoriel

1.2 Caractérisation des bases et de la dimension

1.3 Dimension d'un produit d'espaces vectoriels

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

1. Espaces vectoriels de dimension finie

1.1 Dimension d'un espace vectoriel

1.2 Caractérisation des bases et de la dimension

1.3 Dimension d'un produit d'espaces vectoriels

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

Le point fondamental concernant les espaces vectoriels de dimension finie est que toute base possède le même nombre d'éléments. Cela va nous permettre de définir la dimension d'un espace vectoriel.

Nous devons tout d'abord démontrer le résultat suivant

T 1 *Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel et $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ est une base de E ayant n vecteurs. Alors toute famille de $n + 1$ vecteurs est liée.*

Démonstration.

Soit $S = (w_1, w_2, \dots, w_{n+1})$ une famille de $n+1$ vecteurs de E . Chaque vecteur w_i se décompose dans la base \mathcal{B} sous la forme

$$w_j = a_{1j}v_1 + a_{2j}v_2 + \dots + a_{nj}v_n$$

Considérons maintenant une relation de dépendance linéaire entre les vecteurs $w_1, w_2, \dots, w_n, w_{n+1}$:

$$b_1w_1 + b_2w_2 + \dots + b_nw_n + b_{n+1}w_{n+1} = 0, \quad b_1, b_2, \dots, b_n, b_{n+1} \in \mathbb{K}.$$

Substituons maintenant w_j par son expression en v_1, v_2, \dots, v_n . On a

$$\sum_{j=1}^{n+1} b_j w_j = \sum_{j=1}^{n+1} b_j \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} v_i \right) = \sum_{j=1}^{n+1} \sum_{i=1}^n (b_j a_{ij} v_i) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n+1} (b_j a_{ij} v_i);$$

et donc

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{n+1} b_j a_{ij} \right) v_i = 0.$$

Autrement dit, on obtient la relation de dépendance linéaire

$$(b_1 a_{11} + b_2 a_{12} + \dots + b_{n+1} a_{1,n+1}) v_1 + \dots + (b_1 a_{n1} + b_2 a_{n2} + \dots + b_{n+1} a_{n,n+1}) v_n = 0$$

La famille $\mathcal{B} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ étant une famille libre, les coefficients de cette relation de dépendance linéaire sont tous nuls. Cela s'écrit^a

$$\begin{cases} a_{11}b_1 + a_{12}b_2 + \dots + a_{1,n+1}b_{n+1} &= 0 \\ a_{21}b_1 + a_{22}b_2 + \dots + a_{2,n+1}b_{n+1} &= 0 \\ &\vdots \\ a_{n1}b_1 + a_{n2}b_2 + \dots + a_{n,n+1}b_{n+1} &= 0 \end{cases}$$

Ainsi $b_1w_1 + b_2w_2 + \dots + b_nw_n + b_{n+1}w_{n+1} = 0$ si, et seulement si $(b_1, b_2, \dots, b_{n+1})$ est solution d'un système homogène de n équations avec $n + 1$ inconnues. Ce système admet donc une solution non nulle, c'est-à-dire qu'il existe des scalaires b_1, b_2, \dots, b_{n+1} , non tous nuls tels que

$$b_1w_1 + b_2w_2 + \dots + b_nw_n + b_{n+1}w_{n+1} = 0$$

La famille \mathcal{S} est donc une famille liée.

^aOn peut écrire simplement $Mb = 0$ où $b = (b_1, b_2, \dots, b_{n+1})^T$ et $M = \text{Coord}_{\mathcal{B}}(\mathcal{S})$.

C 2 Dans un espace vectoriel engendré par n vecteurs, toute famille de m vecteurs avec $m > n$ est une famille liée.

T 3 Soit E un espace vectoriel de dimension finie sur un corps \mathbb{K} . Toutes les bases de E ont le même nombre d'éléments.

D 4 Dimension d'un \mathbb{K} -espace vectoriel

Soit E un espace vectoriel de dimension finie sur un corps \mathbb{K} . Il existe un entier n tel que toutes les bases de E possèdent n éléments. On dit que n est la **dimension de E sur le corps \mathbb{K}** , ou que **E est de dimension n sur \mathbb{K}** .

La dimension de E sur \mathbb{K} se désigne par la notation $\dim_{\mathbb{K}}(E)$ ou simplement par $\dim(E)$ si aucune ambiguïté n'est possible sur le corps de base.

Par convention, l'espace vectoriel nul $E = \{ 0 \}$ est de dimension 0.

E 5 La base canonique de \mathbb{K}^n contient n vecteurs.

- ▶ L'espace vectoriel \mathbb{R}^n est donc de dimension n sur \mathbb{R} ,
- ▶ l'espace vectoriel \mathbb{C}^n est donc de dimension n sur \mathbb{C} .

E 6 L'espace vectoriel \mathbb{C} est de dimension 2 sur \mathbb{R} . En effet,

$$\forall z \in \mathbb{C}, \exists!(x, y) \in \mathbb{R}^2, z = x + yi$$

signifie que la famille $(1, i)$, formée de deux vecteurs de \mathbb{C} , est une base du \mathbb{R} -espace vectoriel \mathbb{C} .

E 7

- ▶ Un plan vectoriel de \mathbb{R}^3 est un sous-espace vectoriel de dimension 2. En effet, il est engendré par deux vecteurs linéairement indépendants.
- ▶ Une droite dans \mathbb{R}^n est un sous-espace vectoriel de dimension 1.
- ▶ Un hyperplan de \mathbb{R}^n est un sous-espace vectoriel de dimension $(n - 1)$.

E 8

L'**espace-temps** des physiciens est l'ensemble des couples (v, t) où v est un vecteur d'origine donnée O dans l'espace usuel, et t un nombre réel qu'on appelle le temps. C'est donc le produit cartésien $E \times \mathbb{R}$ où E est l'espace usuel. Celui-ci s'identifie à \mathbb{R}^4 . Par suite, regardé comme espace vectoriel réel, l'espace-temps est de dimension 4.

E 9

L'espace vectoriel des matrices de type (m, n) , $E = \mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{K})$ est un espace vectoriel de dimension $m \times n$. Une base de $\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{K})$ est donnée par les matrices ayant tous leurs coefficients nuls, sauf un égal à 1.

Par exemple, une base de $\mathcal{M}_{2,3}(\mathbb{K})$ est formée par les matrices

$$\begin{array}{lll} M_{1,1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & M_{1,2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & M_{1,3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ M_{2,1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & M_{2,2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & M_{2,3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{array}$$

E 10 L'espace vectoriel des fonctions à valeurs réelles $F = F(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ est de dimension infinie. Il n'admet donc aucune base finie.
De même, l'espace vectoriel des suites à valeurs réelles $S = \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ est de dimension infinie.

1. Espaces vectoriels de dimension finie

1.1 Dimension d'un espace vectoriel

1.2 Caractérisation des bases et de la dimension

1.3 Dimension d'un produit d'espaces vectoriels

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

T 11 Soit v_1, v_2, \dots, v_n des vecteurs d'un \mathbb{K} -espace vectoriel E . Les assertions suivantes sont équivalentes:

1. La famille (v_1, v_2, \dots, v_n) est une base de E .
2. La famille (v_1, v_2, \dots, v_n) est libre et E est de dimension n .
3. La famille (v_1, v_2, \dots, v_n) est une famille génératrice de E et E est de dimension n .

T 12 Soit E un espace vectoriel sur un corps \mathbb{K} et n un entier. Les assertions suivantes sont équivalentes

1. E est de dimension n .
2. n est le plus grand entier tel qu'on puisse extraire de E une famille libre de n vecteurs.
3. n est le plus petit entier tel qu'on puisse extraire de E une famille de n vecteurs engendrant E .

E 13 Reprenons l'exemple du plan W de \mathbb{R}^3 :

$$W = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid x + y - 3z = 0 \right\}.$$

La dimension de W est 2 car nous avons déterminer une base contenant deux vecteurs. Si nous choisissons deux vecteurs linéairement indépendant dans W , c'est automatiquement une base de W . Par exemple $v_1 = (1, 2, 1)^T$ et $v_2 = (3, 0, 1)^T$ sont linéairement indépendant (justifier), et le théorème 11 assure donc que $S = (v_1, v_2)$ est une base de W .

1. Espaces vectoriels de dimension finie

1.1 Dimension d'un espace vectoriel

1.2 Caractérisation des bases et de la dimension

1.3 Dimension d'un produit d'espaces vectoriels

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

T 14 Soit U et V deux \mathbb{K} -espaces vectoriels de dimension finie. Alors l'espace vectoriel produit $U \times V$ est de dimension finie et

$$\dim(U \times V) = \dim(U) + \dim(V).$$

Démonstration. Soit (u_1, \dots, u_n) une base de U et (v_1, \dots, v_p) une base de V . On pose $E = U \times V$ et

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, e_i = (u_i, 0_V) \quad \text{et} \quad \forall j \in \llbracket 1, p \rrbracket, e_{n+j} = (0_U, v_j).$$

Il ne reste plus qu'à vérifier que la famille de $n + p$ vecteurs $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_{n+p})$ est une base de E . ■

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

2.1 Théorème de la base incomplète

2.2 Dimension d'un sous-espace vectoriel

2.3 Rang d'une famille de vecteurs

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

2.1 Théorème de la base incomplète

2.2 Dimension d'un sous-espace vectoriel

2.3 Rang d'une famille de vecteurs

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

T 15 Soit W est un sous-espace vectoriel d'un \mathbb{K} -espace vectoriel E de dimension finie. Alors toute famille libre de vecteurs de W est une famille libre de vecteurs de E .

T 16 **Théorème de la base incomplète**

Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension finie, $\mathcal{L} = (w_1, w_2, \dots, w_r) \in E^r$ une famille libre de vecteurs de E , $\mathcal{G} \subset E$ une partie génératrice de E .

Alors il existe des vecteurs $v_1, v_2, \dots, v_s \in \mathcal{G}$ tels que la famille

$$B = (w_1, w_2, \dots, w_r, v_1, v_2, \dots, v_s)$$

soit une base de E .

Démonstration. On considère les ensembles

$$A = \left\{ \sigma = (w_1, w_2, \dots, w_r, v_1, v_2, \dots, v_s) \mid s \in \mathbb{N} \text{ et } v_1, v_2, \dots, v_s \in \mathcal{G} \text{ et } \sigma \text{ est libre} \right\}$$
$$\text{et } X = \{ \text{card}(\sigma) \mid \sigma \in A \}.$$

Alors X est une partie de \mathbb{N} non vide car $\mathcal{L} \in A$ et $\text{card}(\mathcal{L}) = r \in X$. De plus X est majorée par $\dim(E)$ puisqu'une famille libre de E possède au plus $\dim(E)$ éléments. Ainsi X est une partie non vide et majorée de \mathbb{N} , elle admet donc un plus grand élément n . Il existe donc une famille $B = (w_1, w_2, \dots, w_r, v_1, v_2, \dots, v_s) \in A$ telle que $r + s = n$. La famille B est libre, par définition de A .

Montrons que B engendre E . Supposons qu'il existe $v \in \mathcal{G}$ tel que $v \notin \text{Vect}(B)$, alors la famille $(w_1, w_2, \dots, w_r, v_1, v_2, \dots, v_s, v)$ est une famille libre de E contenant $n + 1$ vecteurs. Ainsi $r + s + 1 = n + 1 \in B$, ce qui contredit $n = \max(B)$. Ainsi tout vecteur $v \in \mathcal{G}$ est combinaison linéaire des vecteurs de la famille B . Autrement dit $\mathcal{G} \subset \text{Vect } B$. Or $\text{Vect } \mathcal{G}$ est le plus petit sous-espace vectoriel de E contenant \mathcal{G} , donc

$$E = \text{Vect } \mathcal{G} \subset \text{Vect } B \subset E.$$

Par double inclusion, $\text{Vect } B = E$: la famille B est donc une famille génératrice de E . ■

C 17 Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension finie.

1. Toute famille libre de E peut-être complétée en une base.
2. De toute partie génératrice de E , on peut extraire une base.

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

2.1 Théorème de la base incomplète

2.2 Dimension d'un sous-espace vectoriel

2.3 Rang d'une famille de vecteurs

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

T 18 Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension finie et W un sous-espace vectoriel de E . Alors W est de dimension finie et l'on a

$$\dim(W) \leq \dim(E).$$

De plus $W = E$ si, et seulement si $\dim(W) = \dim(E)$.

C 19 Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel et V, W deux sous-espaces vectoriels de E de dimension finie. On suppose $V \subset W$ et $\dim(V) = \dim(W)$, alors $V = W$.

T 20 Le plan W de \mathbb{R}^3

$$W = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid x + y - 3z = 0 \right\}$$

admet pour base (v_1, v_2) où $v_1 = (1, 2, 1)^T$ et $v_2 = (3, 0, 1)^T$.

Soit v_3 un vecteur n'appartenant pas à ce plan. Par exemple on peut choisir $v_3 = (1, 0, 0)^T$, qui n'appartient pas à W puisque ses coefficients ne vérifient pas l'équation $x + y - 3z = 0$.

Alors $S = (v_1, v_2, v_3)$ est une base de \mathbb{R}^3 . Pourquoi ?

D 21

- ▶ On appelle **droite vectorielle** un espace vectoriel de dimension 1.
- ▶ On appelle **plan vectoriel** un espace vectoriel de dimension 2.
- ▶ Lorsque E est un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension n , un **hyperplan de E** est un sous-espace vectoriel de E dimension $(n - 1)$.

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

2.1 Théorème de la base incomplète

2.2 Dimension d'un sous-espace vectoriel

2.3 Rang d'une famille de vecteurs

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

D 22 Soit $\mathcal{F} = (v_1, v_2, \dots, v_s)$ une famille de vecteurs d'un \mathbb{K} -espace vectoriel E . On appelle **rang de la famille \mathcal{F}** la dimension du sous-espace vectoriel engendré par les v_i . On a donc

$$\text{rg}(\mathcal{F}) = \text{rg}(v_1, v_2, \dots, v_s) = \dim_{\mathbb{K}} \text{Vect}(v_1, v_2, \dots, v_s).$$

T 23 Soit $\mathcal{F} = (v_1, v_2, \dots, v_s)$ une famille de vecteurs d'un \mathbb{K} -espace vectoriel E . alors

$$\text{rg}(\mathcal{F}) \leq s \quad \text{et} \quad \text{rg}(\mathcal{F}) \leq \dim(E).$$

De plus,

1. $\text{rg}(\mathcal{F}) = s$ si, et seulement si la famille \mathcal{F} est une famille libre.
2. $\text{rg}(\mathcal{F}) = \dim(E)$ si, et seulement si la famille \mathcal{F} est une famille génératrice de E .
3. Si \mathcal{F}' est une sous famille de \mathcal{F} , alors $\text{rg}(\mathcal{F}') \leq \text{rg}(\mathcal{F})$.

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

3.1 Indépendance linéaire dans \mathbb{K}^n

3.2 Bases de \mathbb{K}^n

3.3 Image et noyau d'une matrice

3.4 Théorème du rang pour les matrices

3.5 Le rang des lignes est égal au rang des colonnes

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

3.1 Indépendance linéaire dans \mathbb{K}^n

3.2 Bases de \mathbb{K}^n

3.3 Image et noyau d'une matrice

3.4 Théorème du rang pour les matrices

3.5 Le rang des lignes est égal au rang des colonnes

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

Soit $S = (v_1, \dots, v_p)$ une famille de vecteurs de \mathbb{K}^n et A la matrice dont les colonnes sont v_1, \dots, v_p . La matrice A est donc de type (n, p) .

Pour $(\alpha_1, \dots, \alpha_p) \in \mathbb{K}^p$, on a

$$A \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_p \end{pmatrix} = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_p v_p.$$

Nous pouvons savoir si S est libre en considérant la matrice A dont les colonnes sont les vecteurs v_1, \dots, v_p .

P 24 Soit $A \in \mathcal{M}_{n,k}(\mathbb{K})$. On note v_1, v_2, \dots, v_k les vecteurs de \mathbb{K}^n formant les colonnes de A . Alors, la famille $\mathcal{S} = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ est libre si, et seulement si le système $Ax = 0$ a pour unique solution $x = 0$.

E 25 $v_1 = (1, 2)$, $v_2 = (1, -1)$, $v_3 = (2, -5)$.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & -1 & -5 \end{pmatrix} \underset{L}{\sim} \dots \underset{L}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

Il y a une variable libre, la sol générale est $x = (t, -3t, t)$ en particulier, avec la relation

$$Ax = tv_1 - 3tv_2 + tv_3 = 0,$$

on a $v_1 - 3v_2 + v_3 = 0$.

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

3.1 Indépendance linéaire dans \mathbb{K}^n

3.2 Bases de \mathbb{K}^n

3.3 Image et noyau d'une matrice

3.4 Théorème du rang pour les matrices

3.5 Le rang des lignes est égal au rang des colonnes

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

R Soit $S = (v_1, \dots, v_p)$ une famille de vecteurs de \mathbb{K}^n et A la matrice dont les colonnes sont v_1, \dots, v_p . La matrice A est donc de type (n, p) . Alors,

$$\text{Im}(A) = \text{Vect}(v_1, v_2, \dots, v_p).$$

Ainsi, S engendre \mathbb{K}^n si le système $Ax = v$ a une solution pour tout $v \in \mathbb{R}^n$; c'est-à-dire si le système $Ax = v$ est compatible pour tout $v \in \mathbb{R}^n$.

T 26 Soit A une matrice carrée (n, n) . Alors, les assertions suivantes sont équivalentes

1. A est inversible,
2. $\text{rg}(A) = n$,
3. Les colonnes de A forment une base de \mathbb{K}^n ,
4. Les lignes de A (écrites en colonnes) forment une base de \mathbb{K}^n .

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

3.1 Indépendance linéaire dans \mathbb{K}^n

3.2 Bases de \mathbb{K}^n

3.3 Image et noyau d'une matrice

3.4 Théorème du rang pour les matrices

3.5 Le rang des lignes est égal au rang des colonnes

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

Soit A la matrice $(4,5)$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 4 \\ -1 & 3 & 9 & 1 & 9 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

L'image de A est le sous-espace vectoriel engendré par les colonnes de A :

$$\text{Im}(A) = \text{Vect} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 9 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 9 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}.$$

La forme échelonnée réduite (par ligne) de la matrice A est donnée par

$$A \underset{L}{\sim} R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -3 & 0 & -3 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Ainsi $\text{rg}(A) = 3$.

Le noyau de A est l'ensemble des solutions de $Ax = 0$ avec $x = (x_1, \dots, x_5)^T$. En observant R , on peut utiliser les variables libres $x_3 = s$ et $x_5 = t$, les solutions de $Ax = 0$ sont de la forme

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3s + 3t \\ -2s - t \\ s \\ -3t \\ t \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 0 \\ -3 \\ 1 \end{pmatrix} = sv_1 + tv_2, \quad s, t \in \mathbb{R}.$$

T 28 Vérifier les calculs. Vérifier que $Av_1 = 0$ et $Av_2 = 0$.

Alors (v_1, v_2) est une base de $\ker(A)$. Dans cet exemple $\ker(A)$ est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^5 de dimension 2. Ici, $\dim(\ker A) = 2 = n - r$, où $n = 5$ est le nombre de colonnes de A et $r = 3$ est son rang.

Déterminons maintenant une base de $\text{Im}(A)$.

L'équivalence

$$Ax = 0 \iff Rx = 0$$

s'interprète en disant que les colonnes de A et les colonnes de R vérifient les même relation de dépendance linéaire.

Par exemple, notons c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 les colonnes de A .

- ▶ Les colonnes 1, 2 et 4 de la matrice R sont linéairement indépendantes (ce sont des vecteurs de la base canonique de \mathbb{R}^4). Les colonnes c_1, c_2, c_4 de la matrice A forment donc également une famille libre.
- ▶ La troisième colonne de R est clairement combinaison linéaire des deux première, on retrouve la même relation pour les colonnes de A :

$$-3c_1 + 2c_2 = -3 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + 2 \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 9 \\ 2 \end{pmatrix} = c_3.$$

- ▶ De manière analogue, $c_5 = -3c_1 + c_2 + 3c_4$.

Alors, si nous choisissons les colonnes de A correspondant aux positions des pivots dans la forme échelonnée réduite, c'est-à-dire c_1, c_2, c_4 , alors, ces trois vecteurs sont linéairement indépendants.

Car si l'on effectue les même opération que sur A , on a

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \underset{L}{\sim} \cdots \underset{L}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et nous avons un pivot dans chaque colonne.... : la famille c_1, c_2, c_4 est libre.

Si l'on ajoute un des vecteurs c_3 ou c_5 , ce n'est plus le cas, et la famille est liée.

Puisque c_3 et c_5 sont combinaison linéaire de c_1, c_2, c_4 , on a

$$\text{Im}(A) = \text{Vect} \{ c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 \} = \text{Vect} \{ c_1, c_2, c_4 \}.$$

De plus, la famille (c_1, c_2, c_4) est libre: nous avons trouvé une base de $\text{Im}(A)$. Donc $\text{Im}(A)$ est de dimension 3.

M Si A est une matrice (m, n) dont les colonnes sont c_1, \dots, c_n et que dans la forme échelonnée réduite par ligne de A , les pivots sont dans les colonnes i_1, i_2, \dots, i_r . Alors une base de $\text{Im}(A)$ est

$$B = (c_{i_1}, c_{i_2}, \dots, c_{i_r}).$$

Cette base de $\text{Im}(A)$ est constitué de colonnes de A , *non pas* des colonnes de la matrice échelonnée réduite.

E 30 Soit B la matrice

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 1 \\ 9 & -1 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

La forme échelonné réduite de B est (vérifiez!)

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & 1 & 3/2 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Remarquez encore que les colonnes de B et E satisfont les même relation de dépendance linéaire:

$$c_3 = \frac{1}{2}c_1 + \frac{3}{2}c_2, \text{ et } c_4 = \frac{1}{2}c_1 + \frac{1}{2}c_2.$$

T 31 Vérifier le calcul précédent. Justifier qu'une base de $\text{Im}(B)$ est donc $(1, 2, 9)^T, (1, 0, -1)^T$.

T 32 Si A est une matrice (m, n) , alors $\text{rg}(A) = \dim(\text{Im}(A))$.

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

3.1 Indépendance linéaire dans \mathbb{K}^n

3.2 Bases de \mathbb{K}^n

3.3 Image et noyau d'une matrice

3.4 Théorème du rang pour les matrices

3.5 Le rang des lignes est égal au rang des colonnes

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

T 33 Théorème du rang pour les matrices

Si A est une matrice (m, n) , alors

$$\text{rg}(A) + \dim(\ker A) = n.$$

- T 34** Utiliser les relations de dépendance linéaire entre les colonnes de B pour déterminer deux vecteurs du noyau de B linéairement indépendants.
Utilise le théorème du rang pour conclure qu'ils forment une base de $\ker(B)$.

1. Espaces vectoriels de dimension finie

2. Dimension et sous-espace vectoriel

3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n

3.1 Indépendance linéaire dans \mathbb{K}^n

3.2 Bases de \mathbb{K}^n

3.3 Image et noyau d'une matrice

3.4 Théorème du rang pour les matrices

3.5 Le rang des lignes est égal au rang des colonnes

4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

P 35 Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$ une matrice. Alors le rang de ses vecteurs lignes est égal au rang de ses vecteurs colonnes.

T 36 Soit $A \in \mathcal{M}_{mn}(\mathbb{K})$ une matrice. Alors

$$\operatorname{rg}(A) = \operatorname{rg}(A^T).$$

E 37 1. $\operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix} = 1.$

2. $\operatorname{rg} A = 0$ si et seulement si $A = 0_{n,p}$.

3. Pour mieux apprécier ce qu'il y a d'étonnant dans le résultat précédent, on a

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 4 & 6 \\ 3 & 1 & 5 \end{pmatrix} = 2.$$

Ainsi, il existe une relation de dépendance linéaire entre les colonnes et cela ne saute pas aux yeux!

1. Espaces vectoriels de dimension finie
2. Dimension et sous-espace vectoriel
3. Bases et dimension dans \mathbb{K}^n
4. Bases de polynômes à degrés échelonnés

T 38 et définition

L'ensemble des polynômes de degré inférieur ou égal à n , $\mathbb{K}_n[X]$, est un sous-espace vectoriel de $(\mathbb{K}[X], +, \cdot)$.

- ▶ *La famille $(1, X, \dots, X^n)$ en forme la **base canonique**.*
- ▶ *La dimension de $\mathbb{K}_n[X]$ est donc $n + 1$.*



L'ensemble des polynômes de degré exactement n n'est pas un sous-espace vectoriel de $(\mathbb{K}[X], +, \cdot)$.

D 39 Soient $n \in \mathbb{N}$. Une famille de polynômes (P_0, P_1, \dots, P_n) est dite de **degrés échelonnés** (ou **degrés étagés**) si

$$\deg(P_0) < \deg(P_1) < \dots < \deg(P_n).$$

P 40 **Famille de polynômes de degrés échelonnés**

Soient $n \in \mathbb{N}$ et (P_0, \dots, P_n) une famille de polynômes de $\mathbb{K}[X]$, non nuls et de degrés échelonnés. Alors (P_0, \dots, P_n) est une famille libre de $\mathbb{K}[X]$.

T 41 Soient $n \in \mathbb{N}$ et (P_0, P_1, \dots, P_n) une famille de polynômes telle que

$$\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket, \deg(P_k) = k.$$

Alors (P_0, P_1, \dots, P_n) est une base de $\mathbb{K}_n[X]$.

R Avec des arguments analogues, on prouve :

- Si les polynômes P_k sont non nuls et si $\deg P_0, \dots, \deg P_n$ sont deux à deux distincts, alors la famille (P_0, \dots, P_n) est libre.
- Si $\deg P_0, \dots, \deg P_n$ prennent toutes les valeurs de 0 à d , alors P_0, \dots, P_n engendrent $\mathbb{K}_d[X]$.

E 42 Soient $n \in \mathbb{N}$ et $a \in \mathbb{K}$. Alors la famille

$$(1, (X - a), (X - a)^2, \dots, (X - a)^n)$$

est une base de $\mathbb{K}_n[X]$.