

MEU152 – Algèbre linéaire

Valentin Hernandez & Nicolas Ratazzi

d'après les notes de Guy Henniart, Anne Moreau et Thierry Ramond

valentin.hernandez@universite-paris-saclay.fr

nicolas.ratazzi@universite-paris-saclay.fr



Johann Carl Friedrich Gauss, né le 30 avril 1777 à Brunswick et mort le 23 février 1855 à Göttingen, est un mathématicien, astronome et physicien allemand. Doté d'un grand génie, il apporte de très importantes contributions à ces trois sciences. Surnommé «le prince des mathématiciens», il est considéré comme l'un des plus grands mathématiciens de tous les temps.

Table des matières

Chapitre 1. Espaces vectoriels	5
1. Définitions et exemples	5
2. Sous-espaces vectoriels	7
2.1. Généralités	7
2.2. L'espace vectoriel des polynômes	8
3. Combinaisons linéaires	10
4. Familles génératrices	10
5. Familles libres	11
6. Bases d'un espace vectoriel	12
6.1. Définition, exemples	12
6.2. Dimension d'un espace vectoriel	13
6.3. Le théorème de la base incomplète	15
7. Bases et équations d'un sous-espace vectoriel	16
7.1. Comment trouver un système d'équations d'un sous-espace vectoriel donné par une famille génératrice ?	16
7.2. Comment trouver une base d'un sous-espace vectoriel donné par un système d'équations ?	17
8. Intersection et somme de sous-espaces vectoriels	18
8.1. Intersection de sous-espaces	18
8.2. Somme de sous-espaces	19
8.3. Somme directe	20
8.4. Formule de la dimension	21
8.5. Comment construire une base de l'intersection de deux sous-espaces vectoriels ?	21
Chapitre 2. Matrices	23
1. L'espace vectoriel des matrices	23
2. Produit de matrices	25
3. Opérations sur les lignes d'une matrice	27
4. Inverse d'une matrice carrée	28
4.1. Définition	28
4.2. Existence	30
4.3. Calcul pratique de l'inverse	30
5. Transposée d'une matrice	32
Chapitre 3. Applications linéaires	33
1. Généralités	33
1.1. Définition	33
1.2. Exemples	33
1.3. Somme et composition d'applications linéaires	34
2. Noyau et Image	34
2.1. Injection, surjection, bijection	34
2.2. Noyau d'une application linéaire	35
2.3. Image d'une application linéaire	36

2.4. Applications linéaires bijectives	36
2.5. Le théorème du rang	37
3. Un exemple : dérivation dans $\mathbb{R}[X]$	38
4. Matrices d'une application linéaire	39
4.1. Définition	39
4.2. Liens entre une application linéaire et sa matrice dans des bases données	41
4.3. Rang d'une application linéaire et rang de sa matrice	42
4.4. Matrice d'une bijection	42
5. Changement de base	43
5.1. Matrice de passage d'une base dans une autre	43
5.2. Matrices semblables	44
6. Projections et symétries vectorielles	45
6.1. Projections	45
6.2. Symétries	47

1. Définitions et exemples

Soit E un ensemble. On suppose que l'on sait additionner deux éléments de E , et qu'on obtient alors un élément de E . On note

$$a + b$$

la somme des éléments a et b de E . On suppose aussi que l'on sait multiplier un élément de E quelconque par un réel, et que l'on obtient ainsi un élément de E . On note $\lambda.a$ le produit du réel λ et de $a \in E$. Dans ces conditions, on dit que « $+$ » est une *loi de composition interne sur E* , et que « \cdot » est une *loi de composition externe sur $\mathbb{R} \times E$* .

EXEMPLE 1. Soit $E = \mathbb{R}$. On sait ajouter deux éléments de \mathbb{R} , et multiplier un élément de \mathbb{R} par un élément de \mathbb{R} .

EXEMPLE 2. Soit $E = \mathbb{R}^n$, c'est-à-dire l'ensemble des n -uplets (x_1, \dots, x_n) d'éléments de \mathbb{R} . Les réels x_1, \dots, x_n sont appelées les *composantes* du n -uplet (x_1, \dots, x_n) . Soient (x_1, \dots, x_n) et (y_1, \dots, y_n) deux n -uplets, et $\lambda \in \mathbb{R}$. On note

$$(x_1, \dots, x_n) + (y_1, \dots, y_n) = (x_1 + y_1, \dots, x_n + y_n),$$

le n -uplet obtenu en ajoutant les deux n -uplets composante par composante, et

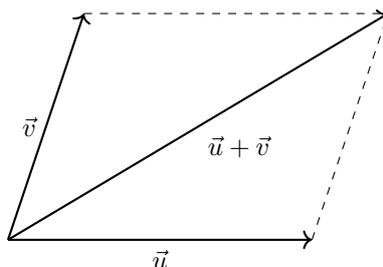
$$\lambda.(x_1, \dots, x_n) = (\lambda x_1, \dots, \lambda x_n),$$

le n -uplet obtenu en multipliant chacune des composantes par λ .

EXEMPLE 3. Soit \mathcal{V} l'ensemble des vecteurs du plan ou de l'espace. On rappelle qu'un vecteur non nul est la donnée d'une direction, d'un sens et d'une longueur. Si \vec{v} est le vecteur nul, $\lambda.\vec{v}$ est le vecteur nul pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$. Pour $\lambda \in \mathbb{R}$ et $\vec{v} \in \mathcal{V}$ non nul, le vecteur $\lambda.\vec{v}$ est le vecteur nul si $\lambda = 0$, et pour $\lambda \neq 0$ le vecteur

- de même direction que \vec{v} ,
- de même sens que \vec{v} si $\lambda > 0$ et de sens opposé si $\lambda < 0$,
- de longueur $|\lambda|$ fois la longueur de \vec{v} .

On sait aussi ajouter deux vecteurs \vec{u} et \vec{v} de \mathcal{V} : on trace un représentant de \vec{v} en partant de l'extrémité d'un représentant de \vec{u} .



EXEMPLE 4. Soit X un ensemble quelconque, et $\mathcal{F}(X, \mathbb{R})$ l'ensemble des fonctions de X dans \mathbb{R} . La somme $f + g$ de deux éléments f et g de $\mathcal{F}(X, \mathbb{R})$ est la fonction de X dans \mathbb{R} définie par

$$h: X \rightarrow \mathbb{R}, \quad x \mapsto f(x) + g(x).$$

Le produit $k = \lambda.f$ de la fonction f par un réel λ est la fonction de X dans \mathbb{R} définie par

$$k: X \rightarrow \mathbb{R}, \quad x \mapsto \lambda f(x).$$

Ces définitions sont les définitions usuelles dans le cas $X = \mathbb{R}$.

Définition 1 – espace vectoriel

Soit $(E, +, \cdot)$ un triplet constitué d'un ensemble E , d'une loi de composition interne «+» et d'une loi de composition externe «.» sur E . On dit que $(E, +, \cdot)$ est un *espace vectoriel* lorsque les lois «+» et «.» vérifient les huit propriétés suivantes :

- (1) pour tous $a, b \in E$, $a + b = b + a$,
- (2) pour tous $a, b, c \in E$, $a + (b + c) = (a + b) + c$,
- (3) il existe un élément e de E tel que pour tout $a \in E$, $a + e = e + a = a$,
- (4) pour tout $a \in E$, il existe un élément b de E tel que $a + b = b + a = e$,
 - (i) pour tout $a \in E$, $1.a = a$,
 - (ii) pour tous réels λ, μ et tout $a \in E$, $\lambda.(\mu.a) = (\lambda\mu).a$,
 - (iii) pour tous réels λ, μ et tout $a \in E$, $(\lambda + \mu).a = \lambda.a + \mu.a$,
 - (iv) pour tous $a, b \in E$ et tout réel λ , $\lambda.(a + b) = \lambda.a + \lambda.b$.

Lorsque la propriété (1) est vérifiée, on dit que la loi «+» est *commutative*. Si la propriété (2) est vérifiée, on dit que la loi «+» est *associative*.

EXERCICE DE COURS 1 (unicité de l'élément neutre et du symétrique).

1. Démontrer que l'élément e de la propriété (3) est unique. On l'appelle l'*élément neutre* pour la loi «+». On le note la plupart du temps 0_E ou simplement 0 , et on l'appelle aussi le *vecteur nul* de E .
2. Démontrer que l'élément b de la propriété (4) est lui aussi unique s'il existe. Le cas échéant, on l'appelle le *symétrique* ou l'*opposé* de a , et on le note $b = -a$.

Définition 2 – groupe commutatif

Lorsque les propriétés (1) à (4) sont vérifiées, on dit que $(E, +)$ est un *groupe commutatif*.

Lorsque la propriété (i) est vérifiée, on dit que le réel 1 est l'*élément neutre* pour la loi externe. On dit que la loi externe est *associative* lorsque (ii) est vraie. Les deux dernières propriétés (iii) et (iv) sont des propriétés de *distributivité*.

Proposition 3 – règles de calcul dans un espace vectoriel

Pour tout $x \in E$, notant 0_E l'élément neutre de l'addition dans $(E, +, \cdot)$, on a

$$0.x = 0_E \quad \text{et} \quad (-1).x = -x.$$

EXERCICE DE COURS 2 (règles de calcul dans un espace vectoriel).

1. Démontrer la proposition 3.
2. En déduire que pour tous $x, y \in E$ et tous réels λ, μ ,

$$\lambda.(x - y) = \lambda.x - \lambda.y,$$

$$(\lambda - \mu).x = \lambda.x - \mu.x,$$

$$\lambda.x = 0_E \iff \lambda = 0 \text{ ou } x = 0_E,$$

où l'on note pour $x, y \in E$, $x - y$ pour $x + (-y)$.

On retiendra donc que dans un espace vectoriel, on peut effectuer les calculs selon les mêmes règles que celles utilisées pour manipuler les vecteurs du plan ou de l'espace.

EXERCICE DE COURS 3 (exemples fondamentaux). Reprendre les exemples précédents 1–4 et démontrer que ce sont bien des espaces vectoriels. Préciser pour chacun d'entre eux l'élément neutre et le symétrique de tout élément.

L'exemple suivant généralise l'exemple 4.

EXEMPLE 5. Si F est un espace vectoriel et X un ensemble, on peut définir sur l'ensemble $\mathcal{F}(X, F)$ des fonctions de X dans F les deux opérations sommes et produit par un réel comme dans l'exemple 4 en utilisant les opérations dans F . On montre facilement, comme dans le cas de $\mathcal{F}(X, \mathbb{R})$, que $\mathcal{F}(X, F)$ muni de ces opérations est un espace vectoriel.

EXERCICE DE COURS 4. Vérifier les assertions de l'exemple précédent.

Voici un autre exemple d'espace vectoriel important.

EXEMPLE 6. Soit \mathcal{S} l'ensemble des suites de nombres réels. On définit la somme $(u_n)_{n \in \mathbb{N}} + (v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ comme étant la suite $(u_n + v_n)_{n \in \mathbb{N}}$, et le produit $\lambda \cdot (u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de la suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ par le réel λ comme étant la suite $(\lambda u_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Comme dans les exemples précédents, il est facile de voir que $(\mathcal{S}, +, \cdot)$ est un espace vectoriel en se ramenant aux propriétés de l'addition et de la multiplication dans \mathbb{R} . Son élément neutre est la suite nulle, i.e., la suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ où $u_n = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. On peut voir \mathcal{S} comme $\mathcal{F}(\mathbb{N}, \mathbb{R})$.

REMARQUE 1. 1. Un point de vocabulaire : en toute rigueur, il est abusif de dire ou d'écrire que E est un espace vectoriel ; c'est le triplet $(E, +, \cdot)$ qui est un espace vectoriel, E désignant seulement l'ensemble sous-jacent. Cependant, on s'autorisera bien souvent cet abus de langage, surtout dans les exercices.

2. Dans la définition 1, les éléments λ, μ qui opèrent dans E pour la loi externe sont des réels. On dit parfois que $(E, +, \cdot)$ est un *espace vectoriel réel*, ou encore que $(E, +, \cdot)$ est un *\mathbb{R} -espace vectoriel*. On définit de la même manière un *espace vectoriel complexe*, ou *\mathbb{C} -espace vectoriel*, $(E, +, \cdot)$ en remplaçant dans la définition 1 «réel» par «complexe».

EXEMPLE 7. L'ensemble \mathbb{C}^n des n -uplets (x_1, \dots, x_n) de nombres complexes muni des lois «+» et «.» définies comme pour \mathbb{R}^n forme un \mathbb{C} -espace vectoriel.

2. Sous-espaces vectoriels

2.1. Généralités.

Définition 4 – sous-espace vectoriel

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel, et F une partie de E . On dit que F est un *sous-espace vectoriel* de E lorsque les trois propriétés suivantes sont vérifiées :

1. le vecteur nul 0_E de E appartient à F ,
2. pour tous éléments a et b de F , $a + b$ est aussi un élément de F ,
3. pour tout réel λ et tout élément a de F , $\lambda \cdot a$ est aussi un élément de F .

EXEMPLE 8. Dans $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ il n'y a pas beaucoup de sous-espaces vectoriels. Soit en effet F un sous-espace vectoriel de \mathbb{R} . Si F contient un élément non nul a , alors pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$, on sait que λa appartient à F . Comme n'importe quel élément x de \mathbb{R} peut s'écrire λa (prendre $\lambda = x/a$), on voit que F contient \mathbb{R} tout entier, donc $F = \mathbb{R}$.

D'autre part le singleton $(F = \{0\}, +, \cdot)$ est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R} (les propriétés de la définition 4 sont faciles à vérifier). En conclusion, les seuls sous-espaces vectoriels de \mathbb{R} sont $\{0\}$ et \mathbb{R} .

EXERCICE DE COURS 5. Vérifier que l'ensemble $F = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x + y = 0\}$ est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^2 .

⚠ Attention, l'ensemble $G = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x + y = 1\}$ n'est pas un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^2 .

Il «ressemble» toutefois à un sous-espace vectoriel. En effet, le point $A = (1, 0)$ appartient à G , et l'ensemble

$$F = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : A + (x, y) \in G\}$$

est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^2 .

EXERCICE DE COURS 6.

1. Représenter F et G sur une même figure et vérifier les assertions précédentes. Dans ces conditions, on dit que $G = A + F$ est un *espace affine de direction* F .
2. Donner d'autres exemples de sous-espaces vectoriels de \mathbb{R}^2 , et d'autres exemples de sous-ensembles de \mathbb{R}^2 qui ne sont pas des sous-espaces vectoriels de \mathbb{R}^2 .

EXEMPLE 9. L'ensemble $\mathcal{C}^0(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ des fonctions continues de \mathbb{R} dans \mathbb{R} est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})$.

EXEMPLE 10. L'ensemble \mathcal{S}_0 des suites de nombres réels qui convergent est un sous-espace vectoriel de \mathcal{S} . En revanche, l'ensemble \mathcal{S}_∞ des suites de nombres réels qui divergent n'est pas un sous-espace vectoriel de \mathcal{S} .

EXERCICE DE COURS 7. Vérifier les assertions des exemples précédents.

REMARQUE 2 (sous-espaces vectoriels triviaux). L'ensemble $F = \{0_E\}$ est toujours un sous-espace vectoriel de n'importe quel espace vectoriel E . En effet $0_E + 0_E = 0_E \in E$ et $\lambda \cdot 0_E = 0_E \in E$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$. On parle du *sous-espace vectoriel nul*. L'ensemble E est lui aussi toujours un sous-espace vectoriel de E .

Proposition 5 – structure de l'ensemble des solutions d'un système linéaire homogène

Soient $n, p \in \mathbb{N}$. L'ensemble des solutions d'un système linéaire homogène (de n équations) à p inconnues est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^p .

EXERCICE DE COURS 8. Démontrer la proposition précédente.

L'intérêt principal de la notion de sous-espace vectoriel réside dans la proposition suivante.

Proposition 6 – un sous-espace vectoriel est un espace vectoriel

Si F est un sous-espace vectoriel d'un espace vectoriel $(E, +, \cdot)$, alors «+» est une loi interne sur F et « \cdot » est une loi externe sur F . De plus $(F, +, \cdot)$ est un espace vectoriel.

EXERCICE DE COURS 9. Démontrer la proposition précédente.

REMARQUE 3. En pratique, pour démontrer qu'un ensemble muni de deux lois est un espace vectoriel, on a toujours intérêt à démontrer que c'est un sous-espace vectoriel d'un espace vectoriel connu qui le contient. Il n'y a alors que trois propriétés à démontrer, au lieu des huit propriétés de la définition 1.

2.2. L'espace vectoriel des polynômes. On rappelle qu'une *fonction polynomiale*, ou *fonction polynôme*, est une fonction de la forme

$$\begin{aligned} f: \mathbb{R} &\longrightarrow \mathbb{R} \\ x &\longmapsto a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n, \end{aligned}$$

où $n \in \mathbb{N}$ est un entier naturel et les coefficients a_0, \dots, a_n sont des réels éventuellement nuls.

Pour $k \in \mathbb{N}$, on note X^k la fonction polynomiale qui à x associe x^k . Pour $k = 0$, X^k est donc la fonction constante égale à 1 que l'on note simplement 1 (on adopte la convention $X^0 = 1$). Ainsi, par définition, une fonction polynomiale est une *combinaison linéaire* des X^k (voir la définition 9) : une fonction polynôme est

une fonction de \mathbb{R} dans \mathbb{R} telle qu'il existe $n \in \mathbb{N}$ et $a_0, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ tels que $f = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n$. Une telle combinaison linéaire $a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n$ est également appelée un *polynôme*. On note $\mathbb{R}[X]$ l'ensemble des polynômes (à coefficients réels).

REMARQUE 4. On précise polynômes à *coefficients réel* pour signifier que les $a_i \in \mathbb{R}$, ce qui semble redondant vu notre définition de polynôme. Il existe en fait une définition plus générale des polynômes où l'on autorise $a_i \in \mathbb{C}$ ou même $a_i \in \mathbb{Q}$, mais dans ce cas on ne parle plus de *fonction polynomiale*. La distinction entre *polynôme* et *fonction polynomiale* sera faite dans les cours d'algèbres au cours des années suivantes. Pour ce cours, on confondra les deux notions de sorte que $\mathbb{R}[X]$ est l'ensemble des fonctions polynomiales et l'on ne traitera pas le cas de coefficients plus généraux.

Définition 7 – degré et coefficient dominant d'un polynôme

Soit $P = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n \in \mathbb{R}[X]$ un polynôme non nul. On appelle *degré* de P , et on note $\deg P$, le maximum des $i \in \{0, \dots, n\}$ tels que $a_i \neq 0$. Le coefficient $a_{\deg P}$ est appelé le *coefficient dominant* de P .

Par convention, le degré du polynôme nul (où tous les a_i sont nuls) est $-\infty$.

Par exemple, le degré des fonctions polynomiales $x \mapsto 3x + 2$, $x \mapsto -x^2$, $x \mapsto -x^2 + 0 \times x^3$ est 1, 2, 2 respectivement. Le coefficient dominant des fonctions polynomiales $x \mapsto 3x + 2$, $x \mapsto -x^2$, $x \mapsto -x^2 + 0 \times x^3$ est 3, -1, et -1 respectivement.

EXERCICE DE COURS 10. Montrer que l'ensemble $\mathbb{R}[X]$ des polynômes à coefficients réels est un espace vectoriel. Préciser la loi interne «+» et la loi externe «.» ainsi que l'élément neutre.

Indication : identifier $\mathbb{R}[X]$ à un sous-espace vectoriel de l'espace vectoriel $\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ des fonctions de \mathbb{R} dans \mathbb{R} .

Proposition 8 – le degré de la somme de deux polynômes est inférieur au maximum des degrés

Pour tous $P, Q \in \mathbb{R}[X]$,

$$\deg(P + Q) \leq \max(\deg(P), \deg(Q)).$$

De plus, si $\deg(P) \neq \deg(Q)$ alors $\deg(P + Q) = \max(\deg(P), \deg(Q))$.

EXERCICE DE COURS 11. Démontrer la proposition.

⚠ Il se peut que $\deg(P + Q) < \max(\deg P, \deg Q)$ lorsque P et Q sont de même degré. Par exemple, si $P = X^2 + X$ et $Q = -X^2$, alors $\deg(P + Q) = \deg(X) = 1 < \max(\deg P, \deg Q) = 2$.

On peut aussi multiplier deux polynômes. Plus généralement, si $f, g \in \mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ sont deux fonctions de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , la fonction $h = f \times g$ de \mathbb{R} dans \mathbb{R} est définie par : $h(x) = f(x)g(x)$ pour tout $x \in \mathbb{R}$.

EXERCICE DE COURS 12 (produit de deux polynômes).

1. Montrer que le produit de deux polynômes est encore un polynôme. Précisément, si $P = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n$ et $Q = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \dots + b_mX^m$, où $m, n \in \mathbb{N}$, $a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m \in \mathbb{R}$ sont deux polynômes, exprimer les coefficients du polynôme PQ en fonction des a_i et des b_j .

2. Que vaut $\deg(PQ)$?

⚠ Nous avons vu au cours de l'exercice précédent qu'il existe dans l'espace vectoriel $\mathbb{R}[X]$ des polynômes une autre loi interne, la multiplication entre polynômes (en plus de la loi interne «+»). Ceci est très spécifique à cet espace vectoriel : en général, on ne peut pas multiplier deux éléments d'un même espace vectoriel !

REMARQUE 5. Un espace vectoriel $(E, +, \cdot)$ muni d'une (autre) loi interne, $E \times E \rightarrow E$, $(x, y) \mapsto x \times y$, notée « \times » et appelée la *multiplication*, telle que la multiplication soit distributive par rapport à l'addition

et compatible avec la loi externe « \cdot » est appelé une *algèbre*. Nous rencontrerons d'autres exemples d'algèbres dans ce cours : l'espace vectoriel $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ des matrices carrées réelles d'ordre n muni de la multiplication des matrices, et l'espace vectoriel $\mathcal{L}(E)$ des endomorphismes d'un espace vectoriel E muni de la composition des endomorphismes (voir le paragraphe 2.1).

3. Combinaisons linéaires

Nous allons généraliser la notion de combinaison linéaire vue à propos des polynômes à n'importe quel espace vectoriel.

Définition 9 – combinaison linéaire

Soient u_1, u_2, \dots, u_n des vecteurs d'un espace vectoriel $(E, +, \cdot)$. On dit que $v \in E$ est une *combinaison* linéaire de u_1, u_2, \dots, u_n lorsqu'il existe des réels $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ tels que

$$\begin{aligned} v &= \lambda_1 u_1 + \lambda_2 u_2 + \dots + \lambda_n u_n \\ &= \sum_{j=1}^n \lambda_j u_j. \end{aligned}$$

Avec cette nouvelle terminologie, on a une version plus courte de la définition d'un sous-espace vectoriel :

Proposition 10 – sous-espace vectoriel et stabilité par combinaisons linéaires

Soit $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel. Une partie F de E est un sous-espace vectoriel de E si et seulement si F contient 0_E et F est stable par combinaison linéaire, c'est-à-dire :

$$\forall u, v \in F, \forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}, \quad \lambda u + \mu v \in F.$$

EXEMPLE 11. Dans \mathbb{R}^3 , le vecteur $u = (3, 3, 1)$ est-il combinaison linéaire de $v_1 = (1, 1, 0)$ et $v_2 = (1, 1, 1)$? Il s'agit de savoir s'il existe deux réels λ_1 et λ_2 tels que $\lambda_1 \cdot (1, 1, 0) + \lambda_2 \cdot (1, 1, 1) = (3, 3, 1)$. On est donc amené à résoudre le système

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 3, \\ \lambda_1 + \lambda_2 = 3, \\ \lambda_2 = 1. \end{cases}$$

Ce système a une (unique) solution $(\lambda_1, \lambda_2) = (2, 1)$, donc $u = 2v_1 + v_2$ est bien combinaison linéaire de v_1 et v_2 .

EXERCICE DE COURS 13. À quelle condition le vecteur $w = (a, b, c)$ est-il une combinaison linéaire de $u = (1, 2, -1)$ et $v = (6, 4, 2)$?

4. Familles génératrices

On commence par un point de vocabulaire : une famille d'éléments d'un ensemble E est une liste, finie ou non, d'éléments de E . Puisque des éléments de la liste peuvent être égaux, on ne doit pas confondre cette notion de famille avec celle de sous-ensemble de E . On note

$$\mathcal{F} = (u_1, u_2, \dots, u_n),$$

entre parenthèses, la famille constituée des éléments u_1, u_2, \dots, u_n . Dans le cadre des espaces vectoriels, on prendra garde à ne pas confondre une famille de n vecteurs avec un élément de \mathbb{R}^n même si la notation est similaire.

Proposition 11 – les combinaisons linéaires de vecteurs donnés forment un sous-espace vectoriel

Soient u_1, u_2, \dots, u_n des vecteurs d'un espace vectoriel $(E, +, \cdot)$. L'ensemble de toutes les combinaisons linéaires de u_1, u_2, \dots, u_n est un sous-espace vectoriel de E . On le note $\text{Vect}(u_1, u_2, \dots, u_n)$ et on l'appelle le *sous-espace vectoriel engendré par la famille* (u_1, u_2, \dots, u_n) .

EXERCICE DE COURS 14. Démontrer la proposition précédente.

REMARQUE 6. Le sous-espace vectoriel $\text{Vect}(u_1, u_2, \dots, u_n)$ est le plus petit (pour l'inclusion) des sous-espaces vectoriels de E qui contient u_1, \dots, u_n . En effet si F est un tel sous-espace vectoriel de E , comme il est stable par combinaison linéaire, il contient toutes les combinaisons linéaires de u_1, \dots, u_n , donc $\text{Vect}(u_1, u_2, \dots, u_n)$.

Définition 12 – famille génératrice

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel et G un sous-espace vectoriel de E . Soient u_1, \dots, u_n des vecteurs de G . On dit que la famille de vecteurs (u_1, u_2, \dots, u_n) engendre G , ou encore est une famille génératrice de G , lorsque $G = \text{Vect}(u_1, u_2, \dots, u_n)$.

EXEMPLE 12. Soient $n \in \mathbb{N}$ et $\mathbb{R}_n[X]$ l'ensemble des polynômes à coefficients réels de degré inférieur ou égal à n . Nous avons vu lors de l'exercice 10 que $\mathbb{R}[X]$ était un sous-espace vectoriel de $\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})$. L'ensemble $\mathbb{R}_n[X]$ est lui aussi un sous-espace vectoriel de $\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ (et de $\mathbb{R}[X]$). En effet la fonction nulle est par convention un polynôme de degré $-\infty$, donc (par abus de langage) inférieur ou égal à n , et une combinaison linéaire de polynômes de degré inférieur ou égal à n est bien un polynôme de degré inférieur ou égal à n (voir la proposition 8). Autrement dit, $\mathbb{R}_n[X]$ est le sous-espace vectoriel de $\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ engendré par la famille $(1, X, \dots, X^n)$:

$$\mathbb{R}_n[X] = \text{Vect}(1, X, \dots, X^n).$$

EXERCICE DE COURS 15.

1. La famille $((1, 1, 2), (-1, 0, 1), (2, 1/3, -1))$ engendre-t-elle \mathbb{R}^3 ?
2. Trouver une équation cartésienne de $F = \text{Vect}((1, 1, 2), (-1, 0, 1), (2, 1/3, -1))$.

5. Familles libres

Définition 13 – famille libre

On dit que la famille (u_1, u_2, \dots, u_n) de vecteurs d'un espace vectoriel $(E, +, \cdot)$ est libre lorsque :

$$\lambda_1 u_1 + \lambda_2 u_2 + \dots + \lambda_n u_n = 0_E \implies \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = 0.$$

Lorsqu'une famille de vecteurs d'un espace vectoriel $(E, +, \cdot)$ n'est pas libre, on dit qu'elle est liée.

EXERCICE DE COURS 16. Dans $\mathbb{R}_n[X]$, montrer que la famille $(1, X, \dots, X^n)$ est libre.

EXERCICE DE COURS 17 (famille de polynômes non nuls de degrés deux à deux distincts). Montrer qu'une famille de polynômes non nuls de degrés deux à deux distincts est libre.

⚠ la réciproque de l'exercice précédent est fautive. Des polynômes peuvent parfaitement former une famille libre sans être de degrés deux à deux distincts ; ils peuvent même former une famille libre tout en étant tous de même degré, comme par exemple dans le cas de la famille $(X^n, X^n + 1, X^n + X, X^n + X^2, \dots, X^n + X^{n-1})$ de $\mathbb{R}_n[X]$.

EXEMPLE 13. Dans l'espace vectoriel \mathcal{F} des fonctions de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , on considère la famille (\cos, \sin) constituée des deux fonctions trigonométriques cosinus et sinus bien connues, et on se demande si elle est libre. On suppose donc que pour deux réels λ_1, λ_2 , on a

$$(1) \quad \lambda_1 \cdot \cos + \lambda_2 \cdot \sin = 0 (= 0_{\mathcal{F}}).$$

⚠ Cette égalité est une égalité dans \mathcal{F} , autrement dit entre fonctions ; en particulier le «0» qui figure dans le membre de droite est la fonction nulle, pas le nombre 0.

L'équation (1) signifie :

$$\forall x \in \mathbb{R}, \quad \lambda_1 \cos(x) + \lambda_2 \sin(x) = 0.$$

En particulier en prenant $x = 0$, on trouve $\lambda_1 = 0$, et pour $x = \pi/2$, on trouve $\lambda_2 = 0$. Donc la famille (\cos, \sin) est libre dans \mathcal{F} .

EXERCICE DE COURS 18. Soit $a \in \mathbb{R}$. Dans \mathbb{R}^3 , montrer que famille $((1, 1, 2), (-1, 0, 1), (2, a, -1))$ est libre si et seulement si $a \neq 1/3$.

REMARQUE 7. Il est important de noter que pour déterminer si une famille est génératrice, on s'est posé la question de *l'existence de solutions* pour un système linéaire, tandis que pour savoir si une famille est libre, il s'est agi de savoir si un système linéaire admet une *unique solution* ou bien plusieurs.

6. Bases d'un espace vectoriel

6.1. Définition, exemples.

Définition 14 – base

On dit que la famille finie $\mathcal{B} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ de vecteurs d'un espace vectoriel $(E, +, \cdot)$ est une *base* de E lorsque \mathcal{B} est libre et génératrice.

EXEMPLE 14. Dans \mathbb{R}^n on note $e_1 = (1, 0, \dots, 0)$, $e_2 = (0, 1, 0, \dots, 0)$, ..., $e_n = (0, \dots, 0, 1)$. La famille (e_1, \dots, e_n) est une base, qu'on appelle la *base canonique* de \mathbb{R}^n . Prouvons en effet que cette famille est génératrice. Soit (x_1, x_2, \dots, x_n) un vecteur de \mathbb{R}^n . On cherche $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ dans \mathbb{R} tels que

$$\lambda_1 \cdot e_1 + \dots + \lambda_n \cdot e_n = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Puisque $\lambda_1 \cdot e_1 + \dots + \lambda_n \cdot e_n = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$, il suffit de prendre $\lambda_j = x_j$ pour tout $j \in \{1, \dots, n\}$. On montre maintenant que (e_1, \dots, e_n) est une famille libre. Supposons que

$$\lambda_1 \cdot e_1 + \dots + \lambda_n \cdot e_n = 0_{\mathbb{R}^n} = (0, \dots, 0).$$

Encore une fois puisque $\lambda_1 \cdot e_1 + \dots + \lambda_n \cdot e_n = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$, cette égalité entraîne $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$.

EXEMPLE 15. Dans $\mathbb{R}_n[X]$, on a déjà vu que la famille $(1, X, \dots, X^n)$ est génératrice (c'est la définition de $\mathbb{R}_n[X]$), et libre. C'est donc une base de $\mathbb{R}_n[X]$, appelée elle aussi la *base canonique*, de $\mathbb{R}_n[X]$ cette fois.

Proposition 15 – coordonnées dans une base

Soit $\mathcal{B} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ une base de l'espace vectoriel $(E, +, \cdot)$. Pour chaque $x \in E$, il existe un unique n -uplet $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ tel que

$$x = \sum_{j=1}^n x_j u_j.$$

On note alors

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}_{\mathcal{B}}, \text{ ou } x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix},$$

s'il n'y a pas d'ambiguïté, et l'on dit que x_1, x_2, \dots, x_n sont les *coordonnées* de x dans la base \mathcal{B} .

EXERCICE DE COURS 19. Démontrer cette proposition.

Dans le cas de l'espace vectoriel \mathbb{R}^n , les coordonnées du n -uplet $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ dans la base canonique $\mathcal{E} = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ sont

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}_{\mathcal{E}},$$

puisque l'on voit facilement que $x = x_1e_1 + x_2e_2 + \dots + x_n e_n$.

⚠ Il est important de bien distinguer les composantes x_1, x_2, \dots, x_n du n -uplet $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ de \mathbb{R}^n et ses coordonnées dans une base donnée.

Par exemple, dans \mathbb{R}^2 , on dispose de la base canonique $\mathcal{E} = (e_1, e_2)$ avec $e_1 = (1, 0)$ et $e_2 = (0, 1)$, mais aussi de la base $\mathcal{B} = (u_1, u_2)$ avec $u_1 = (1, 1)$ et $u_2 = (1, -1)$. Pour le vecteur $x = (2, 3)$, on a

$$x = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}_{\mathcal{E}} = \begin{pmatrix} \frac{5}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix}_{\mathcal{B}},$$

puisque $x = 2e_1 + 3e_2 = \frac{5}{2}u_1 - \frac{1}{2}u_2$.

EXERCICE DE COURS 20. Donner les coordonnées du polynôme $P(X) = 2X^2 - 3X + 1$ dans la base canonique de $\mathbb{R}_2[X]$, puis dans la base $\mathcal{B} = (Q_1, Q_2, Q_3)$ avec $Q_1(X) = X + 1$, $Q_2(X) = X^2$ et $Q_3(X) = X - 1$.

EXERCICE DE COURS 21. Donner les coordonnées des vecteurs de la base canonique \mathcal{E} de \mathbb{R}^n dans la base \mathcal{B} . Si \mathcal{B} est une base quelconque, quelles sont les coordonnées des vecteurs de \mathcal{B} dans \mathcal{B} ?

6.2. Dimension d'un espace vectoriel. On commence par un résultat dont la preuve est un peu longue, mais qui a de nombreuses conséquences importantes.

Proposition 16 – lien entre le nombre d'éléments d'une famille libre et d'une famille génératrice

Soit $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel. On suppose que E admet

- une famille génératrice (u_1, u_2, \dots, u_n) ,
- une famille libre (v_1, v_2, \dots, v_p) .

Alors nécessairement $p \leq n$. De plus, si $p = n$, alors (u_1, u_2, \dots, u_n) et (v_1, v_2, \dots, v_p) sont des bases de E .

On donne un Lemme, utile en soit, qui nous aidera à démontrer la proposition 16.

Lemme 17

Soit E un espace vectoriel et v_1, \dots, v_n une famille libre de E , et $v \in E$. Alors, $v \notin \text{Vect}(v_1, \dots, v_n)$, si, et seulement si, (v_1, \dots, v_n, v) est une famille libre de E .

EXERCICE DE COURS 22. Démontrer la proposition 16 :

1. On veut d'abord montrer le résultat suivant : (P_n) : "Dans un espace vectoriel E engendré par n vecteurs, toute famille de $p > n$ vecteurs est liée." Justifier qu'il suffit de démontrer P_n pour $p = n + 1$.
2. Démontrer (P_n) par récurrence sur n .
3. Conclure que $p \leq n$ dans la situation de la proposition 16.
4. Démontrer le lemme 17.
5. Démontrer la fin de la proposition 16.

EXERCICE DE COURS 23. Le but de cet exercice est de donner une autre preuve de la proposition 16, qui utilise plutôt les résultats sur les systèmes linéaires.

1. Soit $v \in \text{Vect}(v_1, v_2, \dots, v_p)$.

1.1 Montrer qu'il existe un unique p -uplet $(\lambda_1, \dots, \lambda_p)$ de \mathbb{R}^p tel que

$$(2) \quad \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 + \dots + \lambda_p v_p = v.$$

1.2 Montrer qu'il existe des réels $a_{i,j}$, $i \in \{1, \dots, p\}$, $j \in \{1, \dots, n\}$, et des réels x_1, \dots, x_n tels que

$$\begin{cases} v_1 &= a_{1,1}u_1 + a_{1,2}u_2 + \dots + a_{1,n}u_n, \\ v_2 &= a_{2,1}u_1 + a_{2,2}u_2 + \dots + a_{2,n}u_n, \\ &\vdots \\ v_p &= a_{p,1}u_1 + a_{p,2}u_2 + \dots + a_{p,n}u_n, \end{cases}$$

et $v = x_1u_1 + x_2u_2 + \dots + x_nu_n$.

1.3 Remarquer que si le système

$$(3) \quad \begin{cases} a_{1,1}\lambda_1 + a_{2,1}\lambda_2 + \dots + a_{p,1}\lambda_p &= x_1, \\ a_{1,2}\lambda_1 + a_{2,2}\lambda_2 + \dots + a_{p,2}\lambda_p &= x_2, \\ &\vdots \\ a_{1,n}\lambda_1 + a_{2,n}\lambda_2 + \dots + a_{p,n}\lambda_p &= x_n, \end{cases}$$

admet une solution $(\lambda_1, \dots, \lambda_p)$, c'est aussi une solution de l'équation (2). En déduire que le rang de ce système est p puis que $p \leq n$.

2. Si $p = n$, déduire des questions précédentes que (v_1, v_2, \dots, v_p) est une famille génératrice, donc une base, et que (u_1, u_2, \dots, u_n) est une famille libre, donc une base.

Proposition 18 – toutes les bases ont le même nombre d'éléments

Si E admet une base, alors toutes les bases de E ont le même nombre d'éléments.

EXERCICE DE COURS 24. Démontrer la proposition à l'aide de la proposition 16.

Définition 19 – dimension

Soit $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel non nul. S'il existe une base de E , on appelle *dimension* de E , et on note $\dim E$, le nombre commun d'éléments de toutes les bases de E . Dans ce cas, on dit que E est de *dimension finie*. Sinon on dit que E est de *dimension infinie*, et on note $\dim E = +\infty$.

REMARQUE 8. L'espace vectoriel $E = \{0_E\}$ n'admet pas de famille libre puisque toute famille de E contient 0_E . Par convention, on dit pourtant que E a pour dimension 0.

Par analogie avec la situation dans $E = \mathbb{R}^3$, les sous-espaces vectoriels de dimension 1 sont appelés «droites», et les sous-espaces vectoriels de dimension 2 sont appelés «plans». Les sous-espaces vectoriels de dimension $n - 1$ d'un espace de dimension n sont appelés *hyperplans*.

EXERCICE DE COURS 25. Soit $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel non nul. Montrer que les droites de E sont les sous-espaces vectoriels de la forme $\text{Vect}(u)$ où u est un vecteur non nul de E .

EXERCICE DE COURS 26. Montrer que $\mathbb{R}_n[X]$ est de dimension finie. Quelle est sa dimension?



Il existe des espaces vectoriels qui ne sont pas de dimension finie.

Par exemple l'espace $\mathbb{R}[X]$ des polynômes à coefficients réels. Supposons en effet qu'il existe une base $\mathcal{B} = (P_1, P_2, \dots, P_k)$ de $\mathbb{R}[X]$, et notons n le maximum des degrés des polynômes de \mathcal{B} . Puisque $X^{n+1} \in \mathbb{R}[X]$, il existe des réels $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ tel que

$$X^{n+1} = \lambda_1 P_1 + \lambda_2 P_2 + \dots + \lambda_k P_k.$$

Mais le polynôme du membre de droite est de degré inférieur ou égal à n , alors que celui du membre de gauche est de degré $n + 1$, ce qui est absurde. On a donc

$$\dim \mathbb{R}[X] = +\infty.$$

Voici une autre conséquence importante de la proposition 16.

Proposition 20 – inclusion et dimension

Soient E un espace vectoriel de dimension finie, et V un sous-espace vectoriels de E . Alors V est de dimension finie et $\dim V \leq \dim E$. De plus $V = E$ si et seulement si $\dim V = \dim E$.

EXERCICE DE COURS 27. Le but de l'exercice est de démontrer la proposition 20.

1. Démontrer qu'un sous-espace vectoriel V d'un espace E de dimension finie est de dimension finie.

Indication : remarquer que si $V \neq \{0_E\}$, V admet des familles libres, et considérer une famille libre avec un nombre maximal d'éléments.

2. Montrer que $\dim V \leq \dim E$.

Indication : si $V \neq \{0_E\}$, construire par récurrence une famille libre d'éléments v_1, \dots, v_p de V tels que $\text{Vect}(v_1, \dots, v_p) = V$.

3. Montrer que si $\dim V = \dim E$, alors $V = E$. Conclure.

6.3. Le théorème de la base incomplète. On montre maintenant deux résultats importants pour les espaces vectoriels de dimension finie. D'une part, on peut toujours extraire une base d'une famille génératrice, et d'autre part, on peut toujours compléter une famille libre de manière à obtenir une base. C'est cette deuxième propriété qui porte le nom de «théorème de la base incomplète».

On commence par un exercice.

EXERCICE DE COURS 28. Soient $v_1 = (1, 2, 3, 0)$, $v_2 = (0, 2, 2, 4)$ et $v_3 = (-1, a, 2a - 3, 4a)$ trois vecteurs de \mathbb{R}^4 , et $F = \text{Vect}(v_1, v_2, v_3)$. Par définition, la famille (v_1, v_2, v_3) est une famille génératrice de F . On veut trouver une base de F .

1. Montrer que (v_1, v_2, v_3) est une base de F si et seulement si $a \neq 2$.
2. Si $a = 2$, montrer que (v_1, v_2) est une base de F .

Dans l'exercice précédent, on a obtenu une base à partir d'un système générateur, en gardant les vecteurs correspondants aux inconnues principales. C'est un fait général :

Proposition 21 – de toute famille génératrice on peut extraire une base

Soient V un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^n , et $\mathcal{F} = (v_1, \dots, v_p)$ une famille génératrice de V qui n'est pas une base de V . On peut extraire de \mathcal{F} une base de V : il suffit d'échelonner le système correspondant à l'équation

$$(4) \quad \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_p v_p = 0,$$

d'inconnues $\lambda_1, \dots, \lambda_p$. Les vecteurs v_{j_1}, \dots, v_{j_r} correspondant aux inconnues principales constituent alors une base de V . En particulier la dimension de V est égale au rang r du système.

On veut maintenant compléter une famille libre en une base. Le procédé vu ci-dessus permet de prouver le résultat suivant, très important :

Théorème 22 – théorème de la base incomplète

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel de dimension finie et \mathcal{B} une base de E . Toute famille libre de E qui n'est pas une base peut être complétée en une base de E en lui adjoignant des vecteurs de \mathcal{B} .

EXERCICE DE COURS 29. Démontrer le théorème de la base incomplète. Voici une indication : on note $n = \dim E = |\mathcal{B}|$. On note $k = |\mathcal{F}|$, le nombre de vecteurs dans \mathcal{F} , et $r = n - k$.

1. Montrer que si $r = 0$ le résultat est vrai.

où r est le rang du système, et les x'_j des combinaisons linéaires des x_j , et k est une bijection de $\{1, \dots, p\}$ dans lui-même. Notons d'ailleurs $b_{i,j}$, pour $i \in \{r+1, r+2, \dots, n\}$, les réels tels que

$$x'_i = \sum_{j=1}^n b_{i,j} x_j.$$

Les $b_{i,j}$ sont parfaitement déterminés et ne dépendent que des $a_{i,j}$. On a déjà vu que le système ci-dessus admet des solutions si et seulement si les $n - r$ dernières lignes, qui s'écrivent

$$\begin{cases} b_{r+1,1}x_1 + b_{r+1,2}x_2 + \dots + b_{r+1,n}x_n = 0, \\ b_{r+2,1}x_1 + b_{r+2,2}x_2 + \dots + b_{r+2,n}x_n = 0, \\ \vdots \\ b_{n,1}x_1 + b_{n,2}x_2 + \dots + b_{n,n}x_n = 0, \end{cases}$$

sont vraies. Autrement dit, $x = (x_1, \dots, x_n)$ appartient à V si et seulement si (x_1, \dots, x_n) est une solution du système homogène ci-dessus, qui est donc ce que l'on cherche.

On peut remarquer que, compte tenu de la proposition 21 ou comme on le verra dans la proposition 24, la dimension de V est $r = n - (n - r)$, le rang du système initial, qui d'ailleurs est inférieur ou égal à n comme il se doit pour un sous-espace vectoriel de E .

EXERCICE DE COURS 33. On reprend l'exercice 28. Soit $a \in \mathbb{R}$. On considère $v_1 = (1, 2, 3, 0)$, $v_2 = (0, 2, 2, 4)$ et $v_3 = (-1, a, 2a - 3, 4a)$, trois vecteurs de \mathbb{R}^4 , et $V = \text{Vect}(v_1, v_2, v_3)$. Trouver un système d'équations pour V .

7.2. Comment trouver une base d'un sous-espace vectoriel donné par un système d'équations ? On sait que l'ensemble des solutions d'un système homogène de n équations à p inconnues est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^p . On se pose la question d'en trouver une base, et, ainsi, de déterminer sa dimension.

EXEMPLE 16. Soit $V = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3, 2x_1 + 3x_2 = 0, x_1 + x_2 + x_3 = 0\}$. L'ensemble V est l'ensemble des solutions du système

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 = 0, \\ x_1 + x_2 + x_3 = 0. \end{cases}$$

On l'échelonne avec la méthode du pivot. On obtient ($L_2 \leftarrow L_2 - \frac{1}{2}L_1$) le système équivalent

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 = 0, \\ -\frac{1}{2}x_2 + x_3 = 0. \end{cases}$$

Les inconnues principales sont x_1 et x_2 . On peut les exprimer en fonction de l'inconnue secondaire x_3 en écrivant le système sous forme échelonnée réduite ($L_1 \leftarrow L_1 + 6L_2, L_1 \leftarrow \frac{1}{2}L_1, L_2 \leftarrow -2L_2$) :

$$\begin{cases} x_1 + 3x_3 = 0, \\ x_2 - 2x_3 = 0. \end{cases}$$

Le système est de rang 2, ses inconnues principales sont x_1 et x_2 , et la seule inconnue secondaire est x_3 . Les solutions s'obtiennent en donnant une valeur quelconque à x_3 , disons s_3 . En fonction de cette valeur, les solutions s'écrivent

$$(x_1, x_2, x_3) = (-3s_3, 2s_3, s_3) = s_3(-3, 2, 1).$$

Autrement dit $V = \text{Vect}((-3, 2, 1))$, et V est de dimension 1 = $p - r$ où $p = 3$ est le nombre d'inconnues et $r = 2$ le rang du système.

EXEMPLE 17. Soit $V \subset \mathbb{R}^5$ le sous-espace vectoriel des solutions du système

$$\begin{cases} x_2 - x_4 - x_5 = 0, \\ x_3 - 2x_4 + x_5 = 0. \end{cases}$$

Ce système étant déjà sous forme échelonnée réduite, on voit que son rang est $r = 2$, que ses inconnues principales sont x_2 et x_3 et que ses inconnues secondaires sont x_1, x_4 et x_5 . Les solutions s'obtiennent en donnant des valeurs quelconques à x_1, x_4 et x_5 , disons s_1, s_4 et s_5 respectivement. En fonction de ces valeurs, les solutions s'écrivent

$$\begin{aligned} (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) &= (s_1, s_4 + s_5, 2s_4 - s_5, s_4, s_5) \\ &= s_1(1, 0, 0, 0, 0) + s_4(0, 1, 2, 1, 0) + s_5(0, 1, -1, 0, 1). \end{aligned}$$

Autrement dit, les vecteurs $v_1 = (1, 0, 0, 0, 0)$, $v_4 = (0, 1, 2, 1, 0)$ et $v_5 = (0, 1, -1, 0, 1)$ forment une base de V , qui est de dimension 3 = $p - r$, où $p = 5$ est le nombre d'inconnues du système et $r = 2$ son rang.

Tout cela est complètement général :

Proposition 24 – obtention d’une base de l’ensemble des solutions d’un système homogène

Soit V un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^p donné comme l’ensemble des solutions d’un système homogène à p inconnues. Pour trouver une base de V , il suffit d’écrire le système sous forme échelonnée réduite. En particulier, la dimension de V est $p - r$, où r est le rang du système.

La table 2 fournit un récapitulatif des différents savoir-faire vus dans les sections 6 et 7.

	Données	Problème	Méthode
1	Famille génératrice (u_1, \dots, u_n)	Extraire une base de $\text{Vect}(u_1, \dots, u_n)$	Échelonner le système correspondant à $\lambda_1 u_1 + \dots + \lambda_n u_n = 0$. Identifier les inconnues principales.
2	Famille génératrice (u_1, \dots, u_n)	Trouver un système d’équations pour $\text{Vect}(u_1, \dots, u_n)$	Échelonner le système correspondant à $\lambda_1 u_1 + \dots + \lambda_n u_n = v$. Trouver les conditions de compatibilité.
3	Système homogène	Trouver une base de l’espace des solutions	Échelonner et réduire le système. Identifier les inconnues secondaires.
4	Famille libre \mathcal{F} et base \mathcal{B}	Compléter \mathcal{F} avec des vecteurs de \mathcal{B} pour obtenir une base	Appliquer le (1) à la famille génératrice $\mathcal{F} \cup \mathcal{B}$.

TABLE 2. Savoir-faire

8. Intersection et somme de sous-espaces vectoriels

Pour fixer les idées, on rappelle quelques définitions.

Définition 25 – réunion et intersection de deux parties

Soient A et B deux parties d’un ensemble E .

— L’intersection de A et B est la partie $A \cap B$ de E définie par

$$A \cap B = \{x \in E : x \in A \text{ et } x \in B\}.$$

— La réunion de A et B est la partie $A \cup B$ de E définie par

$$A \cup B = \{x \in E : x \in A \text{ ou } x \in B\}.$$

8.1. Intersection de sous-espaces. On sait que l’ensemble des solutions d’un système linéaire homogène à p inconnues est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^p . Cela vaut quel que soit le nombre d’équations : en particulier l’ensemble des solutions d’une seule équation linéaire homogène à p inconnues est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^p . La résolution d’un système de plusieurs équations consiste donc à trouver l’intersection des espaces vectoriels définis par chacune de ces équations.

Dans le cas de \mathbb{R}^p , on a donc pratiquement déjà prouvé la proposition suivante.

Proposition 26 – l’intersection de deux sous-espaces vectoriels est un sous-espace vectoriel

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel, et V, W deux sous-espaces vectoriels de E . Leur intersection de $V \cap W$ est un sous-espace vectoriel de E .

EXERCICE DE COURS 34. Démontrer la proposition de façon «directe». Donner une interprétation géométrique de ce résultat dans \mathbb{R}^3 .

Il n’est pas plus difficile de montrer qu’une intersection quelconque de sous-espaces vectoriels est encore un sous-espace vectoriel.

EXERCICE DE COURS 35 (une caractérisation du sous-espace vectoriel engendré par une famille finie). Soient $(E, +, \cdot)$ un sous-espace vectoriel, n un entier naturel non nul et (u_1, u_2, \dots, u_n) une famille de vecteurs de E . Montrer que le sous-espace vectoriel $\text{Vect}(u_1, u_2, \dots, u_n)$ est l'intersection de tous les sous-espaces vectoriels de E contenant u_1, u_2, \dots, u_n . On retrouve ainsi que $\text{Vect}(u_1, u_2, \dots, u_n)$ est le plus petit (pour l'inclusion) des sous-espaces vectoriels de E qui contient u_1, \dots, u_n (voir la remarque 6).

Proposition 27 – majoration de la dimension de l'intersection de deux sous-espaces vectoriels

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel de dimension finie, et V, W deux sous-espaces vectoriels de E . On a

$$\dim(V \cap W) \leq \min(\dim V, \dim W).$$

De plus s'il y a égalité, c'est que l'un des sous-espaces V ou W est inclus dans l'autre.

EXERCICE DE COURS 36. Démontrer la proposition à l'aide de la proposition 20.

8.2. Somme de sous-espaces.

⚠ La réunion de deux sous-espaces vectoriels n'est en général pas un sous-espace vectoriel.

Par exemple si D_1 et D_2 sont deux droites distinctes de l'espace des vecteurs du plan, u_1 un vecteur non nul de D_1 et u_2 un vecteur non nul de D_2 , le vecteur $u_1 + u_2$ n'est pas dans $D_1 \cup D_2$: cet ensemble n'est donc pas stable pour l'addition (voir la figure 1).

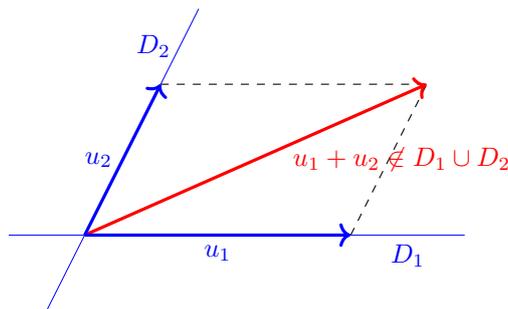


FIGURE 1. La réunion de deux droites vectorielles n'est pas stable pour l'addition en général

On définit maintenant le plus petit sous-espace vectoriel qui contient la réunion de deux sous-espaces vectoriels donnés.

Définition 28 – somme de deux sous-espaces vectoriels

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel, et V, W deux sous-espaces vectoriels de E . On appelle somme de V et W , et on note $V + W$ le sous-ensemble de E défini par

$$V + W = \{x + y : x \in V, y \in W\}.$$

Proposition 29 – la somme de deux sous-espaces vectoriels est un sous-espace vectoriel

Si V et W sont deux sous-espaces vectoriels de E , alors $V + W$ est aussi un sous-espace vectoriel de E . De plus, si F est un sous-espace vectoriel qui contient V et W , alors F contient $V + W$.

EXERCICE DE COURS 37. Démontrer cette proposition.

EXEMPLE 18. Dans $E = \mathbb{R}^3$, on note $a = (0, 1, 2)$, $b = (1, 0, 1)$ et $c = (1, 1, 1)$. Soient aussi $V = \text{Vect}(a, b)$ et $W = \text{Vect}(c)$. L'espace vectoriel $V + W$ est constitué des vecteurs v qui s'écrivent

$$v = (\lambda a + \mu b) + \nu c = \lambda a + \mu b + \nu c.$$

Donc $V + W$ est engendré par la famille (a, b, c) . D'ailleurs puisque cette famille est libre, $V + W = \mathbb{R}^3$: l'espace \mathbb{R}^3 s'écrit comme somme du plan V et de la droite W .

Proposition 30 – majoration de la dimension de la somme de deux sous-espaces vectoriels

Si $V = \text{Vect}(v_1, v_2, \dots, v_k)$ et $W = \text{Vect}(w_1, w_2, \dots, w_\ell)$, alors $V + W = \text{Vect}(v_1, v_2, \dots, v_k, w_1, w_2, \dots, w_\ell)$. En particulier, $\dim(V + W) \leq \dim V + \dim W$.

EXERCICE DE COURS 38. Notons $Y = \text{Vect}(v_1, v_2, \dots, v_k, w_1, w_2, \dots, w_\ell)$.

1. À l'aide de la proposition 29, montrer l'inclusion $V + W \subset Y$.
2. Montrer l'inclusion $Y \subset V + W$.
3. Démontrer la proposition 30.

Puisque $(v_1, \dots, v_k, w_1, \dots, w_\ell)$ est un système générateur de $V + W$, la proposition 21, permet de déterminer une base de $V + W$ (et sa dimension) :

Proposition 31 – construction d'une base de la somme de deux sous-espaces vectoriels

Soient (v_1, \dots, v_k) une base du sous-espace vectoriel V , et (w_1, \dots, w_ℓ) une base du sous-espace vectoriel W . Les vecteurs correspondant aux inconnues principales du système

$$x_1 v_1 + x_2 v_2 + \dots + x_k v_k + y_1 w_1 + \dots + y_\ell w_\ell = 0_E,$$

forment une base de $V + W$.

8.3. Somme directe.

Proposition 32 – notion de composante lorsque cela a un sens

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel, et V, W deux sous-espaces vectoriels de E . Tout vecteur y de $V + W$ s'écrit de manière unique $y = v + w$ avec $v \in V$ et $w \in W$ si et seulement si $V \cap W = \{0_E\}$. Dans ce cas, on dit que v est la *composante de y dans V* et w la *composante de y dans W* .

EXERCICE DE COURS 39. Démontrer la proposition.

Définition 33 – somme directe

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel de dimension finie, et V, W deux sous-espaces vectoriels de E .

1. On dit que V et W sont en *somme directe* lorsque $V \cap W = \{0_E\}$. Dans ce cas on note $F = V \oplus W$ le sous-espace vectoriel $F = V + W$.
2. Si de plus $V \oplus W = E$, on dit que V et W sont *supplémentaires dans E* .

Le critère suivant sera très utile lorsque nous parlerons de *projections* (voir par exemple la section 6.1).

Proposition 34 – caractérisation pour que deux sous-espaces vectoriels soient en somme directe

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel de dimension finie, et V, W deux sous-espaces vectoriels de E . Soit (v_1, v_2, \dots, v_p) une base de V et (w_1, w_2, \dots, w_q) une base de W .

1. V et W sont en somme directe si et seulement si $(v_1, v_2, \dots, v_p, w_1, w_2, \dots, w_q)$ est une famille libre.
2. V et W sont supplémentaires dans E si et seulement si $(v_1, v_2, \dots, v_p, w_1, w_2, \dots, w_q)$ est une base de E .

EXERCICE DE COURS 40. Démontrer cette proposition.

8.4. Formule de la dimension. La proposition suivante est parfois connue sous le nom de *formule de Grassmann*.

Hermann Günther Grassmann (1809-1877) est un mathématicien et indianiste allemand. Polymathe, il était connu de ses contemporains en tant que linguiste. Physicien, néo-humaniste, érudit mais aussi éditeur, Hermann Grassmann est avec Niels Abel, Évariste Galois et Georg Cantor l'un des grands mathématiciens « malheureux » du XIX^e siècle. Il est considéré aujourd'hui comme le fondateur du calcul tensoriel et de la théorie des espaces vectoriels.



Proposition 35 – formule de la dimension ou formule de Grassmann

Soient $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel de dimension finie, et V, W deux sous-espaces vectoriels de E . On a toujours

$$\dim(V + W) = \dim V + \dim W - \dim V \cap W.$$

EXERCICE DE COURS 41. Démontrer cette proposition.

8.5. Comment construire une base de l'intersection de deux sous-espaces vectoriels ? La preuve ci-dessus donne en fait un renseignement plus précis que la proposition : elle donne un procédé de construction d'une base de $V + W$. On peut même en extraire un procédé de construction d'une base de $V \cap W$ connaissant une base de V et une base de W , ce que nous faisons maintenant.

Soient $\mathcal{B}_V = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ une base de V , et $\mathcal{B}_W = (w_1, w_2, \dots, w_\ell)$ une base de W . Un vecteur $x \in E$ appartient à $V \cap W$ si et seulement s'il appartient à V et à W , c'est-à-dire si et seulement s'il existe des réels $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \tilde{\mu}_1, \tilde{\mu}_2, \dots, \tilde{\mu}_\ell$ tels que

$$x = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k \quad \text{et} \quad x = \tilde{\mu}_1 w_1 + \dots + \tilde{\mu}_\ell w_\ell.$$

Autrement dit, $x \in V \cap W$ si et seulement s'il existe des réels $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_\ell$ tels que (on notera que l'on a remplacé les $\tilde{\mu}_j$ par $\mu_j = -\tilde{\mu}_j$),

$$x = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k \quad \text{et} \quad \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k + \mu_1 w_1 + \dots + \mu_\ell w_\ell = 0.$$

Soit alors (S) le système linéaire homogène associé à cette deuxième équation, dont les inconnues sont les λ_j et les μ_j . On notera qu'il s'agit du même système que celui qui permet de trouver une base de $V + W$ (cf. la proposition 31).

On écrit (S) sous forme échelonnée réduite à l'aide de la méthode de Gauss, et l'on note e_1, \dots, e_r les vecteurs correspondant aux inconnues principales π_1, \dots, π_r , et e_{r+1}, \dots, e_{r+q} les vecteurs correspondants aux inconnues secondaires $\sigma_{r+1}, \dots, \sigma_{r+q}$ de (S). Il est important de remarquer que

- On a $r + q = k + \ell$, ou encore $q = k + \ell - r$.
- Pour $j \in \{1, \dots, k\}$, $e_j = v_j$. En effet, si l'on s'arrête aux k premières colonnes, les vecteurs correspondant aux inconnues principales donnent une base de V extraite de \mathcal{B}_V , qui ne peut donc être que \mathcal{B}_V .

- Pour $j \in \{k+1, \dots, k+\ell\}$, les e_j sont donc des vecteurs de \mathcal{B}_W , rangés dans un ordre différent : ceux qui correspondent aux inconnues principales d'abord, pour $j \in \{k+1, \dots, r\}$, puis ceux qui correspondent aux inconnues secondaires pour $j \in \{r+1, \dots, k+\ell\}$.

En particulier, si $(\pi_1, \dots, \pi_r, \sigma_{r+1}, \dots, \sigma_{r+q})$ est une solution de (S), il lui correspond l'élément $x \in V \cap W$ donné par

$$x = \sum_{j=1}^k \pi_j e_j = - \sum_{j=k+1}^r \pi_j e_j - \sum_{j=r+1}^{r+q} \sigma_j e_j.$$

On sait que l'on obtient une solution de (S), donc un élément de $V \cap W$, à chaque fois que l'on fixe la valeur des inconnues secondaires $\sigma_{r+1}, \dots, \sigma_{r+q}$. On note donc x_1, x_2, \dots, x_q les éléments de $V \cap W$ qu'on obtient en prenant successivement

$$\begin{aligned} (\sigma_{r+1}, \dots, \sigma_{r+q}) &= (1, 0, 0, \dots, 0), \\ (\sigma_{r+1}, \dots, \sigma_{r+q}) &= (0, 1, 0, \dots, 0), \\ &\vdots \\ (\sigma_{r+1}, \dots, \sigma_{r+q}) &= (0, 0, \dots, 0, 1). \end{aligned}$$

Johann Carl Friedrich Gauss, né le 30 avril 1777 à Brunswick et mort le 23 février 1855 à Göttingen, est un mathématicien, astronome et physicien allemand. Doté d'un grand génie, il a apporté de très importantes contributions à ces trois sciences. Surnommé «le prince des mathématiciens», il est considéré comme l'un des plus grands mathématiciens de tous les temps.



Proposition 36

La famille $\mathcal{F} = \{x_1, \dots, x_q\}$ ainsi construite est une base de $V \cap W$.

EXERCICE DE COURS 42. On considère les deux sous-espaces vectoriels V et W de \mathbb{R}^4 définis par

$$V = \text{Vect}((1, 0, 1, 1), (5, -1, 6, 1)) \text{ et } W = \text{Vect}((1, 1, 2, 0), (1, 2, 2, 0), (3, 1, 6, 0)).$$

Donner une base de V , de W , puis une base de $V + W$ et une base de $V \cap W$.

Ce chapitre est pour l'essentiel un chapitre de révisions sur les matrices vues au premier semestre.

1. L'espace vectoriel des matrices

Définition 37 – matrice

Rappelons qu'une *matrice* à n lignes et p colonnes est un tableau de nombres de la forme

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,p} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,p} \end{pmatrix}.$$

Les nombres $a_{i,j}$ sont appelés *coefficients* de la matrice A , et on note souvent

$$A = (a_{i,j})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq p},$$

ou même $A = (a_{i,j})$ quand il n'y a pas de confusion possible. Les nombres n et p (dans cet ordre) sont appelés dimensions de la matrice.

On note $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ l'ensemble des matrices à n lignes et p colonnes de nombres réels. Si les dimensions d'une matrice sont égales, i.e., s'il y a autant de lignes que de colonnes, on dit que la matrice est *carrée*, et on dit que la matrice est *d'ordre* n . On note simplement $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ l'ensemble des matrices à n lignes et n colonnes.

EXEMPLE 19. 1. On appelle matrice nulle la matrice dont tous les coefficients sont nuls :

$$0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

2. La matrice d'un système linéaire à n équations et p inconnues

$$\begin{cases} a_{1,1}X_1 + a_{1,2}X_2 + \dots + a_{1,p}X_p = b_1, \\ a_{2,1}X_1 + a_{2,2}X_2 + \dots + a_{2,p}X_p = b_2, \\ \vdots \\ a_{n,1}X_1 + a_{n,2}X_2 + \dots + a_{n,p}X_p = b_n, \end{cases}$$

est le tableau à n lignes et p colonnes dont les coefficients sont les $a_{i,j}$:

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,p} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,p} \end{pmatrix}.$$

La matrice complète du système est la matrice à n lignes et $p + 1$ colonnes définie par

$$\left(\begin{array}{cccc|c} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,p} & b_1 \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,p} & b_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,p} & b_p \end{array} \right).$$

On notera la présence de la barre verticale pour séparer les seconds membres du reste de la matrice.

3. On appelle *matrice élémentaire* toute matrice dont tous les coefficients sont nuls sauf l'un d'entre eux qui vaut 1. On note

$$E_{i,j} = \left(\begin{array}{cccc} & & \vdots & \\ & & \vdots & \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ & & \vdots & \end{array} \right)$$

la matrice élémentaire dont l'élément non nul est sur la ligne i et la colonne j .

4. Lorsqu'une matrice n'a qu'une ligne, on parle de matrice-ligne. Lorsqu'elle n'a qu'une colonne, on parle de matrice-colonne. Par exemple on identifie souvent un vecteur v de \mathbb{R}^n avec la matrice colonne de ses coordonnées dans la base canonique (e_1, e_2, \dots, e_n) de \mathbb{R}^n : si $v = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, on a $v = x_1e_1 + x_2e_2 + \dots + x_n e_n$ et on écrit (voir la proposition 15)

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

Définition 38 – somme de deux matrices

Soient $A = (a_{i,j})$ et $B = (b_{i,j})$ deux matrices de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$. On note $C = A + B$ la matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ définie par $C = (a_{i,j} + b_{i,j})$. Plus explicitement

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,p} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,p} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n,1} & b_{n,2} & \dots & b_{n,p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1} + b_{1,1} & a_{1,2} + b_{1,2} & \dots & a_{1,p} + b_{1,p} \\ a_{2,1} + b_{2,1} & a_{2,2} + b_{2,2} & \dots & a_{2,p} + b_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} + b_{n,1} & a_{n,2} + b_{n,2} & \dots & a_{n,p} + b_{n,p} \end{pmatrix}.$$

On a ainsi défini une loi de composition interne «+» sur l'ensemble $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$. Comme il s'agit d'ajouter les coefficients terme à terme (donc de faire des additions de nombres réels), il est très facile de vérifier que cette loi «+» vérifie les quatre premières propriétés de la définition 1. En particulier l'élément neutre pour l'addition des matrices est la matrice nulle, et la matrice symétrique d'une matrice $A = (a_{i,j})$ est la matrice, notée $-A$, définie par

$$-A = \begin{pmatrix} -a_{1,1} & -a_{1,2} & \dots & -a_{1,p} \\ -a_{2,1} & -a_{2,2} & \dots & -a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -a_{n,1} & -a_{n,2} & \dots & -a_{n,p} \end{pmatrix}.$$

Pour résumer :

Proposition 39

$(\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R}), +)$ est un groupe commutatif.

On définit maintenant une loi de composition externe « \cdot » sur l'ensemble $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$.

Définition 40 – loi externe sur l'ensemble des matrices

Soit $A = (a_{i,j})$ une matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ et λ un réel. On note $C = \lambda.A$ la matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ définie par $C = (\lambda a_{i,j})$. Plus explicitement

$$\lambda \cdot \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,p} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda a_{1,1} & \lambda a_{1,2} & \dots & \lambda a_{1,p} \\ \lambda a_{2,1} & \lambda a_{2,2} & \dots & \lambda a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda a_{n,1} & \lambda a_{n,2} & \dots & \lambda a_{n,p} \end{pmatrix}.$$

Comme il s'agit de multiplier chaque coefficient par λ , il est également facile de vérifier que cette loi « \cdot » vérifie les 4 dernières propriétés de la définition 1.

Proposition 41 – l'ensemble des matrices est un espace vectoriel de dimension finie

$(\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R}), +)$ est un espace vectoriel, de dimension np .

EXERCICE DE COURS 43. Démontrer la proposition.

REMARQUE 9. On notera que la famille $(E_{1,1}, E_{1,2}, \dots, E_{n,p-1}, E_{n,p})$ n'est pas indexée par une partie de \mathbb{N} mais par une partie de $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$. Ce n'est qu'une façon de l'écrire : l'énumération $(E_{1,1}, E_{1,2}, \dots, E_{n,p-1}, E_{n,p}) = (\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \dots, \tilde{E}_{np})$ fournit une nouvelle numérotation de la famille pour des indices entre 1 et np . De manière générale n'importe quel ensemble fini peut servir à énumérer une base.

2. Produit de matrices

On rappelle maintenant comment est défini le produit de deux matrices. Il est naturel de penser multiplier terme à terme les coefficients de chacune, mais cette multiplication-là ne sert à rien (ou disons que c'est une autre histoire). Ce que l'on veut, c'est retrouver le membre de gauche des équations du système

$$\begin{cases} a_{1,1}X_1 + a_{1,2}X_2 + \dots + a_{1,p}X_p = b_1, \\ a_{2,1}X_1 + a_{2,2}X_2 + \dots + a_{2,p}X_p = b_2, \\ \vdots \\ a_{n,1}X_1 + a_{n,2}X_2 + \dots + a_{n,p}X_p = b_n, \end{cases}$$

en multipliant sa matrice par la matrice colonne des symboles X_1, X_2, \dots, X_p . Autrement dit, on veut que

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,p} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,p} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1}X_1 + a_{1,2}X_2 + \dots + a_{1,p}X_p \\ a_{2,1}X_1 + a_{2,2}X_2 + \dots + a_{2,p}X_p \\ \vdots \\ a_{n,1}X_1 + a_{n,2}X_2 + \dots + a_{n,p}X_p \end{pmatrix},$$

et c'est cela que l'on prend comme définition du produit d'une matrice par une matrice-colonne. Il est essentiel de noter que le nombre de lignes de la matrice colonne doit être égal au nombre de colonnes de la matrice.

On étend ensuite cette définition au cas du produit d'une matrice A par une matrice B quelconque (pourvu que le nombre de colonnes de A soit égal au nombre de lignes de B), en construisant la matrice dont la j -ième colonne est le produit de A par la j -ième colonne de B . Le produit de deux matrices se fait donc «*ligne par colonne*».

EXEMPLE 20. Soit $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$ et $B = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$. Le produit $A \times B$ est bien défini puisque A a trois colonnes et B trois lignes. Comme A a deux lignes et B a 2 colonnes, le produit $A \times B$ sera une matrice à 2 lignes et 2 colonnes.

Le produit de A par la première colonne de B est

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1*1 + 2*0 + 3*2 \\ 0*1 + (-1)*0 + 1*2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Celui de A par la seconde colonne de B est

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1*(-1) + 2*1 + 3*3 \\ 0*(-1) + (-1)*1 + 1*3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

On obtient donc

$$A \times B = \begin{pmatrix} 7 & 10 \\ 2 & 2 \end{pmatrix}.$$

On peut formaliser cette définition.

Définition 42 – produit de deux matrices

Soient $A = (a_{i,j})$ une matrice à n lignes et p colonnes, et $B = (b_{i,j})$ une matrice à p lignes et m colonnes. On note $C = A \times B$ la matrice à n lignes et m colonnes dont les coefficients $c_{i,j}$ sont donnés par

$$c_{i,j} = \sum_{k=1}^p a_{i,k} b_{k,j} = a_{i,1} b_{1,j} + a_{i,2} b_{2,j} + \dots + a_{i,p} b_{p,j}.$$

! Le produit de deux matrices n'est pas commutatif. Autrement dit, en général $A \times B \neq B \times A$.

Par exemple

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

D'ailleurs l'un des produits peut être bien défini alors que l'autre ne l'est pas en fonction des dimensions de A et de B .

Dans la pratique, il est commode pour calculer le produit $C = A \times B$ de deux matrices de disposer les calculs de la manière suivante

$$\begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} b_{1,1} & \dots & b_{1,j} & \dots & b_{1,m} \\ b_{2,1} & \dots & b_{2,j} & \dots & b_{2,m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{p,1} & \dots & b_{p,j} & \dots & b_{p,m} \end{pmatrix} & \\ \hline \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \dots & a_{i,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,p} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \vdots \\ \dots & \sum_{k=1}^p a_{i,k} b_{k,j} & \dots \\ \vdots \end{pmatrix} \end{array}$$

Proposition 43 – associativité du produit de deux matrices

Le produit des matrices est associatif : si $A \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$, $B \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ et $C \in \mathcal{M}_{p,q}(\mathbb{R})$, on a

$$A \times (B \times C) = (A \times B) \times C.$$

Proposition 44 – distributivité du produit matriciel par rapport à l'addition

Le produit des matrices est distributif par rapport à l'addition, à gauche et à droite : si $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$, $B \in \mathcal{M}_{p,m}(\mathbb{R})$ et $C \in \mathcal{M}_{p,m}(\mathbb{R})$, on a

$$A \times (B + C) = A \times B + A \times C,$$

et, si $B \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$, $C \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ et $A \in \mathcal{M}_{p,m}(\mathbb{R})$,

$$(B + C) \times A = B \times A + C \times A.$$

EXERCICE DE COURS 44. Montrer que pour $\lambda \in \mathbb{R}$, $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ et $B \in \mathcal{M}_{p,q}(\mathbb{R})$ on a

$$(\lambda A) \times B = \lambda(A \times B) = A \times (\lambda B).$$

Dans les espaces de matrices carrées $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, la multiplication est une loi interne. Ce n'est bien sûr pas le cas dans $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ quand $n \neq p$: la multiplication de deux éléments n'est alors même pas définie. Dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, la multiplication a un élément neutre :

Proposition 45 – existence d'un élément neutre pour le produit matriciel

Soit $I \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ la matrice dont les éléments sont tous nuls, sauf ceux qui se trouvent sur la diagonale qui valent 1 :

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Pour toute matrice $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, on a

$$A \times I = I \times A = A.$$

Cette matrice I , qu'on note aussi I_n pour faire référence à sa taille, est appelée *matrice identité*. On se rappelle qu'il ne peut y avoir qu'un seul élément neutre pour une loi interne (voir l'exercice 1).

Définition 46 – puissance d'une matrice carrée

Soient $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ une matrice carrée, et $k \in \mathbb{N}^*$. On note A^k , et on lit A puissance k , la matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ définie par

$$A^k = \underbrace{A \times A \times \dots \times A}_{k \text{ facteurs}}.$$

On note aussi $A^0 = I$.

EXERCICE DE COURS 45. Soit $E_{k,\ell}$ une matrice élémentaire. Montrer que $(E_{k,\ell})^2 = 0$ si $k \neq \ell$, et que $(E_{k,k})^2 = E_{k,k}$.

3. Opérations sur les lignes d'une matrice

Pour résoudre les systèmes linéaires, on a été amené à utiliser trois opérations sur leurs lignes. Ces opérations n'affectent pas les inconnues, ni ne changent leur ordre, et on peut très bien effectuer ces opérations sur la matrice (complète si le système n'est pas homogène) associée au système. Il se trouve que l'on peut interpréter ces opérations sur les lignes d'une matrice comme un produit par une matrice particulière.

Proposition 47 – action de la multiplication à gauche par une matrice élémentaire

Soit $A = (a_{i,j})$ une matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$, et $E_{k,\ell} = (e_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ la matrice élémentaire dont le seul élément non nul est $e_{k,\ell} = 1$. On a

$$E_{k,\ell} \times A = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \\ a_{\ell,1} & \dots & a_{\ell,p} \\ 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \leftarrow \text{ligne } k.$$

Ainsi, multiplier une matrice A par $E_{k,\ell}$ permet d'extraire la ℓ -ième ligne de A et de la placer sur la ligne k .

Proposition 48 – opérations élémentaires et multiplications par une matrice élémentaire

Soit $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$.

- Effectuer l'opération $L_i \leftarrow L_i + \alpha L_j$ sur la matrice A , avec $i \neq j$, revient à multiplier A à gauche par $I_n + \alpha E_{i,j} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.
- L'opération $L_i \leftarrow \alpha L_i$ correspond à multiplier A à gauche par $I_n + (\alpha - 1)E_{i,i} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

L'opération d'échange de deux lignes d'une matrice A peut aussi s'interpréter comme la multiplication par une matrice. Pour $i, j \in \{1, \dots, n\}$, on note $\tilde{E}_{i,j} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ la matrice définie par

$$\tilde{E}_{i,j} = I_n - E_{i,i} - E_{j,j} + E_{i,j} + E_{j,i}.$$

Il s'agit simplement de la matrice I_n dont on a déplacé les «1» qui se trouvaient à la i -ième et j -ième place sur la diagonale ($-E_{i,i} - E_{j,j}$), en les portant aux places (i, j) et (j, i) respectivement ($+E_{i,j} + E_{j,i}$).

Proposition 49 – échange entre deux lignes

Soit $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$. La matrice $\tilde{A} = \tilde{E}_{i,j} \times A$ est la matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ obtenue en échangeant les lignes i et j de la matrice A .

REMARQUE 10. La proposition est en particulier valable pour $A = I_n$. Or dans ce cas

$$\tilde{A} = \tilde{E}_{i,j} \times I_n = \tilde{E}_{i,j}.$$

On en déduit que $\tilde{E}_{i,j}$ est tout simplement la matrice obtenue en échangeant les lignes i et j de la matrice identité.

REMARQUE 11. Pour opérer sur les colonnes, on multiplie à droite par une matrice d'opération élémentaire. Autrement dit, pour opérer sur les colonnes, il suffit donc de remplacer dans la proposition 48, «ligne» par «colonne» et «gauche» par «droite». Par exemple,

$$\tilde{A} = A \times \tilde{E}_{i,j}$$

est la matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ obtenue en échangeant les colonnes i et j de la matrice A .

4. Inverse d'une matrice carrée

4.1. Définition. On se pose maintenant la question de l'existence pour une matrice $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ donnée, d'un symétrique pour la loi \times .

4.2. Existence. Une manière de voir ce problème est de considérer le système linéaire $A \times X = B$ associé à la matrice A avec un second membre $B \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ quelconque, c'est-à-dire l'équation d'inconnue X qui s'écrit

$$A \times X = B.$$

S'il existe Q telle que $Q \times A = I$, cette équation entraîne

$$X = (Q \times A) \times X = Q \times (A \times X) = Q \times B,$$

donc la seule solution possible est $X = Q \times B$. Si on a aussi $A \times Q = I$, alors

$$A \times (Q \times B) = (A \times Q) \times B = B,$$

ce qui prouve que $X = Q \times B$ est bien une solution du système.

Autrement dit : si A est inversible, pour tout second membre $B \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ le système de n équations à n inconnues $A \times X = B$ a une unique solution.

Examinons la réciproque : supposons que pour tout second membre $B \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ le système $A \times X = B$ a une unique solution. C'est en particulier le cas si B est (le vecteur colonne associé à) l'un des vecteurs e_j de la base canonique de \mathbb{R}^n , c'est à dire l'un des vecteurs

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, B_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

On note Q_1, Q_2, \dots, Q_n la solution correspondante du système, c'est-à-dire l'unique vecteur tel que

$$A \times Q_j = B_j,$$

et Q la matrice dont les colonnes sont Q_1, Q_2, \dots, Q_n . Par définition du produit de A par Q , on a

$$A \times Q = I,$$

donc Q est inverse à droite de A .

D'autre part, puisque le système $A \times X = B$ a une unique solution pour n'importe quel second membre B , toutes ses inconnues sont principales, donc sa forme échelonnée réduite est

$$I \times X = C.$$

On passe du système $A \times X = B$ à sa forme échelonnée réduite en effectuant des opérations du type $L_i \leftrightarrow L_j$, $L_i \leftarrow L_i + \alpha L_j$ ou $L_i \leftarrow \alpha L_i$, c'est-à-dire compte tenu des propositions 48 et 49, en multipliant A à gauche par des matrices de la forme $\tilde{E}_{i,j}$ ou $(I + \beta E_{i,j})$ avec $\beta = \alpha$ ou $\beta = \alpha - 1$. Notant R le produit de toutes ces matrices, on a,

$$R \times A = I,$$

donc R est un inverse à gauche de A . On a démontré que si pour tout second membre $B \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ le système $A \times X = B$ a une unique solution, alors A est inversible. En résumé, on a obtenu la proposition suivante.

Proposition 53 – conditions équivalentes pour qu'une matrice carrée soit inversible

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Les conditions suivantes sont équivalentes :

1. La matrice A est inversible.
2. Le système $A \times X = B$ a une unique solution pour tout second membre $B \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$.
3. La matrice de la forme échelonnée réduite du système est la matrice identité I .

4.3. Calcul pratique de l'inverse. La discussion qui précède donne deux procédés pour calculer l'inverse d'une matrice inversible $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$:

- Par résolution de n systèmes linéaires $A \times X = B_j$, $j = 1, \dots, n$, où les B_j sont les n vecteurs de la base canonique de \mathbb{R}^n .
- Par transformation du système en sa forme échelonnée réduite à l'aide de la méthode du pivot, qu'on a réinterprété comme la multiplication de A par des matrices inversibles de la forme $\tilde{E}_{i,j}$ ou $I + \beta E_{i,j}$.

En fait ces deux procédés conduisent exactement aux mêmes calculs. Commençons par le second : si l'on effectue les mêmes substitutions de lignes sur la matrice identité que celle que l'on fait sur A pour l'amener à sa forme échelonnée réduite, on multiplie la matrice identité par A^{-1} , et donc on récupère l'inverse A^{-1} de A .

Voici un exemple d'un tel calcul. On place à droite de A la matrice identité, et on effectue sur les lignes de la grande matrice obtenue toutes les opérations nécessaires pour obtenir sa forme échelonnée réduite. Si cette forme est la matrice identité, c'est que A est inversible et dans ce cas, la matrice de droite est A^{-1} .

EXEMPLE 22. Pour savoir si la matrice $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \end{pmatrix}$ est inversible et calculer son inverse éventuel, on écrit

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right),$$

et on effectue successivement les opérations $L_3 \leftarrow L_3 - \frac{1}{2}L_1$

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 3/2 & -1/2 & -1/2 & 0 & 1 \end{array} \right),$$

$L_3 \leftarrow L_3 - \frac{3}{2}L_2$

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -1/2 & -3/2 & 1 \end{array} \right),$$

$L_3 \leftarrow -\frac{1}{2}L_3$

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1/4 & 3/4 & -1/2 \end{array} \right),$$

$L_2 \leftarrow L_2 - L_3$

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1/4 & 1/4 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1 & 1/4 & 3/4 & -1/2 \end{array} \right),$$

$L_1 \leftarrow L_1 + L_3$

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 1 & 0 & 5/4 & 3/4 & -1/2 \\ 0 & 1 & 0 & -1/4 & 1/4 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1 & 1/4 & 3/4 & -1/2 \end{array} \right),$$

$L_1 \leftarrow L_1 - L_2$

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & 3/2 & 1/2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1/4 & 1/4 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1 & 1/4 & 3/4 & -1/2 \end{array} \right),$$

et enfin $L_1 \leftarrow \frac{1}{2}L_1$, ce qui donne

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 3/4 & 1/4 & -1/2 \\ 0 & 1 & 0 & -1/4 & 1/4 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1 & 1/4 & 3/4 & -1/2 \end{array} \right).$$

On en conclut que A est inversible, d'inverse $A^{-1} = \begin{pmatrix} 3/4 & 1/4 & -1/2 \\ -1/4 & 1/4 & 1/2 \\ 1/4 & 3/4 & -1/2 \end{pmatrix}$.

Le lien avec la résolution des n systèmes linéaires est clair si l'on remarque que les colonnes de la matrice identité sont les B_j . Les substitutions de lignes ci-dessus sont exactement les opérations nécessaires à la résolution par la méthode du pivot d'un système $A \times X = B$ pour un second membre quelconque. Effectuer ces opérations sur chacune des colonnes de la matrice identité, c'est en fait résoudre simultanément les n systèmes $A \times X = B_j$.

5. Transposée d'une matrice

Définition 54 – transposée d'une matrice carrée

Soit $A = (a_{i,j})$ une matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$. On appelle *transposée* de A , et on note A^T la matrice de $\mathcal{M}_{p,n}(\mathbb{R})$ définie par

$$A^T = (t_{i,j}) \text{ avec } t_{i,j} = a_{j,i} \text{ pour tous } i \in \{1, \dots, p\}, j \in \{1, \dots, n\}.$$

De manière un peu imprécise, on peut dire que A^T s'obtient à partir de A en échangeant les coefficients de A par symétrie par rapport à sa diagonale. De la définition il vient immédiatement que la transposée de la transposée d'une matrice est la matrice elle-même :

$$(5) \quad (A^T)^T = A.$$

REMARQUE 12. On trouve parfois la notation tA pour désigner A^T .

EXEMPLE 23. Soit $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}$. On a $A^T = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 5 \\ 3 & 6 \end{pmatrix}$.

EXERCICE DE COURS 47.

1. Soit $E_{k,\ell}$ une matrice élémentaire de $\mathcal{M}_{n,n}$. Vérifier que l'on a :

$$(E_{k,\ell})^T = E_{\ell,k}.$$

2. Vérifier que la transposée de la somme de deux matrices et la somme des transposées, et que pour $\lambda \in \mathbb{R}$ et $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$,

$$(\lambda.A)^T = \lambda.A^T.$$

Autrement dit, l'application de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ dans $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ qui à une matrice A associe sa transposée A^T est un endomorphisme de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$.

La transposée d'un produit de matrices est le produit des transposées, dans l'ordre inverse. Plus précisément :

Proposition 55 – transposée d'un produit de matrices

Soient $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ et $B \in \mathcal{M}_{p,m}(\mathbb{R})$, de sorte que $A \times B \in \mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{R})$ est bien définie. Alors $B^T \times A^T \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ est bien définie, et on a

$$(A \times B)^T = B^T \times A^T.$$

EXERCICE DE COURS 48. Démontrer la proposition.

Corollaire 56 – transposée d'une matrice inversible

Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. La matrice A est inversible si et seulement si A^T l'est. Dans ce cas

$$(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T.$$

EXERCICE DE COURS 49. Démontrer le corollaire.

1. Généralités

1.1. Définition.

Définition 57 – application linéaire

Soient $(E, +, \cdot)$ et $(F, +, \cdot)$ deux espaces vectoriels. On dit qu'une application $f : E \rightarrow F$ est *linéaire* lorsque pour tous a, b de E et tout λ dans \mathbb{R} ,

$$f(a + b) = f(a) + f(b) \quad \text{et} \quad f(\lambda \cdot a) = \lambda \cdot f(a).$$

On note $\mathcal{L}(E, F)$ l'ensemble des applications linéaires de E dans F .

Les applications linéaires sont aussi appelées «morphisme d'espaces vectoriels». Comme pour les sous-espaces vectoriels, on peut vérifier les deux propriétés de la définition en une fois : une application $f : E \rightarrow F$ est linéaire si et seulement si pour tous réels λ, μ et tous x, y dans E , on a

$$f(\lambda \cdot x + \mu \cdot y) = \lambda \cdot f(x) + \mu \cdot f(y).$$

EXERCICE DE COURS 50 (l'image du vecteur nul par une application linéaire est toujours le vecteur nul). Montrer que l'image du vecteur nul de E par une application linéaire $f : E \rightarrow F$ est toujours 0_F .

! Dans la définition, on a noté «+» et « \cdot » les lois de compositions sur E et sur F . Il faut prendre garde au fait que les ensembles E et F contiennent des objets a priori différents, et que les opérations sur ces objets différents n'ont a priori pas de rapport. Il est utile de se demander de quelle loi il s'agit quand on lit la définition ci-dessus.

1.2. Exemples.

1. On prend $E = F = \mathbb{R}$ munis de l'addition et de la multiplication externe (qui est aussi la multiplication interne dans ce cas) usuelles. Si $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ est une application linéaire, alors pour tout $x \in \mathbb{R}$, on a $f(x) = f(x \cdot 1) = x \cdot f(1)$. Notant $a = f(1)$, on doit donc avoir $f : x \mapsto ax$. Réciproquement, on vérifie facilement qu'une telle application est bien linéaire.
2. Maintenant $E = F$ est l'espace vectoriel des vecteurs du plan. L'application $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ définie par $f(\vec{u}) = \lambda \cdot \vec{u}$ est linéaire. Il s'agit de l'homothétie vectorielle de rapport λ . Si \vec{v} est un vecteur fixé non nul, la translation de vecteur \vec{v} , définie par $f(\vec{u}) = \vec{u} + \vec{v}$ n'est pas linéaire : par exemple $f(\vec{u}_1 + \vec{u}_2) = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + \vec{v}$ alors que $f(\vec{u}_1) + f(\vec{u}_2) = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + 2\vec{v}$. On aurait aussi pu noter que $f(\vec{0}) = \vec{v} \neq \vec{0}$.
3. Soit $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ une matrice. L'application $f : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n$ définie par $f(X) = A \times X$ est une application linéaire. En effet d'après la proposition 44 et la remarque qui la précède, on a

$$f(\lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2) = A \times (\lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2) = A \times (\lambda_1 X_1) + A \times (\lambda_2 X_2) = \lambda_1 f(X_1) + \lambda_2 f(X_2).$$

Dans le paragraphe 4, on verra qu'une application linéaire de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^p est toujours de cette forme.

4. Voici un exemple d'application linéaire qui sort du cadre des espaces vectoriels de dimension finie. On note $\mathcal{C}^0([0, 1])$ l'espace vectoriel des fonctions continues de $[0, 1]$ dans \mathbb{R} . On sait qu'une telle fonction est intégrable sur $[0, 1]$ et que pour tout réels λ, μ

$$\int_0^1 (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx = \lambda \int_0^1 f(x) dx + \mu \int_0^1 g(x) dx.$$

Autrement dit, l'application $\varphi : \mathcal{C}^0([0, 1]) \rightarrow \mathbb{R}$ définie par

$$\varphi(f) = \int_0^1 f(x) dx$$

est une application linéaire.

1.3. Somme et composition d'applications linéaires.

Proposition 58 – l'ensemble des applications linéaires est un espace vectoriel

L'ensemble $\mathcal{L}(E, F)$ des applications linéaires de E dans F , muni de l'addition des fonctions et de la multiplication d'une fonction par un nombre, est un espace vectoriel.

EXERCICE DE COURS 51. Démontrer la proposition.

On peut aussi composer des applications linéaires :

Proposition 59 – composition des applications linéaires

Soient E, F, G trois espaces vectoriels, et $f : E \rightarrow F$, $g : F \rightarrow G$ deux applications linéaires. Alors $g \circ f : E \rightarrow G$ est une application linéaire.

EXERCICE DE COURS 52. Démontrer la proposition.



Attention à l'ordre dans la composition !

2. Noyau et Image

2.1. Injection, surjection, bijection. Les notions que l'on rappelle maintenant ne sont pas liées à la linéarité.

Définition 60 – application injective

On dit qu'une application $f : E \rightarrow F$ est *injective* lorsque pour tous $x, y \in E$,

$$f(x) = f(y) \Rightarrow x = y.$$

EXEMPLE 24. L'application $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(x) = x^2$ n'est pas injective, puisque $f(-1) = f(1)$. En revanche l'application $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(x) = x^2$ est injective.

Définition 61 – application surjective

On dit qu'une application $f : E \rightarrow F$ est *surjective* lorsque pour tout élément y de F , il existe au moins un élément x de E tel que $f(x) = y$.

EXEMPLE 25. L'application $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(x) = x^2$ n'est pas surjective, puisqu'il n'existe pas de réel x tel que $f(x) = -1$. En revanche l'application $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$ définie par $f(x) = x^2$ est surjective.

Définition 62 – application bijective

On dit qu'une application $f: E \rightarrow F$ est *bijective* lorsque pour tout élément y de F , il existe exactement un élément x de E tel que $f(x) = y$.

EXEMPLE 26. L'application $f: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ définie par $f(x) = x^2$ est bijective, puisque pour tout $y \in \mathbb{R}^+$, il existe un unique x tel que $f(x) = y$: il s'agit de $x = \sqrt{y}$.

Proposition 63 – une application est bijective si et seulement si elle est injective et surjective

Une application $f: E \rightarrow F$ est bijective si et seulement si elle est injective et surjective.

EXERCICE DE COURS 53. Démontrer la proposition.

Définition 64 – bijection réciproque

Soit $f: E \rightarrow F$ une application bijective. L'application $f^{-1}: F \rightarrow E$ qui à y dans F associe l'unique $x \in E$ tel que $f(x) = y$ est appelée *bijection réciproque* de f .

On est allé un peu vite : il faut justifier le fait que f^{-1} est bien une bijection :

Proposition 65 – la bijection réciproque est bien une bijection!

Soient $f: E \rightarrow F$ une application bijective, et $f^{-1}: F \rightarrow E$ sa bijection réciproque.

1. f^{-1} est bijective, et sa bijection réciproque est f .
2. On a $f^{-1} \circ f = I_E$ et $f \circ f^{-1} = I_F$.

EXERCICE DE COURS 54. Démontrer la proposition.

Dans le cas des applications linéaires, on a un peu de vocabulaire spécifique :

Définition 66 – endomorphisme, isomorphisme, automorphisme

Les applications linéaires de E dans E sont appelées *endomorphismes*. Les applications linéaires bijectives de E dans F sont appelées *isomorphismes*. Les endomorphismes bijectifs sont appelés *automorphismes*.

Plutôt que $\mathcal{L}(E, E)$, on note simplement $\mathcal{L}(E)$ l'espace vectoriel des endomorphismes de E .

2.2. Noyau d'une application linéaire.**Définition 67** – noyau d'une application linéaire

Soit $f: E \rightarrow F$ une application linéaire. Le sous-ensemble de E des éléments dont l'image est 0_F est appelé noyau de f . On le note

$$\text{Ker } f = \{x \in E : f(x) = 0_F\}.$$

Proposition 68 – le noyau d’une application linéaire est un sous-espace vectoriel

Soit $f: E \rightarrow F$ une application linéaire. Le noyau de f est un sous-espace vectoriel de E .

EXERCICE DE COURS 55. Démontrer la proposition.

Proposition 69 – une application linéaire est injective si et seulement si son noyau est nul

Une application linéaire $f: E \rightarrow F$ est injective si et seulement si son noyau ne contient que le vecteur nul de E , c’est-à-dire $\text{Ker } f = \{0_E\}$.

EXERCICE DE COURS 56. Démontrer la proposition.

EXERCICE DE COURS 57. Soit $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l’application linéaire définie par $f(x, y, z) = (y+z, x+z, x-y)$. Déterminer son noyau. L’application f est-elle injective ?

2.3. Image d’une application linéaire.

Définition 70 – image d’une application linéaire

Le sous-ensemble de F constitué des images par f des éléments de E est appelé *image* de f . On le note

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

Autrement dit $\text{Im } f$ est pour une application linéaire ce que l’on note $f(E)$ pour une application quelconque. Par définition donc, une application linéaire $f: E \rightarrow F$ est surjective si et seulement si $\text{Im } f = F$.

Proposition 71 – l’image d’une application linéaire est un sous-espace vectoriel

Soit $f: E \rightarrow F$ une application linéaire. L’image de f est un sous-espace vectoriel de F .

EXERCICE DE COURS 58. Démontrer la proposition.

EXERCICE DE COURS 59. Soit $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ l’application linéaire définie par $f(x, y, z) = (y+z, x+z, x-y)$. Déterminer son image. L’application f est-elle surjective ?

2.4. Applications linéaires bijectives. Voici une particularité des applications bijectives qui sont linéaires :

Proposition 72 – la bijection réciproque d’une application linéaire bijective est linéaire

Soit $f: E \rightarrow F$ une application linéaire. Si f est bijective, alors son application réciproque $f^{-1}: F \rightarrow E$ est aussi linéaire.

EXERCICE DE COURS 60. Démontrer la proposition.

La proposition suivante, un peu technique, donne une caractérisation de l’injectivité et de la surjectivité d’une application linéaire f en termes de l’image d’une base par f . On retiendra en particulier qu’il ne peut pas y avoir d’application linéaire bijective entre deux espaces de dimensions finies différentes, et qu’une

application linéaire est bijective si et seulement si elle transforme toute base de l'espace de départ en une base de l'espace d'arrivée :

Proposition 73 – caractérisation de l'injectivité et de la surjectivité d'une application linéaire

Soient E un espace vectoriel de dimension finie, et F un espace vectoriel quelconque. Soient \mathcal{B}_E une base de E et $f \in \mathcal{L}(E, F)$ une application linéaire.

1. f est injective si et seulement si $f(\mathcal{B}_E)$ est une famille libre de F ; en particulier, si f est injective on a $\dim E \leq \dim F$.
2. f est surjective si et seulement si $f(\mathcal{B}_E)$ est une famille génératrice de F ; en particulier, si f est surjective on a $\dim F \leq \dim E$.
3. f est bijective si et seulement si $f(\mathcal{B}_E)$ est une base de F ; en particulier, si f est bijective on a $\dim E = \dim F$.

EXERCICE DE COURS 61. Démontrer la proposition.

2.5. Le théorème du rang.

Définition 74 – rang d'une application linéaire

Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$. On appelle *rang de f* la dimension de $\text{Im } f$, et on note

$$\text{rang}(f) = \dim \text{Im } f.$$

Théorème 75 – théorème du rang

Soient E un espace vectoriel de dimension finie, et $f \in \mathcal{L}(E, F)$. On a

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

EXERCICE DE COURS 62. Le but de cet exercice est de démontrer le théorème 75.

On utilise le théorème de la base incomplète (voir le théorème 22). Soit $\mathcal{K} = (u_1, \dots, u_k)$ une base de $\text{Ker } f$. Comme E est de dimension finie – appelons la n –, on peut compléter \mathcal{K} en une famille $\mathcal{B} = (u_1, \dots, u_k, u_{k+1}, \dots, u_n)$ qui est une base de E .

1. En utilisant la définition de $\text{Im } f$, montrer que $(f(u_{k+1}), \dots, f(u_n))$ est une famille génératrice de $\text{Im } f$.
2. Montrer que $(f(u_{k+1}), \dots, f(u_n))$ est une famille libre de $\text{Im } f$.
3. En déduire que $\dim \text{Im } f = n - k$. Conclure.

⚠ Le théorème du rang relie la dimension de E à celles de $\text{Ker } f$ et $\text{Im } f$ mais $\text{Im } f$ n'est pas un sous-espace vectoriel de E en général !

Même lorsque $E = F$, le théorème du rang ne dit pas que les sous-espaces vectoriels $\text{Ker } f$ et $\text{Im } f$ sont supplémentaires dans E . Il se peut que le noyau et l'image d'un endomorphisme ne soient pas en somme directe.

Par exemple que si f est l'endomorphisme de dérivation (voir aussi l'exercice 65)

$$\begin{array}{ccc} f: \mathbb{R}_n[X] & \longrightarrow & \mathbb{R}_n[X] \\ P & \longmapsto & P' \end{array}$$

alors on a $\text{Im } f \cap \text{Ker } f = \text{Vect}(1) = \{\text{polynômes constants}\} \neq \{0_{\mathbb{R}_n[X]}\}$.

Voici une des conséquences très utiles du théorème du rang :

Corollaire 76 – si $\dim E = \dim F$, l'injectivité équivaut à la surjectivité

Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$ avec E et F dimension finie. Si $\dim E = \dim F$, on a les équivalences

$$f \text{ bijective} \iff f \text{ surjective} \iff f \text{ injective}.$$

Voici une autre conséquence du théorème du rang :

Corollaire 77

Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$ avec E et F de dimension finie. Si $\dim E > \dim F$, f ne peut pas être injective. De même si $\dim E < \dim F$, f ne peut pas être surjective.

EXERCICE DE COURS 63. Démontrer les deux corollaires.

3. Un exemple : dérivation dans $\mathbb{R}[X]$

L'espace vectoriel des polynômes est très important aussi bien en analyse qu'en algèbre. Nous approfondissons dans cette section son étude et donnons des exemples intéressants d'applications linéaires dans ce contexte.

Définition 78 – polynôme dérivé

Pour tout $P = \sum_{i=0}^n a_n X^n$ de $\mathbb{R}[X]$, on appelle *polynôme dérivé*, et on note P' , le polynôme défini par :

$$P' = \sum_{k=1}^n k a_k X^{k-1} = \sum_{k=0}^{n-1} (k+1) a_k X^k.$$

On note $P^{(0)} = P$, $P^{(1)} = P'$, $P^{(2)} = P'' = (P')'$ et, pour tout $k \in \mathbb{N}^*$, $P^{(k)} = (P^{(k-1)})'$.

Cette définition est très naturelle : le polynôme dérivé de P n'est rien d'autre que la fonction dérivée de la fonction polynomiale associée à P (qui est dérivable sur tout \mathbb{R}).

EXERCICE DE COURS 64. Soit $P \in \mathbb{R}[X]$.

1. Montrer que $\deg(P') = \deg(P) - 1$ si $\deg(P) \geq 1$ et $\deg(P') = -\infty$ si $\deg(P) \leq 0$, c'est-à-dire si P est un polynôme constant.
2. Montrer que l'application $\mathbb{R}[X] \rightarrow \mathbb{R}[X]$ qui à P associe son polynôme dérivé est un endomorphisme de $\mathbb{R}[X] \rightarrow \mathbb{R}[X]$. Quel est son noyau ? Son image ? Mêmes questions pour sa restriction à $\mathbb{R}_n[X]$ où $n \in \mathbb{N}$.

EXERCICE DE COURS 65. Soient $n \in \mathbb{N}$ et $f: \mathbb{R}_n[X] \rightarrow \mathbb{R}_n[X]$ définie par $f(P) = \lambda P + P'$ avec $\lambda \neq 0$. Montrer que f est un isomorphisme sur $\mathbb{R}_n[X]$.

Gottfried Wilhelm Leibniz, né à Leipzig le 1er juillet 1646 et mort à Hanovre le 14 novembre 1716, est un philosophe, scientifique, mathématicien, logicien, diplomate, juriste, bibliothécaire et philologue allemand. Esprit polymathe, personnalité importante de la période Frühaufklärung, il occupe une place primordiale dans l'histoire de la philosophie et l'histoire des sciences (notamment des mathématiques) et est souvent considéré comme le dernier « génie universel ».



Proposition 79 – formule de Leibniz

Pour tous $P, Q \in \mathbb{R}[X]$, et tout $k \in \mathbb{N}$, on a

$$(PQ)^{(k)} = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} P^{(i)} Q^{(k-i)},$$

où $\binom{k}{i}$ est le coefficient binomial i parmi k .

EXERCICE DE COURS 66. Démontrer la proposition par récurrence sur k .

Le théorème suivant est crucial, et pas seulement pour ce cours!

Théorème 80 – théorème de Taylor pour les polynômes

Soient $n \in \mathbb{N}$ et $P \in \mathbb{R}[X]$ un polynôme de degré au plus n . Alors

$$P = \sum_{k=0}^n \frac{P^{(k)}(0)}{k!} X^k.$$

Autrement dit, les coordonnées du polynôme $P \in \mathbb{R}_n[X]$ dans la base canonique $1, X, X^2, \dots, X^n$ de $\mathbb{R}_n[X]$ sont $P(0), P'(0), P''(0)/2, \dots, P^{(n)}(0)/(n!)$.

Brook Taylor, est un homme de science anglais, né à Edmonton, aujourd'hui un quartier de Londres, le 18 août 1685, et mort à Londres le 29 décembre 1731. Principalement connu comme mathématicien, il s'intéressa aussi à la musique, à la peinture et à la religion.



EXERCICE DE COURS 67.

1. Démontrer le théorème par récurrence sur n .
2. Soient $n \in \mathbb{N}$ et $a \in \mathbb{R}$.
 - 2.1 Dans les conditions du théorème, montrer que l'on a :

$$P = \sum_{k=0}^n \frac{P^{(k)}(a)}{k!} (X - a)^k.$$

C'est le théorème de Taylor pour les polynômes sous sa forme la plus générale.

- 2.2 Montrer que $(1, X - a, (X - a)^2, \dots, (X - a)^n)$ forment une base de $\mathbb{R}_n[X]$. Quelles sont les coordonnées d'un polynôme $P \in \mathbb{R}_n[X]$ dans cette base ?

4. Matrices d'une application linéaire

4.1. Définition. Dans ce paragraphe, on considère deux espaces vectoriels E et F de dimension finie, respectivement p et n . On choisit une base $\mathcal{B}_E = (u_1, u_2, \dots, u_p)$ de E , et une base $\mathcal{B}_F = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ de F .

Proposition 81 – la donnée de l’image des vecteurs d’une base détermine l’application linéaire

Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$ une application linéaire. La donnée de l’image par f des vecteurs de la base \mathcal{B}_E détermine entièrement l’application f .

EXERCICE DE COURS 68. Démontrer la proposition.

D’autre part, les vecteurs $f(u_1), \dots, f(u_p)$ sont eux parfaitement déterminés par la donnée de leurs coordonnées dans la base \mathcal{B}_F . Autrement dit, la donnée du tableau à n lignes et p colonnes constituées des coordonnées des $f(u_j)$ dans la base (v_1, v_2, \dots, v_n) de F détermine entièrement l’application linéaire f . Cela conduit à la définition suivante :

Définition 82

Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$ une application linéaire. On appelle *matrice de f dans les bases \mathcal{B}_E et \mathcal{B}_F* la matrice $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ dont les p colonnes sont les coordonnées des images par f des vecteurs de \mathcal{B}_E dans la base \mathcal{B}_F . On la note

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B}_F \leftarrow \mathcal{B}_E}(f) = \begin{pmatrix} f(u_1) & f(u_2) & \dots & f(u_p) \\ a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,p} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,p} \end{pmatrix} \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{matrix}$$

avec, pour $j \in \{1, \dots, p\}$,

$$f(u_j) = a_{1,j}v_1 + a_{2,j}v_2 + \dots + a_{n,j}v_n = \sum_{i=1}^n a_{i,j}v_i.$$

! La phrase «on considère la matrice de l’application linéaire $f \in \mathcal{L}(E, F)$ » n’a pas de sens ; il faut préciser dans quelles bases de E et F on écrit la matrice !

EXEMPLE 27. On considère l’espace vectoriel \mathbb{R}^n , et $\mathcal{B} = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ une base quelconque de \mathbb{R}^n . La matrice de l’homothétie $h_\lambda: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ de rapport λ dans les bases \mathcal{B} et \mathcal{B} est

$$H_\lambda = \text{Mat}_{\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B}}(h_\lambda) = \begin{pmatrix} h_\lambda(e_1) & h_\lambda(e_2) & \dots & h_\lambda(e_n) \\ \lambda & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \lambda \end{pmatrix} \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{matrix} = \lambda I.$$

EXEMPLE 28. On note $f_\theta: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ la rotation d’angle θ dans \mathbb{R}^2 , définie par

$$f_\theta(x, y) = (x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta).$$

La matrice de f_θ dans la base canonique \mathcal{B} de \mathbb{R}^2 est donc

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B}}(f_\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

EXEMPLE 29. On note $f_\theta: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ la rotation d’axe $(0, 0, 1)$ et d’angle θ dans \mathbb{R}^3 , définie par

$$f_\theta(x, y, z) = (x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta, z).$$

La matrice de f_θ dans la base canonique \mathcal{B} de \mathbb{R}^3 est donc

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B}}(f_\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

EXEMPLE 30. On considère l'espace vectoriel $\mathbb{R}_n[X]$ des polynômes de degré inférieur ou égal à n . La famille $\mathcal{B} = (1, X, X^2, \dots, X^n)$ est une base de $\mathbb{R}_n[X]$. Soit alors $\varphi: \mathbb{R}_n[X] \rightarrow \mathbb{R}_n[X]$ l'application qui à un polynôme $P \in \mathbb{R}_n[X]$ associe son polynôme dérivé P' . L'application φ est linéaire (voir l'exercice 64), et $\varphi(1) = 0$, $\varphi(X) = 1, \dots, \varphi(X^n) = nX^{n-1}$. La matrice de φ dans les bases \mathcal{B} et \mathcal{B} est donc

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B}}(\varphi) = \begin{pmatrix} \varphi(1) & \varphi(X) & \varphi(X^2) & \dots & \varphi(X^n) \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 1 \\ X \\ \vdots \\ X^{n-1} \\ X^n \end{matrix}$$

EXERCICE DE COURS 69. Quelle est la matrice dans les bases \mathcal{B} et \mathcal{B} de l'application linéaire f de l'exercice 65 ?

REMARQUE 13. La matrice d'une application linéaire dans des bases \mathcal{B}_E et \mathcal{B}_F dépend en général des bases \mathcal{B}_E et \mathcal{B}_F . Comme on l'a vu plus haut, ce n'est cependant pas le cas pour les homothéties, et donc en particulier pour l'application identité (qu'on peut écrire h_λ avec $\lambda = 1$).

REMARQUE 14. On a parlé précédemment de l'application linéaire associée à une matrice A donnée de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$. Il est maintenant clair qu'il s'agit de l'application linéaire f de \mathbb{R}^p dans \mathbb{R}^n dont la matrice dans les bases canoniques de \mathbb{R}^p et \mathbb{R}^n est A .

4.2. Liens entre une application linéaire et sa matrice dans des bases données. Soyons plus précis : on a vu que «la donnée du tableau à n lignes et p colonnes constituées des coordonnées des $f(u_j)$ dans la base (v_1, v_2, \dots, v_n) de F détermine entièrement l'application linéaire f », mais comment ?

Proposition 83 – écriture matricielle de l'image d'un vecteur par une application linéaire

Soit $f \in \mathcal{L}(E, F)$ une application linéaire. La matrice $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ est la matrice de f dans les bases \mathcal{B}_E et \mathcal{B}_F , si et seulement si pour tout $x \in E$, de coordonnées $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_p \end{pmatrix}$ dans la base \mathcal{B}_E , les coordonnées $Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$ de son image $y = f(x)$ dans la base \mathcal{B}_F vérifient $Y = A \times X$.

EXERCICE DE COURS 70. Démontrer la proposition.

Proposition 84 – lien entre produit matriciel et composition des applications linéaires

Soient E, F et G des espaces vectoriels de dimension finie, et deux applications linéaires $f: E \rightarrow F$ et $g: F \rightarrow G$. Soient aussi $\mathcal{B}_E, \mathcal{B}_F$ et \mathcal{B}_G des bases respectives de E, F et G , et

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B}_F \leftarrow \mathcal{B}_E}(f), \quad B = \text{Mat}_{\mathcal{B}_G \leftarrow \mathcal{B}_F}(g).$$

Alors la matrice C de l'application linéaire $g \circ f: E \rightarrow G$ dans les bases \mathcal{B}_E et \mathcal{B}_G est donnée par le produit $B \times A$:

$$C = \text{Mat}_{\mathcal{B}_G \leftarrow \mathcal{B}_E}(g \circ f) = \text{Mat}_{\mathcal{B}_G \leftarrow \mathcal{B}_F}(g) \times \text{Mat}_{\mathcal{B}_F \leftarrow \mathcal{B}_E}(f) = B \times A.$$

EXERCICE DE COURS 71. Démontrer la proposition.

EXERCICE DE COURS 72. Soient $f_\theta: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ et $f_{\theta'}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ les rotations d'angle θ et θ' respectivement. Quelle est la matrice de $f_\theta \circ f_{\theta'}$ dans la base canonique ? Pouvait-on prédire géométriquement ce résultat ?

4.3. Rang d'une application linéaire et rang de sa matrice.

Proposition 85 – rang d'une application linéaire en terme du rang d'un système linéaire

Soient $f: E \rightarrow F$ une application linéaire, et $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}_F \leftarrow \mathcal{B}_E}(f)$ sa matrice dans \mathcal{B}_E et \mathcal{B}_F . Le rang de f est le rang du système linéaire associé à la matrice A .

EXERCICE DE COURS 73. À l'aide des résultats du paragraphe 7.1 (Chapitre 1), démontrer la proposition.

On peut même extraire de cette preuve un procédé pour calculer le rang de f . Remarquons que le rang de f est la dimension de l'espace vectoriel engendré par les vecteurs colonnes $(f(u_1), \dots, f(u_p))$ de A . Cela justifie la définition suivante.

Définition 86 – rang d'une matrice

Soit $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ une matrice. On note C_1, C_2, \dots, C_p les vecteurs colonnes de A . On appelle *rang* de A et on note $\text{rang}(A)$ la dimension du sous-espace vectoriel $\text{Vect}(C_1, \dots, C_p)$ de \mathbb{R}^n .

REMARQUE 15. Si u_1, \dots, u_p sont des vecteurs d'un espace vectoriel E de dimension finie, on appelle *rang* de la famille (u_1, \dots, u_p) la dimension du sous-espace vectoriel $\text{Vect}(u_1, \dots, u_p)$.

EXEMPLE 31. On veut déterminer le rang de l'application linéaire f dont la matrice dans la base canonique

de \mathbb{R}^3 est $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 3 & 2 & -1 \end{pmatrix}$. Il s'agit de déterminer la dimension de $\text{Vect}(C_1, C_2, C_3)$, où $C_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$, $C_2 =$

$\begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}$ et $C_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$. Il s'agit de compter les inconnues principales du système homogène correspondant

à l'équation $\lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 + \lambda_3 C_3 = 0$, dont la matrice associée est A . En échelonnant ce système, on trouve facilement $\text{rang}(f) = \text{rang}(A) = 2$.

REMARQUE 16. On vient de prouver un point important. Le rang d'un système linéaire a été défini comme le nombre de lignes non nulles du système échelonné obtenu en appliquant l'algorithme du pivot au système en question. Obtiendrait-on le même rang si l'on utilisait un autre procédé pour trouver un système échelonné équivalent au premier ? Pour les systèmes compatibles, en particulier les systèmes homogènes, la réponse est oui : ce que l'on calcule, c'est la dimension de l'image de l'application linéaire f associée au système, et ce nombre ne dépend pas de la méthode utilisée pour le calculer.

4.4. Matrice d'une bijection.

Proposition 87 – caractérisation matricielle de la bijectivité d'une application linéaire

Soient E et F de dimension finie, respectivement p et n . Soient $f \in \mathcal{L}(E, F)$ une application linéaire, et $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ la matrice de f dans les bases \mathcal{B}_E de E et \mathcal{B}_F de F . L'application f est bijective si et seulement si la matrice A est une matrice carrée, donc $n = p$, qui est inversible. Dans ce cas

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}_E \leftarrow \mathcal{B}_F}(f^{-1}) = A^{-1}.$$

EXERCICE DE COURS 74. Le but de l'exercice est de démontrer la proposition.

1. Supposons f bijective.

1.1 À l'aide de la proposition 73, montrer : $\dim E = \dim F$.

On en déduit que $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}_F \leftarrow \mathcal{B}_E}(f)$ est une matrice carrée de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Notons $B = \text{Mat}_{\mathcal{B}_E \leftarrow \mathcal{B}_F}(f^{-1})$.

1.2 Montrer que A est inversible et que $A^{-1} = B = \text{Mat}_{\mathcal{B}_E \leftarrow \mathcal{B}_F}(f^{-1})$.

2. Supposons la matrice carrée $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}_F \leftarrow \mathcal{B}_E}(f)$ inversible. On note $g: F \rightarrow E$ l'application linéaire dont la matrice dans les bases \mathcal{B}_F et \mathcal{B}_E est A^{-1} . Montrer que $(g \circ f)(x) = x$ pour tout x , ou encore que $g \circ f = I_E$. Montrer de la même manière que $f \circ g = I_F$, et en déduire que f est bijective.

EXERCICE DE COURS 75. Soient $a \in \mathbb{R}$ et $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ l'application linéaire définie par $f(x, y) = (x + 2y, 2x + ay)$. L'application f est-elle bijective? Si oui donner f^{-1} .

5. Changement de base

La matrice d'une application linéaire f donnée dépend en général des bases dans lesquelles on la définit. On s'intéresse dans ce paragraphe aux relations entre les matrices de f dans des bases différentes.

5.1. **Matrice de passage d'une base dans une autre.** Soit E un espace vectoriel de dimension n . Soient $\mathcal{B} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ une base de E , et $\mathcal{B}' = (u'_1, u'_2, \dots, u'_n)$ une «nouvelle base» de E . En général, les vecteurs de $\mathcal{B}' = (u'_1, u'_2, \dots, u'_n)$ sont donnés par leurs coordonnées dans «l'ancienne base» \mathcal{B} , et il est naturel et très simple de former la matrice P des coordonnées des vecteurs de la nouvelle base \mathcal{B}' dans l'ancienne base \mathcal{B} :

$$P = \begin{pmatrix} u'_1 & u'_2 & \dots & u'_n \\ p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,n} \end{pmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{matrix}$$

Cette matrice a un nom, pour l'instant un peu troublant :

Définition 88 – matrice de passage

La matrice P des coordonnées des vecteurs de la nouvelle base \mathcal{B}' dans l'ancienne base \mathcal{B} est appelée *matrice de passage de \mathcal{B} à \mathcal{B}'* . On la note $P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$.

⚠ Attention à l'ordre des bases dans cette définition : $P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$ est la matrice dont les colonnes sont les coordonnées dans la base \mathcal{B} des vecteurs de la base \mathcal{B}' .

EXEMPLE 32. Soient $\mathcal{B} = (e_1, e_2)$ la base canonique de \mathbb{R}^2 et $e'_1 = (1, -1)$, $e'_2 = (0, 2)$. Les vecteurs e'_1 et e'_2 ne sont pas colinéaires, donc $\mathcal{B}' = (e'_1, e'_2)$ est une base de \mathbb{R}^2 . La matrice de passage de \mathcal{B} à \mathcal{B}' est la matrice

$$P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} e'_1 & e'_2 \\ 1 & 0 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \end{matrix}$$

Proposition 89 – une matrice de passage est une matrice associée à l'application identité

Soient E un espace vectoriel de dimension $n \in \mathbb{N}^*$, $\mathcal{B} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ et $\mathcal{B}' = (u'_1, u'_2, \dots, u'_n)$ deux bases de E . La matrice de de passage de \mathcal{B} dans \mathcal{B}' est la matrice de l'application identité de E dans les bases \mathcal{B}' et \mathcal{B} . Autrement dit

$$P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \text{Mat}_{\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B}'}(I).$$

Pour démontrer la proposition, il suffit de remarquer que

$$P_{\mathcal{B},\mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} u'_1 = I(u'_1) & u'_2 = I(u'_2) & \dots & u'_n = I(u'_n) \\ p_{1,1} & p_{1,2} & & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & & p_{n,n} \end{pmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \\ u_n \end{matrix} = \text{Mat}_{\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B}'}(I).$$

REMARQUE 17. Une matrice de passage est toujours inversible, puisque l'application linéaire identité l'est (voir la proposition 87) !

De la définition ci-dessus découle l'importante proposition suivante.

Proposition 90 – matrice d'un vecteur dans une nouvelle base grâce à la matrice de passage

Une matrice $P \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est la matrice de passage de la base \mathcal{B} à la base \mathcal{B}' si et seulement si, pour tout vecteur $x \in E$, ses coordonnées $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ dans la base \mathcal{B} et $X' = \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}$ dans la base \mathcal{B}' vérifient $X = P \times X'$.

EXERCICE DE COURS 76. Démontrer la proposition.

EXEMPLE 33. On reprend les vecteurs de l'exemple 32 : $\mathcal{B} = (e_1, e_2)$ la base canonique de \mathbb{R}^2 et $\mathcal{B}' = (e'_1, e'_2)$ avec $e'_1 = (1, -1)$, $e'_2 = (0, 2)$. Si $x = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$, on a $x = x_1e_1 + x_2e_2$ et $x = x'_1e'_1 + x'_2e'_2$ avec

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{pmatrix}.$$

EXERCICE DE COURS 77. Vérifier l'assertion de l'exemple précédent.

Proposition 91 – inverse d'une matrice de passage

Si P est la matrice de passage de \mathcal{B} à \mathcal{B}' , alors P^{-1} est la matrice de passage de \mathcal{B}' à \mathcal{B} .

EXERCICE DE COURS 78. Démontrer la proposition à l'aide de la proposition 90 et de la remarque 17.

5.2. Matrices semblables.

Proposition 92 – formule de changement de bases pour les applications linéaires

Soient $f \in \mathcal{L}(E, F)$, et A la matrice de f dans les bases \mathcal{B}_E et \mathcal{B}_F . Soient aussi \mathcal{B}'_E et \mathcal{B}'_F des nouvelles bases de E et F respectivement. Alors la matrice A' de f dans les bases \mathcal{B}'_E et \mathcal{B}'_F est donnée par

$$A' = (P_{\mathcal{B}_F, \mathcal{B}'_F})^{-1} \times A \times P_{\mathcal{B}_E, \mathcal{B}'_E}$$

On notera que cette relation s'écrit

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}'_F \leftarrow \mathcal{B}'_E}(f) = (P_{\mathcal{B}_F, \mathcal{B}'_F})^{-1} \times \text{Mat}_{\mathcal{B}_F \leftarrow \mathcal{B}_E}(f) \times P_{\mathcal{B}_E, \mathcal{B}'_E}$$

ou encore

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}'_F \leftarrow \mathcal{B}'_E}(f) = \text{Mat}_{\mathcal{B}'_F \leftarrow \mathcal{B}_F}(I) \times \text{Mat}_{\mathcal{B}_F \leftarrow \mathcal{B}_E}(f) \times \text{Mat}_{\mathcal{B}_E \leftarrow \mathcal{B}'_E}(I).$$

Cette formule est donc une conséquence de la proposition 84.

EXERCICE DE COURS 79. Démontrer la proposition à l'aide de la proposition 90.

Corollaire 93 – formule de changement de bases pour les endomorphismes

Soient $f \in \mathcal{L}(E)$ un endomorphisme, et A la matrice de f dans la base \mathcal{B} . Soit aussi \mathcal{B}' une nouvelle base de E . Alors la matrice A' de f dans la base \mathcal{B}' vérifie

$$A' = P^{-1} \times A \times P,$$

où $P = P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$ est la matrice de passage de \mathcal{B} à \mathcal{B}' .

Définition 94 – matrice semblable

On dit que deux matrices A et B sont *semblables* lorsqu'il existe une matrice inversible $P \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telle que $A = P \times B \times P^{-1}$.

De manière équivalente, deux matrices sont semblables si et seulement si elles représentent la même application linéaire dans des bases différentes, puisqu'une matrice inversible peut être vue comme une matrice de passage. On peut se demander s'il existe une base dans laquelle la matrice d'une application linéaire donnée est la plus simple possible. C'est l'objet central de la *réduction des endomorphismes* (voir le cours de deuxième année).

6. Projections et symétries vectorielles

Pour finir, on examine en détail deux types d'applications linéaires qui jouent un rôle important. Comme leur nom l'indique, il est utile pour bien comprendre ce qui suit d'avoir en tête l'exemple des projections et symétries du plan ou de l'espace.

6.1. Projections.

Définition 95 – définition algébrique d'une projection

Soit $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel. On dit qu'un endomorphisme $p \in \mathcal{L}(E)$ est une *projection* lorsque $p \circ p = p$.

EXERCICE DE COURS 80.

1. Soit $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ et $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ l'application linéaire dont A est la matrice dans la base canonique de \mathbb{R}^2 . Montrer que f est une projection.
2. Soit $p \in \mathcal{L}(E, E)$ une projection. Montrer que $I - p$ est aussi une projection.

Proposition 96 – image et noyau d'une projection sont supplémentaires dans E

Si $p \in \mathcal{L}(E)$ est une projection, alors $\text{Ker } p$ et $\text{Im } p$ sont des sous-espaces vectoriels supplémentaires de E :

$$E = \text{Ker } p \oplus \text{Im } p.$$

De plus la restriction de p à $\text{Ker } p$ est l'application nulle, et celle de p à $\text{Im } p$ est l'application identité.

EXERCICE DE COURS 81. Démontrer la proposition.

Soit $p \in \mathcal{L}(E)$ une projection. La proposition 96 dit que $E = \text{Ker } p \oplus \text{Im } p$, c'est-à-dire que tout vecteur $x \in E$ s'écrit de manière unique $x = u + v$ avec $u \in \text{Ker } p$ et $v \in \text{Im } p$. Conformément à la proposition 32, on dit que u est la *composante* de x sur $\text{Ker } p$ et que v est la *composante* de x sur $\text{Im } p$.

Avec ces notations, on a $p(x) = p(u) + p(v) = p(v)$, et la proposition 96 nous dit que

$$p(x) = p(u) + p(v) = 0 + v = v$$

Finalement, on a donc

$$x = u + v, \quad u \in \text{Ker } p, v \in \text{Im } p \quad \Rightarrow \quad p(x) = v.$$

Cette remarque va nous permettre d’interpréter géométriquement la notion de projection.

Proposition 97 – interprétation géométrique d’une projection

Soient E_1 et E_2 deux sous-espaces vectoriels supplémentaires de l’espace vectoriel E . Soit $p: E \rightarrow E$ l’application qui à $x \in E$ associe sa composante sur E_2 . Alors p est une projection ; son image est E_2 et son noyau est E_1 . On dit que p est la *projection sur E_2 dans la direction de E_1* (ou encore : *parallèlement à E_1*).

EXERCICE DE COURS 82. Démontrer la proposition.

Dans le cas où E est l’ensemble des vecteurs du plan, et E_1, E_2 deux droites vectorielles distinctes, comme dans le cas où E est l’ensemble des vecteurs de l’espace, E_1 une droite et E_2 un plan ne contenant pas E_1 , la projection sur E_2 dans la direction de E_1 est bien ce que l’on pense, comme l’illustre la figure 1.

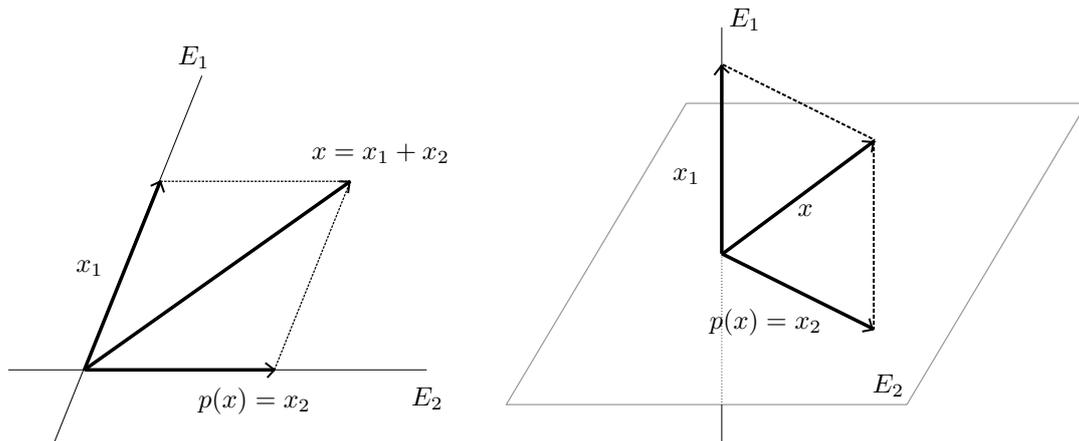


FIGURE 1. Projections vectorielles dans le plan et dans l’espace

Si A est la matrice d’une projection p dans des bases données, on a $A^2 = A \times A = A$, puisque que $A \times A$ est la matrice dans les mêmes bases de $p \circ p = p$. On peut choisir les bases de manière à ce que la matrice de p dans celles-ci soit très simple comme l’illustre l’exercice suivant.

EXERCICE DE COURS 83 (matrice d’une projection). Soient $p: E \rightarrow E$ une projection, $\mathcal{B}_1 = (u_1, \dots, u_{k_1})$ une base de $\text{Im } p$ et $\mathcal{B}_2 = (v_1, \dots, v_{k_2})$ une base de $\text{Ker } p$. Notant A la matrice de p dans les bases \mathcal{B} et \mathcal{B} , montrer que l’on a :

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B}}(p) = \left(\begin{array}{ccc|ccc} p(u_1) & \dots & p(u_{k_1}) & p(v_1) & \dots & p(v_{k_2}) \\ 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{array} \right) \begin{array}{l} u_1 \\ \vdots \\ u_{k_1} \\ v_1 \\ \vdots \\ v_{k_2} \end{array}$$

On pourra rapprocher ce résultat de l’exercice 80 (1).

6.2. Symétries.

Définition 98 – définition algébrique d’une symétrie

Soit $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel. On dit qu’un endomorphisme $s \in \mathcal{L}(E)$ est une *symétrie* lorsque $s \circ s = I$.

On notera qu’une symétrie est une application linéaire bijective, qui est sa propre inverse.

EXERCICE DE COURS 84. Soit $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ et $s: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ l’application linéaire dont A est la matrice dans la base canonique de \mathbb{R}^2 . Montrer que s est une symétrie.

EXERCICE DE COURS 85. Soit $(\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R}), +, \cdot)$ l’espace vectoriel des fonctions de \mathbb{R} dans \mathbb{R} . À une fonction $f \in \mathcal{F}$ on associe la fonction $s(f)$ définie par

$$s(f): x \mapsto f(-x).$$

Montrer que s est une symétrie.

Proposition 99 – lien entre symétries et projections

Soit $p \in \mathcal{L}(E)$. L’application p est une projection si et seulement si $s = I - 2p$ est une symétrie.

EXERCICE DE COURS 86. Démontrer la proposition.

Puisque s est une bijection, on a $\text{Ker } s = \{0_E\}$ et $\text{Im } s = E$, donc en particulier on a encore $E = \text{Ker } s \oplus \text{Im } s$, mais cette égalité est sans intérêt pour une symétrie. En revanche, on a aussi la proposition suivante.

Proposition 100 – deux sous-espaces vectoriels supplémentaires associées à une symétrie

Si $s \in \mathcal{L}(E)$ est une symétrie, alors $\text{Ker}(s + I)$ et $\text{Ker}(s - I)$ sont des sous-espaces vectoriels supplémentaires de E :

$$E = \text{Ker}(s + I) \oplus \text{Ker}(s - I).$$

EXERCICE DE COURS 87. Démontrer la proposition.

EXEMPLE 34. On reprend l’exercice 85. On a vu que l’application $s: \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F}$ définie par $s(f): x \mapsto f(-x)$ est une symétrie. Une fonction $f \in \mathcal{F}$ appartient à $\text{Ker}(s + I)$ si et seulement si pour tout $x \in \mathbb{R}$, on a $(s(f) + f)(x) = f(-x) + f(x) = 0$. Autrement dit $\text{Ker}(s + I)$ est le sous-espace des fonction impaires. De la même manière, $f \in \text{Ker}(s - I)$ si et seulement si $(s(f) - f)(x) = f(-x) - f(x) = 0$, donc $\text{Ker}(s - I)$ est le sous-espace des fonctions paires. Dans ce cas, la proposition précédente dit donc que toute fonction de \mathbb{R} s’écrit de manière unique comme somme d’une fonction paire et d’une fonction impaire.

Soient $s: E \rightarrow E$ une symétrie, et $x \in E$. On peut écrire $x = x_1 + x_2$ avec $x_1 \in \text{Ker}(s - I)$ et $x_2 \in \text{Ker}(s + I)$, de sorte que $s(x) = s(x_1 + x_2) = s(x_1) + s(x_2) = x_1 - x_2$.

Proposition 101 – interprétation géométrique d’une symétrie

Soient E_1 et E_2 deux sous-espaces vectoriels supplémentaires de l’espace vectoriel E . Soit $s: E \rightarrow E$ l’application qui à $x \in E$ associe $x_1 - x_2$ où x_1 et x_2 sont définis par $x = x_1 + x_2$ avec $x_1 \in E_1$ et $x_2 \in E_2$. Alors s est une symétrie. On dit que s est la *symétrie par rapport à E_1 dans la direction de E_2* (ou encore : *parallèlement à E_2*).

EXERCICE DE COURS 88. Démontrer la proposition.

Dans le cas où E est l'ensemble des vecteurs du plan, et E_1, E_2 deux droites vectorielles distinctes, comme dans le cas où E est l'ensemble des vecteurs de l'espace, E_1 un plan et E_2 une droite qui n'est pas contenue dans E_1 , la symétrie par rapport à E_1 dans la direction de E_2 est bien ce que l'on pense, comme l'illustre la figure 2.

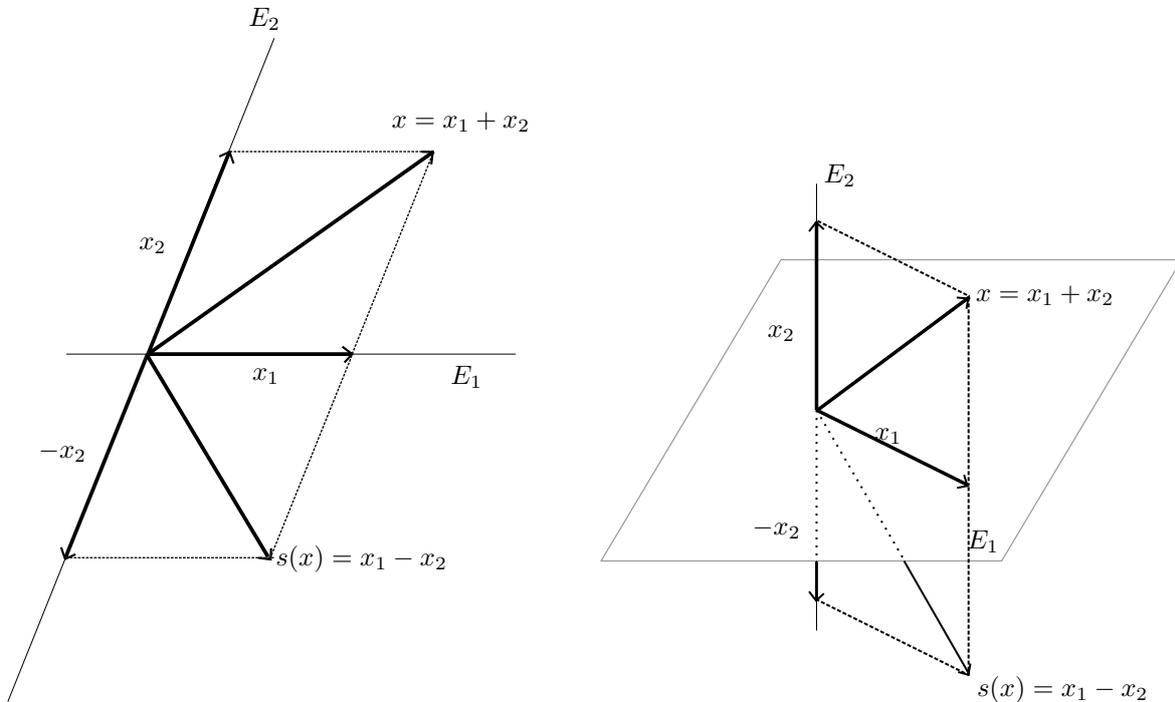


FIGURE 2. Symétries vectorielles dans le plan et dans l'espace

Si A est la matrice d'une symétrie s dans des bases données, on a $A^2 = A \times A = I$, puisque que $A \times A$ est la matrice dans les mêmes bases de $s \circ s = I$. Pour une symétrie aussi, on peut trouver des bases dans lesquelles la matrice de A est très simple comme l'illustre l'exercice suivant.

EXERCICE DE COURS 89. Soient E_1 et E_2 deux sous-espaces supplémentaires de E , et $s : E \rightarrow E$ la symétrie par rapport à E_1 dans la direction de E_2 . Soient aussi $\mathcal{B}_1 = (u_1, \dots, u_{k_1})$ une base de E_1 et $\mathcal{B}_2 = (v_1, \dots, v_{k_2})$ une base de E_2 . Notant A la matrice de s dans les bases \mathcal{B} et \mathcal{B} , montrer que l'on a :

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B}}(s) = \left(\begin{array}{ccc|ccc} s(u_1) & \dots & s(u_{k_1}) & s(v_1) & \dots & s(v_{k_2}) \\ \hline 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & \dots & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -1 \end{array} \right) \begin{array}{l} u_1 \\ \vdots \\ u_{k_1} \\ v_1 \\ \vdots \\ v_{k_2} \end{array}$$

Là encore, on pourra rapprocher ce résultat de l'exercice 84.