



Espaces vectoriels

Fiche amendée par David Chataur et Arnaud Bodin.

1 Définition, sous-espaces

Exercice 1

Montrer que les ensembles ci-dessous sont des espaces vectoriels (sur \mathbb{R}) :

- $E_1 = \{f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}\}$: l'ensemble des fonctions à valeurs réelles définies sur l'intervalle $[0, 1]$, muni de l'addition $f + g$ des fonctions et de la multiplication par un nombre réel $\lambda \cdot f$.
- $E_2 = \{(u_n) : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}\}$: l'ensemble des suites réelles muni de l'addition des suites définie par $(u_n) + (v_n) = (u_n + v_n)$ et de la multiplication par un nombre réel $\lambda \cdot (u_n) = (\lambda \times u_n)$.
- $E_3 = \{P \in \mathbb{R}[x] \mid \deg P \leq n\}$: l'ensemble des polynômes à coefficients réels de degré inférieur ou égal à n muni de l'addition $P + Q$ des polynômes et de la multiplication par un nombre réel $\lambda \cdot P$.

[Indication ▼](#) [Correction ▼](#) [Vidéo ■](#)

[006868]

Exercice 2

Déterminer lesquels des ensembles E_1, E_2, E_3 et E_4 sont des sous-espaces vectoriels de \mathbb{R}^3 .

$$E_1 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid 3x - 7y = z\}$$

$$E_2 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 - z^2 = 0\}$$

$$E_3 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x + y - z = x + y + z = 0\}$$

$$E_4 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid z(x^2 + y^2) = 0\}$$

[Indication ▼](#) [Correction ▼](#) [Vidéo ■](#)

[000886]

Exercice 3

1. Décrire les sous-espaces vectoriels de \mathbb{R} ; puis de \mathbb{R}^2 et \mathbb{R}^3 .
2. Dans \mathbb{R}^3 donner un exemple de deux sous-espaces dont l'union n'est pas un sous-espace vectoriel.

[Indication ▼](#) [Correction ▼](#) [Vidéo ■](#)

[006869]

Exercice 4

Parmi les ensembles suivants reconnaître ceux qui sont des sous-espaces vectoriels.

$$E_1 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x + y + a = 0 \text{ et } x + 3az = 0\}$$

$$E_2 = \{f \in \mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \mid f(1) = 0\}$$

$$E_3 = \{f \in \mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \mid f(0) = 1\}$$

$$E_4 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x + \alpha y + 1 \geq 0\}$$

[Indication ▼](#) [Correction ▼](#) [Vidéo ■](#)

[000888]

Exercice 5

Soit E un espace vectoriel.

1. Soient F et G deux sous-espaces de E . Montrer que

$$F \cup G \text{ est un sous-espace vectoriel de } E \iff F \subset G \text{ ou } G \subset F.$$

2. Soit H un troisième sous-espace vectoriel de E . Prouver que

$$G \subset F \implies F \cap (G + H) = G + (F \cap H).$$

2 Systèmes de vecteurs

Exercice 6

1. Soient $v_1 = (2, 1, 4)$, $v_2 = (1, -1, 2)$ et $v_3 = (3, 3, 6)$ des vecteurs de \mathbb{R}^3 , trouver trois réels non tous nuls α, β, γ tels que $\alpha v_1 + \beta v_2 + \gamma v_3 = 0$.
2. On considère deux plans vectoriels

$$P_1 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x - y + z = 0\}$$

$$P_2 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x - y = 0\}$$

trouver un vecteur directeur de la droite $D = P_1 \cap P_2$ ainsi qu'une équation paramétrée.

Exercice 7

Soient dans \mathbb{R}^4 les vecteurs $v_1 = (1, 2, 3, 4)$ et $v_2 = (1, -2, 3, -4)$. Peut-on déterminer x et y pour que $(x, 1, y, 1) \in \text{Vect}\{v_1, v_2\}$? Et pour que $(x, 1, 1, y) \in \text{Vect}\{v_1, v_2\}$?

Exercice 8

Soit E le sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^3 engendré par les vecteurs $v_1 = (2, 3, -1)$ et $v_2 = (1, -1, -2)$ et F celui engendré par $w_1 = (3, 7, 0)$ et $w_2 = (5, 0, -7)$. Montrer que E et F sont égaux.

Exercice 9

Soit $\alpha \in \mathbb{R}$ et $f_\alpha : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto e^{\alpha x}$. Montrer que la famille $(f_\alpha)_{\alpha \in \mathbb{R}}$ est libre.

3 Somme directe

Exercice 10

Par des considérations géométriques répondez aux questions suivantes :

1. Deux droites vectorielles de \mathbb{R}^3 sont-elles supplémentaires ?
2. Deux plans vectoriels de \mathbb{R}^3 sont-ils supplémentaires ?
3. A quelle condition un plan vectoriel et une droite vectorielle de \mathbb{R}^3 sont-ils supplémentaires ?

Exercice 11

On considère les vecteurs $v_1 = (1, 0, 0, 1)$, $v_2 = (0, 0, 1, 0)$, $v_3 = (0, 1, 0, 0)$, $v_4 = (0, 0, 0, 1)$, $v_5 = (0, 1, 0, 1)$ dans \mathbb{R}^4 .

1. $\text{Vect}\{v_1, v_2\}$ et $\text{Vect}\{v_3\}$ sont-ils supplémentaires dans \mathbb{R}^4 ?
2. $\text{Vect}\{v_1, v_2\}$ et $\text{Vect}\{v_4, v_5\}$ sont-ils supplémentaires dans \mathbb{R}^4 ?
3. $\text{Vect}\{v_1, v_3, v_4\}$ et $\text{Vect}\{v_2, v_5\}$ sont-ils supplémentaires dans \mathbb{R}^4 ?
4. $\text{Vect}\{v_1, v_4\}$ et $\text{Vect}\{v_3, v_5\}$ sont-ils supplémentaires dans \mathbb{R}^4 ?

Exercice 12

Soient $v_1 = (0, 1, -2, 1)$, $v_2 = (1, 0, 2, -1)$, $v_3 = (3, 2, 2, -1)$, $v_4 = (0, 0, 1, 0)$ et $v_5 = (0, 0, 0, 1)$ des vecteurs de \mathbb{R}^4 . Les propositions suivantes sont-elles vraies ou fausses ? Justifier votre réponse.

1. $\text{Vect}\{v_1, v_2, v_3\} = \text{Vect}\{(1, 1, 0, 0), (-1, 1, -4, 2)\}$.
2. $(1, 1, 0, 0) \in \text{Vect}\{v_1, v_2\} \cap \text{Vect}\{v_2, v_3, v_4\}$.
3. $\dim(\text{Vect}\{v_1, v_2\} \cap \text{Vect}\{v_2, v_3, v_4\}) = 1$ (c'est-à-dire c'est une droite vectorielle).
4. $\text{Vect}\{v_1, v_2\} + \text{Vect}\{v_2, v_3, v_4\} = \mathbb{R}^4$.
5. $\text{Vect}\{v_4, v_5\}$ est un sous-espace vectoriel supplémentaire de $\text{Vect}\{v_1, v_2, v_3\}$ dans \mathbb{R}^4 .

Exercice 13

Soit $E = \Delta^1(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ l'espace des fonctions dérivables et $F = \{f \in E \mid f(0) = f'(0) = 0\}$. Montrer que F est un sous-espace vectoriel de E et déterminer un supplémentaire de F dans E .

Exercice 14

Soit

$$E = \{(u_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}} \mid (u_n)_n \text{ converge}\}.$$

Montrer que l'ensemble des suites constantes et l'ensemble des suites convergeant vers 0 sont des sous-espaces supplémentaires dans E .

Indication pour l'exercice 1 ▲

On vérifiera sur ces exemples la définition donnée en cours.

Indication pour l'exercice 2 ▲

1. E_1 est un sous-espace vectoriel.
 2. E_2 n'est pas un sous-espace vectoriel.
 3. E_3 est un sous-espace vectoriel.
 4. E_4 n'est pas un sous-espace vectoriel.
-

Indication pour l'exercice 3 ▲

1. Discuter suivant la dimension des sous-espaces.
 2. Penser aux droites vectorielles.
-

Indication pour l'exercice 4 ▲

1. E_1 est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^3 si et seulement si $a = 0$.
 2. E_2 est un sous-espace vectoriel.
 3. E_3 n'est pas un espace vectoriel.
 4. E_4 n'est pas un espace vectoriel.
-

Indication pour l'exercice 5 ▲

1. Pour le sens \Rightarrow : raisonner par l'absurde et prendre un vecteur de $F \setminus G$ et un de $G \setminus F$. Regarder la somme de ces deux vecteurs.
 2. Raisonner par double inclusion, revenir aux vecteurs.
-

Indication pour l'exercice 6 ▲

1. On pensera à poser un système.
 2. Trouver un vecteur non-nul commun aux deux plans.
-

Indication pour l'exercice 7 ▲

On ne peut pas pour le premier, mais on peut pour le second.

Indication pour l'exercice 8 ▲

Montrer la double inclusion. Utiliser le fait que de manière générale pour $E = \text{Vect}(v_1, \dots, v_n)$ alors :

$$E \subset F \iff \forall i = 1, \dots, n \quad v_i \in F.$$

Indication pour l'exercice 9 ▲

Supposer qu'il existe des réels $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ et des indices $\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_n$ (tout cela en nombre fini !) tels que

$$\lambda_1 f_{\alpha_1} + \dots + \lambda_n f_{\alpha_n} = 0.$$

Ici le 0 est la fonction constante égale à 0. Regarder quel terme est dominant et factoriser.

Indication pour l'exercice 10 ▲

1. Jamais.
 2. Jamais.
 3. Considérer un vecteur directeur de la droite.
-

Indication pour l'exercice 11 ▲

1. Non.
 2. Oui.
 3. Non.
 4. Non.
-

Indication pour l'exercice 12 ▲

1. Vrai.
 2. Vrai.
 3. Faux.
 4. Faux.
 5. Vrai.
-

Indication pour l'exercice 13 ▲

Soit

$$G = \{x \mapsto ax + b \mid (a, b) \in \mathbb{R}^2\}.$$

Montrer que G est un supplémentaire de F dans E .

Indication pour l'exercice 14 ▲

Pour une suite (u_n) qui converge vers ℓ regarder la suite $(u_n - \ell)$.

Correction de l'exercice 1 ▲

Pour qu'un ensemble E , muni d'une addition $x + y \in E$ (pour tout $x, y \in E$) et d'une multiplication par un scalaire $\lambda \cdot x \in E$ (pour tout $\lambda \in K, x \in E$), soit un K -espace vectoriel il faut qu'il vérifie les huit points suivants.

1. $x + (y + z) = (x + y) + z$ (pour tout $x, y, z \in E$)
2. il existe un vecteur nul $0 \in E$ tel que $x + 0 = x$ (pour tout $x \in E$)
3. il existe un opposé $-x$ tel que $x + (-x) = 0$ (pour tout $x \in E$)
4. $x + y = y + x$ (pour tout $x, y \in E$)
 Ces quatre premières propriétés font de $(E, +)$ un groupe abélien.
5. $1 \cdot x = x$ (pour tout $x \in E$)
6. $\lambda \cdot (x + y) = \lambda \cdot x + \lambda \cdot y$ (pour tout $\lambda \in K, x, y \in E$)
7. $(\lambda + \mu) \cdot x = \lambda \cdot x + \mu \cdot x$ (pour tout $\lambda, \mu \in K, x \in E$)
8. $(\lambda \times \mu) \cdot x = \lambda \cdot (\mu \cdot x)$ (pour tout $\lambda, \mu \in K, x \in E$)

Il faut donc vérifier ces huit points pour chacun des ensembles (ici $K = \mathbb{R}$).

Commençons par E_1 .

1. $f + (g + h) = (f + g) + h$; en effet on bien pour tout $t \in [0, 1] : f(t) + (g(t) + h(t)) = (f(t) + g(t)) + h(t)$ d'où l'égalité des fonctions $f + (g + h)$ et $(f + g) + h$. Ceci est vrai pour tout $f, g, h \in E_1$.
2. le vecteur nul est ici la fonction constante égale à 0, que l'on note encore 0, on a bien $f + 0 = f$ (c'est-à-dire pour tout $x \in [0, 1], (f + 0)(t) = f(t)$, ceci pour toute fonction f).
3. il existe un opposé $-f$ définie par $-f(t) = -(f(t))$ tel que $f + (-f) = 0$
4. $f + g = g + f$ (car $f(t) + g(t) = g(t) + f(t)$ pour tout $t \in [0, 1]$).
5. $1 \cdot f = f$; en effet pour tout $t \in [0, 1], (1 \cdot f)(t) = 1 \times f(t) = f(t)$. Et une fois que l'on compris que $\lambda \cdot f$ vérifie par définition $(\lambda \cdot f)(t) = \lambda \times f(t)$ les autres points se vérifient sans peine.
6. $\lambda \cdot (f + g) = \lambda \cdot f + \lambda \cdot g$
7. $(\lambda + \mu) \cdot f = \lambda \cdot f + \mu \cdot f$
8. $(\lambda \times \mu) \cdot f = \lambda \cdot (\mu \cdot f)$; en effet pour tout $t \in [0, 1], (\lambda \times \mu)f(t) = \lambda(\mu f(t))$

Voici les huit points à vérifier pour E_2 en notant u la suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$

1. $u + (v + w) = (u + v) + w$
2. le vecteur nul est la suite dont tous les termes sont nuls.
3. La suite $-u$ est définie par $(-u_n)_{n \in \mathbb{N}}$
4. $u + v = v + u$
5. $1 \cdot u = u$
6. $\lambda \cdot (u + v) = \lambda \cdot u + \lambda \cdot v$: montrons celui-ci en détails par définition $u + v$ est la suite $(u_n + v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et par définition de la multiplication par un scalaire $\lambda \cdot (u + v)$ est la suite $(\lambda \times (u_n + v_n))_{n \in \mathbb{N}}$ qui est bien la suite $(\lambda u_n + \lambda v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ qui est exactement la suite $\lambda \cdot u + \lambda \cdot v$.
7. $(\lambda + \mu) \cdot u = \lambda \cdot u + \mu \cdot v$
8. $(\lambda \times \mu) \cdot u = \lambda \cdot (\mu \cdot u)$

Voici ce qu'il faut vérifier pour E_3 , après avoir remarqué que la somme de deux polynômes de degré $\leq n$ est encore un polynôme de degré $\leq n$ (même chose pour $\lambda \cdot P$), on vérifie :

1. $P + (Q + R) = (P + Q) + R$
2. il existe un vecteur nul $0 \in E_3$: c'est le polynôme nul
3. il existe un opposé $-P$ tel que $P + (-P) = 0$
4. $P + Q = Q + P$
5. $1 \cdot P = P$

6. $\lambda \cdot (P + Q) = \lambda \cdot P + \lambda \cdot Q$
7. $(\lambda + \mu) \cdot P = \lambda \cdot P + \mu \cdot P$
8. $(\lambda \times \mu) \cdot P = \lambda \cdot (\mu \cdot P)$

Correction de l'exercice 2 ▲

1. (a) $(0, 0, 0) \in E_1$.
 (b) Soient (x, y, z) et (x', y', z') deux éléments de E_1 . On a donc $3x - 7y = z$ et $3x' - 7y' = z'$. Donc $3(x + x') - 7(y + y') = (z + z')$, d'où $(x + x', y + y', z + z')$ appartient à E_1 .
 (c) Soit $\lambda \in \mathbb{R}$ et $(x, y, z) \in E_1$. Alors la relation $3x - 7y = z$ implique que $3(\lambda x) - 7(\lambda y) = \lambda z$ donc que $\lambda(x, y, z) = (\lambda x, \lambda y, \lambda z)$ appartient à E_1 .
2. $E_2 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 - z^2 = 0\}$ c'est-à-dire $E_2 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x = z \text{ ou } x = -z\}$. Donc $(1, 0, -1)$ et $(1, 0, 1)$ appartiennent à E_2 mais $(1, 0, -1) + (1, 0, 1) = (2, 0, 0)$ n'appartient pas à E_2 qui n'est en conséquence pas un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^3 .
3. E_3 est un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^3 . En effet :
 (a) $(0, 0, 0) \in E_3$.
 (b) Soient (x, y, z) et (x', y', z') deux éléments de E_3 . On a donc $x + y - z = x + y + z = 0$ et $x' + y' - z' = x' + y' + z' = 0$. Donc $(x + x') + (y + y') - (z + z') = (x + x') + (y + y') + (z + z') = 0$ et $(x, y, z) + (x', y', z') = (x + x', y + y', z + z')$ appartient à E_3 .
 (c) Soit $\lambda \in \mathbb{R}$ et $(x, y, z) \in E_3$. Alors la relation $x + y - z = x + y + z = 0$ implique que $\lambda x + \lambda y - \lambda z = \lambda x + \lambda y + \lambda z = 0$ donc que $\lambda(x, y, z) = (\lambda x, \lambda y, \lambda z)$ appartient à E_3 .
4. Les vecteurs $(1, 0, 0)$ et $(0, 0, 1)$ appartiennent à E_4 mais leur somme $(1, 0, 0) + (0, 0, 1) = (1, 0, 1)$ ne lui appartient pas donc E_4 n'est pas un sous-espace vectoriel de \mathbb{R}^3 .

Correction de l'exercice 3 ▲

1. L'espace vectoriel \mathbb{R} a deux sous-espaces : celui formé du vecteur nul $\{0\}$ et \mathbb{R} lui-même.
 L'espace vectoriel \mathbb{R}^2 a trois types de sous-espaces : $\{0\}$, une infinité de sous-espaces de dimension 1 (ce sont les droites vectorielles) et \mathbb{R}^2 lui-même.
 Enfin, l'espace \mathbb{R}^3 a quatre types de sous-espaces : le vecteur nul, les droites vectorielles, les plans vectoriels et lui-même.
2. On considère deux droites vectorielles de \mathbb{R}^3 dont des vecteurs directeurs u et v ne sont pas colinéaires alors le vecteur $u + v$ n'appartient à aucune de ces deux droites, l'union de celles-ci n'est pas un espace vectoriel.

Correction de l'exercice 4 ▲

1. E_1 : non si $a \neq 0$ car alors $0 \notin E_1$; oui, si $a = 0$ car alors E_1 est l'intersection des sous-espaces vectoriels $\{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x + y = 0\}$ et $\{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x = 0\}$.
2. E_2 est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})$.
3. E_3 : non, car la fonction nulle n'appartient pas à E_3 .
4. E_4 : non, en fait E_4 n'est même pas un sous-groupe de $(\mathbb{R}^2, +)$ car $(2, 0) \in E_4$ mais $-(2, 0) = (-2, 0) \notin E_4$.

Correction de l'exercice 5 ▲

1. Sens \Leftarrow . Si $F \subset G$ alors $F \cup G = G$ donc $F \cup G$ est un sous-espace vectoriel. De même si $G \subset F$.
 Sens \Rightarrow . On suppose que $F \cup G$ est un sous-espace vectoriel. Par l'absurde supposons que F n'est pas inclus dans G et que G n'est pas inclus dans F . Alors il existe $x \in F \setminus G$ et $y \in G \setminus F$. Mais alors $x \in F \cup G$, $y \in F \cup G$ donc $x + y \in F \cup G$ (car $F \cup G$ est un sous-espace vectoriel). Comme $x + y \in F \cup G$ alors $x + y \in F$ ou $x + y \in G$.

- Si $x + y \in F$ alors, comme $x \in F$, $(x + y) + (-x) \in F$ donc $y \in F$, ce qui est absurde.
 - Si $x + y \in G$ alors, comme $y \in G$, $(x + y) + (-y) \in G$ donc $x \in G$, ce qui est absurde.
- Dans les deux cas nous obtenons une contradiction. Donc F est inclus dans G ou G est inclus dans F .

2. Supposons $G \subset F$.

- Inclusion \supset . Soit $x \in G + (F \cap H)$. Alors il existe $a \in G, b \in F \cap H$ tels que $x = a + b$. Comme $G \subset F$ alors $a \in F$, de plus $b \in F$ donc $x = a + b \in F$. D'autre part $a \in G, b \in H$, donc $x = a + b \in G + H$. Donc $x \in F \cap (G + H)$.
- Inclusion \subset . Soit $x \in F \cap (G + H)$. $x \in G + H$ alors il existe $a \in G, b \in H$ tel que $x = a + b$. Maintenant $b = x - a$ avec $x \in F$ et $a \in G \subset F$, donc $b \in F$, donc $b \in F \cap H$. Donc $x = a + b \in G + (F \cap H)$.

Correction de l'exercice 6 ▲

1.

$$\begin{aligned} & \alpha v_1 + \beta v_2 + \gamma v_3 = 0 \\ \Leftrightarrow & \alpha(2, 1, 4) + \beta(1, -1, 2) + \gamma(3, 3, 6) = (0, 0, 0) \\ \Leftrightarrow & (2\alpha + \beta + 3\gamma, \alpha - \beta + 3\gamma, 4\alpha + 2\beta + 6\gamma) = (0, 0, 0) \\ \Leftrightarrow & \begin{cases} 2\alpha + \beta + 3\gamma = 0 \\ \alpha - \beta + 3\gamma = 0 \\ 4\alpha + 2\beta + 6\gamma = 0 \end{cases} \\ \Leftrightarrow & \dots \quad (\text{on résout le système}) \\ \Leftrightarrow & \alpha = -2t, \beta = t, \gamma = t \quad t \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

Si l'on prend $t = 1$ par exemple alors $\alpha = -2, \beta = 1, \gamma = 1$ donne bien $-2v_1 + v_2 + v_3 = 0$.

Cette solution n'est pas unique, les autres coefficients qui conviennent sont les $(\alpha = -2t, \beta = t, \gamma = t)$ pour tout $t \in \mathbb{R}$.

2. Il s'agit donc de trouver un vecteur $v = (x, y, z)$ dans P_1 et P_2 et donc qui doit vérifier $x - y + z = 0$ et $x - y = 0$:

$$\begin{aligned} & v = (x, y, z) \in P_1 \cap P_2 \\ \Leftrightarrow & x - y + z = 0 \text{ et } x - y = 0 \\ \Leftrightarrow & \begin{cases} x - y - z = 0 \\ x - y = 0 \end{cases} \\ \Leftrightarrow & \dots \quad (\text{on résout le système}) \\ \Leftrightarrow & (x = t, y = t, z = 0) \quad t \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

Donc, si l'on fixe par exemple $t = 1$, alors $v = (1, 1, 0)$ est un vecteur directeur de la droite vectorielle D , une équation paramétrique étant $D = \{(t, t, 0) \mid t \in \mathbb{R}\}$.

Correction de l'exercice 7 ▲

1.

$$\begin{aligned}
 &(x, 1, y, 1) \in \text{Vect}\{v_1, v_2\} \\
 \iff &\exists \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad (x, 1, y, 1) = \lambda(1, 2, 3, 4) + \mu(1, -2, 3, -4) \\
 \iff &\exists \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad (x, 1, y, 1) = (\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda) + (\mu, -2\mu, 3\mu, -4\mu) \\
 \iff &\exists \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad (x, 1, y, 1) = (\lambda + \mu, 2\lambda - 2\mu, 3\lambda + 3\mu, 4\lambda - 4\mu) \\
 \implies &\exists \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad 1 = 2(\lambda - \mu) \text{ et } 1 = 4(\lambda - \mu) \\
 \implies &\exists \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad \lambda - \mu = \frac{1}{2} \text{ et } \lambda - \mu = \frac{1}{4}
 \end{aligned}$$

Ce qui est impossible (quelque soient x, y). Donc on ne peut pas trouver de tels x, y .

2. On fait le même raisonnement :

$$\begin{aligned}
 &(x, 1, 1, y) \in \text{Vect}\{v_1, v_2\} \\
 \text{iff } &\exists \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad (x, 1, 1, y) = (\lambda + \mu, 2\lambda - 2\mu, 3\lambda + 3\mu, 4\lambda - 4\mu) \\
 \iff &\exists \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad \begin{cases} x = \lambda + \mu \\ 1 = 2\lambda - 2\mu \\ 1 = 3\lambda + 3\mu \\ y = 4\lambda - 4\mu \end{cases} \\
 \iff &\exists \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad \begin{cases} \lambda = \frac{5}{12} \\ \mu = -\frac{1}{12} \\ x = \frac{1}{3} \\ y = 2 \end{cases} .
 \end{aligned}$$

Donc le seul vecteur $(x, 1, 1, y)$ qui convienne est $(\frac{1}{3}, 1, 1, 2)$.

Correction de l'exercice 8 ▲

Montrons d'abord que $E \subset F$. On va d'abord montrer que $v_1 \in F$ et $v_2 \in F$.

Tout d'abord $v_1 \in F \iff v_1 \in \text{Vect}\{w_1, w_2\} \iff \exists \lambda, \mu \quad v_1 = \lambda w_1 + \mu w_2$.

Il s'agit donc de trouver ces λ, μ . Cela se fait en résolvant un système (ici on peut même le faire de tête) on trouve la relation $7(2, 3, -1) = 3(3, 7, 0) - (5, 0, -7)$ ce qui donne la relation $v_1 = \frac{3}{7}w_1 - \frac{1}{7}w_2$ et donc $v_1 \in F$.

De même $7v_2 = -w_1 + 2w_2$ donc $v_2 \in F$.

Maintenant v_1 et v_2 sont dans l'espace vectoriel F , donc toute combinaison linéaire de v_1 et v_2 aussi, c'est-à-dire : pour tout λ, μ , on a $\lambda v_1 + \mu v_2 \in F$. Ce qui implique $E \subset F$.

Il reste à montrer $F \subset E$. Il s'agit donc d'écrire w_1 (puis w_2) en fonction de v_1 et v_2 . On trouve $w_1 = 2v_1 - v_2$ et $w_2 = v_1 + 3v_2$. Encore une fois cela entraîne $w_1 \in E$ et $w_2 \in E$ donc $\text{Vect}\{w_1, w_2\} \subset E$ d'où $F \subset E$.

Par double inclusion on a montré $E = F$.

Correction de l'exercice 9 ▲

À partir de la famille $(f_\alpha)_{\alpha \in \mathbb{R}}$ nous considérons une combinaison linéaire (qui ne correspond qu'à un nombre fini de termes).

Soient $\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_n$ des réels distincts que nous avons ordonnés, considérons la famille (finie) : $(f_{\alpha_i})_{i=1, \dots, n}$.

Supposons qu'il existe des réels $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ tels que $\sum_{i=1}^n \lambda_i f_{\alpha_i} = 0$. Cela signifie que, quelque soit $x \in \mathbb{R}$, alors $\sum_{i=1}^n \lambda_i f_{\alpha_i}(x) = 0$, autrement dit pour tout $x \in \mathbb{R}$:

$$\lambda_1 e^{\alpha_1 x} + \lambda_2 e^{\alpha_2 x} + \dots + \lambda_n e^{\alpha_n x} = 0.$$

Le terme qui domine est $e^{\alpha_1 x}$ (car $\alpha_1 > \alpha_2 > \dots$). Factorisons par $e^{\alpha_1 x}$:

$$e^{\alpha_1 x} (\lambda_1 + \lambda_2 e^{(\alpha_2 - \alpha_1)x} + \dots + \lambda_n e^{(\alpha_n - \alpha_1)x}) = 0.$$

Mais $e^{\alpha_1 x} \neq 0$ donc :

$$\lambda_1 + \lambda_2 e^{(\alpha_2 - \alpha_1)x} + \dots + \lambda_n e^{(\alpha_n - \alpha_1)x} = 0.$$

Lorsque $x \rightarrow +\infty$ alors $e^{(\alpha_i - \alpha_1)x} \rightarrow 0$ (pour tout $i \geq 2$, car $\alpha_i - \alpha_1 < 0$). Donc pour $i \geq 2$, $\lambda_i e^{(\alpha_i - \alpha_1)x} \rightarrow 0$ et en passant à la limite dans l'égalité ci-dessus on trouve :

$$\lambda_1 = 0.$$

Le premier coefficients est donc nul. On repart de la combinaison linéaire qui est maintenant $\lambda_2 f_2 + \dots + \lambda_n f_n = 0$ et en appliquant le raisonnement ci-dessus on prouve par récurrence $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = 0$. Donc la famille $(f_\alpha)_{\alpha \in \mathbb{R}}$ est une famille libre.

Correction de l'exercice 10 ▲

1. Si les deux droites vectorielles sont distinctes alors elles engendrent un plan vectoriel et donc pas \mathbb{R}^3 tout entier. Si elles sont confondues c'est pire : elles n'engendrent qu'une droite. Dans tout les cas elles n'engendrent pas \mathbb{R}^3 et ne sont donc pas supplémentaires.
2. Si P et P' sont deux plans vectoriels alors $P \cap P'$ est une droite vectorielle si $P \neq P'$ ou le plan P tout entier si $P = P'$. Attention, tous les plans vectoriels ont une équation du type $ax + by + cz = 0$ et doivent passer par l'origine, il n'existe donc pas deux plans parallèles par exemple. Donc l'intersection $P \cap P'$ n'est jamais réduite au vecteur nul. Ainsi P et P' ne sont pas supplémentaires.
3. Soit D une droite et P un plan, u un vecteur directeur de D . Si le vecteur u appartient au plan P alors $D \subset P$ et les espaces ne sont pas supplémentaires (ils n'engendrent pas tout \mathbb{R}^3). Si $u \notin P$ alors d'une part $D \cap P$ est juste le vecteur nul d'autre part D et P engendrent tout \mathbb{R}^3 ; D et P sont supplémentaires. Détaillons un exemple : si P est le plan d'équation $z = 0$ alors il est engendré par les deux vecteurs $v = (1, 0, 0)$ et $w = (0, 1, 0)$. Soit D une droite de vecteur directeur $u = (a, b, c)$.

Alors $u \notin P \iff u \notin \text{Vect}\{v, w\} \iff c \neq 0$. Dans ce cas on bien que d'une part que $D = \text{Vect}\{u\}$ intersecté avec P est réduit au vecteur nul. Ainsi $D \cap P = \{(0, 0, 0)\}$. Et d'autre part tout vecteur $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ appartient à $D + P = \text{Vect}\{u, v, w\}$. Il suffit de remarquer que $(x, y, z) - \frac{z}{c}(a, b, c) = (x - \frac{za}{c}, y - \frac{zb}{c}, 0) = (x - \frac{za}{c})(1, 0, 0) + (y - \frac{zb}{c})(0, 1, 0)$. Et ainsi $(x, y, z) = \frac{z}{c}u + (x - \frac{za}{c})v + (y - \frac{zb}{c})w$. Donc $D + P = \mathbb{R}^3$.

Bilan on a bien $D \oplus P = \mathbb{R}^3$: D et P sont en somme directe.

Correction de l'exercice 11 ▲

1. Non. Tout d'abord par définition $\text{Vect}\{v_1, v_2\} + \text{Vect}\{v_3\} = \text{Vect}\{v_1, v_2, v_3\}$, Nous allons trouver un vecteur de \mathbb{R}^4 qui n'est pas dans $\text{Vect}\{v_1, v_2\} + \text{Vect}\{v_3\}$. Il faut tâtonner un peu pour le choix, par exemple faisons le calcul avec $u = (0, 0, 0, 1)$.

$u \in \text{Vect}\{v_1, v_2, v_3\}$ si et seulement si il existe des réels α, β, γ tels que $u = \alpha v_1 + \beta v_2 + \gamma v_3$. Si l'on écrit les vecteurs verticalement, on cherche donc α, β, γ tels que :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \gamma \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ce qui est équivalent à trouver α, β, γ vérifiant le système linéaire :

$$\begin{cases} 0 = \alpha \cdot 1 + \beta \cdot 0 + \gamma \cdot 0 \\ 0 = \alpha \cdot 0 + \beta \cdot 0 + \gamma \cdot 1 \\ 0 = \alpha \cdot 0 + \beta \cdot 1 + \gamma \cdot 0 \\ 1 = \alpha \cdot 1 + \beta \cdot 0 + \gamma \cdot 0 \end{cases} \quad \text{qui équivaut à} \quad \begin{cases} 0 = \alpha \\ 0 = \gamma \\ 0 = \beta \\ 1 = \alpha \end{cases}$$

Il n'y a clairement aucune solution à ce système (les trois premières lignes impliquent $\alpha = \beta = \gamma = 0$ et cela rentre alors en contradiction avec la quatrième).

Un autre type de raisonnement, beaucoup plus rapide, est de dire que ces deux espaces ne peuvent engendrer tout \mathbb{R}^4 car il n'y a pas assez de vecteurs en effet 3 vecteurs ne peuvent engendrer l'espace \mathbb{R}^4 de dimension 4.

2. Oui. Notons $F = \text{Vect}\{v_1, v_2\}$ et $G = \text{Vect}\{v_4, v_5\}$. Pour montrer $F \oplus G = \mathbb{R}^4$ il faut montrer $F \cap G = \{(0, 0, 0, 0)\}$ et $F + G = \mathbb{R}^4$.

(a) Montrons $F \cap G = \{(0, 0, 0, 0)\}$. Soit $u \in F \cap G$, d'une part $u \in F = \text{Vect}\{v_1, v_2\}$ donc il existe $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ tels que $u = \alpha v_1 + \beta v_2$. D'autre part $u \in G = \text{Vect}\{v_4, v_5\}$ donc il existe $\gamma, \delta \in \mathbb{R}$ tels que $u = \gamma v_4 + \delta v_5$. On a écrit u de deux façons donc on a l'égalité $\alpha v_1 + \beta v_2 = \gamma v_4 + \delta v_5$. En écrivant les vecteurs comme des vecteurs colonnes cela donne

$$\alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \delta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Donc $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ est solution du système linéaire suivant :

$$\begin{cases} \alpha = 0 \\ 0 = \delta \\ \beta = 0 \\ \alpha = \gamma + \delta \end{cases}$$

Cela implique $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 0$ et donc $u = (0, 0, 0, 0)$. Ainsi le seul vecteur de $F \cap G$ est le vecteur nul.

(b) Montrons $F + G = \mathbb{R}^4$. $F + G = \text{Vect}\{v_1, v_2\} + \text{Vect}\{v_4, v_5\} = \text{Vect}\{v_1, v_2, v_4, v_5\}$. Il faut donc montrer que n'importe quel vecteur $u = (x_0, y_0, z_0, t_0)$ de \mathbb{R}^4 s'écrit comme une combinaison linéaire de v_1, v_2, v_4, v_5 . Fixons u et cherchons $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{R}$ tels que $\alpha v_1 + \beta v_2 + \gamma v_4 + \delta v_5 = u$. Après avoir considéré les vecteurs comme des vecteurs colonnes cela revient à résoudre le système linéaire :

$$\begin{cases} \alpha = x_0 \\ \delta = y_0 \\ \beta = z_0 \\ \alpha + \gamma + \delta = t_0 \end{cases}$$

Nous étant donné un vecteur $u = (x_0, y_0, z_0, t_0)$ on a calculé qu'en choisissant $\alpha = x_0, \beta = z_0, \gamma = t_0 - x_0 - y_0, \delta = y_0$ on obtient bien $\alpha v_1 + \beta v_2 + \gamma v_4 + \delta v_5 = u$. Ainsi tout vecteur est engendré par $F + G$.

Ainsi $F \cap G = \{(0, 0, 0, 0)\}$ et $F + G = \mathbb{R}^4$ donc $F \oplus G = \mathbb{R}^4$.

3. Non. Ces deux espaces ne sont pas supplémentaires car il y a trop de vecteurs ! Il engendrent tout, mais l'intersection n'est pas triviale. En effet on remarque assez vite que $v_5 = v_3 + v_4$ est dans l'intersection. On peut aussi obtenir ce résultat en résolvant un système.

4. Non. Il y a bien quatre vecteurs mais il existe des relations entre eux.

On peut montrer $\text{Vect}\{v_1, v_4\}$ et $\text{Vect}\{v_3, v_5\}$ ne sont pas supplémentaires de deux façons. Première méthode : leur intersection est non nulle, par exemple $v_4 = v_5 - v_3$ est dans l'intersection. Deuxième méthode : les deux espaces n'engendrent pas tout, en effet il est facile de voir que $(0, 0, 1, 0) \notin \text{Vect}\{v_1, v_4\} + \text{Vect}\{v_3, v_5\} = \text{Vect}\{v_1, v_4, v_3, v_5\}$.

Correction de l'exercice 12 ▲

Faisons d'abord une remarque qui va simplifier les calculs :

$$v_3 = 2v_1 + 3v_2.$$

Donc en fait nous avons $\text{Vect}\{v_1, v_2, v_3\} = \text{Vect}\{v_1, v_2\}$ et c'est un espace de dimension 2, c'est-à-dire un plan vectoriel. Par la même relation on trouve que $\text{Vect}\{v_1, v_2, v_3\} = \text{Vect}\{v_2, v_3\}$.

1. Vrai. $\text{Vect}\{(1, 1, 0, 0), (-1, 1, -4, 2)\}$ est inclus dans $\text{Vect}\{v_1, v_2, v_3\}$, car $(1, 1, 0, 0) = v_1 + v_2$ et $(-1, 1, -4, 2) = v_1 - v_2$. Comme ils sont de même dimension ils sont égaux (autrement dit : comme un plan est inclus dans un autre alors ils sont égaux).
2. Vrai. On a $(1, 1, 0, 0) = v_1 + v_2$ donc $(1, 1, 0, 0) \in \text{Vect}\{v_1, v_2\}$, or $\text{Vect}\{v_1, v_2\} = \text{Vect}\{v_2, v_3\} \subset \text{Vect}\{v_2, v_3, v_4\}$. Donc $(1, 1, 0, 0) \in \text{Vect}\{v_1, v_2\} \cap \text{Vect}\{v_2, v_3, v_4\}$.
3. Faux. Toujours la même relation nous donne que $\text{Vect}\{v_1, v_2\} \cap \text{Vect}\{v_2, v_3, v_4\} = \text{Vect}\{v_1, v_2\}$ donc est de dimension 2. C'est donc un plan vectoriel et pas une droite.
4. Faux. Encore une fois la relation donne que $\text{Vect}\{v_1, v_2\} + \text{Vect}\{v_2, v_3, v_4\} = \text{Vect}\{v_1, v_2, v_4\}$, or 3 vecteurs ne peuvent engendrer \mathbb{R}^4 qui est de dimension 4.
5. Vrai. Faire le calcul : l'intersection est $\{0\}$ et la somme est \mathbb{R}^4 .

Correction de l'exercice 13 ▲

Analysons d'abord les fonctions de E qui ne sont pas dans F : ce sont les fonctions h qui vérifient $h(0) \neq 0$ ou $h'(0) \neq 0$. Par exemple les fonctions constantes $x \mapsto b$, ($b \in \mathbb{R}^*$) ou les homothéties $x \mapsto ax$, ($a \in \mathbb{R}^*$) n'appartiennent pas à F .

Cela nous donne l'idée de poser

$$G = \{x \mapsto ax + b \mid (a, b) \in \mathbb{R}^2\}.$$

Montrons que G est un supplémentaire de F dans E .

Soit $f \in F \cap G$, alors $f(x) = ax + b$ (car $f \in G$) et $f(0) = b$ et $f'(0) = a$; mais $f \in F$ donc $f(0) = 0$ donc $b = 0$ et $f'(0) = 0$ donc $a = 0$. Maintenant f est la fonction nulle : $F \cap G = \{0\}$.

Soit $h \in E$, alors remarquons que pour $f(x) = h(x) - h(0) - h'(0)x$ la fonction f vérifie $f(0) = 0$ et $f'(0) = 0$ donc $f \in F$. Si nous écrivons l'égalité différemment nous obtenons

$$h(x) = f(x) + h(0) + h'(0)x.$$

Posons $g(x) = h(0) + h'(0)x$, alors la fonction $g \in G$ et

$$h = f + g,$$

ce qui prouve que toute fonction de E s'écrit comme somme d'une fonction de F et d'une fonction de G : $E = F + G$.

En conclusion nous avons montré que $E = F \oplus G$.

Correction de l'exercice 14 ▲

On note F l'espace vectoriel des suites constantes et G l'espace vectoriel des suites convergeant vers 0.

1. $F \cap G = \{0\}$. En effet une suite constante qui converge vers 0 est la suite nulle.
2. $F + G = E$. Soit (u_n) un élément de E . Notons ℓ la limite de (u_n) . Soit (v_n) la suite définie par $v_n = u_n - \ell$, alors (v_n) converge vers 0. Donc $(v_n) \in G$. Notons (w_n) la suite constante égale à ℓ . Alors nous avons $u_n = \ell + u_n - \ell$, ou encore $u_n = w_n + v_n$, ceci pour tout $n \in \mathbb{N}$. En terme de suite cela donne $(u_n) = (w_n) + (v_n)$. Ce qui donne la décomposition cherchée.

Bilan : F et G sont en somme directe dans E : $E = F \oplus G$.