

Résumé cours de Maths - 2eme Session

Algèbre Linéaire

18 mai 2015

Table des matières

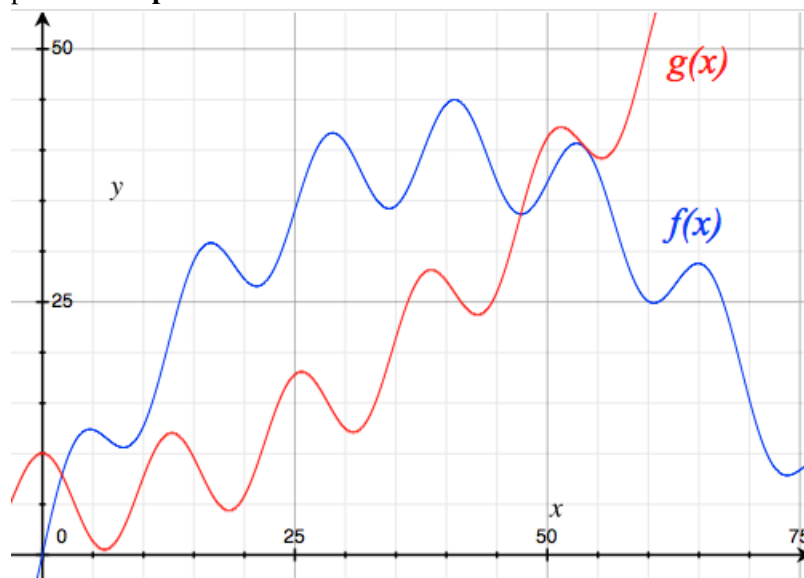
1	Introduction à l'algèbre linéaire	1
2	Vecteurs	1
2.1	Espace vectoriel	1
2.2	Applications linéaires	2
2.3	Sous-espaces vectoriels	4
2.3.1	Noyau et image	6
2.3.2	Combinaison linéaire	7
2.3.3	Famille génératrice	8
2.3.4	Famille libre/liée	9
2.3.5	Bases et dimensions	10
2.3.6	Relation d'équivalence	11
2.3.7	Retour sur Bases et dimensions	14
2.4	Matrices :	15

Contacts :
Henri Anciaux
Mail : henri.anciaux@gmail.com
Site : <http://homepages.ulb.ac.be/hanciaux/MATHF112.html>
Bureau : P.O.7.110

Lien de partage (Google Drive) des scans du cours théorique :
[LIEN - Cours théorique](#)

1 Introduction à l'algèbre linéaire

On retrouve l'algèbre linéaire aussi nombreux que varié dans les mathématiques. Et elle nous permet de pouvoir **simplifier les choses**.



$$f(x+h) \approx f(x) + h \times f'(x) \text{ (linéaire)}$$

Par exemple le Polynôme de Taylor (qui est un cas d'algèbre linéaire) nous permet de simplifier des expressions mathématiques en les linéarisant et donc de pouvoir résoudre certains calculs insolubles sans. Comme la formule d'oscillation du pendule : $y'' + \sin(y) = 0$ qui est une équation différentielle du second ordre impossible à résoudre, peut être simplifiée en $y'' + y = 0$. Elle est aussi utile dans les nuages de points, pour calculer une matrice puissance n , approximer des fonctions, etc...

2 Vecteurs

2.1 Espace vectoriel

Notation :

$\mathbb{K} = \mathbb{R}, \mathbb{C}, \{0, 1\}$ ou n'importe quel "corps".

Définition :

Un **espace vectoriel** sur \mathbb{K} (= "K-espace vectoriel") est un ensemble E muni de 2 opérations :

— **addition interne** : $+$: $E \times E \rightarrow E$ telle que, $\forall u, v, w \in E$:

1. $+$ est **commutative** $\Leftrightarrow v + w = w + v$
2. $+$ est **associative** $\Leftrightarrow u + (v + w) = (u + v) + w$
3. $+$ admet un **élément neutre** noté $\vec{0}_E$ ou $0 \Leftrightarrow 0 + v = v$
4. $+$ admet un **opposé** noté $-v \Leftrightarrow v + (-v) = 0$

— **Multiplication externe** : \cdot : $\mathbb{K} \times E \rightarrow E$ telle que, $\forall \lambda \in \mathbb{K}, v, w \in E$:

1. \cdot est **distributive à gauche** $\Leftrightarrow \lambda \cdot (v + w) = \lambda \cdot v + \lambda \cdot w$
2. \cdot est **distributive à droite** $\Leftrightarrow (v + w) \cdot \lambda = \lambda \cdot v + \lambda \cdot w$
3. \cdot est **associative** $\Leftrightarrow \lambda \cdot (\mu \cdot v) = (\lambda \cdot \mu) \cdot v$
4. \cdot admet un **élément neutre** $\Leftrightarrow 1 \cdot v = v$

Les éléments de E sont appelés vecteurs. Les 2 opérations $+$ et \cdot constituent une structure vectorielle.

Remarque :

Si E est un e.v. (= Espace Vectoriel),

$$\begin{cases} 0 \cdot v = \vec{0}_E \\ (-1) \cdot v = (-v) \end{cases}$$

Notation :

On appelle **scalaire** tout élément de \mathbb{K}

Théorème :

\mathbb{K}^n est un \mathbb{K} -e.v. (par exemple \mathbb{R}^n ou \mathbb{C}^n)

3 concepts fondamentaux :

1. **Applications linéaires**
2. **Sous-espaces vectoriels**
3. **Base et dimensions**

2.2 Applications linéaires

Définition :

Soient E et F , 2 e.v. sur le même corps \mathbb{K} .

Une application $u : E \rightarrow F$ est **linéaire** si elle préserve les structures vectorielles, c'est à dire les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} u(x + y) = u(x) + u(y) \quad \forall x, y \in E \\ u(\lambda \cdot x) = \lambda \cdot u(x) \quad \forall \lambda \in \mathbb{K}, x \in E \end{cases}$$

Exemple :

Les applications suivantes sont-elles linéaires ?

- $a : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 : (x, y) \mapsto (y, x)$
- $b : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 : (x, y) \mapsto (\sin(x), y)$

1) Si a est linéaire, elle doit respecter les 2 propriétés énoncées plus haut. Vérifions la première :
 $a(x + y) \stackrel{?}{=} a(x) + a(y)$.

Considérons (x, y) et (v, w) , 2 antécédents de a . Pour vérifier la première propriété, il faut que

$a((x, y) + (v, w)) = a(x, y) + a(v, w)$. Développons des 2 côtés :

(Gauche) $a((x, y) + (v, w)) = a(x + v, y + w)$

Maintenant on applique a qui va intervertir les coordonnées.

$a(x + v, y + w) = (y + w, x + v)$

(Droite) $a(x, y) + a(v, w) = (y, x) + (w, v) = (y + w, x + v)$.

Le coté gauche de l'équation est égal au coté droit, donc la première propriété est démontrée.

Maintenant il nous faut démontrer la seconde propriété : $a(\lambda \cdot x) \stackrel{?}{=} \lambda \cdot a(x)$

On choisit un couple (x, y) , antécédent de a . Une fois encore, on vérifie en développant des 2 côtés et on regarde s'ils sont égaux. Donc si $a(\lambda \cdot (x, y)) = \lambda \cdot a(x, y)$.

(Gauche) : $a(\lambda \cdot (x, y)) = a(\lambda x, \lambda y) = (\lambda y, \lambda x)$

(Droite) : $\lambda \cdot a(x, y) = \lambda \cdot (y, x) = (\lambda y, \lambda x)$.

Les côtés gauche et droit sont égaux, la seconde propriété est donc respectée. Comme les 2 propriétés ont été vérifiées et approuvées, a est linéaire.

2) (Même principe que plus haut, donc voir a pour les détails)

Si b est linéaire elle doit respecter les 2 propriétés énoncées plus haut. Vérifions la première :

$b(x + y) \stackrel{?}{=} b(x) + b(y)$ et donc $b((x, y) + (v, w)) = b(x, y) + b(v, w)$

(Gauche) : $b((x, y) + (v, w)) = b(x + v, y + w) = (\sin(x + v), y + w)$

(Droite) : $b(x, y) + b(v, w) = (\sin(x), y) + (\sin(v), w) = (\sin(x) + \sin(v), y + w)$

Or, $\sin(x + v) \neq \sin(x) + \sin(v) \forall x, v \in \mathbb{R}$, donc l'égalité est fausse. Comme nous avons une contradiction il n'est pas utile de vérifier la seconde propriété. b n'est pas linéaire. Il suffit de trouver un **contre-exemple** pour prouver qu'une hypothèse est fausse. Si l'on en trouve pas, il faut démontrer que les propriétés marchent dans notre cas. (Voir première séance d'exercice pour plus d'exercice sur les applications linéaires)

Remarque :

Si $u : E \rightarrow F$ est une application linéaire, alors $u(0_E) = 0_F$. Autrement dit, si le domaine de l'application ne contient pas l'élément neutre, alors elle est d'office pas linéaire (**Attention** cette affirmation n'est pas tout le temps vraie dans l'autre sens !).

Théorème :

Soit A , un ensemble quelconque, soit E un \mathbb{K} -e.v.

On écrit $E^A = \{u : A \rightarrow E\}$ l'ensemble des applications allant de A dans E . E^A a une structure vectorielle.

Définition :

Une application linéaire qui est bijective (injective et surjective) est appelée **isomorphisme**.

Rappel pour $f : E \rightarrow F$:

— f est injective \Leftrightarrow il n'existe pas 2 points qui ont la même image. Autrement dit, $f(v) = f(w) \Rightarrow v = w$.

ex : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto x^2$ n'est pas injective sur \mathbb{R} car pour $f(x) = 1$, on a $x^2 = 1 \Leftrightarrow x \in \{-1, 1\}$, mais elle est injective sur \mathbb{R}^+ ;

— f est surjective \Leftrightarrow tout les points de l'ensemble des images sont atteints. Autrement dit, $\forall w \in$

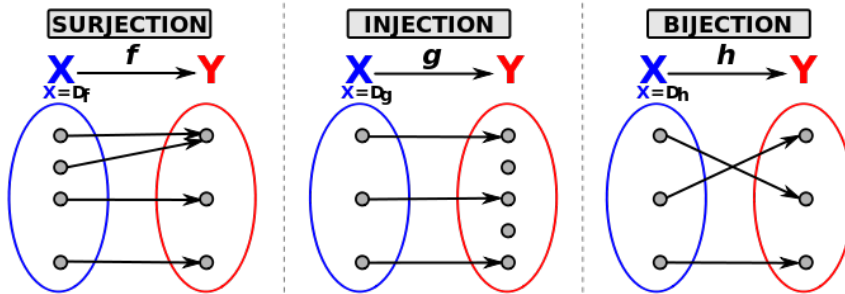
$F, \exists v \in Et.q. f(v) = w.$

ex : $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto x^2$ n'est pas surjective sur l'ensemble image \mathbb{R} car $\nexists x.t.q. f^2 = -1.$

Mais elle est surjective sur l'ensemble des images \mathbb{R}^+ ;

— f est bijective \Leftrightarrow l'application est à la fois injective et surjective. ex : $f : \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto x^3.$

Avec un schéma :



Exemple :

Comment prouver qu'une application est bijective ?

$u : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3 : (x, y, z) \mapsto (x + y - z, x - y, z)$

Si u est bijective, alors pour (a, b, c) fixé, il existe un unique élément $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ tel que $u(x, y, z) = (a, b, c)$. Nous avons donc un système d'équations !

$$\begin{cases} x + y - z = a \\ x - y = b \\ x = c \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = c \\ y = -b + c \\ z = -a - b + 2c \end{cases}$$

Il existe donc qu'une et une seule solution au système, donc l'application u est bijective. Si elle est également linéaire (ce qu'elle est, la démonstration est laissée en exercice), alors u est un isomorphisme.

Théorème :

$\mathbb{K}^{\{0,1\}} \sim \mathbb{K}^2$ (\sim veut dire *est comparable à*), c'est-à-dire qu'il existe un **isomorphisme canonique** : $\phi : \mathbb{K}^{\{0,1\}} \rightarrow \mathbb{K}^2.$

Soit A un ensemble fini : $\#A = n$ ($\#$ = cardinal = nombre d'éléments). $\mathbb{K}^A \sim \mathbb{K}^n \longrightarrow$ ils sont canoniquement isomorphes.

2.3 Sous-espaces vectoriels

Définition :

Soit E un \mathbb{K} -e.v. et $F \subset E$, un sous-ensemble de E . On dit que F est un **sous-espace vectoriel** de E si et seulement si :

$$\begin{cases} v + w \in F & \forall v, w \in F, v + w \in F \\ \lambda \cdot v \in F & \forall \lambda \in \mathbb{K}, v \in F \end{cases}$$

Théorème :

Soit $\{v\}$ où $v \neq 0_E$ n'est **pas** un e.v : $v + v = 2v \neq v$. Alors : $F = \{\lambda \cdot v \mid \lambda \in \mathbb{K}\}$ est sous-e.v. de E . On l'appelle également *droite vectorielle de E engendrée par v* .

Notation :

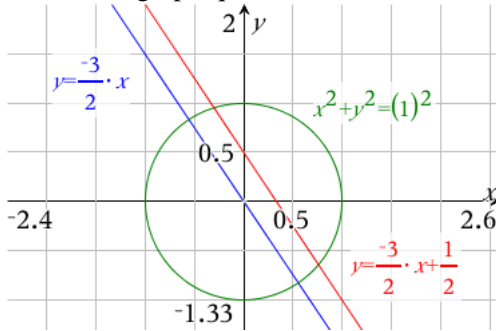
On note la droite vectorielle $\{\lambda \cdot v \mid \lambda \in \mathbb{K}\}$ de la manière suivante : $v\mathbb{K}$.

Exemple :

Pour $E = \mathbb{R}^2$, les sous-ensembles F_i ci dessous sont-ils des sous-espaces vectoriels de E ?

- $F_1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \text{t.q. } 3x + 2y = 0\}$
- $F_2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \text{t.q. } x^2 + y^2 = 1\}$
- $F_3 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \text{t.q. } 3x + 2y = 1\}$

Sur un graphique :



1) F_1 est-il un sous-e.v. ?

- soit (x, y) et (x', y') dans F_1 , est-ce que $(x, y) + (x', y') \in F_1$? $(x, y) + (x', y') = 3(x + x') + 2(y + y') = 3x + 3x' + 2y + 2y' = (3x + 2y) + (3x' + 2y') = 0 + 0 = 0 \in F_1$ étant donné que $3x + 2y = 0$ est notre "équation" de départ (voir énoncé). La première propriété pour que F_1 soit un sous-e.v. de E est donc vérifiée ;
- soit $(x, y) \in F_1$ et $\lambda \in \mathbb{R}$, est-ce que $\lambda(x, y) \in F_1$? $\lambda(x, y) = 3(\lambda x) + 2(\lambda y) = \lambda(3x + 2y) = \lambda \cdot 0 = 0 \in F_1$. La seconde propriété est vérifiée également, donc F_1 est un sous-e.v. de E . Nous pouvons aussi dire que $3x + 2y = 0$ est une droite vectorielle de E .

2) Prenons les points $(1, 0)$ et $(0, 1) \in F_2$. $(1, 0) + (0, 1) = (1, 1) \notin F_2$, car $1^2 + 1^2 = 2 \neq 1$. Donc grâce à un contre-exemple, nous pouvons affirmer que F_2 n'est pas un sous-e.v de E .

3) Idem que pour le 2) avec les points $(1, -1)$ et $(3, -4)$

Remarque :

Si F est un sous-ensemble de E , alors $0_E \in F$. Autrement dit, si le sous-ensemble F ne contient pas

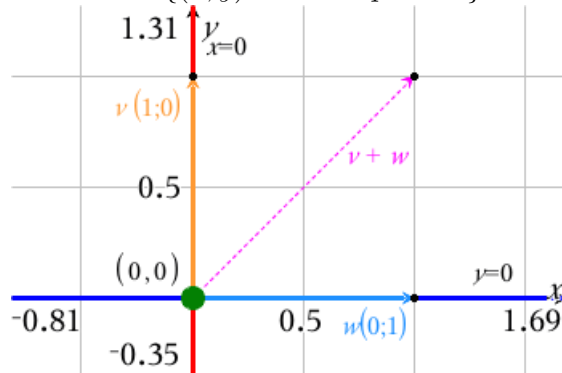
l'élément neutre de l'ensemble E auquel il appartient, il n'est pas un sous-e.v de cet ensemble. (Cette remarque aurait pu permettre de résoudre le 2) et 3) de l'exemple juste au dessus).

Théorème :

Si F_1 et F_2 sont des sous-e.v. de E , alors $F_1 \cap F_2$ est un sous-e.v. (attention, $F_1 \cup F_2$ ne l'est pas forcément).

Exemple :

Soient $F_1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid t.q. x = 0\}$ et $F_2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid t.q. y = 0\}$.



$F_1 \cap F_2$ est ici l'intersection des droites $x = 0$ et $y = 0$ qui est le singleton (ensemble de cardinal = 1) $(0; 0)$. L'union (\cup) est par exemple la somme du vecteur $v(1, 0)$ et $w(0, 1)$. $v + w = (1, 1) \notin F_1$ ni F_2 . Ce n'est donc pas un sous-e.v. de \mathbb{R} .

Théorème :

Si $(F_i)_{i \in I}$ ($I =$ n'importe quel ensemble) est une famille quelconque de sous-e.v., $\bigcap_{i \in I} F_i$ est un sous-e.v.

Théorème :

Y a-t-il une relation entre sous-espace vectoriel et application linéaire ?

Soit $u : E_1 \rightarrow E_2$, une application linéaire.

- Soit F_1 , un sous-e.v de E_1 , $u(F_1) = \{u(v) \mid t.q. v \in F_1\} (\subset E_2)$ est un sous-e.v. de E_2 ;
- soit F_2 , un sous-e.v de E_2 , $u^{-1}(F_2) = \{v \in E \mid t.q. u(v) \in F_2\}$ est sous-e.v de E_1

2.3.1 Noyau et image

Définition :

Pour toute application linéaire $u : E_1 \rightarrow E_2$, on définit $\text{Ker } u$ et $\text{Im } u$, tels que

$\text{Ker } u = u^{-1}(\{0_{E_2}\})$ est le *noyau* de u (sous-e.v. de E_1),

$\text{Im } u = u(E_1)$ est l'*image* de u (sous-e.v. de E_2).

Autrement dit, $\text{Ker } u = \{v \in E_1 \mid t.q. u(v) = 0_{E_2}\}$, ce qui signifie concrètement : *l'ensemble des éléments qui sont envoyés sur l'élément neutre de l'ensemble d'arrivée.*

$\text{Im } u = \{v \in E_2, \exists w \in E_1 \mid t.q. u(w) = v\}$. C'est donc le sous-ensemble de E_2 contenant les images de

tous les éléments de E_1 .

Exemple : (Ex 2 fiche 2)

On fixe un vecteur $v_0 \in \mathbb{R}^3$. On définit l'application $\Phi_1 : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3 : v \mapsto v \times v_0$. Déterminer le noyau Ker et l'image Im de Φ_1 .

2 méthodes sont possibles :

1. Par calculs :

Soit $v_0 = (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})$ fixé.

Φ_1 est le produit vectoriel de 2 vecteurs. Son noyau est donc l'ensemble des vecteurs $v \in \mathbb{R}^3$ tels que $v \times v_0 = (0, 0, 0)$.

Or $v \times v_0 = (v_y v_{0z} - v_z v_{0y}, v_z v_{0x} - v_x v_{0z}, v_x v_{0y} - v_y v_{0x})$.

$$v \times v_0 = (0, 0, 0) \Leftrightarrow \begin{cases} v_y v_{0z} - v_z v_{0y} = 0 \\ v_z v_{0x} - v_x v_{0z} = 0 \\ v_x v_{0y} - v_y v_{0x} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} v_x = v_z \frac{v_{0x}}{v_{0z}} \\ v_y = v_z \frac{v_{0y}}{v_{0z}} \\ 0 = 0 \end{cases}$$

Nous n'avons donc pas de contrainte pour v_z , il est donc toujours bon, peu importe sa valeur. (degré de liberté).

$$S = \left\{ z \frac{v_{0x}}{v_{0z}}, z \frac{v_{0y}}{v_{0z}}, z \right\} = z \left\{ \frac{v_{0x}}{v_{0z}}, \frac{v_{0y}}{v_{0z}}, 1 \right\}.$$

$\text{Ker } \Phi_1 = \mathbb{R} \left\{ \frac{v_{0x}}{v_{0z}}, \frac{v_{0y}}{v_{0z}}, 1 \right\} = \mathbb{R} \frac{1}{v_{0z}} \{v_{0x}, v_{0y}, v_{0z}\}$ qui est la droite vectorielle de \mathbb{R} engendrée par v_0 .

2. En utilisant la définition du produit vectoriel (rappel : $v \times w = 0_{\mathbb{R}^3} \Leftrightarrow v = \lambda w$) :

$\text{Ker } \Phi_1 = \{v \in \mathbb{R}^3 \mid \Phi_1(v) = v \times v_0 = 0_{\mathbb{R}^3}\} = \{v \in \mathbb{R}^3 \mid v = \lambda v_0\} = \{\lambda v_0 \mid \forall \lambda \in \mathbb{R}\} = \mathbb{R} v_0$
 $\mathbb{R} v_0$ est la droite vectorielle de \mathbb{R} engendrée par v_0 .

$\text{Im } \Phi_1 = \{w \in \mathbb{R}^3 \text{ pour lesquels } \exists v \in \mathbb{R}^3 \mid w = v \times v_0\} = \{w \in \mathbb{R}^3 \mid (w \perp v) \wedge (w \perp v_0)\}$, ce qui est le plan perpendiculaire à v_0 .

2.3.2 Combinaison linéaire

Définition :

Soient $v_1, \dots, v_n \in E$ (vecteurs) et $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$ (scalaires). On dit que $\sum_{i=1}^n \lambda_i v_i = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$ est une **combinaison linéaire** (c.l.) des vecteurs v_1, \dots, v_n .

Théorème :

$u : E_1 \rightarrow E_2$ est linéaire, ce qui signifie que pour toute c.l. $\sum_{i=1}^n \lambda_i v_i$, on a $u \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i v_i \right) = \sum_{i=1}^n \lambda_i u(v_i)$.

$F \subset E$ (avec E e.v. et F sous-e.v. de E), signifie que toute c.l. de F , $\sum_{i=1}^n \lambda_i v_i \in F$ pour $\lambda_i, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$, et $v_1, \dots, v_n \in F$.

Définition :

Soit $A \subset E$, un espace quelconque compris dans E , $\text{Vect } A$ (aussi noté $\langle A \rangle$) est défini ainsi :

$$\text{Vect } A \equiv \bigcap_{\substack{F, \text{ sous-e.v. de } E \\ \text{t.q. } A \subset F}} F \stackrel{\text{lemme}}{=} \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i v_i \mid \forall (\lambda_i, v_i) \in \mathbb{K} \times A \right\} \text{ est l'ensemble de toutes les c.l.}$$

possibles sur base des vecteurs de A .

$v \in \text{Vect } A \Leftrightarrow \exists (\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in \mathbb{K}^n \mid v = \sum_{i=1}^n \lambda_i a_i$ avec $a_i \in A$. $\text{Vect } A$ est un sous e.v. de E et on l'appelle l'**espace vectoriel engendré** par A .

Pour prouver ce lemme, il faut prouver que $\bigcap_{\substack{F, \text{ sous-e.v. de } E \\ \text{t.q. } A \subset F}} F$ et $\left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i v_i \mid \forall (\lambda_i, v_i) \in \mathbb{K} \times A \right\}$ sont

égaux. Il est possible d'utiliser le théorème de double inclusion pour cela. Rappel : soient A et B , 2 sous-ensembles de E . $A = B \Leftrightarrow (A \subset B) \wedge (B \subset A)$.

2.3.3 Famille génératrice

Définition :

Soit $A \subset E$, on dit que A est une **famille génératrice** (ou partie génératrice) si $\text{Vect } A = E$. Autrement dit, $\forall v \in E, \exists \lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}, v_1, \dots, v_n \in A \mid v = \sum_{i=1}^n \lambda_i v_i$

Lemmes :

- Si A est génératrice et $A \subset B$, alors B est génératrice.
- Soit A , une famille génératrice et $v \in A$, alors $A \setminus \{v\}$ est génératrice si et seulement si v est une c.l. de vecteurs de $A \setminus \{v\}$

Exemple :

Prenons $E = \mathbb{R}^3$. La famille $A = \{(0, 1, 0), (0, 0, 1), (1, 1, 1)\} \subset \mathbb{R}^3$ est-elle génératrice ?

Soit un vecteur quelconque (a, b, c) , $\exists ? (x, y, z)$ tel que $(a, b, c) \stackrel{?}{=} x(0, 1, 0) + y(0, 0, 1) + z(1, 1, 1)$? Ceci est équivalent à trouver une solution au système suivant :

$$\begin{cases} z = a \\ x + z = b \\ y + z = c \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = b - a \\ y = c - a \\ z = a \end{cases}$$

Étant donné que pour tout vecteur (a, b, c) , $\exists x, y, z \in \mathbb{R} \mid (a, b, c) = x(0, 1, 0) + y(0, 0, 1) + z(1, 1, 1)$, on peut affirmer que A est génératrice.

2.3.4 Famille libre/liée

Définition :

Soit $A \subset E$, un sous-ensemble de E quelconque, on dit que A est **libre** si la seule c.l. de vecteurs $\in A$ égale à 0_E est la c.l. nulle triviale. C'est à dire si $\sum_{i=1}^n \lambda_i v_i = 0_E$, avec $v_1, \dots, v_n \in A \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = 0$

Si une famille n'est pas libre, elle est **liée**.

Exemple :

1. Prenons $E = \mathbb{R}^2$, $A = \{(-2, 3), (2, -3)\}$. A est liée car $v_1 + v_2 = (-2, 3) + (2, -3) = (-2, 3) + (2, -3) = (0, 0) = 0_E$.
 A est donc liée car on a trouvé $\lambda_1 = \lambda_2 = 1 \neq 0$
2. Prenons $E = \mathbb{R}^3$, $A' = \{(1, 1, 3), (5, 2, -1), (4, 1, -4)\}$. A' est liée aussi car $v_1 - v_2 + v_3 = 0_E$.
 A' est donc liée car on a trouvé $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (1, -1, 1) \neq (0, 0, 0)$
3. Prenons $E = \mathbb{R}^3$, $A'' = \{(1, 1, 3), (5, 2, -1)\}$. À vu d'œil on ne sait pas dire si A'' est libre ou liée. Donc on résout le système, il faut donc essayer de trouver une c.l. des éléments de A'' égale à 0_E . C'est à dire : $\lambda_1(1, 1, 3) + \lambda_2(5, 2, -1) = 0_E = (0, 0, 0)$

Ce qui revient à résoudre le système :

$$\begin{cases} \lambda_1 + 5\lambda_2 = 0 \\ \lambda_1 + 2\lambda_2 = 0 \\ 3\lambda_1 - \lambda_2 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \lambda_1 = -5\lambda_2 \\ \lambda_1 = -2\lambda_2 \\ \lambda_1 = \frac{\lambda_2}{3} \end{cases} \Leftrightarrow \lambda_1 = \lambda_2 = 0$$

Donc A'' est libre !

Si on avait essayé de résoudre le système du 2, on aurait obtenu le calcul suivant :

$$\begin{cases} \lambda_1 + 5\lambda_2 + 4\lambda_3 = 0 \\ \lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3 = 0 \\ 3\lambda_1 - \lambda_2 - 4\lambda_3 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \lambda_1 = \lambda_3 \\ \lambda_2 = -\lambda_3 \end{cases} \Leftrightarrow \lambda_1 = -\lambda_2 = \lambda_3$$

Donc $\forall \lambda, \lambda v_1 - \lambda v_2 + \lambda v_3 = 0_E$. La réponse (contreexemple) que nous avons trouvée : $v_1 - v_2 + v_3 = 0_E$ correspondant au vecteur $(1, -1, 1)$ et correspond donc bien à une de nos réponses du système (avec $\lambda = 1$).

Définition :

Si A est libre, on dit que les vecteurs $\in A$ sont **linéairement indépendant** (l.i.), et si A est liée, alors on dit que ses vecteurs sont **linéairement dépendant** (l.d.).

Remarque :

Si $0_E \in A$, A ne peut pas être libre (donc elle est d'office liée) car $\lambda 0_E = 0_E \quad \forall \lambda$.

Lemme :

Soit A , une famille de E .

- $A \subset B$ est liée $\Rightarrow B$ est liée ;
- $A \supset B$ est libre $\Rightarrow B$ est libre ;
- A est libre et $v \in \text{Vect } A \Rightarrow \exists! (\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in \mathbb{K}^n \mid v = \sum_{i=1}^n \lambda_i v_i$ avec $v_1, \dots, v_n \in A$;
- A est libre et $v \in E \setminus A \Rightarrow A \cup \{v\}$ libre.

Théorème :

Si $A \subset E$ est libre, alors $v \in A \Rightarrow A \setminus \{v\}$ est libre et $(v \notin A) \wedge (A \cup \{v\} \text{ est libre}) \Leftrightarrow v \notin \text{Vect } A$.
 Si $A \subset E$ est génératrice, alors $(v \in A) \wedge (A \setminus \{v\} \text{ est génératrice}) \Leftrightarrow v \in \text{Vect } A \setminus \{v\}$ et $v \notin A \Rightarrow A \cup \{v\}$ est génératrice.

2.3.5 Bases et dimensions**Définition :**

Soit $B \subset E$ une partie de E .

Si B est libre et génératrice on dit que B est une **base**.

Soit E un e.v. alors E admet une base (et en fait beaucoup).

Toutes les bases de E ont le même nombre d'éléments. C'est la **dimension** de E

Exemple :

- $\dim(\mathbb{R}^n) = n$
- $\dim(\mathbb{R}^{\mathbb{N}}) = \infty$ (car \mathbb{N} à une infinité d'éléments)
- $v \in E, v \neq 0 \Rightarrow \dim(\mathbb{K}_v) = \dim(\text{vect}(\{v\})) = 1$ (que \vec{v})
- $\dim(\{ \vec{0}_E \}) = 0$ (par convention)

Théorème :

Si a est libre, il existe B telle que $a \subset B$, avec B une base.

Inversement, si a est génératrice, il existe une base B contenue dans a .

Autrement dit une famille qui sera libre/génératrice mais qui ne sera pas génératrice/libre, peut devenir une base (donc libre et génératrice), à condition qu'on rajoute/enlève des vecteurs correctement.

Exemple :

$a = \{(1; 0; 0)\} \rightarrow$ est libre (mais pas génératrice, on va donc essayer de rajouter des vecteurs dans a pour que ça devienne générateur (en restant libre))

$a' = \{(1; 0; 0); (1; 5; 3)\} \rightarrow$ est encore libre (mais toujours pas génératrice)

$a'' = \{(1; 0; 0); (1; 5; 3); (2; 5; 3)\} \rightarrow$ n'est plus libre (il existe une c.l : $v_3 = v_1 + v_2$). Il faut donc

faire attention aux vecteurs que l'on rajoute, car même si la famille était génératrice, elle ne serait pas une base car a'' n'est plus libre

$a = \{(1; 0; 0); (0; 1; 0); (0; 0; 1); (1; 1; 1); (4; 3; 21)\} \rightarrow$ est génératrice (mais pas libre par ex : $v_4 = v_1 + v_2 + v_3$), on va donc essayer d'enlever des vecteurs de a pour que cela devienne libre, tout en restant génératrice.

$a' = \{(1; 0; 0); (0; 1; 0); (0; 0; 1); (1; 1; 1)\} \rightarrow$ est encore génératrice (mais toujours pas libre)

$a'' = \{(1; 0; 0); (0; 1; 0); (0; 0; 1)\} \rightarrow$ est génératrice et libre, c'est donc une base.

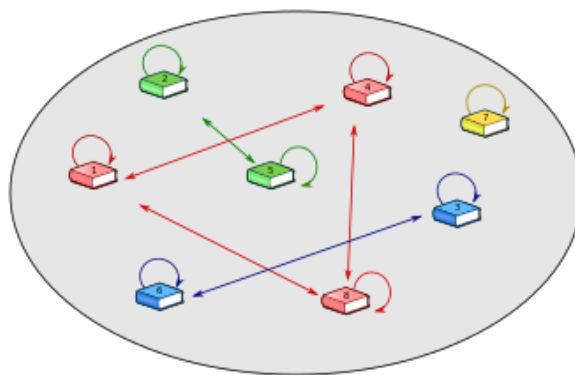
2.3.6 Relation d'équivalence

Définition :

Une **relation d'équivalence** dans un ensemble a (quelconque) est une **relation binaire** (relation entre paires d'éléments) de a , notée \sim .

Elle est :

1. **Réflexive** : $x \sim x \quad \forall x \in a$
(tout le monde est ami avec soi-même)
2. **Symétrique** : si $x \sim y$ alors $y \sim x \quad \forall x, y \in a$
(si je suis ami avec A, alors A est ami avec moi aussi)
3. **Transitive** : si $x \sim y$ et $y \sim z$ alors $x \sim z \quad \forall x, y, z \in a$
(les amis de mes amis, sont mes amis)



Notation :

$x \sim_p y$ s'écrit aussi communément $x \equiv y[p]$

Exemple :

La relation "être parallèle" ($//$) est une relation d'équivalence pour l'ensemble E des droites du plan.

1. **Réflexivité** : Toutes les droites sont parallèles à elle-même
2. **Symétrie** : Si $D // D'$ alors $D' // D$
3. **Transitivité** : Si $D // D'$ et que $D' // D''$ alors $D // D''$

Soit $p \in \mathbb{N}^*$. On dira que deux nombres entiers relatifs x et y sont congrus modulo p et on notera : $x \equiv y[p]$ si $x - y$ est un multiple de p . Prouver qu'il s'agit d'une relation d'équivalence et qu'il y a exactement p classes d'équivalences.

$x \equiv y[p]$ si $x - y$ est un multiple de p . Revient au même que : si p divise $x - y$

Si c'est une classe d'équivalences, alors elle respecte les 3 propriétés :

1. Réflexivité : $x \sim x$

$$x \stackrel{?}{\equiv} x[p] \rightarrow x - x = 0 \text{ (qui est bien un multiple de } p\text{)}$$

2. Symétrie : $x \sim y \Rightarrow y \sim x$

$$x \equiv y[p] \stackrel{?}{\Rightarrow} y \equiv x[p]$$

$$x \equiv y[p] \rightarrow x - y \text{ multiple de } p$$

$$y \equiv x[p] \rightarrow y - x \text{ multiple de } p \text{ ? } y - x = -1 \cdot (x - y) \text{ qui sont tout 2 multiple de } p \text{ OU si } p \text{ divise } x - y \text{ alors } p \text{ divise aussi } y - x$$

3. Transitivité : $x \sim y$ et $y \sim z \Rightarrow x \sim z$

$$x \sim y \rightarrow p \text{ divise } x - y \rightarrow x - y = q_1 \cdot p \quad q_1 \in \mathbb{Z}$$

$$y \sim z \rightarrow p \text{ divise } y - z \rightarrow y - z = q_2 \cdot p \quad q_2 \in \mathbb{Z}$$

En sommant les 2 équations :

$$(x - y) + (y - z) = (q_1 \cdot p) + (q_2 \cdot p) \Leftrightarrow x - z = p \cdot (q_1 + q_2)$$

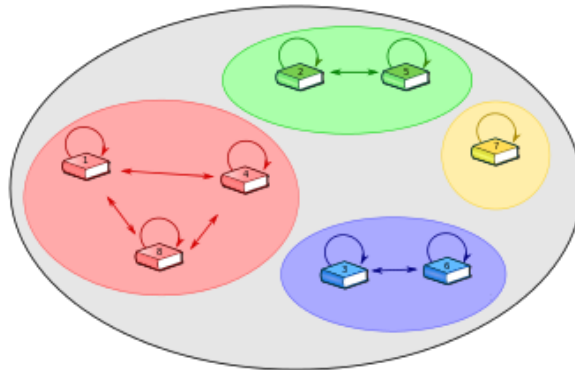
$$\text{Or } x \sim z \rightarrow x - z = p \cdot q_3 \rightarrow q_3 = (q_1 + q_2) \text{ qui est multiple de } p$$

Il s'agit donc bien d'une relation d'équivalence

Définition :

Soit a muni d'une **classe d'équivalence** \sim .

La classe d'un élément $x \in a$ est le sous-ensemble de a défini par : $[x]_N = \{y \in a \mid x \sim y\}$



Exemple :

(Classes d'équivalences des exemple précédent)

Le parallélisme, sur l'ensemble des droites du plan à comme classe les directions.

Sur l'ensemble \mathbb{Z} des entiers relatifs, la congruence modulo n (pour un entier n fixé) est une relation d'équivalence, dont les classes forment le groupe cyclique $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$. Qui correspond à :
 $\{x + p; x + 2p; \dots; x - p; x - 2p; \dots\} = \{x + kp \mid k \in \mathbb{Z}\} = x + p\mathbb{Z}$

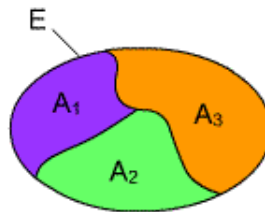
Théorème :

L'ensemble des classes d'équivalences de \sim forme une partition de E .

$(a_i)_{i \in I}$ famille de partie de $E : \forall i \in I, a_i \subset E$.

On dira que $(a_i)_{i \in I}$ est une partition de E si :

- $a_i \cap a_j = \emptyset$ si $i \neq j$ (pas d'intersection entre les familles)
- $\bigcup_{i \in I} a_i = E$ (l'union de toute les familles forme l'ensemble)



Définition :

$\{[x], x \in a\} = a / \sim$ et est appelé "quotient de a par \sim "

Exemple :

(Avec le modulo de l'exemple précédent)

$\mathbb{Z} / \sim_p = p \text{ éléments} := \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$

Pour $p = 2$ on a : $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \approx \{[0]; [1]\} = \{\{ \text{"pairs"} \text{ (multiples de 2)}; \text{"impairs"} \}\}$

Pour $p = 3$ on a donc : $\{\{ \text{"nombre \% 3 = 0"}; \text{"nombre \% 3 = 1"}; \text{"nombre \% 3 = 2"} \}\}$ (% est considéré comme le symbole du modulo comme en Python)

Théorème :

E/F (l'ensemble des classes d'équivalences) à une structure vectorielle canonique (E/F est un e.v. sur \mathbb{K})

Remarque :

Une autre relation d'équivalence :

Soient a et B 2 ensembles, on dira que a et B ont "le même cardinal" s'il existe une bijection $f : a \rightarrow B$ noté : $\#a = \#B$ (et revient en gros au nombres d'éléments de l'ensemble).

Notation :

Si $\#a = \#\{1; \dots; n\}$ on dira que A est fini et on notera $\#a = n$

Théorème :

On dira que $\#a \leq \#B$ s'il existe une injection $f : a \rightarrow B$

Contor-Bernstein : Si $\#a \leq \#B$ et $\#B \leq \#a$ alors $\#a = \#B$

Définition :

Si $\#a = \#\mathbb{N}$, on dit que a est **dénombrable**

Si $\#a = \#\mathbb{R}$, on dit que a à la puissance du continu

Propriétés :

- Si $\#a \leq \#\mathbb{N}$, soit a est fini, soit a est dénombrable
- Si $\#a = n$, $\#(P(a)) = 2^n$ ($P(a) = \{\text{sous-ensemble de } a\}$)
- Si $\#a = n$ et $\#B = m$, $\#(B^a) = m^n = \#B^{\#a}$ ($B^a = \{f : a \rightarrow B\}$)
- $\#\mathbb{Z} = \#\mathbb{N}$ (en pouvant, par exemple, associé les éléments pairs des éléments de \mathbb{N} aux éléments positifs de \mathbb{Z} et les impaires aux négatifs (Voir scan théorique page 17 pour détails)), du coup \mathbb{Z} est dénombrable, \mathbb{N}^2 aussi et également \mathbb{Q} .
- Mais \mathbb{R} n'est pas dénombrable, autrement dit : il n'existe pas de bijection : $f : \mathbb{N} \rightarrow \{0; \dots; 9\}^{\mathbb{N}} \Rightarrow \#\{0; \dots; 9\}^{\mathbb{N}} > \#\mathbb{N}$

2.3.7 Retour sur Bases et dimensions**Rappel :**

Soit E un e.v sur \mathbb{K} . Alors il existe de(s) base(s) noté B, B', B'', \dots

$\#B$ est appelé dimension de E

S'il existe une famille génératrice finie dans E , on dit que E est de **dimension finie**

Théorème :

Si j'ai 2 bases B et B' de E , alors $\#B = \#B'$.

Rappel :

Soit E_2 un e.v sur \mathbb{K} .

$E_2^{E_1} = \{f : E_1 \rightarrow E_2\}$ est un e.v. sur \mathbb{K} on suppose de plus que E_1 est un e.v. sur \mathbb{K} .

Définition :

$L(E_1, E_2) \subset E_2^{E_1}$, $L(E_1, E_2) = \{u : E_1 \rightarrow E_2 | u \text{ linéaire, c'est à dire : } u(\lambda \cdot v + w) = \lambda u(v) + u(w)\}$

Théorèmes :

- $L(E_1, E_2)$ est un sous e.v. de $E_2^{E_1}$
- Si $\dim(E_1) < +\infty$ et $\dim(E_2) < +\infty$, $\dim(L(E_1, E_2)) = \dim(E_1) \times \dim(E_2)$
- Si $\#a < +\infty$ et E un e.v. de dimension finie : $\dim(E^a) = (\dim(E))^{\#a}$

Théorème :

Soit E un e.v. sur \mathbb{K} , $B = \{e_1 ; \dots ; e_n\}$ base de E , $\dim(E) = n$

$\phi : \mathbb{K}^n \rightarrow E$

$(\lambda_1 ; \dots ; \lambda_n) \mapsto \sum_{i=1}^n \lambda_i e_i$ alors ϕ est un isomorphisme

2.4 Matrices :

Définition :

Soit $u : E \rightarrow E'$ avec E et E' 2 e.v sur \mathbb{K} avec

$B = \{e_1 ; \dots ; e_n\}$ base de E

$B' = \{e'_1 ; \dots ; e'_m\}$ base de E'

$$u(\phi(\lambda_1 ; \dots ; \lambda_n)) = \sum_{i,j=1}^{n,m} \lambda_i a_{j,i} e'_j \text{ (voir théorème précédent)}$$

$$\text{On dira que la matrice } M = [a_{j,i}]_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}$$

est la matrice associée à u dans les bases B et B' .

Exemple :

Soit $u : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$

$$u(x, y, z) = (x + 3y - z, y + 2z)$$

Trouver la matrice associée à u .

La base canonique de \mathbb{R}^3 est : $\{e_1, e_2, e_3\} = \{(1;0;0), (0;1;0), (0;0;1)\}$

La base canonique de \mathbb{R}^2 est : $\{e'_1, e'_2\} = \{(1;0), (0;1)\}$

Nous allons trouver les vecteurs de la base canonique de départ, associé à u :

$$u(e_1) = u((1;0;0)) = (1 + 3 \cdot 0; 0 + 2 \cdot 0) = (1;0) = e'_1$$

$$u(e_2) = u((0;1;0)) = (3;1) = 3 \cdot e'_1 + e'_2$$

$$u(e_3) = u((0;0;1)) = (-1;2) = -e'_1 + 2 \cdot e'_2$$

La matrice associée à u est les résultats précédents mis en colonnes :

$$\text{Matrice associée à } u = \begin{pmatrix} u(e_1) & u(e_2) & u(e_3) \\ 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Si l'on vérifie dans l'autre sens en utilisant la définition au dessus : $u(\lambda_1 ; \lambda_2 ; \lambda_3) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 \lambda_i a_{j,i} e'_j$

qui peut être interprété (pour les BG informaticiens :D) comme un `for` imbriqué en Python.

Si l'on décompose :

- $i = 1$:
 - $j = 1$: $\lambda_1 \cdot a_{1,1} \cdot e'_1 = \lambda_1 \cdot 1 \cdot (1; 0) = (\lambda_1; 0)$
 - $j = 2$: $\lambda_1 \cdot a_{2,1} \cdot e'_2 = \lambda_1 \cdot 0 \cdot (0; 1) = 0$
- $i = 2$:
 - $j = 1$: $\lambda_2 \cdot a_{1,2} \cdot e'_1 = \lambda_2 \cdot 3 \cdot (1; 0) = (3\lambda_2; 0)$
 - $j = 2$: $\lambda_2 \cdot a_{2,2} \cdot e'_2 = \lambda_2 \cdot 1 \cdot (0; 1) = (0; \lambda_2)$
- $i = 3$:
 - $j = 1$: $\lambda_3 \cdot a_{1,3} \cdot e'_1 = \lambda_3 \cdot (-1) \cdot (1; 0) = (-\lambda_3; 0)$
 - $j = 2$: $\lambda_3 \cdot a_{2,3} \cdot e'_2 = \lambda_3 \cdot 2 \cdot (0; 1) = (0; 2\lambda_3)$

La somme des 6 lignes donne : $(\lambda_1 + 3\lambda_2 - \lambda_3; \lambda_2 + 2\lambda_3)$

$u(\lambda_1 ; \lambda_2 ; \lambda_3) = (\lambda_1 + 3\lambda_2 - \lambda_3; \lambda_2 + 2\lambda_3)$ Ce qui est bien ce qu'on avait au départ (en remplaçant les λ par x, y et z)

Notation :

Les matrices sont aussi notées $\text{Mat}_{\mathbb{K}}(m, n)$ avec :

m = nombre de colonnes

n = nombre de lignes

Théorème :

Les matrices $\text{Mat}_{\mathbb{K}}(m, n)$ sont des e.v. sur \mathbb{K} .

Chaque matrice à sa "propre" application linéaire qui lui est associée.

Théorème :

Soit $u : E \rightarrow E'$ et $u' : E' \rightarrow E''$ avec E, E' et E'' e.v. sur \mathbb{K} .

Si $u \in L(E, E')$ et $u' \in L(E', E'')$, alors $u' \circ u \in L(E, E'')$

Soit :

$B = \{e_1 ; \dots ; e_n\}$ base de E

$B' = \{e'_1 ; \dots ; e'_n\}$ base de E'

$B'' = \{e''_1 ; \dots ; e''_n\}$ base de E''

$[a_{i,j}]$ matrice de u

$[b_{j,k}]$ matrice de u'

$[c_{i,k}]$ matrice de $u' \circ u$

$$(u' \circ u)(e_i) = \dots = \sum_{k=1}^p \left(\sum_{j=1}^m \underbrace{a_{i,j} \cdot b_{j,k}}_{c_{i,k}} \right) e''_k$$