

GÉOMÉTRIE DIFFÉRENTIELLE

2023-2024

Table des matières

1 Fonctions continues	1
2 Dérivée, dérivée partielle, différentielle	3
2.1 Différentiabilité des fonctions multi-variables	4
2.2 Deux points fins	6
2.3 La dérivée de composition	7
3 Inversion locale, fonctions implicites, théorème du rang	8
3.1 Théorème de l'application inverse	8
3.2 Théorème du rang	9
3.3 Théorème de fonctions implicites	11
4 Algèbre multilinéaire	12
4.1 L'espace dual E^*	12
4.2 Les applications multilinéaires	14
4.2.1 Quelques notations	15
4.3 Produit scalaire	20

1 Fonctions continues

$U \subseteq \mathbb{R}^n$ ouvert.
 $f : U \longrightarrow \mathbb{R}$ application.
 $f : (x_1, \dots, x_n) \longmapsto f(x_1, \dots, x_n)$
 f est continue en x_0 dans U si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, \forall x \in U, \|x - x_0\| < \delta \rightarrow |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon,$$

avec $\|y\| = \sqrt{y_1^2 + \dots + y_n^2}$.

On dit que f est une application continue quand f est continue en $x \in U$ pour tout $x \in U$.

Proposition 1.1. f est continue si et seulement si pour tout intervalle ouvert $J \subseteq \mathbb{R}$, $f^{-1}(J)$ est ouvert, avec $f^{-1}(J) := \{x \in U \mid f(x) \in J\}$.

Démonstration. 1. Si f est continue, alors $\forall J \subset \mathbb{R}$ intervalle ouvert, $f^{-1}(J)$ est ouvert.

Il faut montrer que $\forall x_0 \in f^{-1}(J)$, il existe $r > 0$ tel que $B(x_0, r) \subset f^{-1}(J)$.

$J = (a, b)$.

$x_0 \in f^{-1}(J) \implies f(x_0) \in J \implies a < f(x_0) < b \implies \exists \varepsilon > 0$ tel que

$$a < f(x_0) - \varepsilon < f(x_0) < f(x_0) + \varepsilon < b.$$

On peut choisir $\varepsilon = \min\{\frac{b-f(x_0)}{2}, \frac{f(x_0)-a}{2}\}$.

Donc il y a $\delta > 0$ tel que

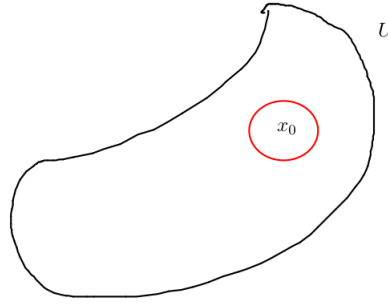


FIGURE 1 – Illustration

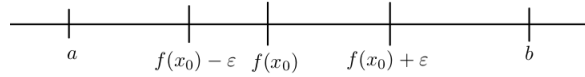


FIGURE 2 – On choisit ε de cette sorte

$$\begin{aligned}
 \|x - x_0\| < \delta &\implies |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon \\
 &\implies -\varepsilon < f(x) - f(x_0) < \varepsilon \\
 \implies f(x_0) - \varepsilon < f(x) < f(x_0) + \varepsilon &\implies a < f(x) < b \\
 &\implies f(x) \in J \implies x \in f^{-1}(J).
 \end{aligned}$$

Choisissons $r := \delta$

$$x \in B(x_0, r) \implies \|x - x_0\| < r = \delta.$$

On a démontré que avec ce choix de δ on a $x \in f^{-1}(J) \implies B(x_0, r) \subset f^{-1}(J)$.

2. Si $f^{-1}(J)$ ouvert pour tout intervalle $J \subset \mathbb{R}$, alors f est continue.

Fixons $x_0 \in U$: $\varepsilon > 0$ est donné.

On met $J = (f(x_0) - \varepsilon, f(x_0) + \varepsilon) \neq \emptyset$.

Par l'hypothèse, $f^{-1}(J)$ est ouvert, donc $\exists r > 0, B(x_0, r) \subset f^{-1}(J)$.

On met $\delta := r$.

$$\begin{aligned}
 \|x - x_0\| < \delta &\implies x \in B(x_0, \delta) = B(x_0, r) \\
 &\implies x \in f^{-1}(J) \implies f(x) \in J \\
 \implies f(x_0) - \varepsilon < f(x) < f(x_0) + \varepsilon &\implies -\varepsilon < f(x) - f(x_0) < \varepsilon \\
 &\implies |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon.
 \end{aligned}$$

□

On peut aussi généraliser ces définitions et la proposition aux cas où $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ est une application de U dans \mathbb{R}^m , avec

$$f(x_1, \dots, x_n) = (f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n)).$$

Exemple $f(x_1, x_2) = (x_1^2 + 3 \cos(x_2)e^{x_1 - x_2}), n = 2, m = 2, U = \mathbb{R}^2$.

Définition 1.1. f est continue en $x_0 \in U$ si

$$\begin{aligned}
 \forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, \forall x \in U, \|x - x_0\| < \delta &\implies \|f(x) - f(x_0)\| < \varepsilon, \\
 \text{avec } \|f(x) - f(x_0)\| &= \sqrt{(f_1(x) - f_1(x_0))^2 + \dots + (f_m(x) - f_m(x_0))^2}.
 \end{aligned}$$

Définition 1.2. $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ est continue quand f est continue en $x, \forall x \in U$.

Proposition 1.2. Les 3 conditions suivantes sont équivalentes.

1. $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ est continue ;
2. $\forall j \in \{1, \dots, m\}, f_j$ est continue ;
3. $\forall V \subseteq \mathbb{R}^m$ ensemble ouvert, $f^{-1}(V)$ est ouvert.

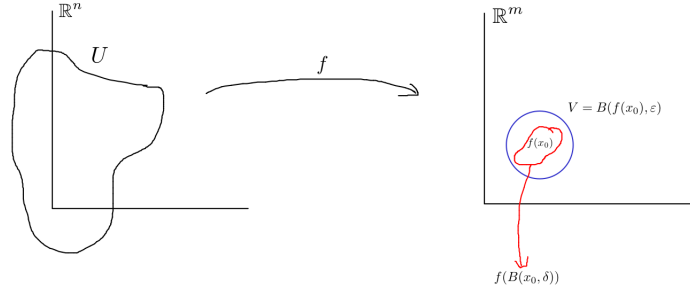


FIGURE 3 – Illustration pour 1.2

2 Dérivée, dérivée partielle, différentielle

$f : U \rightarrow \mathbb{R}$.

$x \in U$ fixé.

La dérivée partielle $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, pour $i \in \{1, \dots, n\}$ et $x = (x_1, \dots, x_n)$ est définie par

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_1, \dots, x_i + h, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{h}$$

si la limite existe.

Si $e_i \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur $e_i = (0, 0, \dots, 0, \overbrace{1}^{i\text{-ème}}, 0, \dots, 0)$ (tel que $\{e_1, \dots, e_n\}$ est la base standard de l'espace linéaire \mathbb{R}^n), on a

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x + he_i) - f(x)}{h}.$$

On peut aussi calculer les dérivées partielles de $\frac{\partial f}{\partial x_i}$. En général, pour tout $k \geq 1$,

$$\frac{\partial^k f}{\partial x_k \partial x_{k-1} \dots \partial x_2 \partial x_1} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial}{\partial x_{k-1}} \dots \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right) \right).$$

$i_1 \in \{1, \dots, n\}, \dots, i_k \in \{1, \dots, n\}$.

Pour $k = 1$, il y a n dérivées partielles.

Pour $k = 2, i_1 \rightarrow n$ choix de $\{1, \dots, n\}$.

$i_2 \rightarrow n$ choix.

Donc il y a n^2 choix.

En général, il y a n^k dérivées partielles différentes de l'ordre k .

Définition 2.1. $r \in \mathbb{N}$.

On dit que $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ est une application de classe C^r ou tout simplement f est C^r quand

1. Si $r = 0$, f est continue.

2. Si $r \geq 1$, f est continue et les dérivées partielles d'ordre k existent partout dans U et elles sont toutes les applications continues dans U et ceci pour tout $1 \leq k \leq r$.
3. Pour $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$, une application, on dit que f est \mathcal{C}^r si $\forall j \in \{1, \dots, m\}$, f_j est une application \mathcal{C}^r , avec $f = (f_1, \dots, f_m)$.
On dit que f est \mathcal{C}^∞ quand $\forall r \in \mathbb{N}$, f est \mathcal{C}^r .

2.1 Différentiabilité des fonctions multi-variables

$U \subseteq \mathbb{R}^n$ ouvert, $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $x = (x_1, \dots, x_n) \in U$, $f = (f_1, \dots, f_m)$.

On dit que f est différentiable à $x \in U$ quand il existe une application linéaire $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ telle que

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 \text{ si } \|h\| < \delta \text{ et } x + h \in U, \text{ alors } \|f(x + h) - (f(x) + L(h))\| < \varepsilon \|h\|.$$

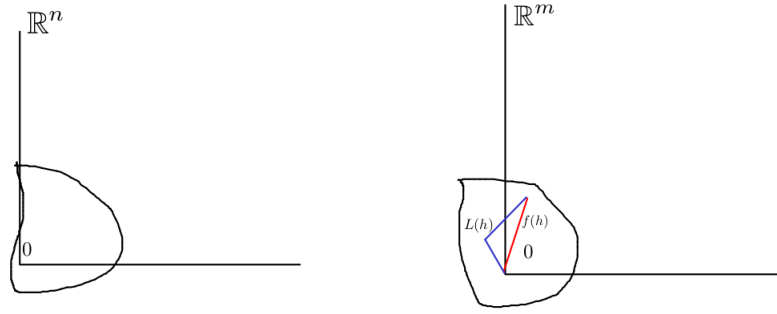


FIGURE 4 – Exemple illustratif avec $x = 0, f(0) = 0$

$$f \text{ différentiable en } 0 \text{ si } \forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, \|h\| < \delta \implies \|f(h) - L(h)\| < \varepsilon \|h\|.$$

Proposition 2.1. $n = 1, m = 1, f : I \rightarrow \mathbb{R}$ est différentiable selon la définition donnée sur un point $x \in I$ si et seulement si $f'(x)$ existe.

Démonstration.

1. *Sens direct :* f différentiable en $x \in I \implies f'(x)$ existe.

$\exists L : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ telle que

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, |h| < \delta, x + h \in I \implies \|f(x + h) - f(x) - L(h)\| < \varepsilon \|h\|.$$

$L(h) = ah$ pour un $a \in \mathbb{R}$ quelconque mais fixé.

a est la pente ou le coefficient directeur.

Prenons a la pente du graphe de L (comme L linéaire, $\exists a \in \mathbb{R}$ tel que $\forall h \in \mathbb{R}, L(h) = ah$).

On obtient

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, |h| < \delta, x + h \in I \implies |f(x + h) - f(x) - ah| \leq \varepsilon |h|.$$

On divise par $|h| \neq 0$ pour obtenir

$$\left| \frac{f(x + h) - f(x)}{h} - \frac{ah}{h} \right| \leq \varepsilon.$$

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 \text{ tel que } |h| < \delta, h + x \in I, \text{ alors } \left| \frac{f(x + h) - f(x)}{h} - a \right| \leq \varepsilon,$$

c'est à dire

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = a.$$

Donc $f'(x)$ existe et $f'(x) = a$.

2. *Sens réciproque* : $f'(x)$ existe $\implies f$ différentiable.

Si $f'(x)$ existe, on met $a := f'(x)$.

On définit $L(h) = ah$. On sait que

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = f'(x) = a.$$

Donc

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, |h| < \delta &\implies \left| \frac{f(x+h) - f(x)}{h} - a \right| \leq \varepsilon \\ &\implies |f(x+h) - f(x) - ah| \leq \varepsilon |h| \\ &\implies \forall h, |h| < \delta, \text{ on a } |f(x+h) - f(x) - ah| \leq \varepsilon |h|. \end{aligned}$$

f est différentiable selon notre définition avec $L(h) = ah$.

□

On suppose maintenant que $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m, U \subseteq \mathbb{R}^n$.

Pour $x \in U$, f différentiable en x si $\exists L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ linéaire telle que

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, \forall h \in \mathbb{R}^n, \|h\| < \delta, x+h \in U \implies \|f(x+h) - f(x) - L(h)\| \leq \varepsilon \|h\|.$$

On note $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) = \{T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \mid T \text{ est linéaire}\}$.

On écrit dans ce cas là que $Df(x) = L \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$.

En particulier, si f est différentiable pour tout $x \in U$, on obtient une application

$$Df : U \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m).$$

Rappel Chaque transformation linéaire est uniquement représentée par une matrice au cas où les bases des espaces de départ et d'arrivée sont fixées.

Si on choisit les bases standard $\alpha = \{e_1, \dots, e_n\}$ pour \mathbb{R}^n et $\beta = \{e_1, \dots, e_m\} \in \mathbb{R}^m, T \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$.

$$[T]_{\beta}^{\alpha} := A = [A_{ij}]_{m \times n}$$

et on a

$$T(e_j) = \sum_{i=1}^m A_{ij} e_i = \begin{pmatrix} A_{1j} \\ A_{2j} \\ \vdots \\ A_{mj} \end{pmatrix}.$$

C'est la j -ième colonne de la matrice A .

En particulier, pour chaque $x \in U$ où f est différentiable, en fixant les bases standard de \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^m , on peut supposer que $Df(x) \in \mathbb{R}^{m \times n}$.

On peut identifier $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$ avec $\mathbb{R}^{m \times n} = \{[A_{ij}], 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \mid A_{ij} \in \mathbb{R}\}$.

Avec cette identification, on peut utiliser la norme euclidienne de $\mathbb{R}^{m \times n}, \|A\| = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |A_{ij}|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$.

Comme ça on peut parler de continuité et de différentiabilité de l'application

$$Df : U \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) \simeq \mathbb{R}^{m \times n}.$$

Ou bien on peut encore identifier $\mathbb{R}^{m \times n}$ avec \mathbb{R}^{mn} . Alors $Df : U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{mn}$.
Donc on peut parler de continuité de Df , de dérivée de Df .
Pour $x \in U$, $D(Df)(x) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m))$.
On va noter $D(Df)$ par D^2f . Alors $D^2f(x) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)) = \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{m \times n})$.
 $D^2f : U \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{m \times n}) \simeq \mathbb{R}^{mn^2}$.

Théorème 1. $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ une application donnée et $r \in \mathbb{N}$.

f est de classe C^r si et seulement si $D^k f : U \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \dots))$ (de dimension mn^k) existe comme une application pour tout $1 \leq k \leq r$, et elle est en plus continue.

2.2 Deux points fins

En général, les dérivées partielles de f peuvent exister sans que Df soit définie.

Par exemple, dans \mathbb{R}^2 , on peut avoir f telle que $\frac{\partial f}{\partial x_1}(0)$ existe, $\frac{\partial f}{\partial x_2}$ existe, mais $Df(0)$ n'existe pas.

Par contre, si $Df(x_0)$ existe, alors toutes les dérivées partielles de f existent en x_0 .

Démonstration. Supposons que $Df(x_0)$ existe. Donc

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, \|h\| < \delta, x + h \in U \implies \|f(x) - f(x_0) - L(h)\| < \varepsilon \|h\|.$$

Fixons une direction $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$ et on met $h = t\vec{v}$, avec $\|\vec{v}\| \neq 0$. Donc $\|h\| = |t| \cdot \|\vec{v}\|$.
Donc

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, t < \frac{\delta}{\|\vec{v}\|}, x_0 + t\vec{v} \in U \implies |f(x_0 + t\vec{v}) - f(x_0) - tL(\vec{v})| < \varepsilon |t| \|\vec{v}\|.$$

On pose $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon \|\vec{v}\|$ et $\tilde{\delta} = \frac{\delta}{\|\vec{v}\|}$.

$$\begin{aligned} \forall \tilde{\varepsilon} > 0, \exists \tilde{\delta} > 0 \text{ tel que } |t| < \tilde{\delta} &\implies \|f(x_0 + t\vec{v}) - f(x_0) - tL(\vec{v})\| \leq \tilde{\varepsilon} \\ \forall \tilde{\varepsilon} > 0, \exists \tilde{\delta} > 0, |t| < \tilde{\delta} &\implies \left\| \frac{1}{t} (f(x_0 + t\vec{v}) - f(x_0)) - L(\vec{v}) \right\| \leq \tilde{\varepsilon} \\ &\implies \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (f(x_0 + t\vec{v}) - f(x_0)) = L(\vec{v}) = Df(x_0)(\vec{v}). \end{aligned}$$

On définit

$$D_{\vec{v}}f(x_0) := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (f(x_0 + t\vec{v}) - f(x_0)).$$

Donc si $Df(x_0)$ existe, la dérivée directionnelle de f en x_0 dans une direction $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$ existe et on a

$$D_{\vec{v}}f(x_0) = Df(x_0)(\vec{v}) \in \mathbb{R}^m.$$

En particulier, si $\vec{v} = e_j, 1 \leq j \leq n$,

$$\frac{\partial f}{\partial x_j}(x_0) = D_{e_j}f(x_0) = Df(x_0)(e_j).$$

□

Il se peut que toutes les dérivées directionnelles $D_{\vec{v}}f(x_0)$ existent pour tout $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$ alors que $Df(x_0)$ n'existe pas.

Théorème 2. Si $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m, x_0 \in U$.

Si $Df(x_0)$ existe, alors f est continue en x_0 .

Démonstration. En exercice.

□

Il se peut que toutes les dérivées directionnelles $D_{\vec{v}}f(x_0)$ existent pour tout $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$ en $x_0 \in U$ sans que pour autant f soit continue en x_0 .

Si la matrice de $Df(x_0)$ est donnée par $[A_{ij}]_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}}$.

$$\forall j \in \{1, \dots, n\}, A_{e_j} = \frac{\partial f}{\partial x_j}(x_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_j}(x_0) \\ \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_j}(x_0) \end{bmatrix}.$$

$$Df = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}.$$

C'est la matrice jacobienne de f .

2.3 La dérivée de composition

$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, (g \circ f)'(x) = g'(f(x))f'(x)$.

$f : U \rightarrow \mathbb{R}^m, g : V \rightarrow \mathbb{R}^p$.

Supposons que pour $x_0 \in U, f(x_0) \in V$.

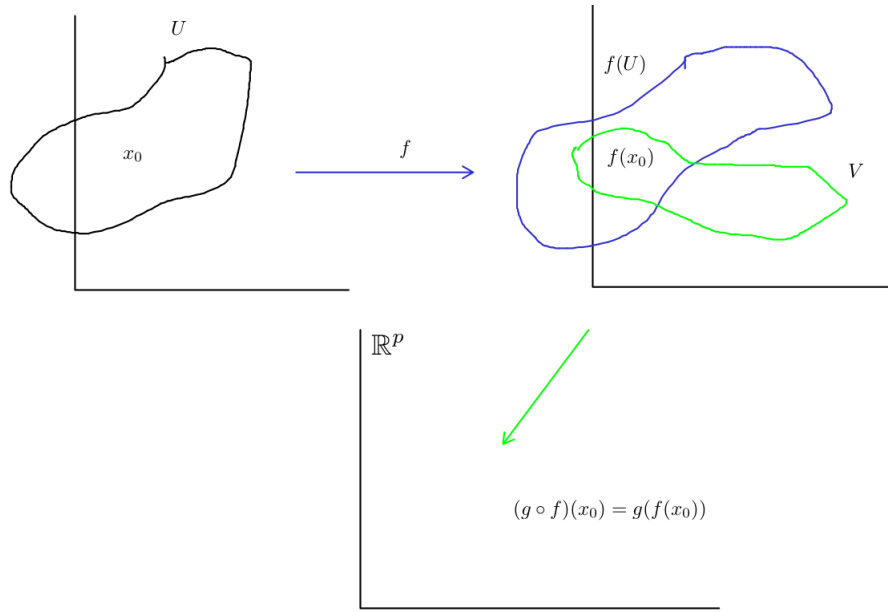


FIGURE 5 – La différentiation composée

Si f est continue, $g \circ f$ est définie dans un voisinage de x_0 , par exemple dans une boule ouverte $B(x_0, r) = \tilde{U} \subset U \cap f^{-1}(V)$.

$g \circ f : \tilde{U} \rightarrow \mathbb{R}^p$.

Supposons que les trois dérivées $Df(x_0), Dg(f(x_0)), D(g \circ f)(x_0)$ existent.

$Df(x_0) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$.

$D(g(f(x_0))) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$.

$D(g \circ f) \in (\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p)$.

Théorème 3. Supposons que f est dérivable en $x_0 \in U$ avec la dérivée $Df(x_0)$ et g est dérivable en $f(x_0) \in V$ avec la dérivée $Dg(f(x_0))$, alors $g \circ f$ est bien dérivable en $x_0 \in U$ et

$$D(g \circ f)(x_0) = Dg(f(x_0)) \circ Df(x_0).$$

Si on utilise les matrices jacobiniennes de chaque dérivée ($1 \leq k \leq m, 1 \leq j \leq n, 1 \leq i \leq p$),

$$\left[\frac{\partial(g \circ f)_i}{\partial x_j} \right]_{p \times n}(x_0) = \left[\frac{\partial g_i}{\partial y_k} \right]_{p \times m}(f(x_0)) \times \left[\frac{\partial f_k}{\partial x_j} \right]_{m \times n}(x_0).$$

$$\left[\frac{\partial z_i}{\partial x_j} \right](x_0) = \left[\frac{\partial z_i}{\partial y_k} \right](f(x_0)) \times \left[\frac{\partial y_k}{\partial x_j} \right](x_0).$$

On a :

$$\frac{\partial z_i}{\partial x_j}(x_0) = \sum_{k=1}^n \frac{\partial z_i}{\partial y_k}(f(x_0)) \frac{\partial y_k}{\partial x_j}(x_0).$$

$f : U \rightarrow \mathbb{R}^m, U \subseteq \mathbb{R}^n, V = f(U)$ est ouvert et $g : V \rightarrow \mathbb{R}^n$ est l'inverse de f .

Donc $g \circ f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ et $g \circ f = \mathbb{1}_U$.

Si en plus f et g sont différentiables, alors $m = n$ et $\forall x \in U, Dg(f(x)) = (Df(x))^{-1}$, c'est à dire en particulier $Df(x)$ est une transformation linéaire inversible.

Démonstration. Si f est dérivable en $x \in U$ et g dérivable en $f(x) \in V$, $\mathbb{1} = g \circ f$ dérivable en x_0 et

$$D\mathbb{1}_U(x_0) = D(g(f(x_0))) \circ Df(x_0).$$

$$\mathbb{1}_U(x) = x \implies D\mathbb{1}_U(x_0) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n).$$

Donc

$$\mathbb{1}_{\mathbb{R}^n} = Dg(f(x_0)) \circ Df(x_0).$$

Ainsi comme g est linéaire de f on a $f \circ g = \mathbb{1}_V$, donc

$$\mathbb{1}_{\mathbb{R}^m} = Df(x_0) \circ Dg(f(x_0)).$$

□

Lemme. Si $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ est une fonction linéaire, $\vec{b} \in \mathbb{R}^m$ et $T(x) = L(x) + \vec{b}$, $T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$.
Ainsi T est différentiable dans \mathbb{R}^n et

$$\forall x \in \mathbb{R}^n, DT(x) = L.$$

Dans ce cas, $DT : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$ est une application constante (les dérivées partielles de T aussi).

3 Inversion locale, fonctions implicites, théorème du rang

Théorème 4 (de Bronner). Si $U \subseteq \mathbb{R}^n, V \subseteq \mathbb{R}^m, h : U \rightarrow V$ est un homéomorphisme (i. e. h continue, inversible et d'inverse **continue** $h^{-1} : V \rightarrow U$), alors $m = n$.

3.1 Théorème de l'application inverse

Théorème 5 (De l'application inverse). $U \subseteq \mathbb{R}^n, x_0 \in U, f : U \rightarrow \mathbb{R}^n, f$ est de classe C^1 . Supposons que $Df(x_0) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ est inversible.

Alors il existe des ensembles ouverts $W \subset U, x_0 \in W$ et $V \subseteq \mathbb{R}^n$ tels que $f|_W : W \rightarrow V$ est inversible. L'inverse $(f|_W)^{-1} : V \rightarrow W$ est aussi de classe C^1 .

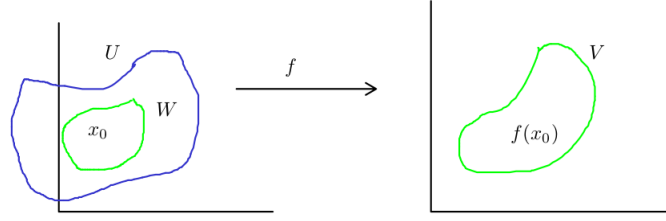


FIGURE 6 – Fonctions inversibles

Remarque. Si en plus f est de classe \mathcal{C}^r , alors $(f|_W)^{-1}$ est aussi de classe \mathcal{C}^r .

Notons que $\forall y \in V, x \in W, f(x) = y$,

$$(D(f|_W)^{-1})(y) = (Df(x))^{-1}.$$

En particulier, il existe W tel que $Df(x)$ est inversible pour tout $x \in W$.

3.2 Théorème du rang

20-09-2023

Théorème 6 (Du rang). $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^n$ de classe \mathcal{C}^r , $r \geq 1$. Supposons que $\forall x \in U$,

$$\text{rang}(Df(x)) \equiv k,$$

où $1 \leq k \leq m$ est fixé.

($Df(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, donc $0 \leq \text{rang}(Df(x)) \leq m$).

Soit $x_0 \in U$. Alors il y a des ouverts $W \subseteq \mathbb{R}^n, V \subseteq \mathbb{R}^m, x_0 \in W, f(x) \in V$, 2 applications de classe \mathcal{C}^r inversibles

$$\begin{aligned} \varphi : W &\rightarrow W', \varphi(x_0) = 0, W' \subseteq \mathbb{R}^n \\ \psi : V &\rightarrow V', \psi(f(x_0)) = 0, V' \subseteq \mathbb{R}^m \end{aligned}$$

telles que $\forall z \in W', z = (z_1, \dots, z_n)$,

$$\psi \circ f \circ \varphi^{-1}(z_1, z_2, \dots, z_n) = (z_1, z_2, \dots, z_k, 0, \dots, 0).$$

En particulier, $f(W)$ est un objet de dimension k , de régularité \mathcal{C}^r (Si $m = 3, k = 2$, $f(W)$ est une surface de classe \mathcal{C}^r) et pour tout $y \in f(W)$, $f^{-1}(y)$ est un objet de dimension $n - k$ de régularité \mathcal{C}^r .

On note que les deux applications φ et ψ sont de classe \mathcal{C}^r et inversibles. On peut démontrer que dans ce cas-là, les inverses φ^{-1} et ψ^{-1} sont aussi de classe \mathcal{C}^r .

$$D\varphi^{-1}(y) = (D\varphi(\varphi^{-1}(y)))^{-1}, y \in W'.$$

φ^{-1} étant continue, $D\varphi$ étant continue, l'inverse d'une matrice étant continue tant que $\det \neq 0$, φ est de classe \mathcal{C}^1 inversible $\implies \varphi^{-1}$ est de classe \mathcal{C}^1 .

Définition 3.1 (Difféomorphisme). Soient $U, U' \subseteq \mathbb{R}^n$ ouverts.

Si $\varphi : U \rightarrow U'$ est une application de classe \mathcal{C}^r , avec l'inverse $\varphi^{-1} : U' \rightarrow U$ de classe \mathcal{C}^r , on dit que φ est un difféomorphisme de classe \mathcal{C}^r .

Remarque (Le théorème de rang dans le cas spécial où f est linéaire). Soit $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $\text{rang}(L) = k, 0 \leq k \leq m$, alors il existe deux bases α_n et β_m pour \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^m telles que

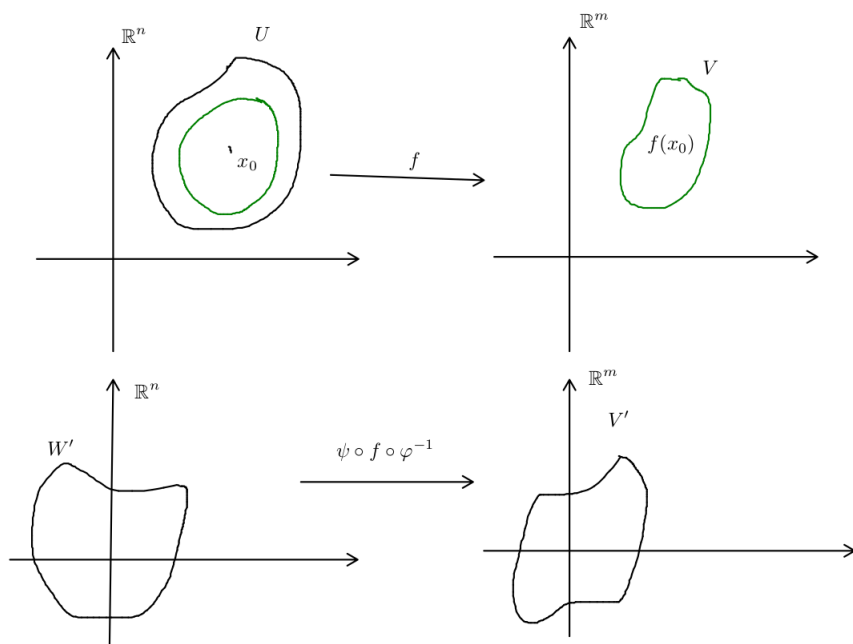


FIGURE 7 – Illustration du théorème de rang

$$[L]_{\alpha_n}^{\beta_m} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{m \times n}.$$

(En exercice).

Corollaire. $U \subseteq \mathbb{R}^n, f : U \rightarrow \mathbb{R}^m, f$ est $\mathcal{C}^r, r \geq 1$.

Supposons que pour $x_0 \in U$, $Df(x_0)$ est injective. $Df(x_0) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$. Alors il existe un voisinage W de x_0 tel que f est injective sur W .

Pour $x \in U$,

$$Df(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{m \times n}.$$

Si $Df(x_0)$ est injective, $\text{rang}(Df(x_0)) = n$ ($m \geq n$). On obtient une sous-matrice de $Df(x)$ de taille $n \times n$ inversible.

Lemme (D'algèbre linéaire). $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Alors $\text{rang } A = n$ si et seulement si il existe une sous-matrice $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ de A telle que $\det B \neq 0$.

(En exercice).

Alors sous les hypothèse du corollaire 3.2, $\text{rang } Df(x) \equiv n$ dans un voisinage W de x_0 , appliquant le théorème du rang

$$\tilde{f} = \varphi \circ f \circ \varphi^{-1}(z_1, \dots, z_n) = (z_1, \dots, z_n, 0, \dots, 0)$$

qui est injectif.

Corollaire. Les mêmes hypothèses que dans le corollaire 3.2.

Si $Df(x_0)$ est surjective, alors il existe un voisinage ouvert $V \subseteq f(U)$ de $f(x_0)$ (c'est à dire $f(x_0)$ est un point intérieur de $f(U)$) tel que f est surjective sur V .

Argument à travers l'observation de l'algèbre linéaire qui dit que si $\text{rang}(A) = m, m \leq n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, il y a une sous-matrice $B \in \mathbb{R}^{m \times m}$ tel que $\det(B) \neq 0$.

Théorème de rang : $k = m \leq n$.

Les détails en exercice.

3.3 Théorème de fonctions implicites

Théorème 7 (De fonctions implicites). $U \subseteq \mathbb{R}^n, V \subseteq \mathbb{R}^m, F : U \times V \rightarrow \mathbb{R}^m$ une application $\mathcal{C}^r, r \geq 1$.

$(x_0, y_0) \in U \rightarrow V$ donné.

$$DF(x_0) \in \mathbb{R}^{m \times (m+n)}$$

et

$$DF(x_0) = \left[\frac{\partial F}{\partial x_1} \quad \cdots \quad \frac{\partial F}{\partial x_n} \quad | \quad \frac{\partial F}{\partial y_1} \quad \cdots \quad \frac{\partial F}{\partial y_m} \right]_{m \times (m+n)}.$$

Pour tout $(x_0, y_0) \in U \times V, DyF(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^{m \times m}$. Supposons que $DyF(x_0)$ est inversible. Alors il existe un voisinage W de x_0 dans U et une application $\mathcal{C}^r f : W \rightarrow V$ telle que $f(x_0) = y_0$ et

$$\forall x \in W, F(x, f(x)) = F(x_0, y_0).$$

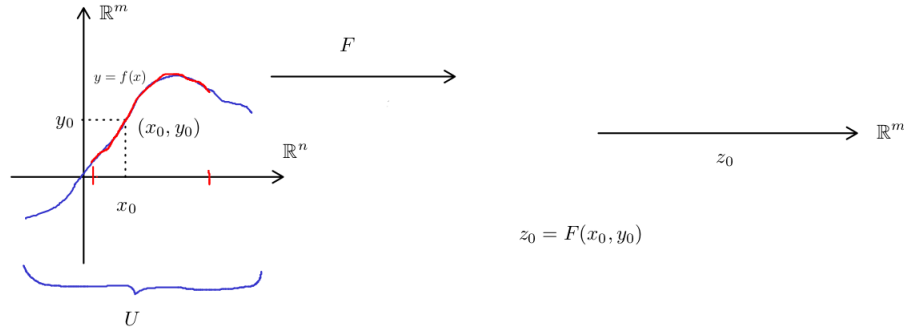


FIGURE 8 – Illustration du théorème de fonctions implicites

Donc le graphe de $x \rightarrow f(x)$ dans $W \times V$ pour l'application $f : W \rightarrow V$ est à l'intérieur de $F^{-1}(x_0)$.

On peut dire que la fonction implicite

$$F(x, y) = z_0, x \in \mathbb{R}^n, y \in \mathbb{R}^m, z_0 \in \mathbb{R}^m$$

peut être exprimée explicitement $y = f(x)$ dans un voisinage W .

Exemple $m = 1 = n$.

Si $F(x, y) = y^2 - x$.

Exemple 1 $x_0 = 0, y_0 = 1, z_0 = 1$.

$$DF = \left[\frac{\partial F}{\partial x} \quad \frac{\partial F}{\partial y} \right] = [-1 \quad 2y] \in \mathcal{C}^\infty.$$

$$DyF = [2y]_{|x|}.$$

$$DyF(x_0, y_0) = 2y_0 = 2 \neq 0.$$

Donc près de $(0, 1) = (x_0, y_0), y = f(x)$ a une solution \mathcal{C}^∞ .

Mais si $x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0, DyF(x_0, y_0) = 2y_0 = 0$ n'est pas inversible. F est \mathcal{C}^∞ .

Implicitement, près de $(0, 0)$, on a $y^2 - x = 0$.

On essaie de trouver $y = f(x)$.

$$y^2 = x \implies y = \pm\sqrt{x}.$$

Mais $\sqrt{\cdot}$ n'est pas définie pour $x < 0$ près de $x_0 = 0$!

Donc il n'y a pas un moyen d'écrire explicitement $F(x, y) = 0$ près de $(0, 0)$ comme une fonction \mathcal{C}^∞ .

Remarque (Sur le théorème des fonctions implicites). *En effet, si $W' = f(W) \subset V$, on a*

$$(x, y) \in W \times W', F(x, y) = z_0 \iff y = f(x).$$

4 Algèbre multilinéaire

Soit E espace vectoriel sur \mathbb{R} de dimension finie n , c'est-à-dire il existe $\beta = \{\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_n\}$ base telle que

$$\forall \vec{v} \in E, \exists ! (\alpha_1, \dots, \alpha_n), \vec{v} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \vec{v}_i.$$

En particulier, β engendre E ($E = \text{span}(\beta) = \langle \beta \rangle$) si β est libre.

4.1 L'espace dual E^*

$$E^* = \{T : E \rightarrow \mathbb{R} \text{ linéaire}\} = \mathcal{L}(E, \mathbb{R}).$$

Théorème 8. *On a $\dim(E^*) = \dim(E)$.*

Démonstration. Supposons $\beta = (e_1, \dots, e_n)$ est une base ordonnée de E . On définit alors n éléments (e^1, e^2, \dots, e^n) , $e^j \in E^*$ de la manière suivante :

$$e^j(e_i) = \delta_i^j = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Remarque (Personnelle). e^j est l'évaluation du vecteur $\vec{v} \in E$ en e_j .

$$\text{Donc } e^j \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i e_i \right) = \sum_{i=1}^n \alpha_i e^j(e_i) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta_i^j = \alpha_j.$$

Donc $\forall j \in \{1, \dots, n\}$, $e^j \in E^*$, $\beta^* = \{e^1, \dots, e^n\}$. On montre que β^* est une base pour E^* .

1. β^* est libre. Supposons que pour $c_j \in \mathbb{R}$,

$$\sum_{j=1}^n c_j e^j = 0 \in E^*.$$

Donc pour tout i ,

$$\begin{aligned} \left(\sum_{j=1}^n c_j e^j \right) (e_i) &= 0 \in \mathbb{R} \text{ et} \\ \left(\sum_{j=1}^n c_j e^j \right) (e_i) &= \sum_{j=1}^n c_j e^j(e_i) = \sum_{j=1}^n c_j \delta_i^j = c_i. \end{aligned}$$

Donc $\forall i, c_i = 0$.

2. β^* engendre E^* . Soit $T \in E^*$. Est-ce qu'il existe $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ tel que

$$T = \sum_{j=1}^n \alpha_j e^j ?$$

Essayons de trouver les α_j en appliquant l'identité désirée en e_i .

$$\forall i, T(e_i) = \left(\sum_{j=1}^n \alpha_j e_j \right) (e_i) = \sum_{j=1}^n \alpha_j e_j(e_i) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \delta_i^j = \alpha_i.$$

Donc pour $T \in E^*$ donnée, le candidat pour α_i est

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, \alpha_i \in T(e_i) \in \mathbb{R},$$

et on obtient que

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, T(e_i) = \left(\sum_{j=1}^n \alpha_j e^j \right) (e_i).$$

Comme T et \tilde{T} ont les mêmes valeurs sur la base β , donc $T = \tilde{T}$.

$$T = \sum_{j=1}^n T(e_j) e^j.$$

□

Définition 4.1. On dit que β^* est la base duale de β .

On considère le dual du dual $E^{**} = (E^*)^*$.

Théorème 9. Si $\dim(E) < \infty$, il y a un isomorphisme canonique entre E et E^{**} .

On peut définir $E \rightarrow E^{**}$. On pose $e : E \rightarrow E^{**}$.

$$(\iota(\vec{v}))(T) = T(\vec{v}),$$

$$\forall T \in E^* = \mathcal{L}(E, \mathbb{R}).$$

Exercice 1.

1. Montrer que $\forall v \in E, \iota(\vec{v}) : E^* \rightarrow \mathbb{R}$ est une transformation linéaire.
2. Montrer que $\iota : E \rightarrow E^{**}$ est une transformation linéaire.
3. Montrer que ι est bijective (donc un isomorphisme).

Démonstration.

1.

$$\iota(\vec{v})(\alpha T + S) = (\alpha T + S)(\vec{v}) = \alpha T(\vec{v}) + S(\vec{v}) = \alpha \iota(\vec{v})(T) + \iota(\vec{v})(S).$$

2. $\iota : E \rightarrow E^{**}$ est linéaire.

$$\begin{aligned} \iota(\alpha \vec{v} + \vec{w})(T) &= T(\alpha \vec{v} + \vec{w}) \stackrel{T \text{ linéaire}}{=} \alpha T(\vec{v}) + T(\vec{w}) \\ &= \alpha \iota(\vec{v})(T) + \iota(\vec{w})(T) = \alpha \iota(\vec{v}) + \iota(\vec{w}). \end{aligned}$$

Comme c'est vrai $\forall T \in E^*$, on a l'identification $\iota(\alpha \vec{v} + \vec{w}) = \alpha \iota(\vec{v}) + \iota(\vec{w})$ (comme un élément de E^{**}). Donc ι est une transformation linéaire.

3. On sait que $\dim E = \dim E^* = \dim E^{**}$ (ce qui veut dire que ι est surjective). Pour démontrer que ι est un isomorphisme, il suffit de démontrer que $\text{Ker}(\iota) = \{0\}$ (que ι est injective).
Si $\vec{v} \in \text{Ker}(\iota)$, alors $\iota(\vec{v}) = 0 \implies \forall T \in E^*, T(\vec{v}) = \iota(\vec{v})(T) = 0(T) = 0$, donc \vec{v} est tel que $\forall T \in E^*, T(\vec{v}) = 0$.
Si $\vec{v} \neq \vec{0}$, on peut compléter \vec{v} avec une base $\{\vec{v}, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n\}$ de E et définir $T(\alpha_1 \vec{v} + \alpha_2 \vec{v}_2 + \dots + \alpha_n \vec{v}_n) = \alpha_1$. Dans ce cas-là, $T(\vec{v}) = 1 \neq 0$.
Si $\beta = (e_1, \dots, e_n)$ base de E . On a vu que la base duale $\beta^* = (e^1, e^2, \dots, e^n)$ est une base de E^* .

$$e^j(e_i) = \delta_i^j.$$

$$(\beta^*)^* = \beta^{**} = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n).$$

$$\forall i, \eta_i \in E^{**}, \eta_i(e^j) = \delta_i^j, \forall i, j. \quad (1)$$

On va aussi calculer

$$\iota(e_i)(e^j) = e^j(e_i) = \delta_i^j. \quad (2)$$

$\forall e^j$ de base β^* , on a

$$\eta_i(e^j) = \iota(e_i)(e^j), \eta_i, \iota(e_i) \in E^{**} = \mathcal{L}(E^*, \mathbb{R}).$$

η_i et $\iota(e_i)$ coïncident sur une base de E^* , donc

$$\forall i, \eta_i = \iota(e_i).$$

Pour simplifier, parfois on identifie E et E^{**} par l'application ι , c'est-à-dire on met $\vec{v} = \iota(\vec{v})$. □

Les éléments de E^* sont appelés **les vecteurs covariants**. Les éléments de E^{**} sont appelés **les vecteurs contravariants**.

4.2 Les applications multilinéaires

Supposons que E_1, E_2, \dots, E_k sont des espaces vectoriels sur \mathbb{R} et E' espace vectoriel de \mathbb{R} .

$$\alpha : E_1 \times E_2 \times \dots \times E_k \longrightarrow E'$$

est une application k -linéaire quand α est linéaire par rapport à chaque coordonnée dans l'un des espaces E_j quand les autres coordonnées (composantes) sont fixées.

$\vec{v}_i \in E_i, 1 \leq i \leq k, \alpha(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_k)$.

Si $\forall i \in \{1, \dots, k\}, a \in \mathbb{R}, \forall \vec{v}_j \in E_j, \vec{w} \in E_i$, on a

$$\alpha(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, a\vec{v}_i + \vec{w}, \dots, \vec{v}_k) = a\alpha(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_i, \dots, \vec{v}_k) + \alpha(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \overbrace{\vec{w}}^{i\text{-ème}}, \dots, \vec{v}_k).$$

Exemple

1. $f(x, y) = xy, f : \overset{E_1}{\mathbb{R}} \times \overset{E_2}{\mathbb{R}} \rightarrow \overset{E'}{\mathbb{R}}$.
2. $E_1 = E_2 = \mathbb{R}^n, E' = \mathbb{R}$,

$$\alpha(\vec{v}_1, \vec{v}_2) = \vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2 \text{ 2-linéaire.}$$

3. $E_1 = E_2 = E_3 \equiv \mathbb{R}^3$, $E' = \mathbb{R}$.

$$\alpha(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3) = \vec{v}_1 \cdot (\vec{v}_2 \wedge \vec{v}_3) = \det \left(\begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{v}_3 \end{bmatrix} \right)_{3 \times 3}.$$

Cette application est 3-linéaire.

4. $E_1 = E_2 = \dots = E_n = \mathbb{R}^n$.

$$\alpha(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n) = \det \left(\begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vdots \\ \vec{v}_n \end{bmatrix} \right).$$

C'est une application n -linéaire.

5. Le déterminant d'une matrice de taille $n \times n$ est une application n -linéaire.

4.2.1 Quelques notations

E espace vectoriel de dimension finie.

On note $\Omega^k(E) := \{\alpha : \underbrace{E \times E \times \dots \times E}_{k \text{ fois}} \rightarrow \mathbb{R} \mid \alpha \text{ est } k\text{-linéaire}\}$.

Remarquons que $\Omega^1(E) = \{\alpha : E \rightarrow \mathbb{R} \mid \alpha \text{ est linéaire}\} = E^*$.

Proposition 4.1. $\forall k \in \mathbb{N}^*, \Omega^k(E)$ est un espace vectoriel de dimension n^k .

Démonstration. Si $\alpha, \beta \in \Omega^k(E)$, $a \in \mathbb{R}$. Il faut démontrer que $a\alpha + \beta$ est aussi une application k -linéaire sur $E^k = \underbrace{E \times \dots \times E}_{k \text{ fois}}$.

$$\begin{aligned} a\alpha + \beta(b\vec{v}_1 + \vec{w}, \dots) &= a[\alpha(b\vec{v}_1 + \vec{w}, \dots)] + \beta(b\vec{v}_1 + \vec{w}) \\ &= a[b\alpha(\vec{v}_1, \dots) + \alpha(\vec{w}, \dots)] + b\beta(\vec{v}_1, \dots) + \beta(\vec{w}, \dots) \\ &= b[a\alpha + \beta](\vec{v}_1, \dots) + [a\alpha + \beta](\vec{w}, \dots) \end{aligned}$$

De même pour chaque $1 \leq i \leq k$.

Pour trouver la dimension de $\Omega^k(E)$, il faudra trouver une base de $\Omega^k(E)$. Pour cela, il faudra d'abord introduire "le produit tensoriel". \square

Définition 4.2 (Produit tensoriel). Supposons que $\alpha : E_1 \times \dots \times E_k \rightarrow \mathbb{R}$ k -linéaire, $\beta : E'_1 \times \dots \times E'_l \rightarrow \mathbb{R}$ l -linéaire.

On définit

$$\alpha \otimes \beta : E_1 \times \dots \times E_k \times E'_1 \times \dots \times E'_l \longrightarrow \mathbb{R}$$

telle que

$$\alpha \otimes \beta(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_k, \vec{v}'_1, \dots, \vec{v}'_l) := \alpha(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_k) \beta(\vec{v}'_1, \dots, \vec{v}'_l)$$

qui est une application $(k+l)$ -linéaire (avec $\vec{v}_i \in E_i, i \in \{1, \dots, k\}, \vec{v}'_j \in E'_j, j \in \{1, \dots, l\}$).

Les applications k -linéaires sont appelées les tenseurs covariants d'ordre k .

Exercice 2. On montre que \otimes est une opération associative.

$\forall \alpha, \beta, \gamma$ tenseurs covariants,

$$(\alpha \otimes \beta) \otimes \gamma = \alpha \otimes (\beta \otimes \gamma).$$

Exemple $E_1 = \mathbb{R}^n, E'_1 = \mathbb{R}^n, k = l = 1, \alpha \in E_1^*, \alpha(\vec{v}) = 2\vec{v} \cdot e_1, \forall \vec{v} \in \mathbb{R}^n, \beta \in E_1'^*, \beta(\vec{v}) = \vec{v} \cdot e_1, \forall \vec{v} \in \mathbb{R}^n.$

$$\alpha \otimes \beta(\vec{v}, \vec{v}) = 2(\vec{v} \cdot e_1)(\vec{v} \cdot e_1)$$

et

$$\beta \otimes \alpha(\vec{v}, \vec{v}) = 2(\vec{v} \cdot e_1)(\vec{v} \cdot e_1).$$

Mais si $\tilde{\beta}(\vec{v}) = \vec{v} \cdot e_2,$

$$\alpha \otimes \tilde{\beta}(\vec{v}, \vec{v}) = 2(\vec{v} \cdot e_1)(\vec{v} \cdot e_2),$$

$$\text{mais } \tilde{\beta} \otimes \alpha(\vec{v}, \vec{v}) = 2(\vec{v} \cdot e_1)(\vec{v} \cdot e_2).$$

Le produit tensoriel n'est donc pas commutatif.

$$E^k = \underbrace{E \times \cdots \times E}_{k \text{ fois}}$$

$$\Omega^k(E) := \{\alpha : \underbrace{E \times E \times \cdots \times E}_{k \text{ fois}} \rightarrow \mathbb{R} \mid \alpha \text{ est } k\text{-linéaire}\}.$$

Proposition 4.2. $\Omega^k(E)$ est un espace vectoriel de dimension n^k , où $n = \dim(E)$.

Démonstration. $\dim E = n$, (e_1, \dots, e_n) est une base de E et (e^1, \dots, e^n) est une base de $E^* = \Omega^1(E)$.

Par exemple si on prend

$$\underbrace{e^1 \otimes e^1 \otimes \cdots \otimes e^1}_{k \text{ fois}} : E \times \cdots \times E \rightarrow \mathbb{R},$$

et

$$e^1 \otimes e^1 \otimes \cdots \otimes e^1(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_n), \vec{v}_i \in E,$$

$$= e^1(\vec{v}_1) e^1(\vec{v}_2) \dots e^1(\vec{v}_n).$$

$$\mathcal{A} = \{e^{i_1} \otimes e^{i_2} \otimes \cdots \otimes e^{i_k} \mid \text{pour } 1 \leq j \leq k, 1 \leq i_k \leq n\}.$$

Il y a n choix pour chaque e^{i_j} , alors, au total, on a n^k choix pour les éléments de \mathcal{A} , ce qui démontre la proposition 4.2. On montre maintenant que

1. \mathcal{A} engendre $\Omega^k(E)$;

2. \mathcal{A} est libre.

Soit $\alpha \in \Omega^k(E)$.

On va démontrer que

$$\alpha \stackrel{?}{=} \sum_{1 \leq i_1, \dots, i_k \leq n} \alpha(e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_k}) e^{i_1} \otimes e^{i_2} \otimes \cdots \otimes e^{i_k}.$$

Prenons $(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n) \in E^k$. On a

$$\vec{v}_j = \sum_{i=1}^n c_{ij} e_i.$$

$$\begin{aligned}
\alpha(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_k) &= \alpha\left(\sum_{i=1}^n c_{i1} e_i, \dots, \sum_{i=1}^n c_{ik} e_i\right) \\
&= \sum_{i=1}^n c_{i1} \alpha\left(e_i, \sum_{i_2} c_{i_2 2} e_{i_2}, \dots\right) \\
&= \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \dots \sum_{i_k=1}^n c_{i_1 1} c_{i_2 2} \dots c_{i_k k} \alpha(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}).
\end{aligned}$$

Maintenant, pour

$$\beta = \sum_{1 \leq i_1, \dots, i_n \leq n} \alpha(e_{i_1}, \dots, e_{i_n}) e^{i_1} \otimes \dots \otimes e^{i_n},$$

on calcule pour $\beta \in \Omega^k(E)$,

$$\beta(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_k) = \sum_{i_1} \sum_{i_2} \dots \sum_{i_k} c_{i_1 1} c_{i_2 2} \dots c_{i_k k} \beta(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}).$$

Mais

$$\begin{aligned}
\beta(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}) &= \sum_{1 \leq i'_1, \dots, i'_k \leq n} \alpha(e_{i'_1}, e_{i'_2}, \dots, e_{i'_k}) e^{i'_1} \otimes e^{i'_2} \otimes \dots \otimes e^{i'_k} (e_{i_1}, \dots, e_{i_k}) \\
&= \sum_{1 \leq i'_1 \leq \dots \leq i'_k \leq n} \alpha(e_{i'_1}, \dots, e_{i'_k}) e^{i'_1}(e_{i_1}) e^{i'_2}(e_{i_2}) \dots e^{i'_k}(e_{i_k}) \\
&= \sum_{1 \leq i'_1, \dots, i'_k \leq n} \alpha(e_{i'_1}, \dots, e_{i'_k}) \delta_{i'_1}^{i_1} \dots \delta_{i'_k}^{i_k} = \alpha(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}).
\end{aligned}$$

Donc

$$\beta(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_k) = \sum_{i_1} \sum_{i_2} \dots \sum_{i_k} c_{i_1 1} c_{i_2 2} \dots c_{i_k k} \alpha(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}) = \alpha(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_k).$$

Donc ? est démontré, et on a $\alpha \in \text{span}(\mathcal{A}) = \langle \mathcal{A} \rangle$, où $\mathcal{A} = \{e^{i_1} \otimes \dots \otimes e^{i_k}\}$.

Montrons que \mathcal{A} est libre. Soit

$$\sum_{1 \leq i_1, \dots, i_k \leq n} c_{i_1 i_2 \dots i_k} e^{i_1} \otimes \dots \otimes e^{i_k} = 0 \in \Omega^k(E).$$

Le même calcul qu'auparavant démontre que

$$0 = 0(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}) = c_{i_1 \dots i_k}, \forall i_1, \dots, i_k,$$

donc

$$\forall i_1, \dots, i_k, c_{i_1 \dots i_k} = 0,$$

donc \mathcal{A} est libre. □

Remarque. Si $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m, U \subseteq \mathbb{R}^n, Df(x) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$,

$$\begin{aligned} Df &: U \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) \\ D^2 f(x) &\in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)) \\ &\vdots \\ D^n f(x) &\in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \dots, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m))). \end{aligned}$$

Lemme. $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)) \simeq \{\alpha : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \mid \alpha \text{ est 2-linéaire}\}.$

Pour un élément $g \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m))$ et $\vec{v} \in \mathbb{R}^n, g(\vec{v}) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m).$

Pour tout k , pour tout $x \in U, D^k f(x) \in (\Omega^k(\mathbb{R}^n))^m$. Cet espace est de dimension $m(n^k)$.

On définit

$$\alpha_g(\vec{v})(\vec{w}) \in \mathbb{R}^m.$$

On voit que α_g est une application 2-linéaire.

Supposons que $\alpha_g = \alpha_{g'}$, donc $\forall \vec{v}, \vec{w} \in \mathbb{R}^n, \alpha_g(\vec{v}, \vec{w}) = \alpha_{g'}(\vec{v}, \vec{w})$, donc $g(\vec{v})(\vec{w}) = g'(\vec{v})(\vec{w})$.

Donc $\forall \vec{v} \in \mathbb{R}^n, g(\vec{v}) = g'(\vec{v}) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$, donc $g = g'$.

On en déduit que $g \rightarrow \alpha_g$ est injective.

27-09-2023

Exemple 1. $T : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, Tx = 2x_1 + 5x_2$. On définit $\alpha : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, \alpha((x_1, x_2), (x'_1, x'_2)) = x_1 x'_2 - x_2 x'_1, \alpha \in \Omega^2(\mathbb{R}^2)$.

Ecrire le produit tensoriel entre α et T ...

Si E, F sont deux espaces vectoriels et $T : E \rightarrow F$ linéaire ($T \in \mathcal{L}(E, F)$). On peut définir une application linéaire

$$T^* : F^* \rightarrow E^*.$$

Pour $f \in F^*$, on doit déterminer $T^*(f)$ comme un élément de E^* . Alors $T^*(f)$ doit être une application linéaire $T^*(f) \in \mathcal{L}(E, \mathbb{R})$, i. e. $T^*(f) : E \rightarrow \mathbb{R}$.

$$\forall v \in E, (T^*(f))(v) \stackrel{\text{déf}}{=} f(T(v)) \text{ cf figure 9.}$$

On a $f \in F^*, f \in \mathcal{L}(F, \mathbb{R})$.

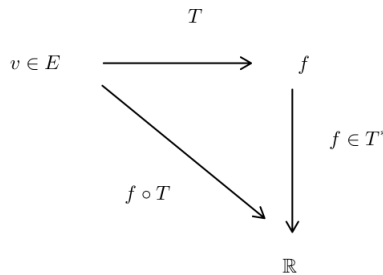


FIGURE 9 – Illustration de T^*

$F^* = \Omega^1(F), E^* = \Omega^1(E)$. On peut aussi utiliser la notation $\Omega^1(T)$ pour T^* . On peut aussi définir, à partir de T ,

$$\Omega^k(T) : \underbrace{\Omega^k(F)}_{\alpha} \rightarrow \underbrace{\Omega^k(E)}_{\beta}.$$

Pour $\alpha \in \Omega^k(E)$, on a besoin que $\underbrace{\Omega^k(T)(\alpha)}_{k\text{-linéaire}} \in \Omega^k(E)$.

$\forall v_1, \dots, v_n$, on a besoin de définir

$$\underbrace{(\Omega^k(T))(\alpha)}_{\beta \in \Omega^k(E)}(v_1, \dots, v_k) = \underbrace{\alpha(T(v_1), T(v_2), \dots, T(v_k))}_{\in F^k}.$$

Exercice 3.

1. Montrer que β est k -linéaire, i. e. $\forall k, \Omega^k(T)(\alpha) \in \Omega^k(E)$.
2. Montrer que $\Omega^k(S \circ T) = \Omega^k(T) \circ \Omega^k(S)$.
3. Montrer que $\Omega^k(\mathbb{1}_E) = \mathbb{1}_{\Omega^k(E)}$.
4. Montrer que si $T : E \rightarrow F$ est inversible, alors

$$\Omega^k(T^{-1}) = (\Omega^k(T))^{-1}.$$

Quelques propriétés Si on a $E \xrightarrow{T} F \xrightarrow{S} G$, on a

$$\Omega^k(G) \xrightarrow{\Omega^k(S)} \Omega^k(S) \xrightarrow{\Omega^k(T)} \Omega^k(E)$$

.

On a $S \circ T : E \rightarrow G$. Alors

$$\Omega^k(T) \circ \Omega^k(S) \in \Omega^k(G) \rightarrow \Omega^k(E)$$

et

$$\Omega^k(S \circ T) : \Omega^k(G) \rightarrow \Omega^k(E)$$

.

On considère $\mathbb{1}_E : E \rightarrow E$. Alors

$$\Omega^k(\mathbb{1}_E) = \mathbb{1}_{\Omega^k(E)}$$

.

On rappelle que l'on peut associer à un vecteur $v \in E$ un vecteur contravariant $\iota(v) \in E^{**}$. On définit alors, $\forall l \in \mathbb{N}, l \geq 1$,

$$\Omega_l(E) := \{\alpha : \underbrace{E^* \times \dots \times E^*}_{k \text{ fois}} \rightarrow \mathbb{R} \mid \alpha \text{ est } l\text{-linéaire}\} = \Omega^l(E^*),$$

avec la base $\{e_{i_1} \otimes \dots \otimes e_{i_l} \mid 1 \leq i_j \leq n, 1 \leq j \leq l\}$.

On a $\dim(\Omega_l(E)) = n^l$ et $\forall \alpha \in \Omega_l(E)$,

$$\alpha = \sum_{1 \leq i_1, \dots, i_l \leq n} \alpha(e^{i_1}, \dots, e^{i_l}) e_{i_1} \otimes \dots \otimes e_{i_l}.$$

Pour $T : E \rightarrow F$, $\Omega_l(T) : \Omega_l(E) \rightarrow \Omega_l(F)$ (objets contravariants pour la dualité), avec $\alpha \in \Omega_l(E)$, $\beta = \Omega_l(T)(\alpha) \in \Omega_l(F)$.

On va essayer de définir

$$\beta(f_1, \dots, f_l) = \Omega_l(T)(\alpha)(f_1, \dots, f_l) \stackrel{\text{déf}}{=} \alpha(T^*(f_1), \dots, T^*(f_l)).$$

$f_j \in F^* \qquad T^*(f_j) \in E^*$

On a alors le schéma suivant :

$$\begin{array}{ccccc} F & \xrightarrow{T} & F & \xrightarrow{S} & G \\ \Omega_l(E) & \xrightarrow{\Omega_l(T)} & \Omega_l(F) & \xrightarrow{\Omega_l(S)} & \Omega_l(G). \end{array}$$

Définition 4.3. Pour tous k, l , on a

$$\Omega_l^k(E) := \left\{ \alpha : \underbrace{E \times \cdots \times E}_{k \text{ fois}} \times \underbrace{E^* \times \cdots \times E^*}_{l \text{ fois}} \mid \alpha \text{ est } k\text{-linéaire} \right\}$$

qui a pour base

$$\{e^{i_1} \otimes \cdots \otimes e^{i_k} \otimes e_{j_1} \otimes \cdots \otimes e_{j_l} \mid 1 \leq i_1, \dots, i_k \leq n, 1 \leq j_1, \dots, j_l \leq n\}.$$

On a $\dim(\Omega_l^k) = n^{k+l}$. Pour $\alpha \in \Omega_l^k(E)$, on écrit

$$\alpha = \sum_{\substack{1 \leq i_1, \dots, i_k \leq n \\ 1 \leq j_1, \dots, j_l \leq n}} \alpha(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}, e^{j_1}, \dots, e^{j_l}) e^{i_1} \otimes \cdots \otimes e^{i_k} \otimes e_{j_1} \otimes \cdots \otimes e_{j_l}.$$

Parenthèse sur les notations En physique, on écrit

$$\alpha = \sum_{\substack{i_1, \dots, i_k \\ j_1, \dots, j_l}} a_{i_1 \dots i_k}^{j_1 \dots j_l} e^{i_1} \otimes \cdots \otimes e^{i_k} \otimes e_{j_1} \otimes \cdots \otimes e_{j_l}.$$

et on dit : si α est un (l, k) tenseur, alors α est la collection de valeurs $a_{i_1 \dots i_k}^{j_1 \dots j_l}$.

Si $T : E \rightarrow E$ est donnée, alors $\Omega_l^k(T)(\alpha)$ est donnée maintenant par le coefficient

$$b_{i_1, \dots, i_l}^{\tilde{j}_1, \dots, \tilde{j}_l}.$$

4.3 Produit scalaire

Les produits scalaires sur un espace vectoriel sont des tenseurs 2-covariants.

Définition 4.4 (Produit scalaire). Une application $\alpha : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ est un produit scalaire quand

1. $\alpha \in \Omega^2(E)$;
2. α est symétrique, i. e.

$$\forall v, w, \alpha(v, w) = \alpha(w, v).$$

3. α est définie positive, i. e. $\forall v \in E, \alpha(v, v) \geq 0$ et $\alpha(v, v) = 0 \iff v = 0$. En particulier, si $v \neq 0$, alors $\alpha(v, v) > 0$.

α dans une base est donnée par les coefficients $a_{i,j}, 1 \leq i, j \leq n$. Par exemple, on considère

$$v = \sum x_i e_i, w = \sum y_i e_i, \alpha = \sum_{1 \leq i, j \leq n} a_{ij} e^i \otimes e^j. \quad (3)$$

Dans ce cas, on a

$$\alpha(v, w) = \left(\sum_{1 \leq i, j \leq n} a_{ij} e^i \otimes e^j \right) \left(\sum_k x_k e_k, \sum_l y_l e_l \right) \quad (4)$$

$$= \sum_{i,j,k,l} a_{ij} e^i(k) e^j(e_l) x_k y_l = \sum_{i,j,k,l} a_{ij} \delta_k^i \delta_l^j x_k y_l = \sum_{i,j} a_{ij} x_i y_j. \quad (5)$$

Donc un produit scalaire est un $(0, 2)$ -tenseur.

Pour aller vers les formes différentielles, on a besoin d'une sous-catégorie de $\Omega_l^k(E)$ qui sont appelés les tenseurs extérieurs. Voici quelques définitions.

Définition 4.5. 1. On dit que σ est une permutation d'ordre k quand

$$\sigma : \{1, \dots, k\} \mapsto \{1, \dots, k\}$$

est une bijection. On note $\sigma_i := \sigma(i)$. Pour tout $k \in \mathbb{N}$, S_k est l'ensemble des permutations d'ordre k . L'ensemble S_k muni de la loi \circ est un groupe. On dit qu'une permutation est une transposition quand il existe $i \neq j$ tels que

$$\sigma_i = j, \sigma_j = i, \sigma_s = s \forall s \notin \{i, j\}.$$

$\forall \sigma \in S_k, \exists \sigma_{(1)}, \dots, \sigma_{(l)}$ tel que

$$\sigma = \sigma_{(1)} \dots \sigma_{(l)}, \quad (6)$$

et chaque $\sigma_{(s)}$ est une transposition. Cette décomposition n'est pas unique, mais dans toutes les décompositions comme dans 6, la parité de l ne change pas.

On définit

$$\begin{aligned} \text{sgn}(\sigma) &:= \begin{cases} 1 & \text{si } l \text{ est paire,} \\ 0 & \text{si } l \text{ est impaire.} \end{cases} \\ \varepsilon(\sigma) & \end{aligned}$$

Définition 4.6. $\alpha \in \Omega^k(E)$ est dite un **tenseur extérieur** (aussi appelé tenseur antisymétrique) si

$$\forall v_1, \dots, v_k \in E, \forall \sigma \in S_k, \alpha(v_{\sigma_1}, \dots, v_{\sigma_k}) = \text{sgn}(\sigma) \alpha(v_1, \dots, v_k).$$

Proposition 4.3. Les trois assertions suivantes sont équivalentes :

1. α est extérieur ;
2. $\forall \sigma \in S_k$ telle que σ est une transposition,

$$\alpha(v_1, \dots, v_k, \alpha(v_{\sigma_1}, \dots, v_{\sigma_k})) = -\alpha(v_1, \dots, v_k);$$

3. $\forall v_1, \dots, v_k \in E$, s'il existe $i, j \in \{1, \dots, k\}$ tels que $v_i = v_j, i \neq j$, alors $\alpha(v_1, \dots, v_k) = 0$.

Démonstration.

1. (1) \implies (2). On a $\text{sgn}(\text{transposition}) = -1$.
2. (2) \implies (3). Donné i, j tel que $v_i = v_j, i \neq j$. On considère la transposition qui échange i et j et on a

$$\alpha(v_{\sigma_1}, \dots, v_{\sigma_k}) = -\alpha(v_1, \dots, v_k),$$

mais $(v_{\sigma_1}, \dots, v_{\sigma_k}) = (v_1, \dots, v_k)$ comme $v_i = v_j$ et donc

$$\alpha(v_1, \dots, v_k) = -\alpha(v_1, \dots, v_k) \implies \alpha(v_1, \dots, v_k) = 0.$$

3. (2) \implies (1). Si $\sigma = \sigma_{(1)} \dots \sigma_{(l)}$, $\sigma_{(j)}$ sont des transpositions, alors

$$\alpha(v_{\sigma_1}, \dots, \alpha(v_{\sigma_k})) = (-1)^l \alpha(v_1, \dots, v_k) = \text{sgn}(\sigma) \alpha(v_1, \dots, v_k).$$

4. (3) \implies (2). σ est une transposition telle que $\sigma_i = j, \sigma_j = i$. Les v_1, \dots, v_k sont donnés. On a

$$\alpha(v_1, \dots, \underbrace{v_i + v_j}_{\text{position } i}, \underbrace{v_i + v_j}_{\text{position } j}, \dots, v_k) = 0.$$

Mais

$$\begin{aligned}
& \alpha(v_1, \dots, v_i + v_j, \dots, v_i + v_j, \dots, v_k) \\
&= \alpha(v_1, \dots, v_i, \dots, v_i + v_j, \dots, v_k) + \alpha(v_1, \dots, v_j, \dots, v_i + v_j, \dots, v_k) \\
&= \alpha(v_1, \dots, v_i, \dots, v_i, \dots, v_k) + \alpha(v_1, \dots, v_i, \dots, v_j, \dots, v_k) \\
&+ \alpha(v_1, \dots, v_j, \dots, v_i, \dots, v_k) + \alpha(v_1, \dots, v_j, \dots, v_j, \dots, v_k).
\end{aligned}$$

On a donc

$$\alpha(v_1, \dots, v_i, \dots, v_j, \dots, v_k) = -\alpha(v_1, \dots, v_j, \dots, v_i, \dots, v_k) = \alpha(v_{\sigma_1}, \dots, v_{\sigma_k}).$$

□

Exemple 2. 1. $\alpha(v, w) = \alpha((v', v^2), (w', w^2)) = v'w^2 - v^2w'$. On vérifie facilement qu'il est antisymétrique.

2. Plus généralement, pour chaque $v_1, \dots, v_k \in \mathbb{R}^k$,

$$\alpha(v_1, \dots, v_k) = \det[v_1 \ v_2 \ \dots \ v_k]$$

est un tenseur extérieur.

Corollaire. Si $\{v_1, \dots, v_k\}$ n'est pas libre (i. e. linéairement dépendant), $\alpha(v_1, \dots, v_k) = 0$.

Démonstration. Si la famille n'est pas libre, il existe i tel que $v_i = \sum_{j \neq i} c_j v_j$. □

On suppose que $\dim(E) = n$ et $k > n$. Alors si $\alpha \in \Omega^k(E)$ est un tenseur extérieur,

$$\forall v_1, \dots, v_k \in E, \alpha(v_1, \dots, v_k) = 0.$$

On définit maintenant

$$\Lambda^k(E) := \{\alpha \in \Omega^k(E), \alpha \text{ est tenseur extérieur.}\}$$

Proposition 4.4. $\Lambda^k(E)$ est un sous-espace vectoriel, i. e.

$$\forall \alpha, \beta \in \Lambda^k(E), c \in \mathbb{R}, (c\alpha + \beta) \in \Lambda^k(E).$$

Quelle est la dimension de $\Lambda^k(E)$?

On cherche une base pour $\Lambda^k(E)$. Si (e_1, \dots, e_n) base de E , (e'_1, \dots, e'_n) base duale, alors

$$\{e^{i_1} \otimes \dots \otimes e^{i_k} \mid 1 \leq i_j \leq n, 1 \leq j \leq k\}$$

est une base de E .

On va définir pour chaque choix d'indices $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n$ un élément extérieur $\varepsilon^{i_1 i_2 \dots i_k}$ comme un élément proposé de base de $\Lambda^k(E)$ par la formule

$$\varepsilon^{i_1 \dots i_k}(v_1, \dots, v_k) = \sum_{\sigma \in S_k} \text{sgn}(\sigma) e^{i_1} \otimes \dots \otimes e^{i_k}(v_{\sigma_1}, \dots, v_{\sigma_k}).$$

Exemple 3.

$$e^{12}(v_1, v_2) = e^1 \otimes e^2(v_1, v_2) - e^1 \otimes e^2(v_2, v_1) = e^1(v_1)e^2(v_2) - e^1(v_2)e^2(v_1).$$

Proposition 4.5. $\varepsilon^{i_1 \dots i_k} \in \Lambda^k(E)$.

Démonstration. Si $\tau \in S_k$ fixé, alors

$$\begin{aligned}\varepsilon^{i_1 \dots i_k}(v_{\tau_1}, \dots, v_{\tau_k}) &= \sum_{\sigma \in S_k} \text{sgn}(\sigma) e^{i_1} \otimes \dots \otimes e^{i_k}(v_{\sigma\tau_1}, \dots, v_{\sigma\tau_k}) \\ &= \sigma(\tau) \sum_{\sigma \in S_k} \text{sgn}(\tau) \text{sgn}(\sigma) e^{i_1} \otimes \dots \otimes e^{i_k}(v_{\sigma\tau_1}, \dots, v_{\sigma\tau_k}).\end{aligned}$$

Donc

$$\varepsilon^{i_1 \dots i_k}(v_{\tau_1}, \dots, v_{\tau_k}) = \text{sgn}(\tau) \sum_{\sigma' \in S_k} \text{sgn}(\sigma') e^{i_1} \otimes \dots \otimes e^{i_k}(v_{\sigma'_1}, \dots, v_{\sigma'_k}) = \text{sgn}(\sigma) \varepsilon^{i_1 \dots i_k}(v_1, \dots, v_k).$$

□

Une autre manière pour proposer des éléments de base $\forall 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n$ et $1 \leq j_1 < \dots < j_k \leq n$: on va définir

$$\bar{\varepsilon}^{i_1 \dots i_k}(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) \stackrel{\text{déf}}{=} \delta_{j_1}^{i_1} \delta_{j_2}^{i_2} \dots \delta_{j_k}^{i_k}.$$

Si $j_s = j_l$ pour $s \neq l$ $\bar{\varepsilon}^{i_1 \dots i_k} = 0$ par définition.

Si j_1, \dots, j_k sont k indices différents, mais pas dans l'ordre croissant, on les réordonne par une permutation $\sigma \in S_k$ avec $1 \leq \sigma_{j_1} < \dots < \sigma_{j_k} \leq n$. On définit

$$\bar{\varepsilon}^{i_1 \dots i_k}(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) \stackrel{\text{déf}}{=} \text{sgn}(\sigma) \delta_{i_1}^{j_1} \dots \delta_{i_k}^{j_k}.$$

Est-ce que on a $\bar{\varepsilon} = \varepsilon$ pour tout choix de $1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n$? (exercice).

$\bar{\varepsilon}$ est prolongé par k -linéarité sur tout élément $(v_1, \dots, v_k) \in E^k$.

Théorème 10. $\{\bar{\varepsilon}^{i_1 \dots i_k}, \text{ pour tout } 1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n\}$
forme une base pour $\Lambda^k(E)$.

Démonstration.

1. Ils sont libres. En effet,

$$\begin{aligned}& \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} c_{i_1 \dots i_k} \bar{\varepsilon}^{i_1 \dots i_k} = 0 \\ \implies & \forall 0 \leq j_1 < \dots < j_k \leq n, \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} c_{i_1 \dots i_k} \bar{\varepsilon}^{i_1 \dots i_k}(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) = 0 \\ \implies & 0 = \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} c_{i_1 \dots i_k} \delta_{j_1}^{i_1} \dots \delta_{j_k}^{i_k} = c_{j_1 \dots j_k}.\end{aligned}$$

2. Ils génèrent $\Lambda^k(E)$: exercice.

□

Quelle est la dimension de $\Lambda^k(E)$?

C'est $\dim(\Lambda^k(E)) = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$.

Par convention, $\dim(\Lambda^0(E)) = \mathbb{R}$, $\Lambda^k(E) = \{0\}$ si $k < 0$ et

$$\dim(\Lambda^k(E)) = \frac{n!}{1!(n-1)!} = n \text{ et } \dim(\Lambda^n(E)) = \frac{n!}{(n-n)!0!} = 1.$$

Proposition 4.6. Si $\alpha \in \Lambda^k(F)$, $T \in \mathcal{L}(E, F)$, $(\Omega^k(T))(\alpha) \in \Lambda^k(E)$.

Démonstration. Si $\beta = (\Omega^k(E))(\alpha)$, $v_1, \dots, v_k \in E$,

$$\beta(v_1, \dots, v_k) = \alpha(T(v_1), \dots, T(v_k)).$$

Si $i \neq j$, $v_i = v_j$, alors $T(v_i) = T(v_j)$ et $\alpha(T(v_1), \dots, T(v_k)) = 0$, donc $\beta(v_1, \dots, v_k) = 0$. Donc $\beta \in \Lambda^k(E)$. \square

On écrit

$$\Lambda^k(T) \stackrel{\text{déf}}{=} \Omega^k(E)|_{\Lambda^k(E)}.$$

Exemple 4. 1.

2. Si $k = n$, on a $\dim(\Lambda^k(E)) = 1$ et

$$\bar{\varepsilon}^{1\dots n}(e_1, \dots, e_n) = 1 \text{ et } \bar{\varepsilon}^{12\dots n}(e_{\sigma_1}, \dots, e_{\sigma_n}) = \text{sgn}(\sigma).$$

Si $k = 2 = n$, on a

$$\bar{\varepsilon}(e_1, e_2) = 1, \bar{\varepsilon}(e_2, e_1) = -1, \bar{\varepsilon}(e_1, e_1) = 0, \bar{\varepsilon}(e_2, e_2) = 0.$$

et $\bar{\varepsilon}(v, w) = -\bar{\varepsilon}(w, v)$. Si $v = (x_1, x_2), w = (y_1, y_2)$. Donc

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}(v, w) &= \bar{\varepsilon}(x_1 e_1 + x_2 e_2, y_1 e_1 + y_2 e_2) \\ &= \dots \text{ on développe grâce à la linéarité de l'application } = x_1 y_2 - x_2 y_1. \end{aligned}$$

C'est le déterminant formé par les vecteurs v, w , à savoir l'aire du parallélogramme formé par v, w .

Donc

$$\bar{\varepsilon}^{12\dots n}(v_1, \dots, v_n) = \det[v_1 \dots v_n].$$

C'est le volume n -dimensionnel signé de parallélépipède créé par (v_1, \dots, v_n) (ordonné). On dit que $\bar{\varepsilon}^{1\dots n}$ est l'élément de volume sur $\Lambda^k(E)$ et on va le noter par $w = \bar{\varepsilon}^{1\dots n}$.

$$w(v_1, \dots, v_n) = \text{volume signé de parallélépipède créé par } v_1, \dots, v_n = \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i v_i, 0 \leq \lambda_i \leq 1 \right\}.$$

Remarque (Sur les notations). Parfois on représente les éléments de E comme les vecteurs de colonne

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} x^1 \\ \vdots \\ x^n \end{bmatrix} = |\vec{v}\rangle, \text{ avec } \vec{v} = x^1 e_1 + \dots + x^n e_n$$

et les éléments de E^* comme les vecteurs de ligne par rapport à la base duale.

$$\vec{a} = y_1 e^1 + \dots + y_n e^n, \langle \vec{a} | = [y_1 \dots y_n].$$

Pour $\vec{a} \in E^*$, pour $\vec{v} \in E$,

$$\begin{aligned} \vec{a}(\vec{v}) &= \sum_{i=1}^n y_i x^i = \langle \vec{a} | \vec{v} \rangle \\ &= [y_1 \dots y_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Dans le cas général, $w = \bar{\varepsilon}^{1\dots n} \in \Lambda^k(E)$ est le seul élément de base pour cet espace de dimension 1. Si $T : E \rightarrow E$ transformation linéaire $\Lambda^k(T) : \Lambda^k(E) \rightarrow \Lambda^k(E)$, mais $\dim(\Lambda^n(E)) = 1$. S'il existe $c \in \mathbb{R}, \forall \alpha \in \Lambda^n(E)(\alpha), \Lambda^n(T)(\alpha) = c\alpha$.

Définition 4.7. $\det(T) := c$.

Exercice 4. Si $E = \mathbb{R}^n, T(v) = A|\vec{v}\rangle$ pour la base standard, alors $\det(T) = \det(A)$.

On considère $T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n, \alpha \in \Lambda^n(\mathbb{R}^n)$,

$$(\Lambda^n(T))(\alpha)(w_1, \dots, w_n) = \alpha(T(w_1), \dots, T(w_n)) = \det(T)\alpha(w_1, \dots, w_n).$$

On choisit $\alpha = \omega, w_i = e_i$.

$$\omega(T(e_1), \dots, T(e_n)) = \det(T)\omega(e_1, \dots, e_n). \quad (7)$$

Mais

$$\det(T) = \omega(T(e_1), \dots, T(e_n)) = \det[T(e_1), \dots, T(e_n)]. \quad (8)$$

7, 8 $\implies \det(T) = \det(A)$.

$\det(T)$ est défini directement indépendamment d'une base de E . Donc

$$\Lambda^n(\mathbb{1}_E) = \mathbb{1}_{\Lambda^n(E)},$$

donc $\mathbb{1}_{\Lambda^n(E)}(\alpha) = \alpha \implies c = 1$.

De plus, pour $T : E \rightarrow E, S : E \rightarrow E$,

$$\Lambda^n(S \circ T) = \Lambda^n(T) \circ \Lambda^n(S) \implies \det(S \circ T) = \det(S)\det(T).$$

Si T est inversible, alors

$$\begin{aligned} \Lambda^n(E)(T \circ T^{-1}) &= \Lambda^n(\mathbb{1}_E) = \mathbb{1}_{\Lambda^n(E)} \\ \implies \Lambda^n(T^{-1}) \circ \Lambda^n(T) &= \mathbb{1}_{\Lambda^n(E)} \\ \implies \det(T)\det(T^{-1}) &= 1. \end{aligned}$$

Si T est inversible, on a $\det(T) \neq 0$ et

$$\det(T^{-1}) = \frac{1}{\det(T)}.$$

Aussi $\det(T) \neq 0 \implies T$ est inversible. Etant donné (e_1, \dots, e_n) , on doit démontrer que $T(e_1), \dots, T(e_n)$ forment une famille libre.

$$\omega(T(e_1), \dots, T(e_n)) = \Lambda^n(T)(\omega)(e_1, \dots, e_n) = (\det(T))\omega(e_1, \dots, e_n) = \det(T) \cdot 1 \neq 0.$$

Comme ω est linéairement dépendant, par contraposée, $\{T(e_1), \dots, T(e_n)\}$ ne peut pas être linéairement dépendant.

Lemme. Si $\{v_1, \dots, v_n\}$ sont linéairement dépendants, alors $\omega(v_1, \dots, v_n) = 0$. Si $\omega(v_1, \dots, v_n) \neq 0$, alors $\{v_1, \dots, v_n\}$ famille libre.

Aussi, si $\{v_1, \dots, v_n\}$ sont libres, on définit $Te_i = v_i, T : E \rightarrow E$ devient inversible, donc $\det(T) \neq 0$.

$$\begin{aligned} \det(T) &= \det(T)\omega(e_1, \dots, e_n) = (\Lambda^n(T))(\omega)(e_1, \dots, e_n) \\ &= \omega(T(e_1), \dots, T(e_n)) = \omega(v_1, \dots, v_n) \implies \omega(v_1, \dots, v_n) \neq 0. \end{aligned}$$

$T : E \rightarrow E, (e_1, \dots, e_n)$ base de E ,

$$Te_i = A|e_i\rangle = \begin{bmatrix} A_{1i} \\ A_{2i} \\ \vdots \\ A_{ni} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n A_{ji} e_j.$$

$$\begin{aligned} \det(T) &= \omega(T(e_1), \dots, T(e_n)) = \omega\left(\sum_{j=1}^n A_{j1} e_j, \dots, \sum_{j=1}^n A_{jn} e_j\right) \\ &= \sum_{j_1} \dots \sum_{j_n} A_{j_1 1} A_{j_2 2} \dots A_{j_n n} \omega(e_{j_1}, \dots, e_{j_n}) = \sum_{\sigma \in S_n} A_{\sigma_1 1} A_{\sigma_2 2} \dots A_{\sigma_n n} \operatorname{sgn}(\sigma) \\ &\implies \det(A) = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) A_{\sigma_1 1} A_{\sigma_2 2} \dots A_{\sigma_n n}. \end{aligned}$$