Pourquoi vous enseigne-t-on les mathématiques ?

1. Pour la construction de votre esprit :

   → acquérir la logique mathématique

   → acquérir la démarche scientifique

2. Pour décrire des phénomènes et prédire leurs évolutions :

   → physique, biologie, informatique, chimie, climatologie

   → finance, économie, médecine

   → sociologie, psychologie

Ph.D. Elian Masnada

Problème :

Vous connaissez parfaitement les fonctions
(programme d'Analyse de préING1)

$$f \;:\; \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$$

Mais on décrit peu de chose avec des fonctions scalaires d'une variable

Ph.D. Elian Masnada

Problème :

Vous connaissez parfaitement les fonctions
(programme d'Analyse de préING1)

$$f \;:\; \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$$

Mais on décrit peu de chose avec des fonctions scalaires d'une variable

Exemples :

En thermodynamique : énergie interne U

$$U(T,P) \;:\; \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+ \longrightarrow \mathbb{R}$$

En électromagnétisme :

$$\vec{E}, \vec{B} : \quad \mathbb{R}^3 \longrightarrow \mathbb{R}^3$$

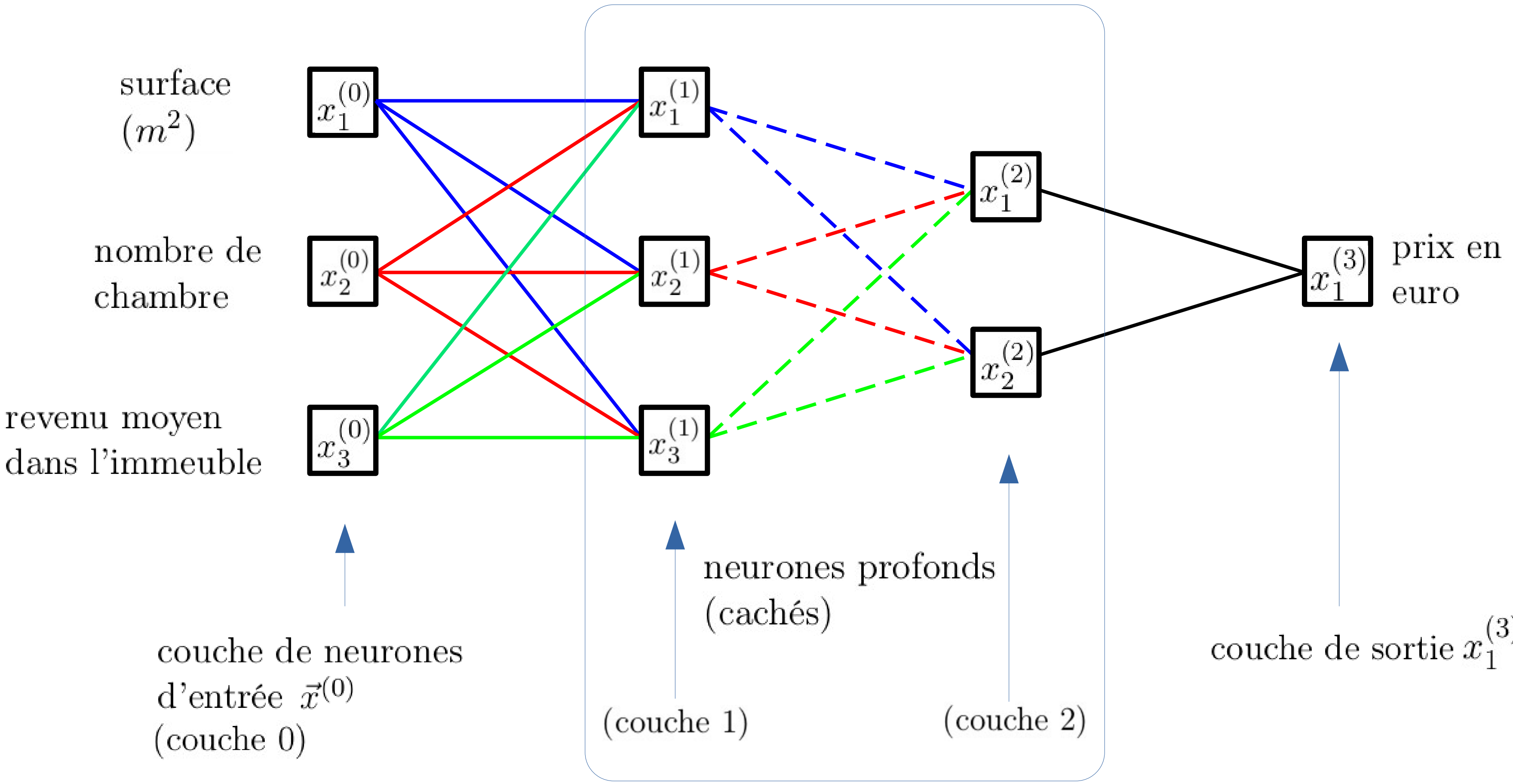
prédiction du prix d'un appartement
par deep learning

surface (m^2) $\boxed{x_1^{(0)}}$

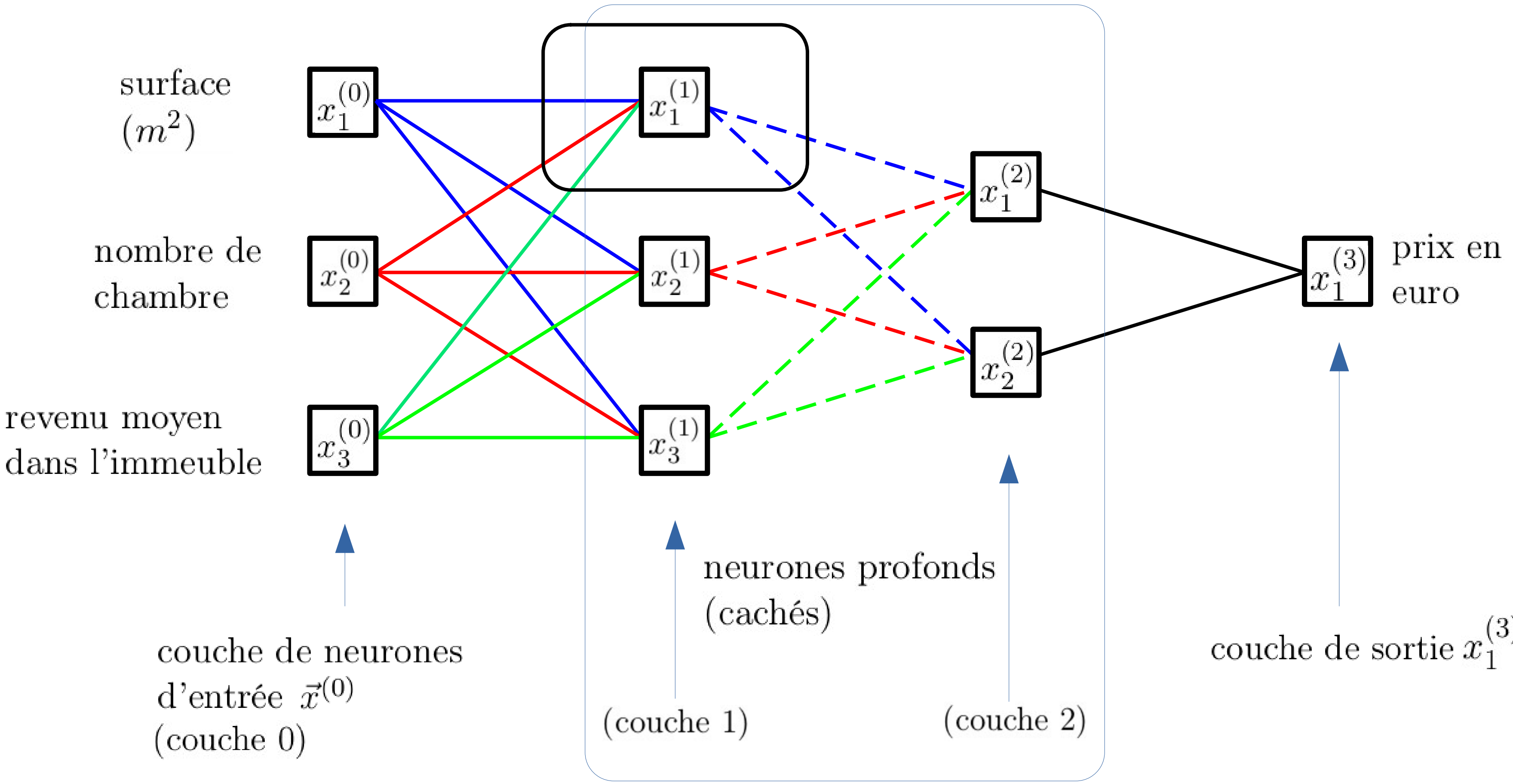
nombre de chambre $\boxed{x_2^{(0)}}$

revenu moyen dans l'immeuble $\boxed{x_3^{(0)}}$

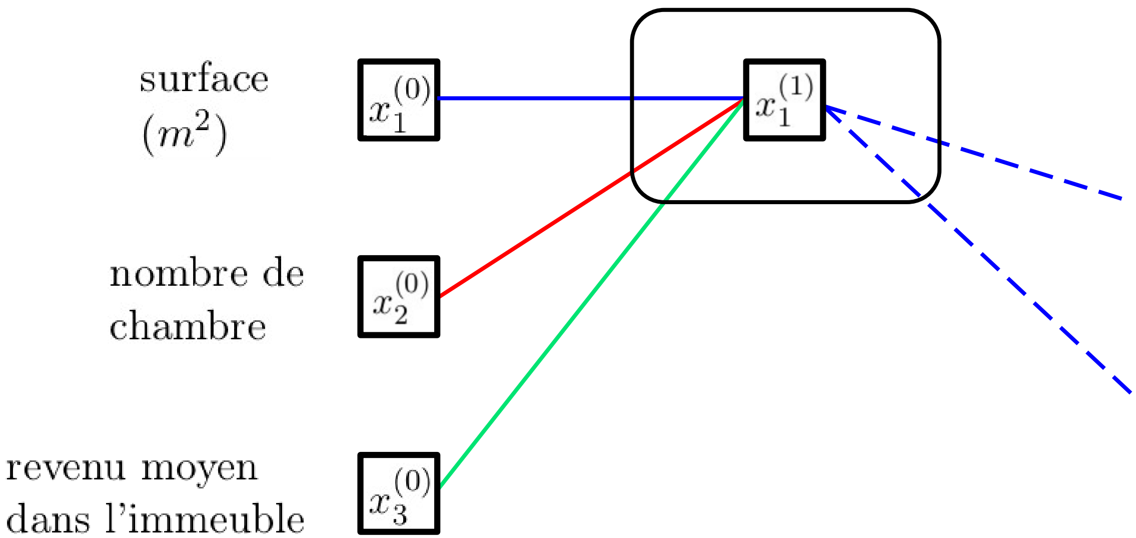
prédiction du prix d'un appartement par deep learning



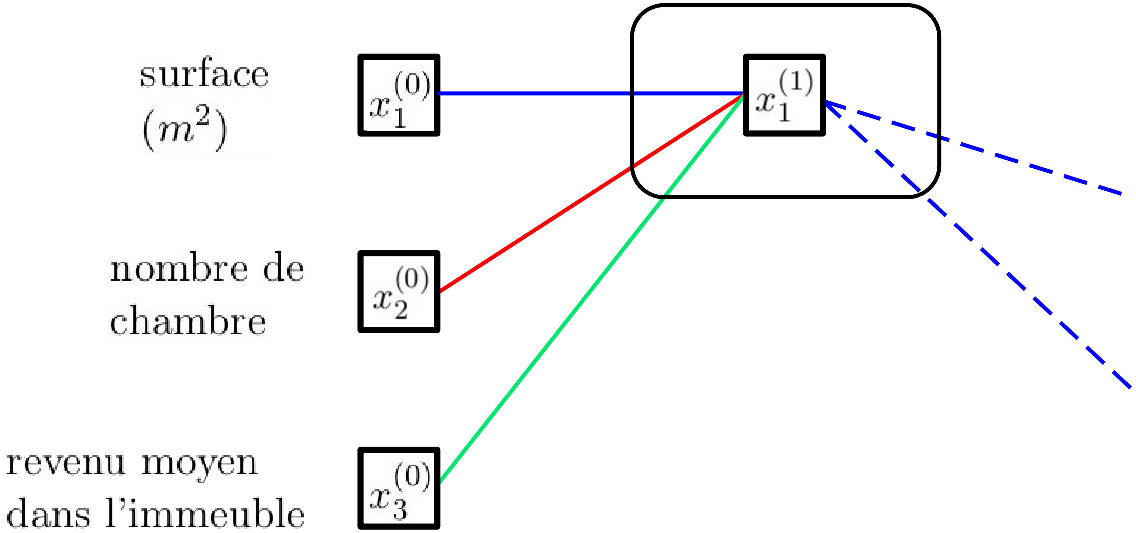
prédiction du prix d'un appartement
par deep learning



prédiction du prix d'un appartement par deep learning



prédiction du prix d'un appartement
par deep learning



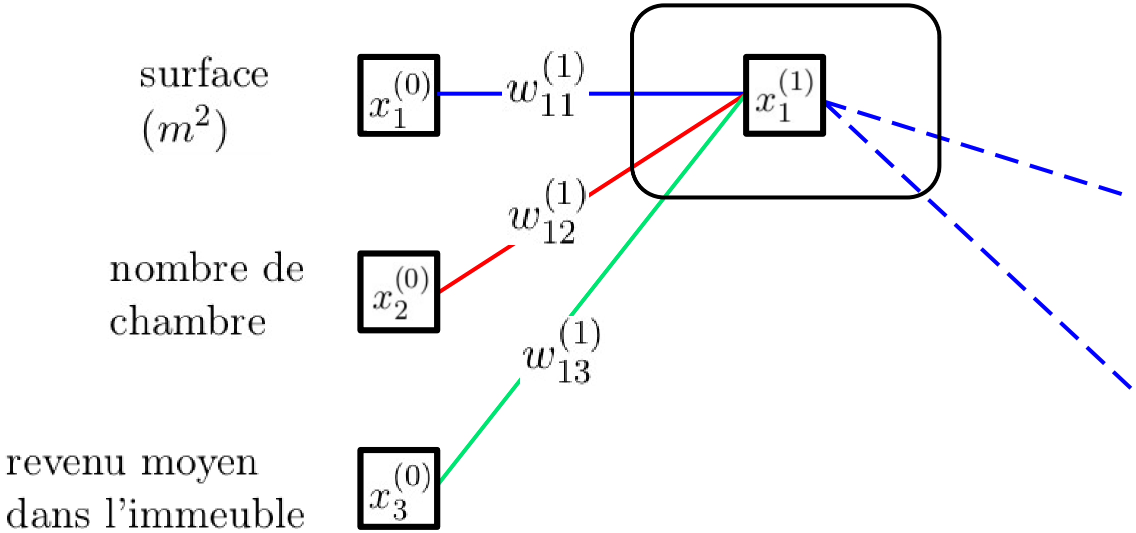
fonction poids : $w_{jk}^{(n)}$

couche

neurone j de
la couche n

signal provenant
du neurone k

prédiction du prix d'un appartement
par deep learning



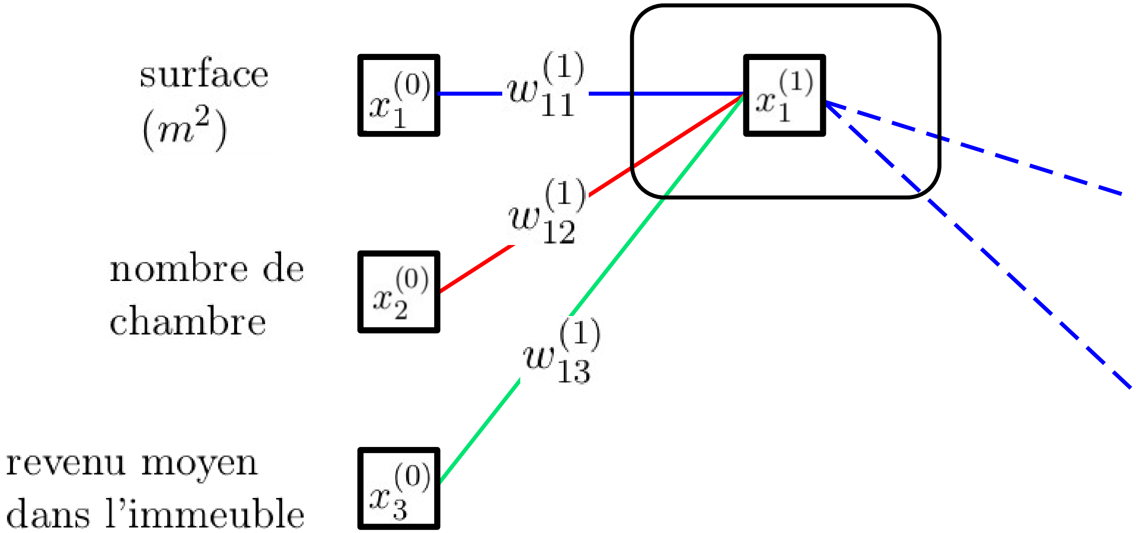
fonction poids : $w_{jk}^{(n)}$

couche

neurone j de
la couche n

signal provenant
du neurone k

prédiction du prix d'un appartement
par deep learning



fonction poids : $w_{jk}^{(n)}$

couche

neurone j de
la couche n

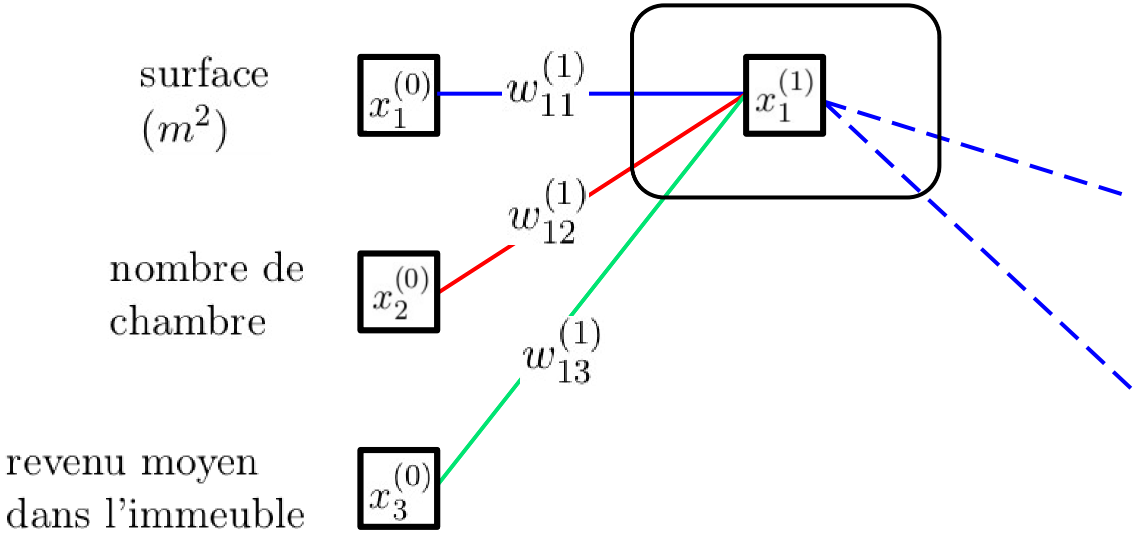
signal provenant
du neurone k

fonction d'agrégation : $p_j^{(n)}$

couche

neurone j de
la couche n

prédiction du prix d'un appartement
par deep learning



fonction biais

$$p_j^{(n)} = \sum_k w_{jk}^{(n)} x_k^{(n-1)} + b_j^{(n)}$$

couche

fonction poids : $w_{jk}^{(n)}$

signal provenant
du neurone k

neurone j de
la couche n

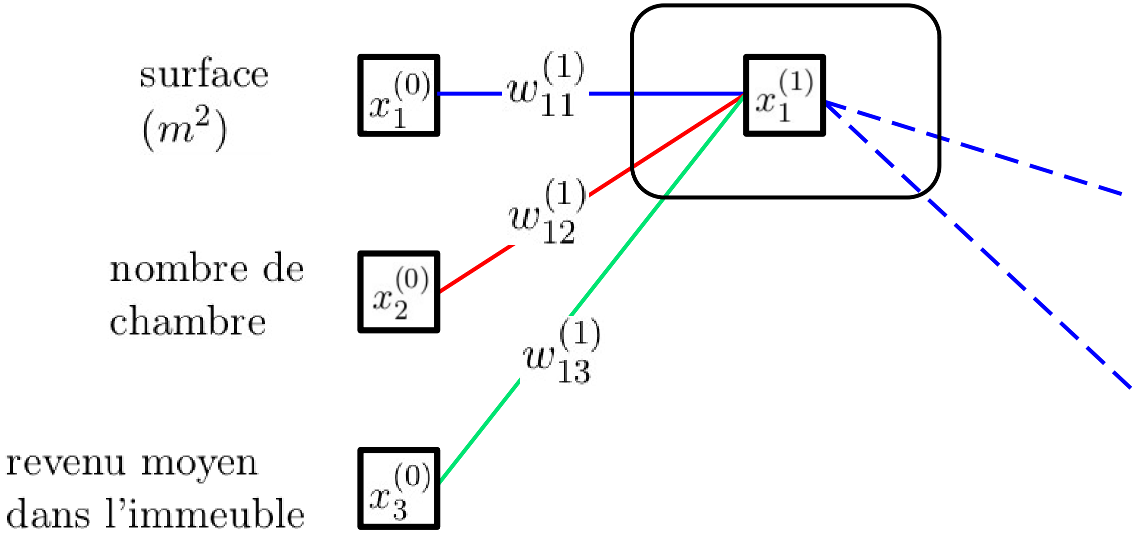
couche

fonction d'agrégation : $p_j^{(n)}$

neurone j de
la couche n

prédiction du prix d'un appartement
par deep learning

fonction biais



$$p_j^{(n)} = \sum_k w_{jk}^{(n)} x_k^{(n-1)} + b_j^{(n)}$$

$$p_1^{(1)} = w_{11}^{(1)} x_1^0 + w_{12}^{(1)} x_2^0 + w_{13}^{(1)} x_3^0 + b_1^{(1)}$$

couche

fonction poids : $w_{jk}^{(n)}$

signal provenant
du neurone k

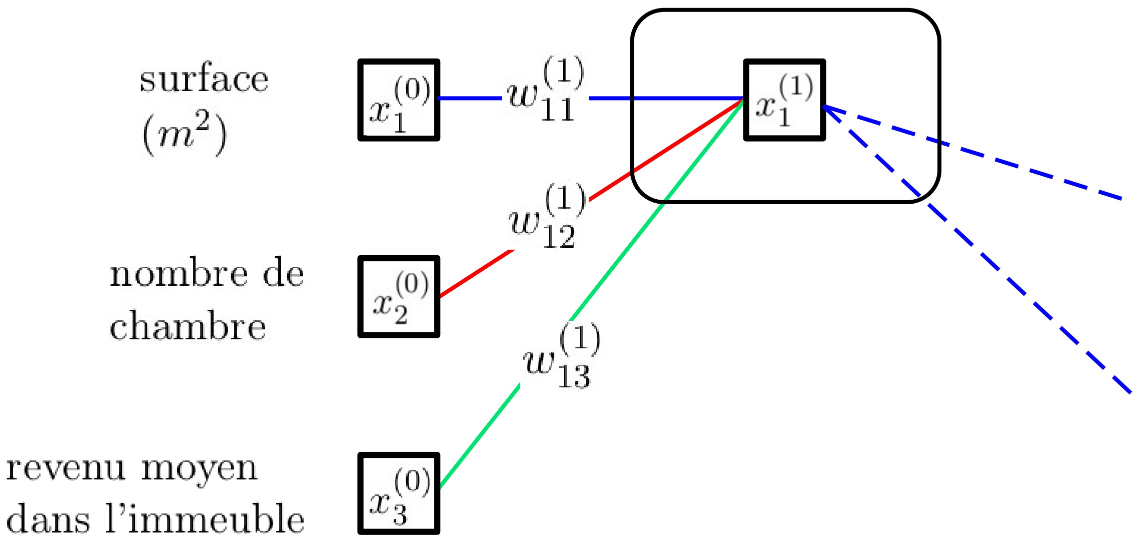
neurone j de
la couche n

couche

fonction d'agrégation : $p_j^{(n)}$

neurone j de
la couche n

prédiction du prix d'un appartement
par deep learning



fonction biais

$$p_j^{(n)} = \sum_k w_{jk}^{(n)} x_k^{(n-1)} + b_j^{(n)}$$

fonction d'activation

exemple :

$$x_j^{(n)} = \max\left(0, p_j^{(n)}\right)$$

fonction poids : $w_{jk}^{(n)}$

couche

neurone j de
la couche n

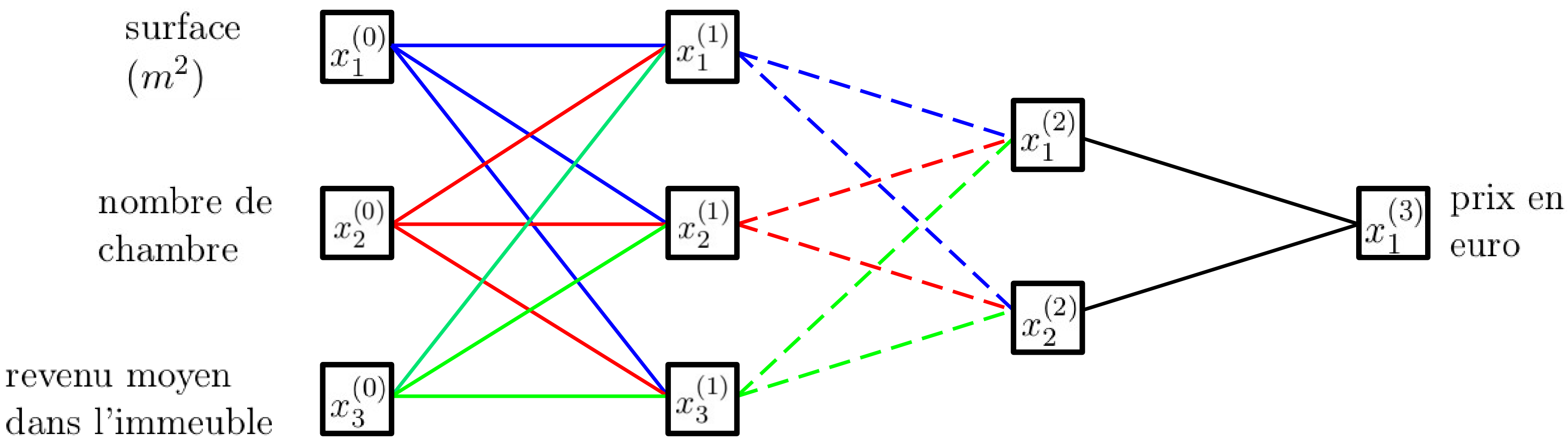
signal provenant
du neurone k

fonction d'agrégation : $p_j^{(n)}$

couche

neurone j de
la couche n

prédiction du prix d'un appartement
par deep learning



si on connait les $w_{jk}^{(n)}$ et $b_j^{(n)}$
alors on peut déduire $x_1^{(3)}$

Prix Réel

$$x_1^{(3)} = f\left(\vec{x}^{\ (0)}, w_{jk}^{(n)}, b_j^{(n)}\right) \xrightarrow{\text{erreur}} e^{(n)} = \left(x_1^{(3)} - PR\right)^2$$

prédiction du prix d'un appartement
par deep learning

Comment trouver les $w_{jk}^{(n)}$ et $b_j^{(n)}$?

C'est la phase d'entraînement du réseau de neurone.

prédiction du prix d'un appartement
par deep learning

Comment trouver les $w_{jk}^{(n)}$ et $b_j^{(n)}$?

C'est la phase d'entraînement du réseau de neurone.

Procédure :

1. On initialise à des valeurs quelconques les poids et biais.

boucle jusqu'à convergence

2. On effectue un entrainement.
3. On calcule l'erreur de sortie $e^{(n)}$.
4. On applique algorithme de retro-propagation de l'erreur

$$\frac{\partial e}{\partial w} = \frac{\partial e}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial w}$$

formule de dérivation d'une fonction de plusieurs variables

dérivées partielles

5. On réactualise les poids grâce à l'application de la formule précédente

Objectifs du cours :

$$f \ : \ \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$$

préING1

limite, continuité

dérivée, dérivabilité, développement limité

équation différentielle

Généralisations aux cas

$$\mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^p$$

préING2

plus généralement $\quad E \longrightarrow F$

Chapitre 2 : Espace Vectoriel Normé

Eléments de topologie dans $\mathbb{R}^n$

(a) de norme et de distance
(b) de boule ouverte et de boule fermée
(c) d'ouvert, de fermé et de compact
(d) et enfin, d'intérieur et d'adhérent

Suites d'éléments d'un EVN

(a) de convergence
(b) de suites extraites et de valeurs d'adhérence
(c) de suite de Cauchy
(d) et enfin, d'espace complet et de Banach

Chapitre 3 : Limite et Applications Continues

(a) de limite

(b) de continuité et de continuité uniforme

Chapitre 3 : Limite et Applications Continues

(a) de limite

(b) de continuité et de continuité uniforme

Chapitre 4 : Calcul différentiel du 1er ordre

(a) de dérivées partielles d'ordre 1

(b) de différentiabilité

(c) de classe $\mathcal{C}^1$

(d) équations aux dérivées partielles d'ordre 1

Chapitre 5 : Calcul différentiel d'ordre supérieur

(a) dérivées partielles d'ordre supérieur à 1

(b) classe $\mathcal{C}^k$

(c) équations aux dérivées partielles d'ordre 2

(d) recherche des extremums d'une fonction de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$

1. Comprendre les mathématiques ne signifie pas connaître par coeur les définitions et les théorèmes.

2. Comprendre un théorème ne signifie pas connaître par coeur sa démonstration.

3. Savoir faire des mathématiques ne signifie pas de ne pas faire appel à l'intuition ou de ne pas avoir d'image mentale.

Parfois, la rigueur mathématique et l'apprentissage quasiment automatique que vous faites des définitions, des théorèmes et des démonstrations semblent être un frein à votre compréhension

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Soit g et f deux applications $\mathcal{C}^1$ de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Chapitre 1 :

Introduction générale

a. Objectifs

b. Plan

c. A propos des math

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Soit g et f deux applications $\mathcal{C}^1$ de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Soit $h = g \circ f$

$$\forall x \in \mathbb{R},\ h(x) = g\big(f(x)\big)$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Soit g et f deux applications $\mathcal{C}^1$ de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Soit $h = g \circ f$

$$\forall x \in \mathbb{R},\ h(x) = g\big(f(x)\big)$$

Question :

$$h'(x) = \ ?$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Définition mathématique

$$\omega'(x) = \frac{d\omega}{dx} = \lim_{dx \to 0} \frac{\omega(x+dx) - \omega(x)}{dx}$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Définition mathématique

$$\omega'(x) = \frac{d\omega}{dx} = \lim_{dx \to 0} \frac{\omega(x+dx) - \omega(x)}{dx}$$

on peut connaitre cela par coeur
sans rien comprendre à sa signification

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Définition mathématique

$$\omega'(x) = \frac{d\omega}{dx} = \lim_{dx \to 0} \frac{\omega(x+dx) - \omega(x)}{dx}$$

Définition graphique

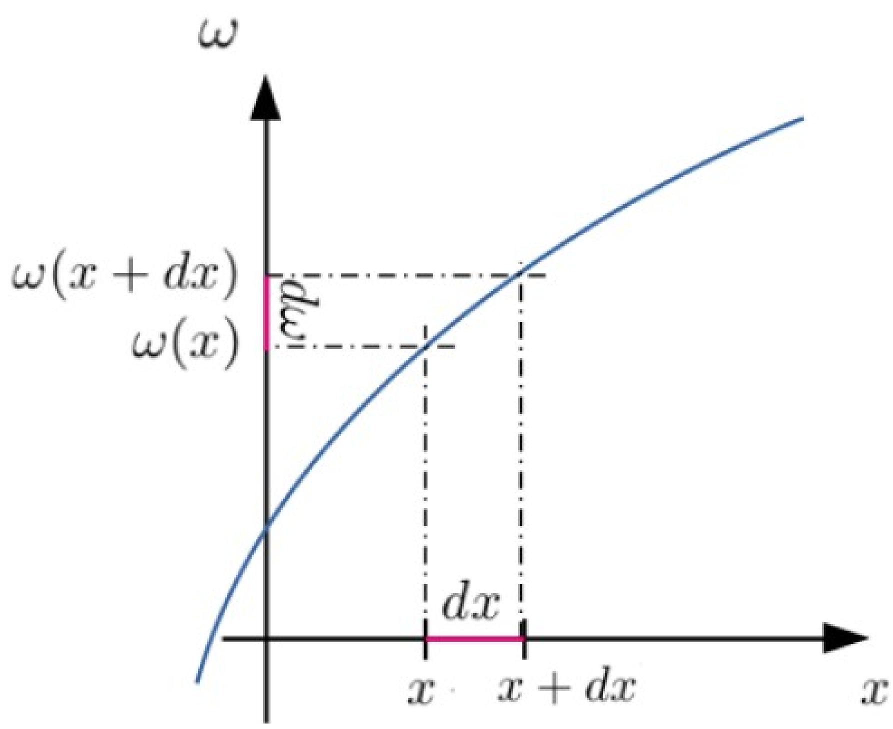
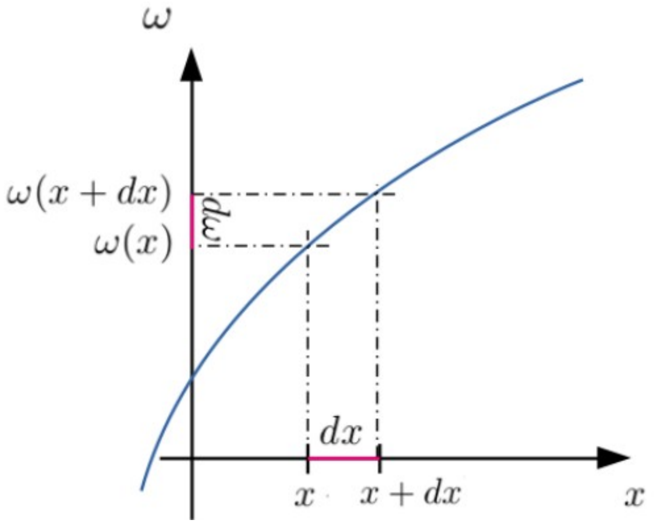


Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Définition mathématique

$$\omega'(x) = \frac{d\omega}{dx} = \lim_{dx \to 0} \frac{\omega(x+dx) - \omega(x)}{dx}$$

Définition graphique



Définition littéraire

la dérivée de ω en x est la variation de ω en x par unité infinitésimale de distance au point x

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$h'(x) = \lim_{dx \to 0} \frac{h(x+dx) - h(x)}{dx}$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$
\begin{aligned}
h'(x) &= \lim_{dx \to 0} \frac{h(x+dx) - h(x)}{dx} \\
&= \lim_{dx \to 0} \frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{dx}
\end{aligned}
$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$\begin{aligned}
h'(x) &= \lim_{dx \to 0} \frac{h(x+dx) - h(x)}{dx} \\
&= \lim_{dx \to 0} \frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{dx} \\
&= \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \times \frac{f(x+dx) - f(x)}{dx} \right]
\end{aligned}$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$\begin{aligned}
h'(x) &= \lim_{dx \to 0} \frac{h(x+dx) - h(x)}{dx} \\
&= \lim_{dx \to 0} \frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{dx} \\
&= \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \times \frac{f(x+dx) - f(x)}{dx} \right] \\
&= \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right] \lim_{dx \to 0} \left[\frac{f(x+dx) - f(x)}{dx} \right]
\end{aligned}$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$
\begin{aligned}
h'(x) &= \lim_{dx\to 0} \frac{h(x+dx)-h(x)}{dx} \\
&= \lim_{dx\to 0} \frac{g\big(f(x+dx)\big)-g\big(f(x)\big)}{dx} \\
&= \lim_{dx\to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big)-g\big(f(x)\big)}{f(x+dx)-f(x)} \times \frac{f(x+dx)-f(x)}{dx}\right] \\
&= \lim_{dx\to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big)-g\big(f(x)\big)}{f(x+dx)-f(x)}\right] \underbrace{\lim_{dx\to 0} \left[\frac{f(x+dx)-f(x)}{dx}\right]}_{f'(x)}
\end{aligned}
$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$
\begin{aligned}
h'(x) &= \lim_{dx\to 0} \frac{h(x+dx)-h(x)}{dx} \\
&= \lim_{dx\to 0} \frac{g\big(f(x+dx)\big)-g\big(f(x)\big)}{dx} \\
&= \lim_{dx\to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big)-g\big(f(x)\big)}{f(x+dx)-f(x)} \times \frac{f(x+dx)-f(x)}{dx}\right] \\
&= \lim_{dx\to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big)-g\big(f(x)\big)}{f(x+dx)-f(x)}\right] \lim_{dx\to 0} \left[\frac{f(x+dx)-f(x)}{dx}\right] \\
&= f'(x) \lim_{dx\to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big)-g\big(f(x)\big)}{f(x+dx)-f(x)}\right]
\end{aligned}
$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$h'(x) = f'(x) \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right]$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$h'(x) = f'(x) \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right]$$

posons

$$k = f(x+dx) - f(x)$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$h'(x) = f'(x) \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right]$$

posons

$$k = f(x+dx) - f(x)$$

$$\Rightarrow \quad \lim_{dx \to 0} k = \lim_{dx \to 0} \left[f(x+dx) - f(x) \right] = 0$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$h'(x) = f'(x) \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right]$$

posons

$$k = f(x+dx) - f(x)$$

$$\Rightarrow \quad \lim_{dx \to 0} k = \lim_{dx \to 0} \left[f(x+dx) - f(x) \right] = 0$$

$$\lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right]$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$h'(x) = f'(x) \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right]$$

posons

$$k = f(x+dx) - f(x)$$

$$\Rightarrow \quad \lim_{dx \to 0} k = \lim_{dx \to 0} \left[f(x+dx) - f(x) \right] = 0$$

$$\lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right] = \lim_{k \to 0} \left[\frac{g\big(f(x)+k\big) - g\big(f(x)\big)}{k} \right]$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$h'(x) = f'(x) \lim_{dx\to 0}\left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)}\right]$$

posons

$$k = f(x+dx) - f(x)$$

$$\lim_{dx\to 0} k = \lim_{dx\to 0}\left[f(x+dx) - f(x)\right] = 0$$

$$\lim_{dx\to 0}\left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)}\right] = \lim_{k\to 0}\left[\frac{g\big(f(x)+k\big) - g\big(f(x)\big)}{k}\right]$$

$$= g'\big(f(x)\big)$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par la méthode classique

$$h'(x) = f'(x) \lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right]$$

posons

$$k = f(x+dx) - f(x)$$

$$\Rightarrow \quad \lim_{dx \to 0} k = \lim_{dx \to 0} \left[f(x+dx) - f(x) \right] = 0$$

$$\lim_{dx \to 0} \left[\frac{g\big(f(x+dx)\big) - g\big(f(x)\big)}{f(x+dx) - f(x)} \right] = \lim_{k \to 0} \left[\frac{g\big(f(x)+k\big) - g\big(f(x)\big)}{k} \right]$$
$$= g'\big(f(x)\big)$$

Finalement

$$h'(x) = g'\big(f(x)\big) \times f'(x)$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 1 : Si $f'(x) = 0$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 1 : Si $f'(x) = 0$

alors pour $dx \longrightarrow 0$ $f(x+dx) = f(x)$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 1 : Si $f'(x) = 0$

alors pour $dx \longrightarrow 0$ $f(x + dx) = f(x)$

On a donc

$$g\big(f(x + dx)\big) = g\big(f(x)\big)$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 1 : Si $f'(x) = 0$

alors pour $dx \longrightarrow 0$ $\quad f(x + dx) = f(x)$

On a donc

$$g\big(f(x + dx)\big) = g\big(f(x)\big) \Longleftrightarrow h(x + dx) = h(x)$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 1 : Si $f'(x) = 0$

alors pour $dx \longrightarrow 0$ $\quad f(x+dx) = f(x)$

On a donc

$$g\big(f(x+dx)\big) = g\big(f(x)\big) \Longleftrightarrow h(x+dx) = h(x)$$

d'où l'on déduit

$$h'(x) = 0$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 1 : Si $f'(x) = 0$

alors pour $dx \longrightarrow 0$ $\quad f(x+dx) = f(x)$

On a donc

$$g\big(f(x+dx)\big) = g\big(f(x)\big) \Longleftrightarrow h(x+dx) = h(x)$$

d'où l'on déduit

$$h'(x) = 0$$

$$h'(x) = \boxed{???} \times f'(x)$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 2 :

Si $g\big(f(x)\big)$ est constant en $X = f(x)$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 2 :

Si $g\big(f(x)\big)$ est constant en $X = f(x)$

alors en $x + dx$ (avec $dx \longrightarrow 0$)

$$g\big(f(x+dx)\big) = g\big(f(x)\big)$$

Ph.D. Elian Masnada

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

Cas limite 2 :

$$\text{Si } g\big(f(x)\big) \text{ est constant en } X = f(x)$$

alors en $x + dx$ (avec $dx \longrightarrow 0$)

$$g\big(f(x+dx)\big) = g\big(f(x)\big)$$

Donc

$$h'(x) = 0$$

Illustration : dérivée d'une composée de fonctions

Par cas limites

<u>Cas limite 2 :</u>

$$\text{Si } g\big(f(x)\big) \text{ est constant en } X = f(x)$$

alors en $x + dx$ (avec $dx \longrightarrow 0$)

$$g\big(f(x+dx)\big) = g\big(f(x)\big)$$

Donc

$$h'(x) = 0$$

Finalement

$$h'(x) = g'\big(f(x)\big) \times f'(x)$$

Dernière Remarque :

Nous allons étudier les applications d'un espace vectoriel quelconque à un autre espace vectoriel quelconque

Dernière Remarque :

Nous allons étudier les applications d'un espace vectoriel quelconque à un autre espace vectoriel quelconque

vous connaissez les applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

espace vectoriel

Dernière Remarque :

Nous allons étudier les applications d'un espace vectoriel quelconque à un autre espace vectoriel quelconque

vous connaissez les applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

espace vectoriel

Les définitions et les théorèmes contiennent en cas limite tout ce que vous connaissez

$$f \ : \ \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$$

préING1

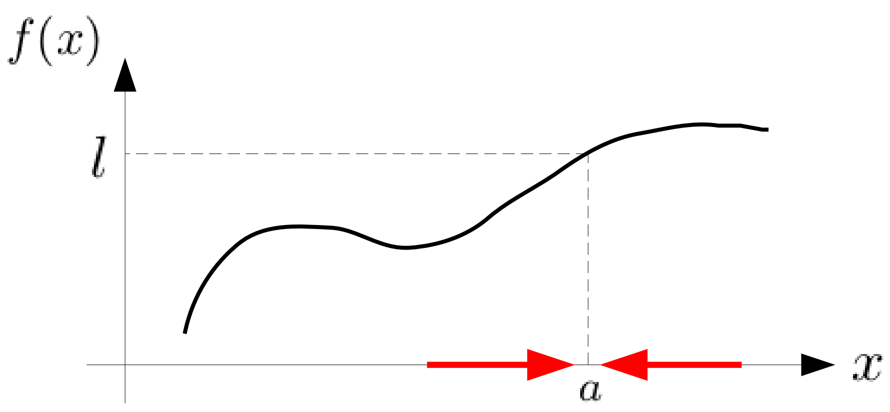
limite, continuité

dérivée, dérivabilité, développement limité

équation différentielle

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

$$\Longleftrightarrow \quad \forall \epsilon > 0, \ \exists \eta > 0 \ / \ |x - a| < \eta \Longrightarrow |f(x) - l| < \epsilon$$



$$f \ : \ \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$$

préING1

limite, continuité

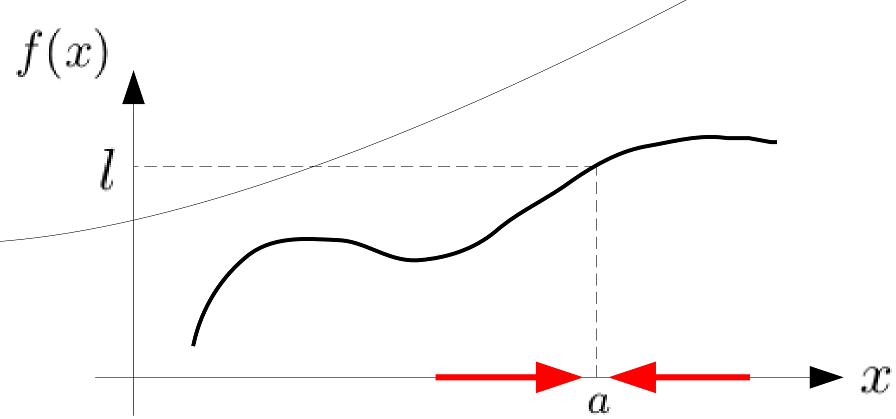
dérivée, dérivabilité, développement limité

équation différentielle

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

$$\Longleftrightarrow \quad \forall \epsilon > 0, \ \exists \eta > 0 \ / \ |x - a| < \eta \Longrightarrow |f(x) - l| < \epsilon$$

notion de distance



Il existe ϵ tel que

$]a - \epsilon ; a + \epsilon[$

ouvert (topologie)

$$f \ : \ \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$$

préING1

limite, continuité

dérivée, dérivabilité, développement limité

équation différentielle

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

$$\Longleftrightarrow \ \forall \epsilon > 0, \ \exists \eta > 0 \ / \ |x - a| < \eta \Longrightarrow |f(x) - l| < \epsilon$$

généralisation des notions de :

- ★ norme, distance
- ★ topologie : ouvert, fermé, intérieur, adhérent

Ph.D. Elian Masnada

Définition 1 : (norme)
Soit E un espace vectoriel. Soit $\|\cdot\|$ une application de $\mathbb{E}$ dans $\mathbb{R}$. $\|\cdot\|$ est une norme sur E, si, et seulement si, l'application vérifie les 3 propriétés suivantes

1. $\forall x \in E, \ \|x\| = 0 \Longrightarrow x = 0_E$ (séparation)
2. $\forall x \in E, \forall \lambda \in \mathbb{R}, \ \|\lambda x\| = |\lambda| \, \|x\|$ (absolue homogénéité)
3. $\forall x, y \in E, \ \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (inégalité triangulaire)

On dira alors que $(E, \|\cdot\|)$ est un espace vectoriel normé (EVN).

Ph.D. Elian Masnada

Définition 1 : (norme)
Soit E un espace vectoriel. Soit $\|\cdot\|$ une application de $\mathbb{E}$ dans $\mathbb{R}$. $\|\cdot\|$ est une norme sur E, si, et seulement si, l'application vérifie les 3 propriétés suivantes

1. $\forall x \in E, \ \|x\| = 0 \Longrightarrow x = 0_E$ (séparation)
2. $\forall x \in E, \forall \lambda \in \mathbb{R}, \ \|\lambda x\| = |\lambda| \, \|x\|$ (absolue homogénéité)
3. $\forall x, y \in E, \ \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (inégalité triangulaire)

On dira alors que $(E, \|\cdot\|)$ est un espace vectoriel normé (EVN).

Remarque 1 : $1. + 2.$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 1 : (norme)
Soit E un espace vectoriel. Soit $\|\cdot\|$ une application de $\mathbb{E}$ dans $\mathbb{R}$. $\|\cdot\|$ est une norme sur E, si, et seulement si, l'application vérifie les 3 propriétés suivantes

1. $\forall x \in E,\ \|x\| = 0 \Longrightarrow x = 0_E$ (séparation)
2. $\forall x \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\ \|\lambda x\| = |\lambda|\,\|x\|$ (absolue homogénéité)
3. $\forall x, y \in E,\ \|x+y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (inégalité triangulaire)

On dira alors que $(E, \|\cdot\|)$ est un espace vectoriel normé (EVN).

Remarque 1 : 1. + 2.

$$\|0_E\| = \|0 \times 0_E\| = 0 \times \|0_E\| = 0$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 1 : (norme)
Soit E un espace vectoriel. Soit $\|\cdot\|$ une application de $\mathbb{E}$ dans $\mathbb{R}$. $\|\cdot\|$ est une norme sur E, si, et seulement si, l'application vérifie les 3 propriétés suivantes

1. $\forall x \in E,\ \|x\| = 0 \Longrightarrow x = 0_E$ (séparation)
2. $\forall x \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\ \|\lambda x\| = |\lambda|\ \|x\|$ (absolue homogénéité)
3. $\forall x, y \in E,\ \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (inégalité triangulaire)

On dira alors que $(E, \|\cdot\|)$ est un espace vectoriel normé (EVN).

Remarque 1 : 1. + 2.

$$\|0_E\| = \|0 \times 0_E\| = 0 \times \|0_E\| = 0$$

$$x = 0_E \Longrightarrow \|x\| = 0$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 1 : (norme)

Soit E un espace vectoriel. Soit $\|\cdot\|$ une application de $\mathbb{E}$ dans $\mathbb{R}$. $\|\cdot\|$ est une norme sur E, si, et seulement si, l'application vérifie les 3 propriétés suivantes

1. $\forall x \in E, \|x\| = 0 \Longrightarrow x = 0_E$ (séparation)
2. $\forall x \in E, \forall \lambda \in \mathbb{R}, \|\lambda x\| = |\lambda| \, \|x\|$ (absolue homogénéité)
3. $\forall x, y \in E, \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (inégalité triangulaire)

On dira alors que $(E, \|\cdot\|)$ est un espace vectoriel normé (EVN).

Remarque 1 : 1. + 2.

$$\|0_E\| = \|0 \times 0_E\| = 0 \times \|0_E\| = 0$$

$$x = 0_E \Longrightarrow \|x\| = 0$$

Remarque 2 :

Vous connaissez un exemple de norme dans $\mathbb{R}^3$

$$\text{soit } \vec{X} = (x, y, z), \text{ alors } \|\vec{X}\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Donnons des exemples de norme sur $E = \mathbb{R}^n$:

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n) \in \mathbb{R}^n$. Alors, les trois applications suivantes sont des normes

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i| \qquad \|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

$$\|x\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} (|x_i|)$$

Donnons des exemples de norme sur $E = \mathbb{R}^n$:
Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n) \in \mathbb{R}^n$. Alors, les trois applications suivantes sont des normes

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i| \qquad \|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

$$\|x\|_\infty = \max_{1\leq i\leq n} (|x_i|)$$

Remarques

1) Si $E = \mathbb{R}$, alors $\forall x \in E$, $\|x\|_1 = \|x\|_2 = \|x\|_\infty = |x|$

Ph.D. Elian Masnada

Donnons des exemples de norme sur $E = \mathbb{R}^n$:

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n) \in \mathbb{R}^n$. Alors, les trois applications suivantes sont des normes

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i| \qquad \|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

$$\|x\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} (|x_i|)$$

Remarques

1) Si $E = \mathbb{R}$, alors $\forall x \in E$, $\|x\|_1 = \|x\|_2 = \|x\|_\infty = |x|$

2) Si $E = \mathbb{R}^3$, alors $\forall \vec{X} = (x, y, z) \in E$, $\|x\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

→ c'est donc la norme que vous connaissez

→ on appelle cette norme, la norme euclidienne

Ph.D. Elian Masnada

Donnons des exemples de norme sur $E = \mathbb{R}^n$:

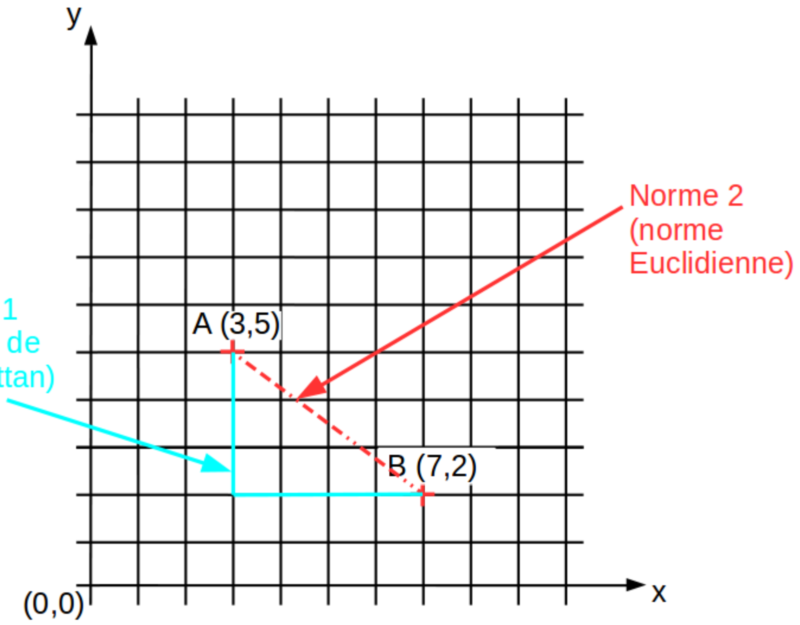
Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n) \in \mathbb{R}^n$. Alors, les trois applications suivantes sont des normes

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i| \qquad \|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

$$\|x\|_\infty = \max_{1\leq i\leq n} (|x_i|)$$

Remarques

3)



Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \Rightarrow x = 0_E$

Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \quad \Rightarrow x = 0_E$

Vérification de la 2ème propriétés :

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a donc $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)$.

Alors

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \quad \Rightarrow x = 0_E$

Vérification de la 2ème propriétés :
Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a donc $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)$.
Alors

$$\|\lambda x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |\lambda x_i|$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \quad \Rightarrow x = 0_E$

Vérification de la 2ème propriétés :

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a donc $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)$.
Alors

$$\|\lambda x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |\lambda x_i| = |\lambda| \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \quad \Rightarrow x = 0_E$

Vérification de la 2ème propriétés :

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a donc $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)$.
Alors

$$\|\lambda x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |\lambda x_i| = |\lambda| \sum_{i=1}^{n} |x_i| = |\lambda|\, \|x\|_1$$

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \Rightarrow x = 0_E$

Vérification de la 2ème propriétés :

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a donc $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)$.

Alors

$$\|\lambda x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |\lambda x_i| = |\lambda| \sum_{i=1}^{n} |x_i| = |\lambda|\, \|x\|_1$$

Vérification de la 3ème propriétés :

Soient $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $y = (y_1, y_2, ..., y_n)$.

Alors $x + y = (x_1 + y_1, ..., x_n + y_n)$.

$$\|x + y\|_1 =$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \quad \Rightarrow x = 0_E$

Vérification de la 2ème propriétés :

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a donc $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)$.

Alors

$$\|\lambda x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |\lambda x_i| = |\lambda| \sum_{i=1}^{n} |x_i| = |\lambda|\, \|x\|_1$$

Vérification de la 3ème propriétés :

Soient $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $y = (y_1, y_2, ..., y_n)$.

Alors $x + y = (x_1 + y_1, ..., x_n + y_n)$.

$$\|x + y\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i + y_i|$$

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \quad \Rightarrow x = 0_E$

Vérification de la 2ème propriétés :

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a donc $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)$.

Alors

$$\|\lambda x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |\lambda x_i| = |\lambda| \sum_{i=1}^{n} |x_i| = |\lambda|\, \|x\|_1$$

Vérification de la 3ème propriétés :

Soient $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $y = (y_1, y_2, ..., y_n)$.

Alors $x + y = (x_1 + y_1, ..., x_n + y_n)$.

$$\|x+y\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i + y_i| \leq \sum_{i=1}^{n} (|x_i| + |y_i|)$$

Ph.D. Elian Masnada

Vérifions par exemple que $\|\cdot\|_1$ est bien une norme

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

Vérification de la 1ère propriété :

$$\|x\|_1 = 0 \Longrightarrow \forall i,\ x_i = 0$$

On voit donc que $\|x\|_1 = 0 \quad \Rightarrow x = 0_E$

Vérification de la 2ème propriétés :

Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a donc $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)$.

Alors

$$\|\lambda x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |\lambda x_i| = |\lambda| \sum_{i=1}^{n} |x_i| = |\lambda|\, \|x\|_1$$

Vérification de la 3ème propriétés :

Soient $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $y = (y_1, y_2, ..., y_n)$.

Alors $x + y = (x_1 + y_1, ..., x_n + y_n)$.

$$\|x + y\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i + y_i| \leq \sum_{i=1}^{n} (|x_i| + |y_i|) = \|x\|_1 + \|y\|_1$$

Ph.D. Elian Masnada

L'application suivante est-elle une norme ?

$$\begin{array}{rcccl} N & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & N(x,y) = |4x+7y| \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

L'application suivante est-elle une norme ?

$$\begin{array}{rccl} N : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & N(x,y) = |4x+7y| \end{array}$$

si $N(x,y) = 0$ alors $|4x+7y| = 0$

Ph.D. Elian Masnada

L'application suivante est-elle une norme ?

$$\begin{array}{cccc} N : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & N(x,y) = |4x+7y| \end{array}$$

si $N(x,y) = 0$ alors $|4x+7y| = 0$

or $|4x+7y| = 0 \implies x = -\frac{7}{4}y$

Ph.D. Elian Masnada

L'application suivante est-elle une norme ?

$$\begin{array}{cccl} N & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & N(x,y) = |4x+7y| \end{array}$$

NON

si $N(x,y) = 0$ alors $|4x+7y| = 0$

or $|4x+7y| = 0 \implies x = -\frac{7}{4}y$

La 1ère propriété n'est pas vérifiée, donc N n'est pas une norme.

Ph.D. Elian Masnada

L'application suivante est-elle une norme ?

$$\begin{array}{rccl} N : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & N(x,y) = |4x+7y| \end{array}$$

NON

si $N(x,y) = 0$ alors $|4x+7y| = 0$

or $|4x+7y| = 0 \implies x = -\frac{7}{4}y$

La 1ère propriété n'est pas vérifiée, donc N n'est pas une norme.

Si $E = \mathcal{C}([0,1],\mathbb{R})$: (espace des fonctions continues sur $[0,1]$ dans $\mathbb{R}$)

Soit f une fonction appartenant à E. Alors les trois normes les plus souvent utilisées sont

$$\|f\|_1 = \int_0^1 |f(x)|dx \qquad \|f\|_2 = \sqrt{\int_0^1 f^2(x)dx}$$

$$\|f\|_\infty = \max_{0\leq x\leq 1}(|f(x)|)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x, \ \|x\| \geq 0$.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 1</u> : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x, \ \|x\| \geq 0$.

démonstration :

$\forall x \in E, \ 0 = \|0_E\|$:

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x,\ \|x\| \geq 0.$

démonstration :

$\forall x \in E,\ 0 = \|0_E\| = \|x - x\|$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x,\ \|x\| \geq 0$.

démonstration :

$\forall x \in E,\ 0 = \|0_E\| = \|x - x\| \leq \|x\| + \|-x\|$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x, \ \|x\| \geq 0$.

démonstration :

$\forall x \in E, \, 0 = \|0_E\| = \|x - x\| \leq \|x\| + \|-x\| = 2\,\|x\|$.

Propriété 1 : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x, \ \|x\| \geq 0$.

démonstration :

$\forall x \in E$, $0 = \|0_E\| = \|x - x\| \leq \|x\| + \|-x\| = 2\|x\|$. Donc $\|x\| \geq 0$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x,\ \|x\| \geq 0$.

démonstration :
$\forall x \in E,\ 0 = \|0_E\| = \|x - x\| \leq \|x\| + \|-x\| = 2\|x\|$. Donc $\|x\| \geq 0$.

Propriété 2 :

Pour la norme euclidienne : $\forall x, y \in E,\ \|x+y\| = \|x\| + \|y\| \iff x = \lambda y$ avec $\lambda \in \mathbb{R}$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x,\ \|x\| \geq 0$.

démonstration :

$\forall x \in E,\ 0 = \|0_E\| = \|x - x\| \leq \|x\| + \|-x\| = 2\,\|x\|$. Donc $\|x\| \geq 0$.

Propriété 2 :

Pour la norme euclidienne : $\forall x, y \in E,\ \|x+y\| = \|x\| + \|y\| \iff x = \lambda y$ avec $\lambda \in \mathbb{R}$.

Démonstration : Admis car cela fera l'objet d'une démonstration dans le cours d'algèbre bilinéaire.

Propriété 1 : (Positivité)

La norme est définie positive : $\forall x,\ \|x\| \geq 0$.

démonstration :

$\forall x \in E$, $0 = \|0_E\| = \|x - x\| \leq \|x\| + \|-x\| = 2\|x\|$. Donc $\|x\| \geq 0$.

Propriété 2 :

Pour la norme euclidienne : $\forall x, y \in E,\ \|x+y\| = \|x\| + \|y\| \iff x = \lambda y$ avec $\lambda \in \mathbb{R}$.

Démonstration : Admis car cela fera l'objet d'une démonstration dans le cours d'algèbre bilinéaire.

ceci n'est en général pas vrai (voir poly p.15)

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|),\ \|x-y\| \geq |\,\|x\| - \|y\|\,|$$

démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|), \ \|x - y\| \geq |\, \|x\| - \|y\| \,|$$

démonstration :

$\forall x, y$ $\quad\quad\quad\quad$ $\|x\| = \|x - y + y\|$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|),\ \|x-y\| \geq |\,\|x\| - \|y\|\,|$$

démonstration :

$\forall x, y$ $\quad\|x\| = \|x-y+y\| \leq \|x-y\| + \|y\|$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|), \ \|x-y\| \geq \big| \|x\| - \|y\| \big|$$

démonstration :

$\forall x, y$

$$\|x\| = \|x-y+y\| \leq \|x-y\| + \|y\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|x\| - \|y\|$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|), \ \|x-y\| \geq |\,\|x\| - \|y\|\,|$$

démonstration :

$\forall x, y$

$$\|x\| = \|x - y + y\| \leq \|x-y\| + \|y\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|x\| - \|y\|$$

$$\|y\| = \|y - x + x\|$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|),\ \|x-y\| \geq |\ \|x\| - \|y\|\ |$$

démonstration :

$\forall x, y$

$$\|x\| = \|x-y+y\| \leq \|x-y\| + \|y\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|x\| - \|y\|$$

$$\|y\| = \|y-x+x\| \leq \|y-x\| + \|x\|$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|),\ \|x-y\| \geq |\,\|x\| - \|y\|\,|$$

démonstration :

$\forall x, y$

$$\|x\| = \|x-y+y\| \leq \|x-y\| + \|y\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|x\| - \|y\|$$

$$\|y\| = \|y-x+x\| \leq \|y-x\| + \|x\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|y\| - \|x\|$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|),\ \|x-y\| \geq |\, \|x\| - \|y\| \,|$$

démonstration :

$\forall x, y$

$$\|x\| = \|x-y+y\| \leq \|x-y\| + \|y\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|x\| - \|y\|$$

$$\|y\| = \|y-x+x\| \leq \|y-x\| + \|x\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|y\| - \|x\|$$

On voit donc que

$$\|x-y\| \geq \max(\|y\| - \|x\|\, , \|x\| - \|y\|)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 : (2nd inégalité triangulaire)

$$\forall x, y \in (E, \|\cdot\|),\ \|x-y\| \geq |\, \|x\| - \|y\|\, |$$

démonstration :

$\forall x, y$

$$\|x\| = \|x-y+y\| \leq \|x-y\| + \|y\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|x\| - \|y\|$$

$$\|y\| = \|y-x+x\| \leq \|y-x\| + \|x\|$$

$$\Longrightarrow \|x-y\| \geq \|y\| - \|x\|$$

On voit donc que

$$\|x-y\| \geq \max(\|y\| - \|x\|, \|x\| - \|y\|) = |\, \|x\| - \|y\|\, |$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 2 : (normes équivalentes)

Soit E un espace vectoriel muni de deux normes $\|\cdot\|_a$ et $\|\cdot\|_b$. Alors, on dit que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ si, et seulement si, il existe α, $\beta > 0$ tels que

$$\forall x \in E,\ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

Cette relation est bien une relation d'équivalence :

Ph.D. Elian Masnada

Définition 2 : (normes équivalentes)

Soit E un espace vectoriel muni de deux normes $\|\cdot\|_a$ et $\|\cdot\|_b$. Alors, on dit que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ si, et seulement si, il existe $\alpha,\ \beta > 0$ tels que

$$\forall x \in E,\ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

Cette relation est bien une relation d'équivalence :

1. Réflexivité :

Ph.D. Elian Masnada

Définition 2 : (normes équivalentes)

Soit E un espace vectoriel muni de deux normes $\|\cdot\|_a$ et $\|\cdot\|_b$. Alors, on dit que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ si, et seulement si, il existe α, $\beta > 0$ tels que

$$\forall x \in E,\ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

Cette relation est bien une relation d'équivalence :

1. Réflexivité :

$$\forall x \in E,\ \|x\|_a \leq \|x\|_a \leq \|x\|_a$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 2 : (normes équivalentes)

Soit E un espace vectoriel muni de deux normes $\|\cdot\|_a$ et $\|\cdot\|_b$. Alors, on dit que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ si, et seulement si, il existe α, $\beta > 0$ tels que

$$\forall x \in E,\ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

Cette relation est bien une relation d'équivalence :

1. Réflexivité :

$$\forall x \in E,\ \|x\|_a \leq \|x\|_a \leq \|x\|_a$$

$\Rightarrow$ $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$

Ph.D. Elian Masnada

2. Symétrie : Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

Ph.D. Elian Masnada

2. Symétrie : Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

démonstration :

Considérons que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$

Ph.D. Elian Masnada

2. Symétrie : Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

démonstration :

Considérons que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$

$$\Rightarrow \quad \exists \alpha, \beta > 0 \ / \ \forall x \in E, \ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

Ph.D. Elian Masnada

2. <u>Symétrie :</u> Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

démonstration :

Considérons que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$

$$\Rightarrow \quad \exists \alpha, \beta > 0 \;/\; \forall x \in E,\; \underbrace{\alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b}_{} \leq \beta \|x\|_a$$

Ph.D. Elian Masnada

2. <u>Symétrie :</u> Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

démonstration :

Considérons que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$

$$\Rightarrow \exists \alpha, \beta > 0 \ / \ \forall x \in E, \ \underbrace{\alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b} \leq \beta \|x\|_a$$

$$\alpha > 0$$

$$\|x\|_a \leq \frac{1}{\alpha} \|x\|_b$$

2. <u>Symétrie :</u> Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

démonstration :

Considérons que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$

$$\exists \alpha, \beta > 0 \;/\; \forall x \in E,\; \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

$\alpha > 0$

$$\|x\|_a \leq \frac{1}{\alpha} \|x\|_b$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

2. Symétrie : Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

démonstration :

Considérons que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$

$$\Rightarrow \exists \alpha, \beta > 0 \ / \ \forall x \in E, \ \underbrace{\alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b} \leq \beta \|x\|_a$$

$$\underbrace{\|x\|_b \leq \beta \|x\|_a}$$

$\alpha > 0$: $\|x\|_a \leq \dfrac{1}{\alpha} \|x\|_b$

$\beta > 0$: $\dfrac{1}{\beta} \|x\|_b \leq \|x\|_a$

2. Symétrie : Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

démonstration :

Considérons que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$

$$\Rightarrow \exists \alpha, \beta > 0 \;/\; \forall x \in E,\ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

$\alpha > 0$: $\|x\|_a \leq \dfrac{1}{\alpha} \|x\|_b$

$\beta > 0$: $\dfrac{1}{\beta} \|x\|_b \leq \|x\|_a$

$$\Rightarrow \forall x \in E,\ \frac{1}{\beta} \|x\|_b \leq \|x\|_a \leq \frac{1}{\alpha} \|x\|_b$$

Ph.D. Elian Masnada

2. <u>Symétrie :</u> Si $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$ alors $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$.

démonstration :

Considérons que $\|\cdot\|_a$ est équivalent à $\|\cdot\|_b$

$$\exists \alpha, \beta > 0 \ / \ \forall x \in E, \ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

$\alpha > 0$

$\beta > 0$

$$\|x\|_a \leq \frac{1}{\alpha} \|x\|_b \qquad \frac{1}{\beta} \|x\|_b \leq \|x\|_a$$

$$\forall x \in E, \ \frac{1}{\beta} \|x\|_b \leq \|x\|_a \leq \frac{1}{\alpha} \|x\|_b$$

donc $\|\cdot\|_b$ est équivalent à $\|\cdot\|_a$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

3. Transivité :

Ph.D. Elian Masnada

3. Transivité :

$$\text{Montrons que :} \quad \left\{ \begin{array}{lr} \text{Si } \|\cdot\|_a \text{ équivalent à } \|\cdot\|_b & (1) \\ \text{Si } \|\cdot\|_b \text{ équivalent à } \|\cdot\|_c & (2) \\ \text{Alors } \|\cdot\|_a \text{ équivalent à } \|\cdot\|_c & (3) \end{array} \right.$$

Ph.D. Elian Masnada

3. Transivité :

$$\text{Montrons que :}\quad \begin{cases} \text{Si } \|\cdot\|_a \text{ équivalent à } \|\cdot\|_b & (1) \\ \text{Si } \|\cdot\|_b \text{ équivalent à } \|\cdot\|_c & (2) \\ \text{Alors } \|\cdot\|_a \text{ équivalent à } \|\cdot\|_c & (3) \end{cases}$$

Démonstration :

$$(1) \Rightarrow \exists \alpha, \beta > 0 \ / \ \forall x \in E,\ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

$$(2) \Rightarrow \exists \eta, \gamma > 0 \ / \ \forall x \in E,\ \eta \|x\|_b \leq \|x\|_c \leq \gamma \|x\|_b$$

Ph.D. Elian Masnada

3. Transivité :

Montrons que :

$$\begin{cases} \text{Si } \|\cdot\|_a \text{ équivalent à } \|\cdot\|_b & (1) \\ \text{Si } \|\cdot\|_b \text{ équivalent à } \|\cdot\|_c & (2) \\ \text{Alors } \|\cdot\|_a \text{ équivalent à } \|\cdot\|_c & (3) \end{cases}$$

Démonstration :

$$(1) \Rightarrow \exists \alpha, \beta > 0 \ / \ \forall x \in E, \ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$$

$$(2) \Rightarrow \exists \eta, \gamma > 0 \ / \ \forall x \in E, \ \eta \|x\|_b \leq \|x\|_c \leq \gamma \|x\|_b$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \|x\|_c \geq \eta \|x\|_b \geq \eta\alpha \|x\|_a \\ \|x\|_c \leq \gamma \|x\|_b \leq \gamma\beta \|x\|_a \end{cases}$$

3. Transivité :

Montrons que : $\begin{cases} \text{Si } \|\cdot\|_a \text{ équivalent à } \|\cdot\|_b & (1) \\ \text{Si } \|\cdot\|_b \text{ équivalent à } \|\cdot\|_c & (2) \\ \text{Alors } \|\cdot\|_a \text{ équivalent à } \|\cdot\|_c & (3) \end{cases}$

Démonstration :

$(1) \Rightarrow \exists \alpha, \beta > 0 \ / \ \forall x \in E,\ \alpha \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq \beta \|x\|_a$

$(2) \Rightarrow \exists \eta, \gamma > 0 \ / \ \forall x \in E,\ \eta \|x\|_b \leq \|x\|_c \leq \gamma \|x\|_b$

$$\Rightarrow \begin{cases} \|x\|_c \geq \eta \|x\|_b \geq \eta\alpha \|x\|_a \\ \|x\|_c \leq \gamma \|x\|_b \leq \gamma\beta \|x\|_a \end{cases}$$

$$\Rightarrow \eta\alpha \|x\|_a \leq \|x\|_c \leq \gamma\beta \|x\|_a$$

Ph.D. Elian Masnada

$$\text{Réflexif} + \text{Symétrie} + \text{Transitif} = \text{Relation d'équivalence}$$

Ph.D. Elian Masnada

$$\text{Réflexif} + \text{Symétrie} + \text{Transitif} = \text{Relation d'équivalence}$$

<u>Théorème 1</u> : (Equivalence des normes)

Soit E un espace vectoriel de dimension finie. Alors, toutes les normes sur E sont équivalentes.

Démonstration : admis.

Ph.D. Elian Masnada

$$\text{Réflexif} + \text{Symétrie} + \text{Transitif} = \text{Relation d'équivalence}$$

<u>Théorème 1</u> : (Equivalence des normes)

Soit E un espace vectoriel de dimension finie. Alors, toutes les normes sur E sont équivalentes.

Démonstration : admis.

Ce théorème va être fondamental dans la suite du cours

Ph.D. Elian Masnada

Définition 3 : (Distance)

Soit X un ensemble quelconque. L'application d, de $X \times X \longrightarrow \mathbb{R}^+$, est une distance sur X, si et seulement si, elle vérifie :

1. $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) = 0 \Longleftrightarrow X = Y$
2. $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) = d(Y,X)$
3. $\forall (X,Y,Z) \in X^3,\ d(X,Y) \leq d(X,Z) + d(Z,Y)$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 3 : (Distance)

Soit X un ensemble quelconque. L'application d, de $X \times X \longrightarrow \mathbb{R}^+$, est une distance sur X, si et seulement si, elle vérifie :

1. $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) = 0 \Longleftrightarrow X = Y$
2. $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) = d(Y,X)$
3. $\forall (X,Y,Z) \in X^3,\ d(X,Y) \leq d(X,Z) + d(Z,Y)$

1. La seule façon pour que la distance entre deux points soit nulle est que les deux points soient confondus.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Définition 3</u> : (Distance)

Soit X un ensemble quelconque. L'application d, de $X \times X \longrightarrow \mathbb{R}^+$, est une distance sur X, si et seulement si, elle vérifie :

1. $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) = 0 \Longleftrightarrow X = Y$
2. $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) = d(Y,X)$
3. $\forall (X,Y,Z) \in X^3,\ d(X,Y) \leq d(X,Z) + d(Z,Y)$

1. La seule façon pour que la distance entre deux points soit nulle est que les deux points soient confondus.

2. La distance est symétrique. La distance entre X et Y est la même que la distance entre Y et X.

Ph.D. Elian Masnada

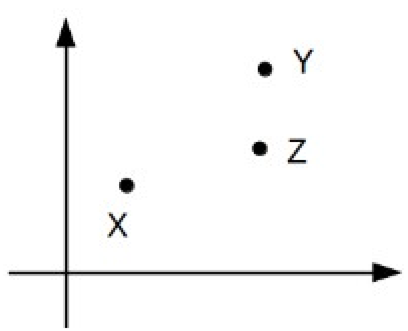
<u>Définition 3</u> : (Distance)

Soit X un ensemble quelconque. L'application d, de $X \times X \longrightarrow \mathbb{R}^+$, est une distance sur X, si et seulement si, elle vérifie :

1. $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) = 0 \Longleftrightarrow X = Y$
2. $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) = d(Y,X)$
3. $\forall (X,Y,Z) \in X^3,\ d(X,Y) \leq d(X,Z) + d(Z,Y)$

1. La seule façon pour que la distance entre deux points soit nulle est que les deux points soient confondus.

2. La distance est symétrique. La distance entre X et Y est la même que la distance entre Y et X.

3. 

si je passe par un autre point Z pour aller de X à Y, au mieux je ne réduis pas la distance au pire je fais un détour.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 4 : (positivité de la distance)

La distance est une application définie positive : $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) \geq 0$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 4 : (positivité de la distance)

La distance est une application définie positive : $\forall (X, Y) \in X^2,\ d(X, Y) \geq 0$.

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 4 : (positivité de la distance)

La distance est une application définie positive : $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) \geq 0$.

Démonstration :

$$\forall (X,Y) \in X^2,\ \ d(X,X) \leq d(X,Y) + d(Y,X)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 4 : (positivité de la distance)

La distance est une application définie positive : $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) \geq 0.$

Démonstration :

$$\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,X) \leq d(X,Y) + d(Y,X) \Longrightarrow 0 \leq 2d(X,Y)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 4 : (positivité de la distance)

La distance est une application définie positive : $\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,Y) \geq 0$.

Démonstration :

$$\forall (X,Y) \in X^2,\ d(X,X) \leq d(X,Y) + d(Y,X) \Longrightarrow 0 \leq 2d(X,Y)$$

Propriété 5 : (Distance associée à une norme)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Alors, on appelle distance associée à la norme $\|\cdot\|$, l'application d définie par

$$\begin{array}{rcccl} d & : & E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ & & X, Y & \mapsto & d(X,Y) = \|X - Y\| \end{array}$$

Démonstration qu'il s'agit bien d'une distance :

voir le polycopié.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 6 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 6</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 6 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Démonstration :

$$d(\lambda X, \lambda Y)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 6 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Démonstration :

$$d(\lambda X, \lambda Y) = \|\lambda X - \lambda Y\|$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 6 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R}, \quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Démonstration :

$$d(\lambda X, \lambda Y) = \|\lambda X - \lambda Y\| = |\lambda|\,\|X - Y\|$$

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 6</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Démonstration :

$$d(\lambda X, \lambda Y) = \|\lambda X - \lambda Y\| = |\lambda|\,\|X - Y\| = |\lambda| d(X, Y)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 6 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Démonstration :

$$d(\lambda X, \lambda Y) = \|\lambda X - \lambda Y\| = |\lambda|\, \|X - Y\| = |\lambda| d(X, Y)$$

Exemples de distance :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 6 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Démonstration :

$$d(\lambda X, \lambda Y) = \|\lambda X - \lambda Y\| = |\lambda|\, \|X - Y\| = |\lambda| d(X, Y)$$

Exemples de distance :

$$\begin{array}{llcl} d & : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^+ \\ & (X, Y) & \mapsto & d(X, Y) = \|X - Y\|_2 = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2} \end{array}$$

avec $\begin{cases} X = (x_1, x_2) \\ Y = (y_1, y_2) \end{cases}$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 6 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et d la distance associée à la norme $\|\cdot\|$. Alors, d vérifie

$$\forall X, Y \in E,\ \forall \lambda \in \mathbb{R},\quad d(\lambda X, \lambda Y) = |\lambda| d(X, Y)$$

Démonstration :

$$d(\lambda X, \lambda Y) = \|\lambda X - \lambda Y\| = |\lambda|\, \|X - Y\| = |\lambda| d(X, Y)$$

Exemples de distance :

$$\begin{array}{rccl} d & : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^+ \\ & (X, Y) & \mapsto & d(X, Y) = \|X - Y\|_2 = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2} \end{array}$$

avec $\begin{cases} X = (x_1, x_2) \\ Y = (y_1, y_2) \end{cases}$ distance associée à la norme $\|\cdot\|_2$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \quad : \quad E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X, Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \quad : \quad E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcccl} d_0 & : & E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ & & (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rccl} d_0 & : & E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ & & (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \quad : \quad E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \; : \; E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

c) vérifions si $\forall X, Y, Z, \; d_0(X,Y) \leq d_0(X,Z) + d_0(Z,Y)$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \quad : \quad E \times E & \rightarrow & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

c) vérifions si $\forall X, Y, Z,\ d_0(X,Y) \leq d_0(X,Z) + d_0(Z,Y)$

$$\text{Si } X = Y = Z, \quad \text{alors } 0 \leq 0 + 0 \text{ donc OK}$$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 & : & E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ & & (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

c) vérifions si $\forall X, Y, Z,\ d_0(X,Y) \leq d_0(X,Z) + d_0(Z,Y)$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } X = Y = Z, & \text{alors } 0 \leq 0 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Y \neq Z, & \text{alors } 0 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \; : \; E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

c) vérifions si $\forall X, Y, Z,\; d_0(X,Y) \leq d_0(X,Z) + d_0(Z,Y)$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } X = Y = Z, & \text{alors } 0 \leq 0 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Y \neq Z, & \text{alors } 0 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Z \neq Y, & \text{alors } 1 \leq 0 + 1 \text{ donc OK} \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \ : \ E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

c) vérifions si $\forall X, Y, Z,\ \ d_0(X,Y) \leq d_0(X,Z) + d_0(Z,Y)$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } X = Y = Z, & \text{alors } 0 \leq 0 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Y \neq Z, & \text{alors } 0 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Z \neq Y, & \text{alors } 1 \leq 0 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X \neq Y = Z, & \text{alors } 1 \leq 1 + 0 \text{ donc OK} \end{array}$$

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \quad : \quad E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

c) vérifions si $\forall X, Y, Z,\ d_0(X,Y) \leq d_0(X,Z) + d_0(Z,Y)$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } X = Y = Z, & \text{alors } 0 \leq 0 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Y \neq Z, & \text{alors } 0 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Z \neq Y, & \text{alors } 1 \leq 0 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X \neq Y = Z, & \text{alors } 1 \leq 1 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si tous différents}, & \text{alors } 1 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \ : \ E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

c) vérifions si $\forall X, Y, Z,\ d_0(X,Y) \leq d_0(X,Z) + d_0(Z,Y)$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } X = Y = Z, & \text{alors } 0 \leq 0 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Y \neq Z, & \text{alors } 0 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Z \neq Y, & \text{alors } 1 \leq 0 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X \neq Y = Z, & \text{alors } 1 \leq 1 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si tous différents,} & \text{alors } 1 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \end{array}$$

cette distance n'est pas associée à une norme: prenons $X \neq Y$ et $\lambda = 3$

Ph.D. Elian Masnada

Soit E un espace vectoriel quelconque. Soit

$$\begin{array}{rcl} d_0 \ : \ E \times E & \to & \mathbb{R}^+ \\ (X,Y) & \mapsto & d_0(X,Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } X = Y \\ 1 & \text{si } X \neq Y \end{cases} \end{array}$$

Vérifions qu'il s'agit bien d'une distance

a) Si $X = Y$ alors $d_0(X,Y) = 0$ par construction.
Si $d_0(X,Y) = 0$ alors $X = Y$

b) d_0 est trivialement symétrique.

c) vérifions si $\forall X, Y, Z,\ d_0(X,Y) \leq d_0(X,Z) + d_0(Z,Y)$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } X = Y = Z, & \text{alors } 0 \leq 0 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Y \neq Z, & \text{alors } 0 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X = Z \neq Y, & \text{alors } 1 \leq 0 + 1 \text{ donc OK} \\ \text{Si } X \neq Y = Z, & \text{alors } 1 \leq 1 + 0 \text{ donc OK} \\ \text{Si tous différents,} & \text{alors } 1 \leq 1 + 1 \text{ donc OK} \end{array}$$

cette distance n'est pas associée à une norme: prenons $X \neq Y$ et $\lambda = 3$

$$d_0(3X,3Y) = 1 \text{ puisque } 3X \neq 3Y \quad \Rightarrow \quad d_0(3X,3Y) \neq 3d_0(X,Y)$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 4 : (Boule ouverte, Boule fermée et Sphère)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. $\forall a \in E$, $\forall r > 0$, on définit :

1. la boule ouverte de centre a et de rayon r, comme l'ensemble des points vérifiants

$$B(a, r) = \{x \in E \ / \ \|x - a\| < r\}$$

2. la boule fermée de centre a et de rayon r, comme l'ensemble des points vérifiants

$$\overline{B}(a, r) = \{x \in E \ / \ \|x - a\| \leq r\}$$

3. la sphère de centre a et de rayon r, comme l'ensemble des points vérifiants

$$S(a, r) = \{x \in E \ / \ \|x - a\| = r\}$$

On remarque alors que $\overline{B}(a, r) = B(a, r) \cup S(a, r)$

Ph.D. Elian Masnada

Cas de la boule fermée dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ centrée en a et de rayon ϵ

Cas de la boule fermée dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ centrée en a et de rayon ϵ

On cherche l'ensemble des points de $\mathbb{R}$ tel que

$$|x - a| \leq \epsilon$$

Cas de la boule fermée dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ centrée en a et de rayon ϵ

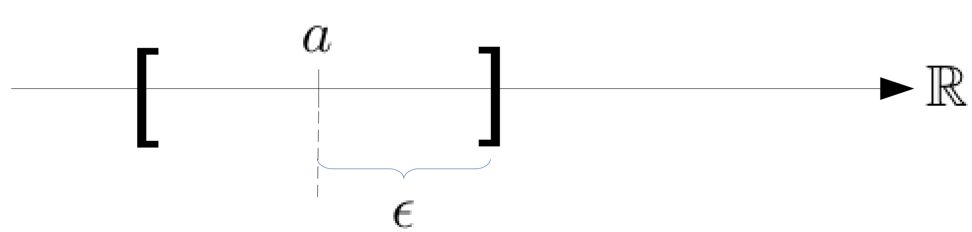
On cherche l'ensemble des points de $\mathbb{R}$ tel que

$$|x-a| \leq \epsilon \iff x \in [a-\epsilon; a+\epsilon]$$

Cas de la boule fermée dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ centrée en a et de rayon ϵ

On cherche l'ensemble des points de $\mathbb{R}$ tel que

$$|x-a| \leq \epsilon \iff x \in [a-\epsilon; a+\epsilon]$$

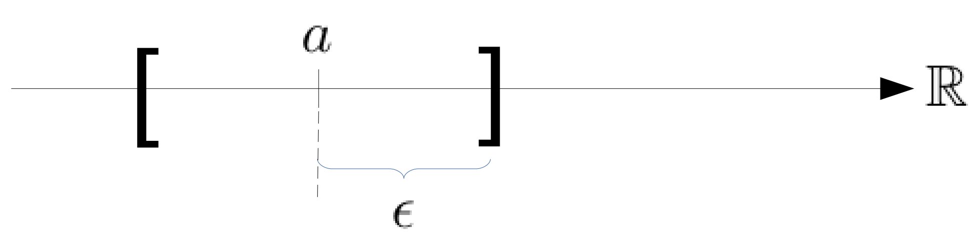


Ph.D. Elian Masnada

Cas de la boule fermée dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ centrée en a et de rayon ϵ

On cherche l'ensemble des points de $\mathbb{R}$ tel que

$$|x-a| \leq \epsilon \iff x \in [a-\epsilon; a+\epsilon]$$



Pour la boule ouverte

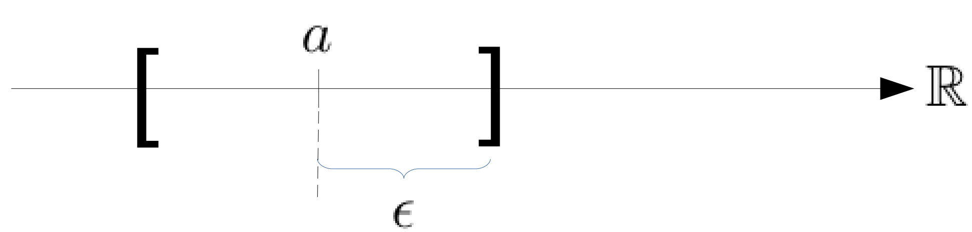
$$|x-a| < \epsilon$$

Ph.D. Elian Masnada

Cas de la boule fermée dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ centrée en a et de rayon ϵ

On cherche l'ensemble des points de $\mathbb{R}$ tel que

$$|x-a| \leq \epsilon \quad \Longleftrightarrow \quad x \in [a-\epsilon; a+\epsilon]$$



Pour la boule ouverte

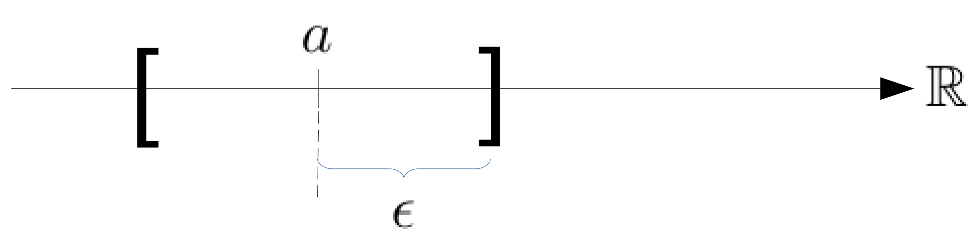
$$|x-a| < \epsilon \quad \Longleftrightarrow \quad x \in]a-\epsilon; a+\epsilon[$$

Ph.D. Elian Masnada

Cas de la boule fermée dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ centrée en a et de rayon ϵ

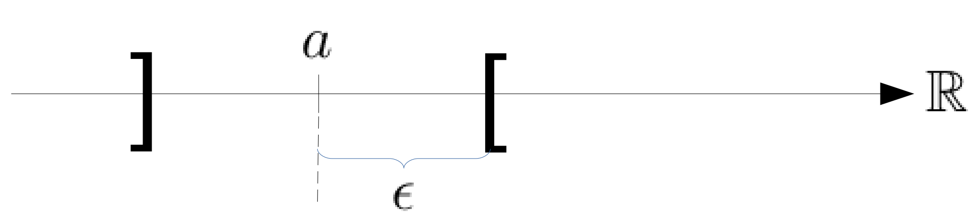
On cherche l'ensemble des points de $\mathbb{R}$ tel que

$$|x-a| \leq \epsilon \iff x \in [a-\epsilon; a+\epsilon]$$



Pour la boule ouverte

$$|x-a| < \epsilon \iff x \in]a-\epsilon; a+\epsilon[$$



Ph.D. Elian Masnada

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Ph.D. Elian Masnada

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Considérons les boules fermées unitaire de centre $(0,0)$ de $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$, $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ et $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$

Ph.D. Elian Masnada

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Considérons les boules fermées unitaire de centre $(0,0)$ de $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$, $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ et $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$

1. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$:

Rappel
$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$
dans notre cas
$$\|X\|_1 = |x| + |y|$$

Ph.D. Elian Masnada

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Considérons les boules fermées unitaire de centre $(0,0)$ de $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$, $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ et $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$

1. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_1 \leq 1$

Rappel

$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$

dans notre cas

$$\|X\|_1 = |x| + |y|$$

Ph.D. Elian Masnada

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Considérons les boules fermées unitaire de centre $(0,0)$ de $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$, $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ et $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$

1. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_1 \leq 1$

   Si $x > 0, y > 0,$

Rappel
$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$
dans notre cas
$$\|X\|_1 = |x| + |y|$$

Ph.D. Elian Masnada

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Considérons les boules fermées unitaire de centre $(0,0)$ de $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$, $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ et $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$

1. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_1 \leq 1$

Si $x > 0$, $y > 0$, alors $\|X\|_1 = 1 \iff x + y = 1$

Rappel
$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$
dans notre cas
$$\|X\|_1 = |x| + |y|$$

Ph.D. Elian Masnada

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Considérons les boules fermées unitaire de centre $(0,0)$ de $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$, $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ et $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$

1. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_1 \leq 1$

Si $x > 0$, $y > 0$, alors $\|X\|_1 = 1 \iff x + y = 1 \iff y = 1 - x$.

Rappel
$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$
dans notre cas
$$\|X\|_1 = |x| + |y|$$

Ph.D. Elian Masnada

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Considérons les boules fermées unitaire de centre $(0,0)$ de $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$, $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ et $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$

1. <u>Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$</u> : On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_1 \leq 1$

$$\text{Si } x > 0, y > 0, \text{ alors } \|X\|_1 = 1 \iff x + y = 1 \iff y = 1 - x.$$
$$\text{Si } x > 0, y < 0, \text{ alors } \|X\|_1 = 1 \iff x - y = 1 \iff y = x - 1.$$
$$\text{Si } x < 0, y > 0, \text{ alors } \|X\|_1 = 1 \iff -x + y = 1 \iff y = 1 + x.$$
$$\text{Si } x < 0, y < 0, \text{ alors } \|X\|_1 = 1 \iff -x - y = 1 \iff y = -1 - x.$$

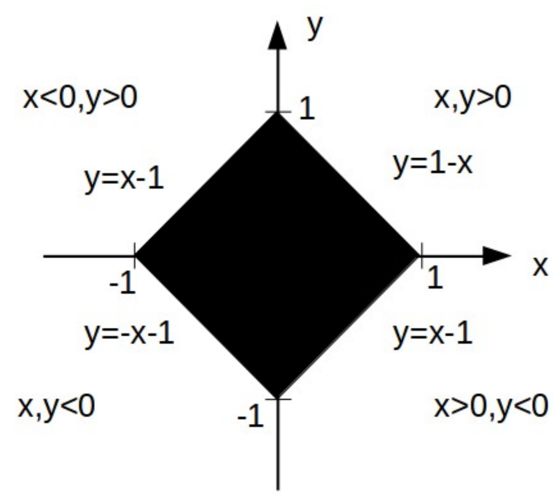
Rappel
$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$
dans notre cas
$$\|X\|_1 = |x| + |y|$$

La forme des boules dépend de l'espace vectoriel et de la norme.

Considérons les boules fermées unitaire de centre $(0,0)$ de $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$, $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ et $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$

1. $\underline{\text{Cas } (\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)}$: On cherche les points $X=(x,y)$ tels que $\|X-(0,0)\|_1 \leq 1$

$$\text{Si } x>0, y>0, \text{ alors } \|X\|_1 = 1 \iff x+y=1 \iff y=1-x.$$
$$\text{Si } x>0, y<0, \text{ alors } \|X\|_1 = 1 \iff x-y=1 \iff y=x-1.$$
$$\text{Si } x<0, y>0, \text{ alors } \|X\|_1 = 1 \iff -x+y=1 \iff y=1+x.$$
$$\text{Si } x<0, y<0, \text{ alors } \|X\|_1 = 1 \iff -x-y=1 \iff y=-1-x.$$



Rappel
$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|$$
dans notre cas
$$\|X\|_1 = |x| + |y|$$

Ph.D. Elian Masnada

2. <u>Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$</u> :

Rappel

$$\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

dans notre cas

$$\|X\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Ph.D. Elian Masnada

2. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_2 \leq 1$

Rappel
$$\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$
dans notre cas
$$\|X\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

2. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_2 \leq 1$

$\Rightarrow$ $\|X - (0,0)\|_2 = \|X\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$ $\Rightarrow$ cercle

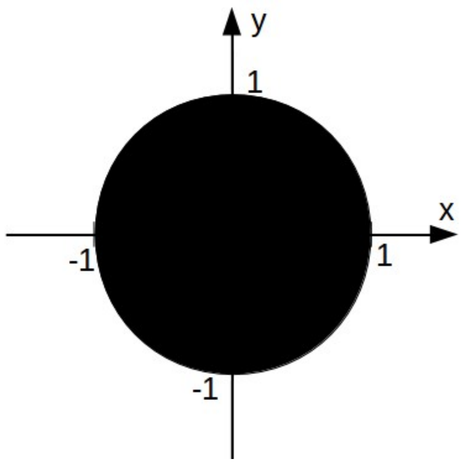
Rappel
$$\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$
dans notre cas
$$\|X\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

2. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_2 \leq 1$

$\Rightarrow$ $\|X - (0,0)\|_2 = \|X\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$ $\Rightarrow$ cercle

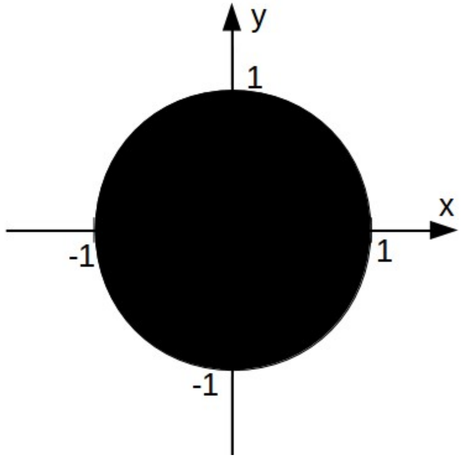


Rappel
$$\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$
dans notre cas
$$\|X\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Ph.D. Elian Masnada

2. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_2 \leq 1$

$\Rightarrow \|X - (0,0)\|_2 = \|X\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2} \Rightarrow$ cercle



3. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$: En exercice

Chapitre 2 :

Espace vectoriel normé

Introduction du chapitre 2

Partie 1 :
Eléments de topologie

a. Norme & distance

b. Boule Ouverte, Boule Fermée et Sphère

c. Voisinage

d. Ouvert, Fermé

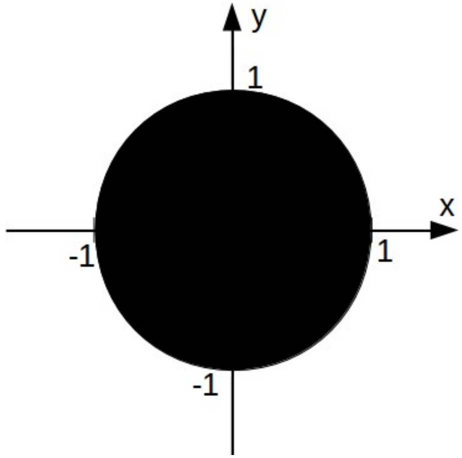
e. Intérieur et adhérent

Partie 2 :
Suites d'éléments d'un EVN

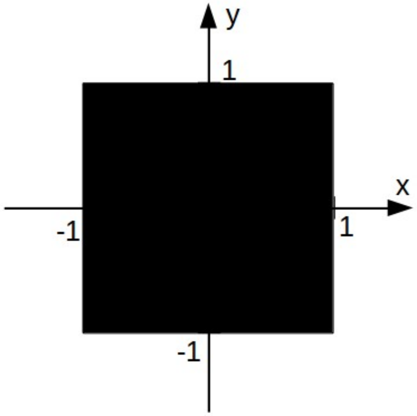
Ph.D. Elian Masnada

2. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$: On cherche les points $X = (x, y)$ tels que $\|X - (0,0)\|_2 \leq 1$

$$\Rightarrow \|X - (0,0)\|_2 = \|X\|_2 = \sqrt{x^2 + y^2} \Rightarrow \text{cercle}$$



3. Cas $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_\infty)$: En exercice



Ph.D. Elian Masnada

Propriété 7 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Alors, $\forall r, r' > 0$ et $\forall a \in E$:

$$r < r' \iff B(a,r) \subset B(a,r')$$
$$r < r' \iff \overline{B}(a,r) \subset \overline{B}(a,r')$$

Propriété 7 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Alors, $\forall r, r' > 0$ et $\forall a \in E$:

$$r < r' \iff B(a,r) \subset B(a,r')$$
$$r < r' \iff \overline{B}(a,r) \subset \overline{B}(a,r')$$

Démonstration : On étudie ici seulement la boule ouverte.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 7 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Alors, $\forall r, r' > 0$ et $\forall a \in E$:

$$r < r' \iff B(a,r) \subset B(a,r')$$
$$r < r' \iff \overline{B}(a,r) \subset \overline{B}(a,r')$$

Démonstration : On étudie ici seulement la boule ouverte.

$\Longrightarrow$: On a

$$\begin{cases} r < r' \\ x_0 \in B(a,r) \end{cases} \Longrightarrow \|x_0 - a\| < r < r'$$

Finalement $x_0 \in B(a,r')$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 7 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Alors, $\forall r, r' > 0$ et $\forall a \in E$:

$$r < r' \iff B(a,r) \subset B(a,r')$$
$$r < r' \iff \overline{B}(a,r) \subset \overline{B}(a,r')$$

Démonstration : On étudie ici seulement la boule ouverte.

$\Longrightarrow$: On a

$$\begin{cases} r < r' \\ x_0 \in B(a,r) \end{cases} \Longrightarrow \|x_0 - a\| < r < r'$$

Finalement $x_0 \in B(a,r')$.

$\Longleftarrow$:

$$B(a,r) \subset B(a,r') \Longrightarrow \text{ il existe } y \begin{cases} \in B(a,r') \\ \notin B(a,r) \end{cases} \quad \text{tel que } r \leq \|y - a\| < r'$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 5 : (Voisinage)

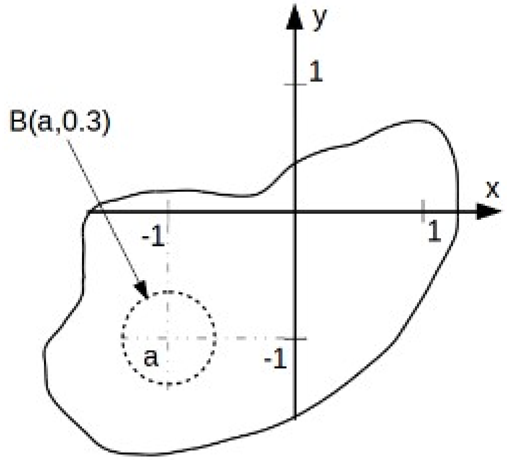
Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $a \in E$ et V une partie de E. On dit que V est un voisinage de a, si, et seulement si, V contient au moins une boule ouverte centrée en a et de rayon $r > 0$.

Formulation mathématique :

$$V \text{ voisinage de } a \iff \exists r > 0 \ / B(a, r) \subset V$$

On note $\mathcal{V}(a)$ l'ensemble des voisinages de a.

Représentation dans $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$



Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 8</u> :

Soit E un EVN de dimension finie, muni de plusieurs normes. Soit $a \in E$ et V une partie de E. Alors le fait que V soit voisinage ou non de a ne dépend pas de la norme choisie.

Démonstration :
La démonstration de cette propriété sera discutée en TD.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 8 :

Soit E un EVN de dimension finie, muni de plusieurs normes. Soit $a \in E$ et V une partie de E. Alors le fait que V soit voisinage ou non de a ne dépend pas de la norme choisie.

Démonstration :
La démonstration de cette propriété sera discutée en TD.

Propriété 9 :

a est toujours un élément de ses voisinages $(\forall V \in \mathcal{V}(a),\ a \in V)$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 8 :

Soit E un EVN de dimension finie, muni de plusieurs normes. Soit $a \in E$ et V une partie de E. Alors le fait que V soit voisinage ou non de a ne dépend pas de la norme choisie.

Démonstration :
La démonstration de cette propriété sera discutée en TD.

Propriété 9 :

a est toujours un élément de ses voisinages $(\forall V \in \mathcal{V}(a),\ a \in V)$

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 8 :

Soit E un EVN de dimension finie, muni de plusieurs normes. Soit $a \in E$ et V une partie de E. Alors le fait que V soit voisinage ou non de a ne dépend pas de la norme choisie.

Démonstration :
La démonstration de cette propriété sera discutée en TD.

Propriété 9 :

a est toujours un élément de ses voisinages $(\forall V \in \mathcal{V}(a),\ a \in V)$

Démonstration :

$$\forall V \in \mathcal{V}(a), \exists r > 0 \text{ tel que } B(a,r) \subset V$$

Propriété 8 :

Soit E un EVN de dimension finie, muni de plusieurs normes. Soit $a \in E$ et V une partie de E. Alors le fait que V soit voisinage ou non de a ne dépend pas de la norme choisie.

Démonstration :
La démonstration de cette propriété sera discutée en TD.

Propriété 9 :

a est toujours un élément de ses voisinages ($\forall V \in \mathcal{V}(a),\ a \in V$)

Démonstration :

$$\forall V \in \mathcal{V}(a), \exists r > 0 \text{ tel que } B(a,r) \subset V$$

$$\text{Or } a \in B(a,r) \text{ puisque } \|a-a\| = \|0_E\| < r$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 8 :

Soit E un EVN de dimension finie, muni de plusieurs normes. Soit $a \in E$ et V une partie de E. Alors le fait que V soit voisinage ou non de a ne dépend pas de la norme choisie.

Démonstration :
La démonstration de cette propriété sera discutée en TD.

Propriété 9 :

a est toujours un élément de ses voisinages ($\forall V \in \mathcal{V}(a),\ a \in V$)

Démonstration :

$\forall V \in \mathcal{V}(a)$, $\exists r > 0$ tel que $B(a, r) \subset V$

Or $a \in B(a, r)$ puisque $\|a - a\| = \|0_E\| < r$

Donc $a \in V$ puisque $a \in B(a, r)$ et $B(a, r) \subset V$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 10 :

Toute réunion de voisinages de a est un voisinage de a.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 10 :

Toute réunion de voisinages de a est un voisinage de a.

Démonstration :

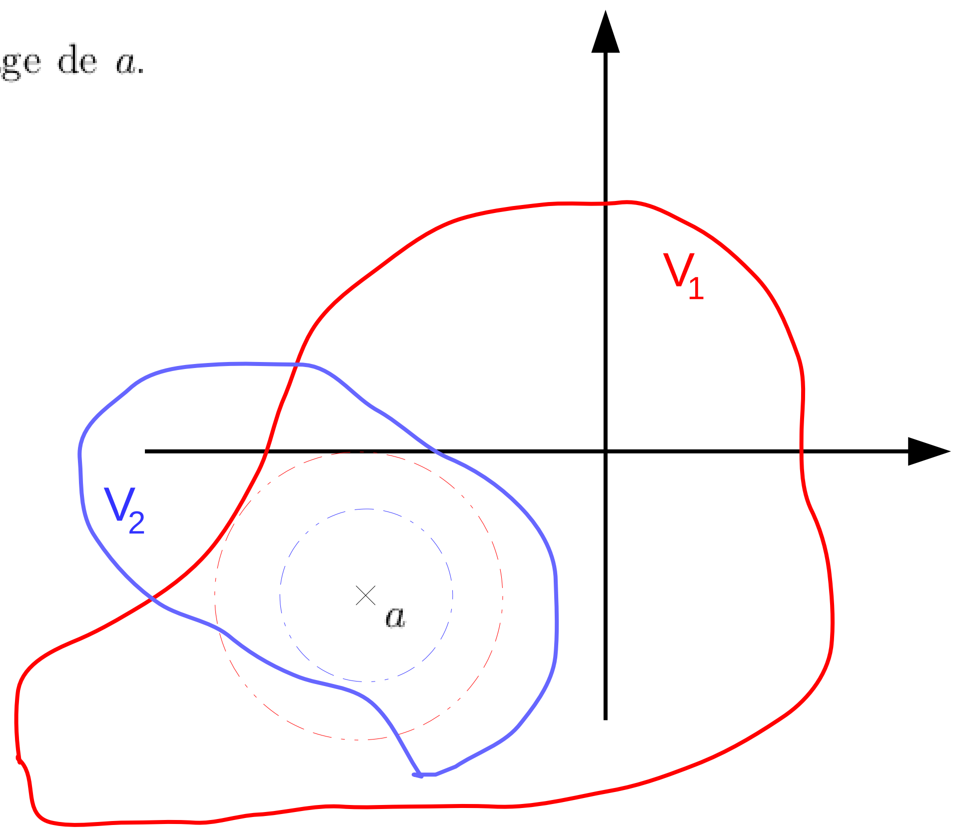
Ph.D. Elian Masnada

Propriété 10 :

Toute réunion de voisinages de a est un voisinage de a.

Démonstration :

Soit $(V_i)_{i\in I}$ une famille de voisinage de a.



Ph.D. Elian Masnada

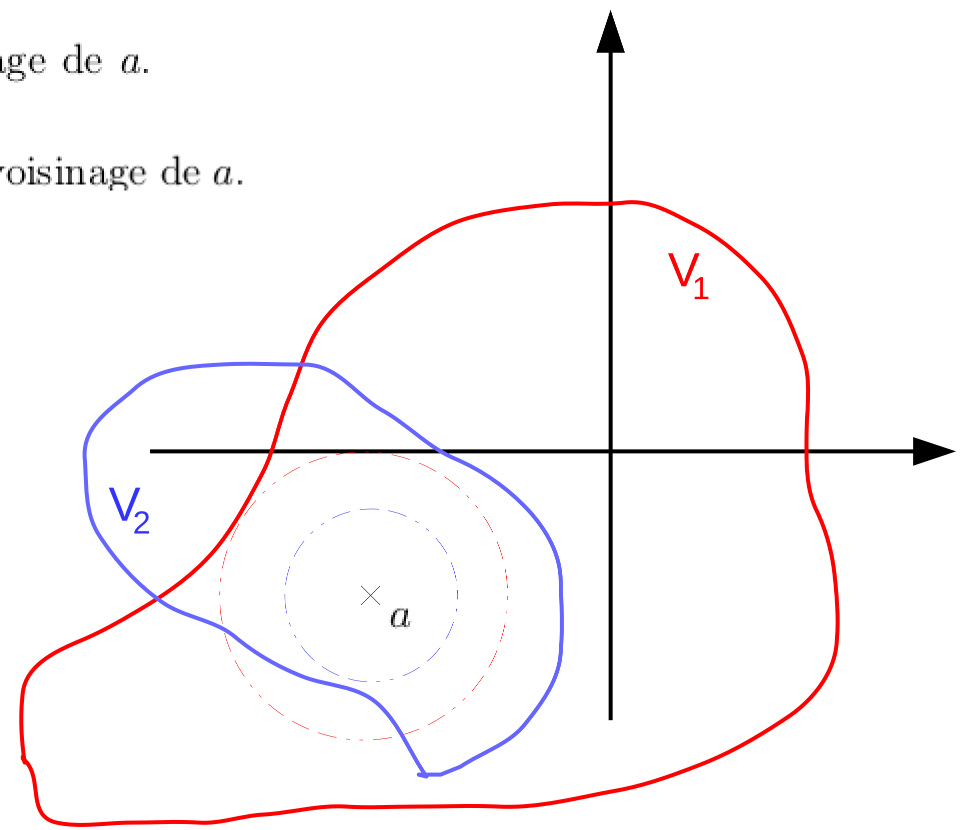
Propriété 10 :

Toute réunion de voisinages de a est un voisinage de a.

Démonstration :

Soit $(V_i)_{i\in I}$ une famille de voisinage de a.

On pose $V = \cup_{i\in I} V_i$ l'union de voisinage de a.



Ph.D. Elian Masnada

Propriété 10 :

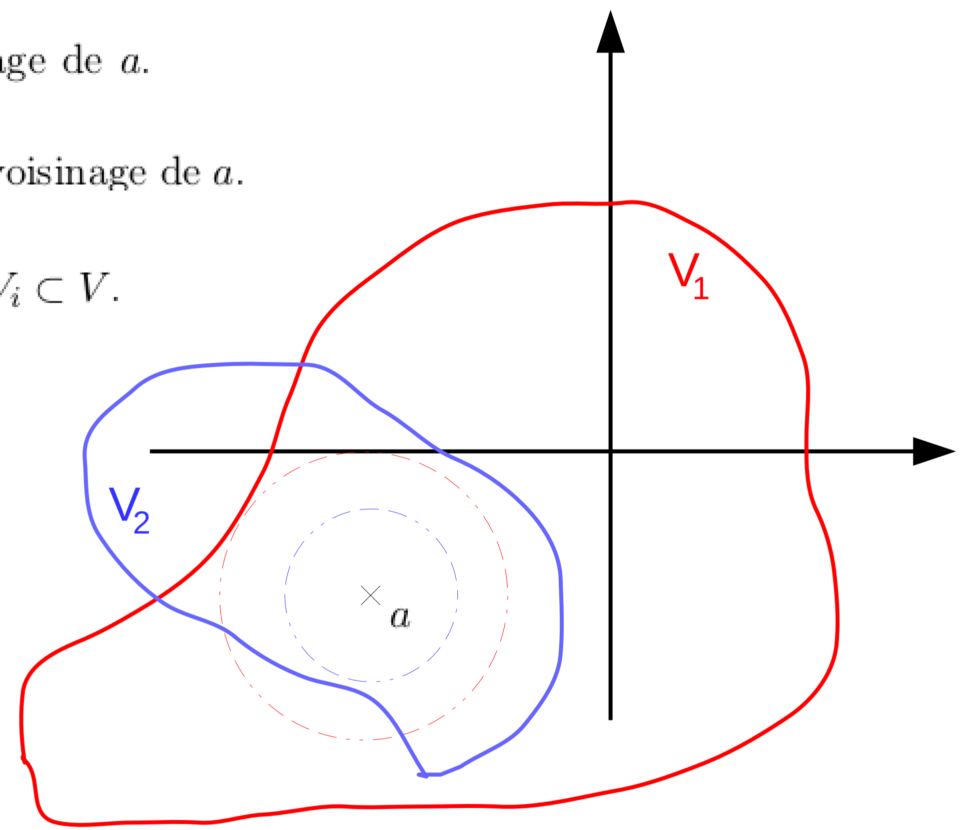
Toute réunion de voisinages de a est un voisinage de a.

Démonstration :

Soit $(V_i)_{i\in I}$ une famille de voisinage de a.

On pose $V = \cup_{i\in I} V_i$ l'union de voisinage de a.

$\forall i \in I, \exists r_i > 0$ tel que $B(a, r_i) \subset V_i \subset V$.



Propriété 10 :

Toute réunion de voisinages de a est un voisinage de a.

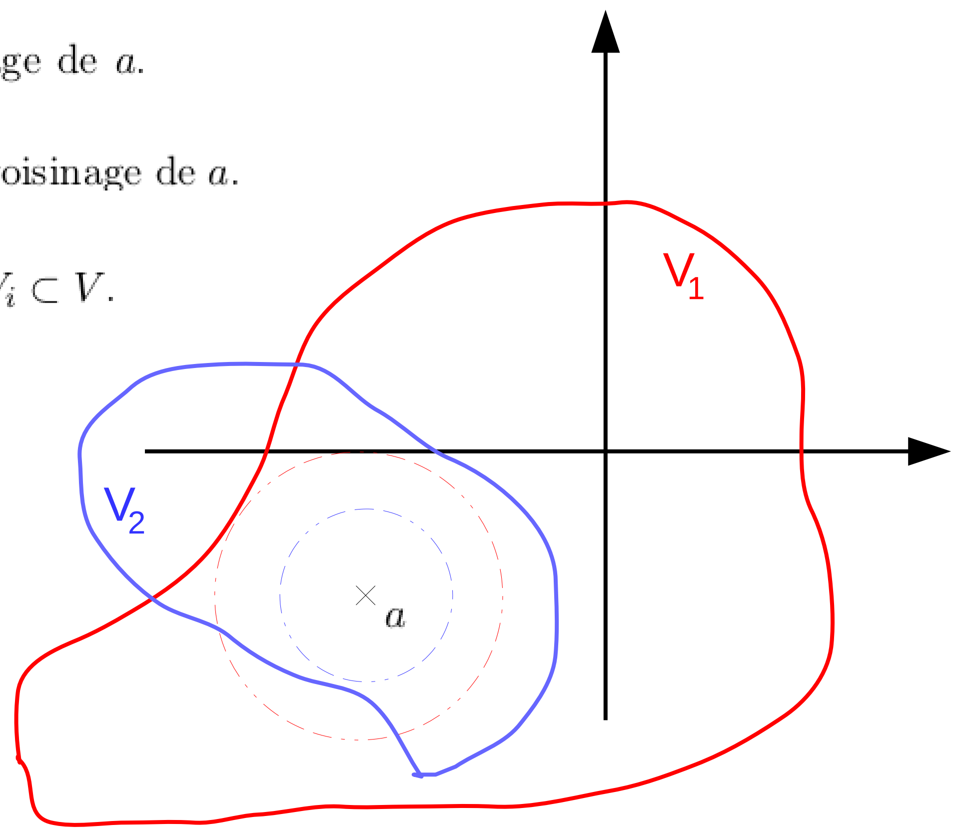
Démonstration :

Soit $(V_i)_{i\in I}$ une famille de voisinage de a.

On pose $V = \cup_{i\in I} V_i$ l'union de voisinage de a.

$\forall i \in I, \exists r_i > 0$ tel que $B(a, r_i) \subset V_i \subset V$.

Donc V est un voisinage de a.



Ph.D. Elian Masnada

Propriété 11 :

Toute boule fermée ou ouverte de rayon r et de centre a est un voisinage de a.

Démonstration : pour la boule ouverte

Propriété 11 :

Toute boule fermée ou ouverte de rayon r et de centre a est un voisinage de a.

Démonstration : pour la boule ouverte

Rappels : on considère $(E, \|\cdot\|)$ un EVN

(a) Définition d'une boule ouverte :

Soit $a \in E$ et $r \in \mathbb{R}_+^*$.

Soit $B(a,r)$ la boule ouverte de centre a et de rayon r qui est définie par

$$B(a,r) = \{x \in E \ / \ \|x-a\| < r\}$$

(b) V voisinage de a ssi $\exists r > 0 \ / \ B(a,r) \subset V$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 11 :

Toute boule fermée ou ouverte de rayon r et de centre a est un voisinage de a.

Démonstration : pour la boule ouverte

Rappels : on considère $(E, \|\cdot\|)$ un EVN

(a) Définition d'une boule ouverte :

Soit $a \in E$ et $r \in \mathbb{R}_+^*$.

Soit $B(a,r)$ la boule ouverte de centre a et de rayon r qui est définie par

$$B(a,r) = \{x \in E \;/\; \|x-a\| < r\}$$

(b) V voisinage de a ssi $\exists r > 0 \;/\; B(a,r) \subset V$

soir $r' = r/2$ $\xrightarrow{\text{d'après la propriété 7 :}}$ $B(a,r') \subset B(a,r)$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 11 :

Toute boule fermée ou ouverte de rayon r et de centre a est un voisinage de a.

Démonstration : pour la boule ouverte

Rappels : on considère $(E, \|\cdot\|)$ un EVN

(a) Définition d'une boule ouverte :

Soit $a \in E$ et $r \in \mathbb{R}_+^*$.

Soit $B(a, r)$ la boule ouverte de centre a et de rayon r qui est définie par

$$B(a, r) = \{x \in E \ / \ \|x - a\| < r\}$$

(b) V voisinage de a ssi $\exists r > 0 \ / \ B(a, r) \subset V$

soit $r' = r/2 \xrightarrow{\text{d'après la propriété 7 :}} B(a, r') \subset B(a, r)$

d'où l'on déduit que $B(a, r)$ est voisinage de a

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 12 :

Toute intersection finie de voisinage de a est un voisinage de a.

Démonstration : voir le polycopié

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 12 :

Toute intersection finie de voisinage de a est un voisinage de a.

Démonstration : voir le polycopié

Considérons $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 12 :

Toute intersection finie de voisinage de a est un voisinage de a.

Démonstration : voir le polycopié

Considérons $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Rappels :

(a) Boule dans $\mathbb{R}$:

$$B(a,r) = \{x \in \mathbb{R} \ / \ |x-a| < r\} =]a-r \ ; \ a+r[$$

(b) V voisinage de a ssi $\exists r > 0 \ / \ B(a,r) \subset V$

Propriété 12 :

Toute intersection finie de voisinage de a est un voisinage de a.

Démonstration : voir le polycopié

Considérons $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Rappels :

(a) Boule dans $\mathbb{R}$:

$$B(a,r) = \{x \in \mathbb{R} \;/\; |x-a| < r\} =]a-r\,;\,a+r[$$

(b) V voisinage de a ssi $\exists r > 0 \;/\; B(a,r) \subset V$

Prenons $a = 0$ et $r = 1/n$ (avec $n \in \mathbb{N}^*$). Alors

$$B(a,r) = B\left(0, \frac{1}{n}\right) = \left]-\frac{1}{n}; \frac{1}{n}\right[= V_n$$

$\forall n \in \mathbb{N}^*$ voisinage de 0 d'après la Prop 11.

Propriété 12 :

Toute intersection finie de voisinage de a est un voisinage de a.

Démonstration : voir le polycopié

Considérons $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Rappels :

(a) Boule dans $\mathbb{R}$:

$$B(a,r) = \{x \in \mathbb{R} \ / \ |x-a| < r\} =]a-r \ ; \ a+r[$$

(b) V voisinage de a ssi $\exists r > 0 \ / \ B(a,r) \subset V$

Prenons $a = 0$ et $r = 1/n$ (avec $n \in \mathbb{N}^*$). Alors

$$B(a,r) = B\left(0, \frac{1}{n}\right) = \left]-\frac{1}{n}; \frac{1}{n}\right[= V_n$$

$\forall n \in \mathbb{N}^*$ voisinage de 0 d'après la Prop 11.

$$V = \cap_{n=1}^{+\infty} V_n = \{0\}.$$

Propriété 12 :

Toute intersection finie de voisinage de a est un voisinage de a.

Démonstration : voir le polycopié

Considérons $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Rappels :

(a) Boule dans $\mathbb{R}$:

$$B(a,r) = \{x \in \mathbb{R} \ / \ |x-a| < r\} =]a-r \ ; \ a+r[$$

(b) V voisinage de a ssi $\exists r > 0 \ / \ B(a,r) \subset V$

Prenons $a = 0$ et $r = 1/n$ (avec $n \in \mathbb{N}^*$). Alors

$$B(a,r) = B\left(0, \frac{1}{n}\right) = \left]-\frac{1}{n}; \frac{1}{n}\right[= V_n$$

$\forall n \in \mathbb{N}^*$ voisinage de 0 d'après la Prop 11.

$V = \cap_{n=1}^{+\infty} V_n = \{0\}$. Or $\{0\}$ n'est pas un voisinage de 0.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Définition 6</u> : (Espace séparé)

Soit E un ensemble quelconque. On dit que E est séparé si, et seulement si, $\forall a, b \in E$, si $a \neq b$, alors

$$\exists V_a \in \mathcal{V}(a),\ \exists V_b \in \mathcal{V}(b) \text{ tels que } V_a \cap V_b = \emptyset$$

Ph.D. Elian Masnada

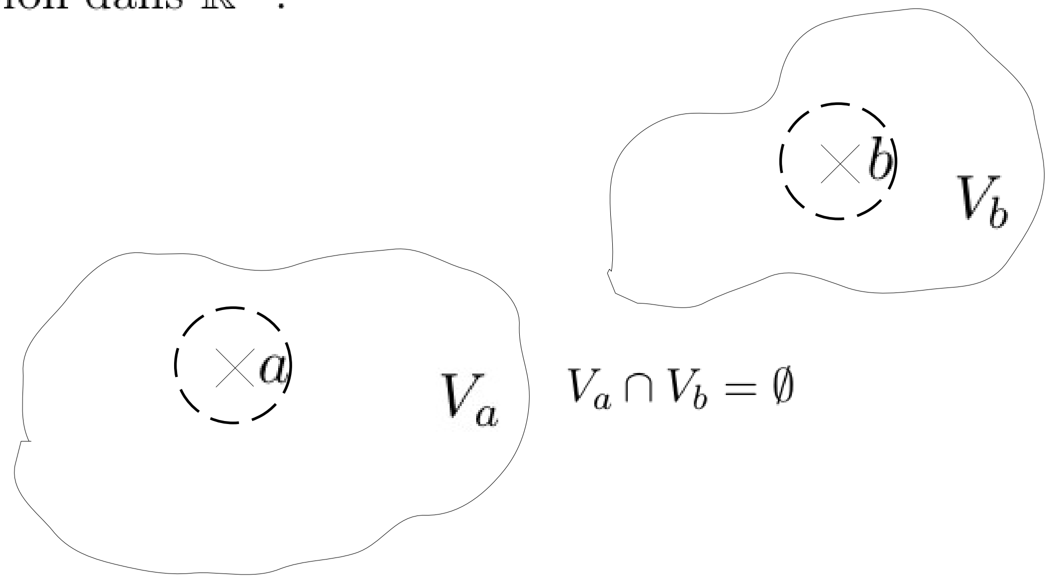
Définition 6 : (Espace séparé)

Soit E un ensemble quelconque. On dit que E est séparé si, et seulement si, $\forall a, b \in E$, si $a \neq b$, alors

$$\exists V_a \in \mathcal{V}(a),\ \exists V_b \in \mathcal{V}(b) \text{ tels que } V_a \cap V_b = \emptyset$$

Représentation dans $\mathbb{R}^2$:

$a \neq b$



Ph.D. Elian Masnada

Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

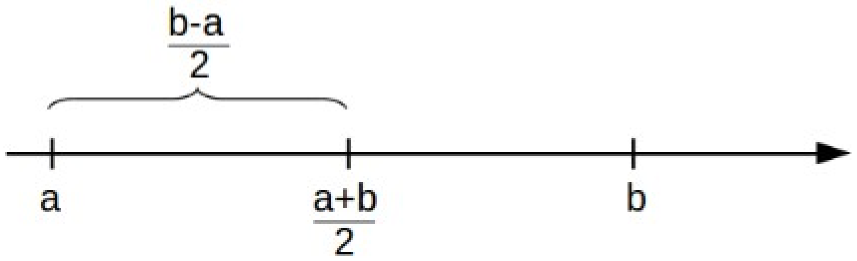
Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

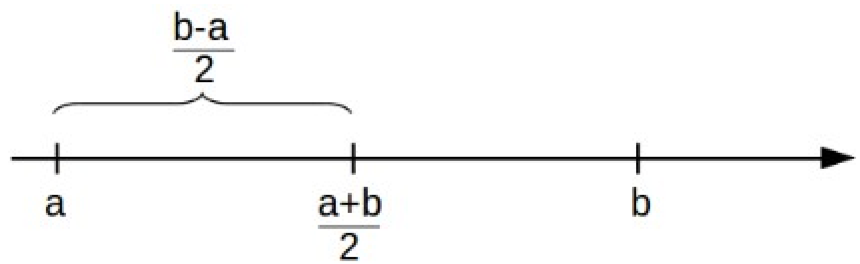
Démonstration :



Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

Démonstration :



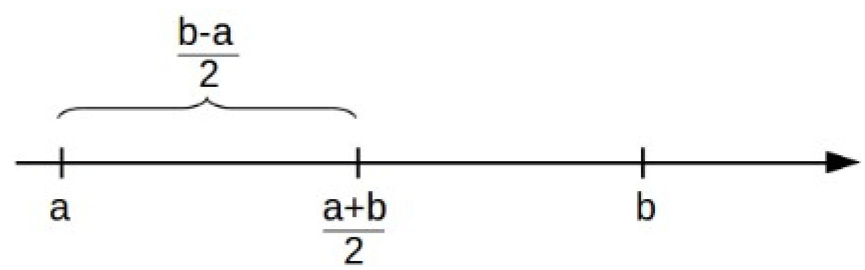
Soit $a, b \in E$ tels que $a \neq b$. Introduisons les deux voisinages suivants

$$V_a = B\left(a, \frac{\|b-a\|}{2}\right) \qquad V_b = B\left(b, \frac{\|b-a\|}{2}\right)$$

Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

Démonstration :



Soit $a, b \in E$ tels que $a \neq b$. Introduisons les deux voisinages suivants

$$V_a = B\left(a, \frac{\|b-a\|}{2}\right) \qquad V_b = B\left(b, \frac{\|b-a\|}{2}\right)$$

Soit $x \in V_a \cap V_b$ puisque x appartient aux deux boules

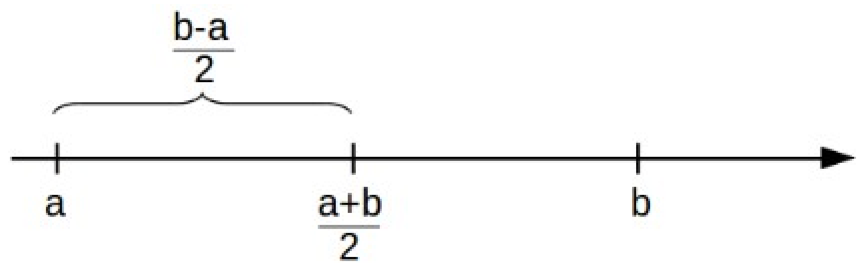
$$\|x-a\| < \frac{\|b-a\|}{2} \qquad \text{et} \qquad \|x-b\| < \frac{\|b-a\|}{2}$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

Démonstration :



Soit $a, b \in E$ tels que $a \neq b$. Introduisons les deux voisinages suivants

$$V_a = B\left(a, \frac{\|b-a\|}{2}\right) \qquad V_b = B\left(b, \frac{\|b-a\|}{2}\right)$$

Soit $x \in V_a \cap V_b$ puisque x appartient aux deux boules

$$\|x-a\| < \frac{\|b-a\|}{2} \qquad \text{et} \qquad \|x-b\| < \frac{\|b-a\|}{2}$$

On peut alors utiliser l'inégalité triangulaire

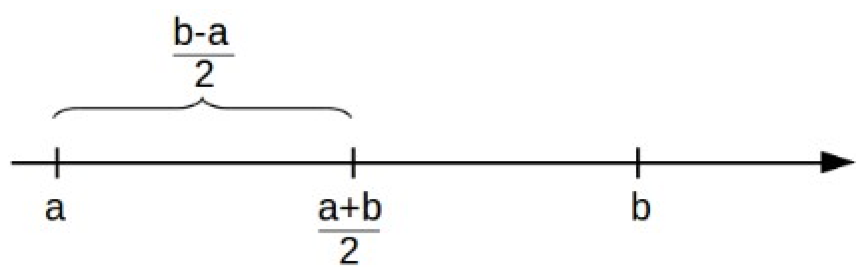
$$\|a-b\|$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

Démonstration :



Soit $a, b \in E$ tels que $a \neq b$. Introduisons les deux voisinages suivants

$$V_a = B\left(a, \frac{\|b-a\|}{2}\right) \qquad V_b = B\left(b, \frac{\|b-a\|}{2}\right)$$

Soit $x \in V_a \cap V_b$ puisque x appartient aux deux boules

$$\|x-a\| < \frac{\|b-a\|}{2} \qquad \text{et} \qquad \|x-b\| < \frac{\|b-a\|}{2}$$

On peut alors utiliser l'inégalité triangulaire

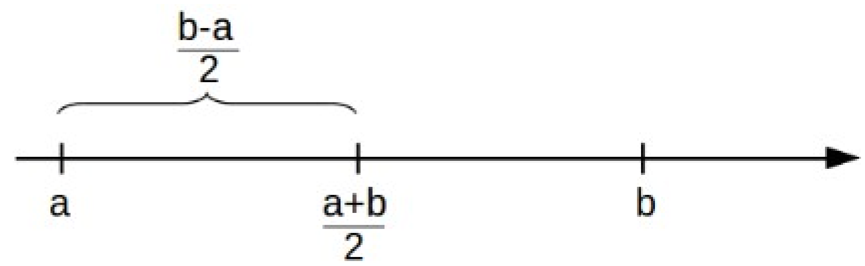
$$\|a-b\| = \|a-x+x-b\|$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

Démonstration :



Soit $a, b \in E$ tels que $a \neq b$. Introduisons les deux voisinages suivants

$$V_a = B\left(a, \frac{\|b-a\|}{2}\right) \qquad V_b = B\left(b, \frac{\|b-a\|}{2}\right)$$

Soit $x \in V_a \cap V_b$ puisque x appartient aux deux boules

$$\|x-a\| < \frac{\|b-a\|}{2} \qquad \text{et} \qquad \|x-b\| < \frac{\|b-a\|}{2}$$

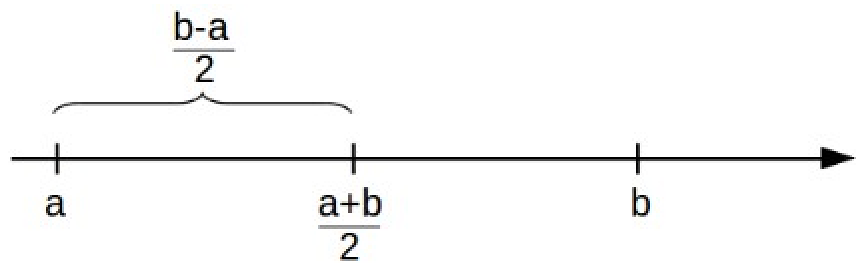
On peut alors utiliser l'inégalité triangulaire

$$\|a-b\| = \|a-x+x-b\| \leq \|a-x\| + \|x-b\|$$

Propriété 13 : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

Démonstration :



Soit $a, b \in E$ tels que $a \neq b$. Introduisons les deux voisinages suivants

$$V_a = B\left(a, \frac{\|b-a\|}{2}\right) \qquad V_b = B\left(b, \frac{\|b-a\|}{2}\right)$$

Soit $x \in V_a \cap V_b$ puisque x appartient aux deux boules

$$\|x-a\| < \frac{\|b-a\|}{2} \qquad \text{et} \qquad \|x-b\| < \frac{\|b-a\|}{2}$$

On peut alors utiliser l'inégalité triangulaire

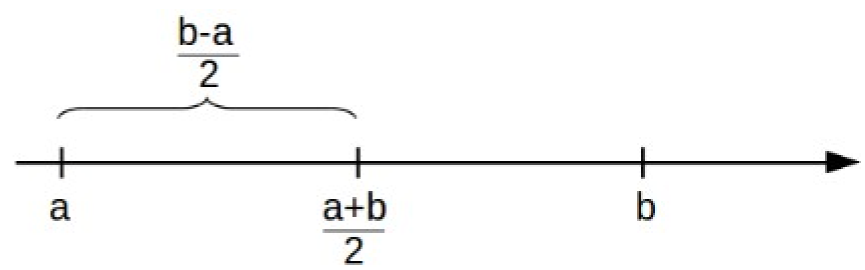
$$\|a-b\| = \|a-x+x-b\| \leq \|a-x\| + \|x-b\| < \|a-b\|$$

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 13</u> : (EVN séparé)

Tout EVN est un espace séparé.

Démonstration :



Soit $a, b \in E$ tels que $a \neq b$. Introduisons les deux voisinages suivants

$$V_a = B\left(a, \frac{\|b-a\|}{2}\right) \qquad V_b = B\left(b, \frac{\|b-a\|}{2}\right)$$

Soit $x \in V_a \cap V_b$ puisque x appartient aux deux boules

$$\|x-a\| < \frac{\|b-a\|}{2} \qquad \text{et} \qquad \|x-b\| < \frac{\|b-a\|}{2}$$

On peut alors utiliser l'inégalité triangulaire

$$\|a-b\| = \|a-x+x-b\| \leq \|a-x\| + \|x-b\| < \|a-b\|$$

absurde donc $V_a \cap V_b = \emptyset$

Ph.D. Elian Masnada

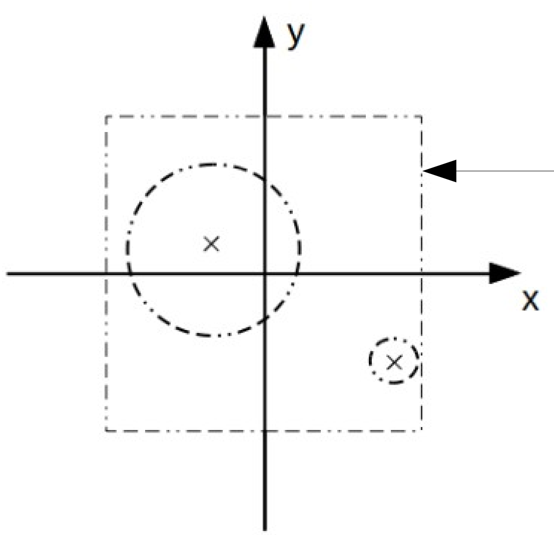
Définition 7 : (Ouvert)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et U une partie de E. Alors U est un ouvert, si, et seulement si, il existe pour chaque point de U un voisinage contenu dans U.

Dit autrement, U est un ouvert si U est voisinage de chacun de ses points.

Formulation mathématique :

$$U \text{ ouvert } \iff \forall x \in U,\ \exists r > 0 \text{ tel que } B(x,r) \subset U$$



dans la suite, on représentera les contours d'un ouvert avec des pointillés

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 14 :

Soit E un EVN de dimension finie muni de plusieurs normes. Soit U une partie de E. Alors le fait que U soit un ouvert ou non ne dépend pas du choix de la norme.

Démonstration :
La démonstration de cette propriété sera discutée en TD.

Propriété 14 :

Soit E un EVN de dimension finie muni de plusieurs normes. Soit U une partie de E. Alors le fait que U soit un ouvert ou non ne dépend pas du choix de la norme.

Démonstration :
La démonstration de cette propriété sera discutée en TD.

Propriété 15 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Alors $\emptyset$ et E sont des ouverts.

Démonstration :
À ce stade, le fait que $\emptyset$ soit un ouvert est conventionnel. E ouvert : trivial.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 16 :

Une boule ouverte est un ouvert.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 16 :

Une boule ouverte est un ouvert.

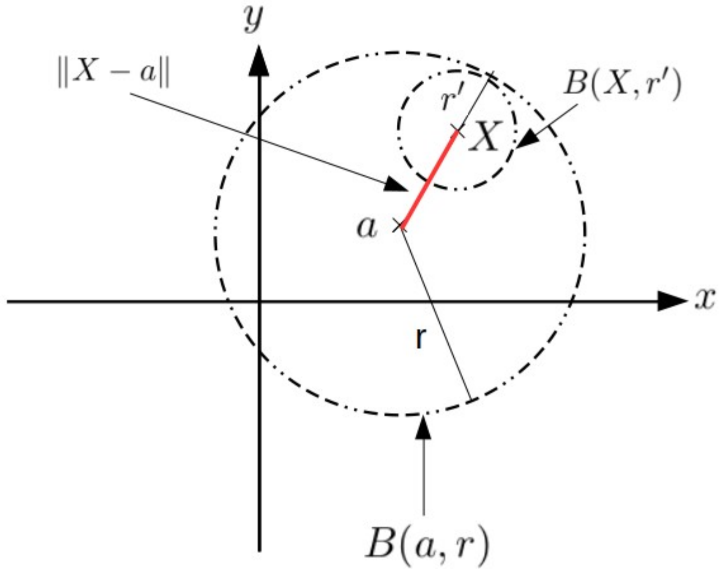
Démonstration :

Propriété 16 :

Une boule ouverte est un ouvert.

Démonstration :

représentation dans $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$



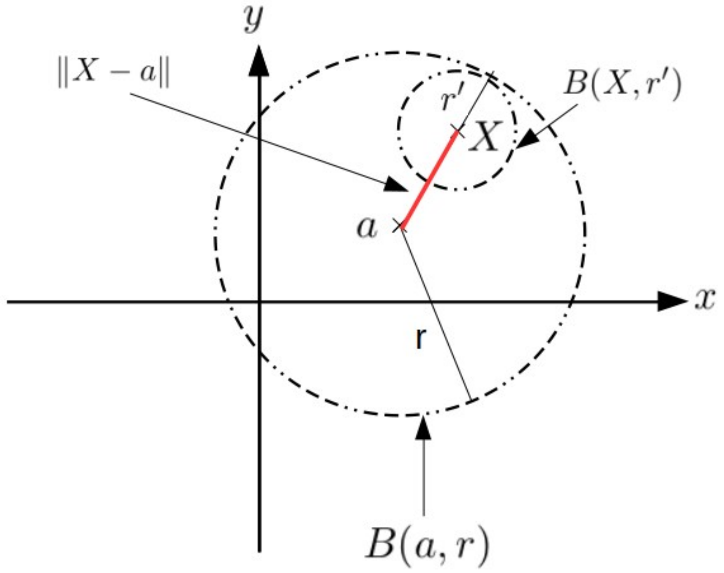
Ph.D. Elian Masnada

Propriété 16 :

Une boule ouverte est un ouvert.

Démonstration :

représentation dans $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$



Soit la boule ouverte $B(a,r)$.

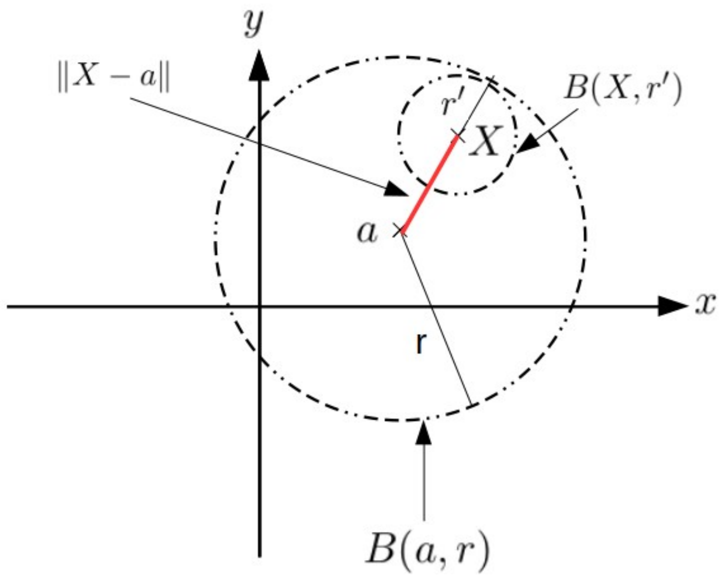
Ph.D. Elian Masnada

Propriété 16 :

Une boule ouverte est un ouvert.

Démonstration :

représentation dans $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$



Soit la boule ouverte $B(a,r)$.

On introduit au point $X \in B(a,r)$
la boule ouverte $B(X, r' = r - \|X-a\|)$

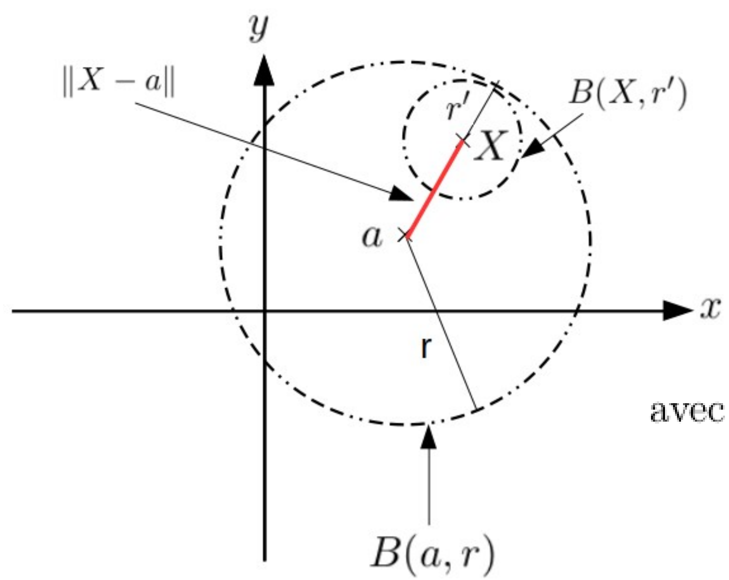
Ph.D. Elian Masnada

Propriété 16 :

Une boule ouverte est un ouvert.

Démonstration :

représentation dans $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$



Soit la boule ouverte $B(a,r)$.

On introduit au point $X \in B(a,r)$
la boule ouverte $B(X, r' = r - \|X-a\|)$

Alors
$$\forall X \in B(a,r),\ B(X,r') \subset B(a,r)$$
avec $r' > 0$ puisque $r' = r - \|X-a\|$ et $\|X-a\| < r$

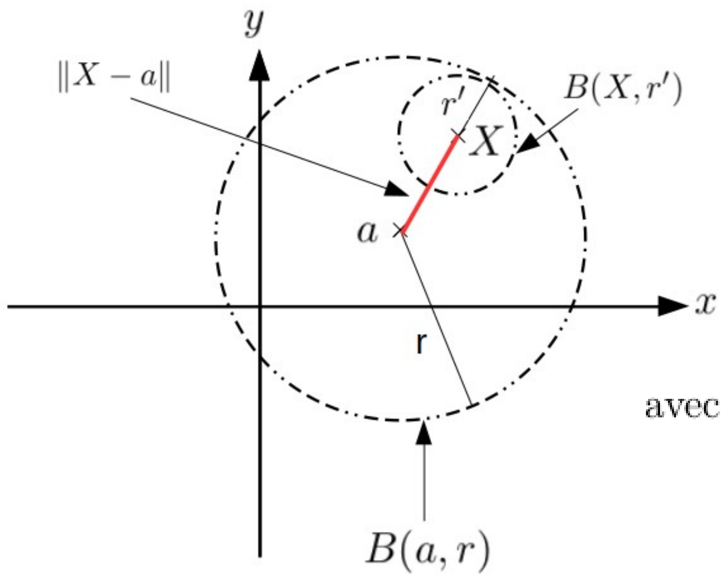
Ph.D. Elian Masnada

Propriété 16 :

Une boule ouverte est un ouvert.

Démonstration :

représentation dans $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$



Soit la boule ouverte $B(a,r)$.

On introduit au point $X \in B(a,r)$
la boule ouverte $B(X, r' = r - \|X-a\|)$

Alors

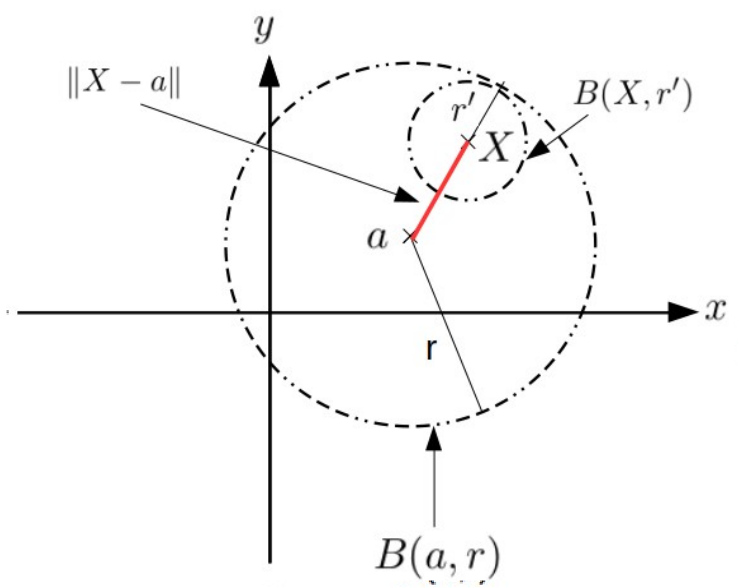
$$\forall X \in B(a,r),\ B(X,r') \subset B(a,r)$$

avec $r' > 0$ puisque $r' = r - \|X-a\|$ et $\|X-a\| < r$

Montrons que cela est vrai pour tout EVN (et pas seulement pour $\mathbb{R}^2$)

Ph.D. Elian Masnada

Etape 0 : Vérifions que $B(X,r') \subset B(a,r)$ pour $(E, \|\cdot\|)$.



Chapitre 2 :

Espace vectoriel normé

Introduction du chapitre 2

Partie 1 :
Eléments de topologie

a. Norme & distance

b. Boule Ouverte, Boule Fermée et Sphère

c. Voisinage

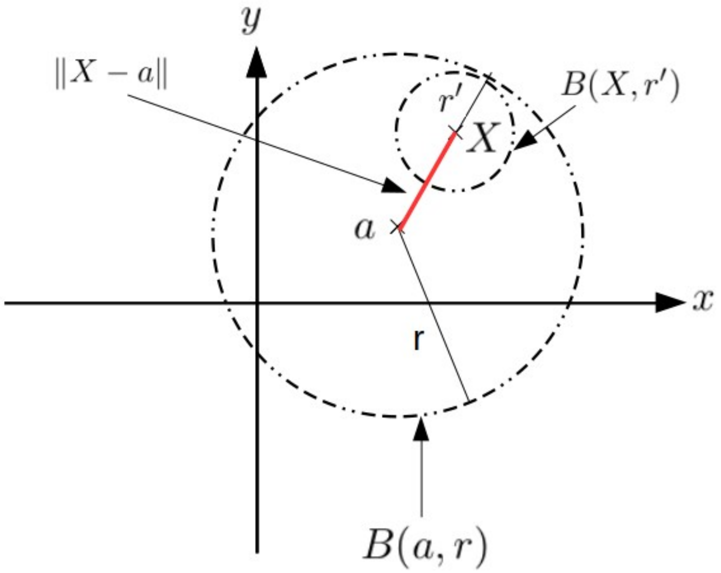
d. Ouvert, Fermé

e. Intérieur et adhérent

Partie 2 :
Suites d'éléments d'un EVN

Etape 0 : Vérifions que $B(X,r') \subset B(a,r)$ pour $(E, \|\cdot\|)$.

Soit $Y \in B(X,r')$. On peut alors écrire

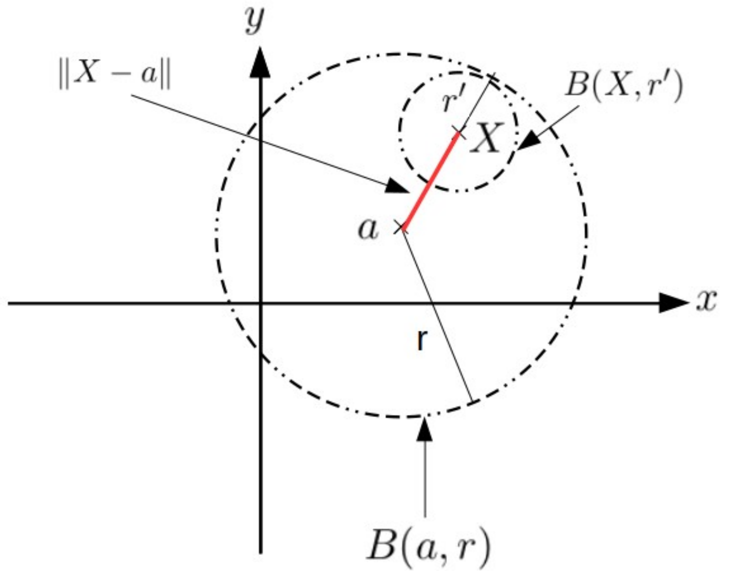


Ph.D. Elian Masnada

<u>Etape 0 :</u> Vérifions que $B(X,r') \subset B(a,r)$ pour $(E, \|\cdot\|)$.

Soit $Y \in B(X,r')$. On peut alors écrire

$$\|Y - X + X - a\| \leq \|Y - X\| + \|X - a\|$$

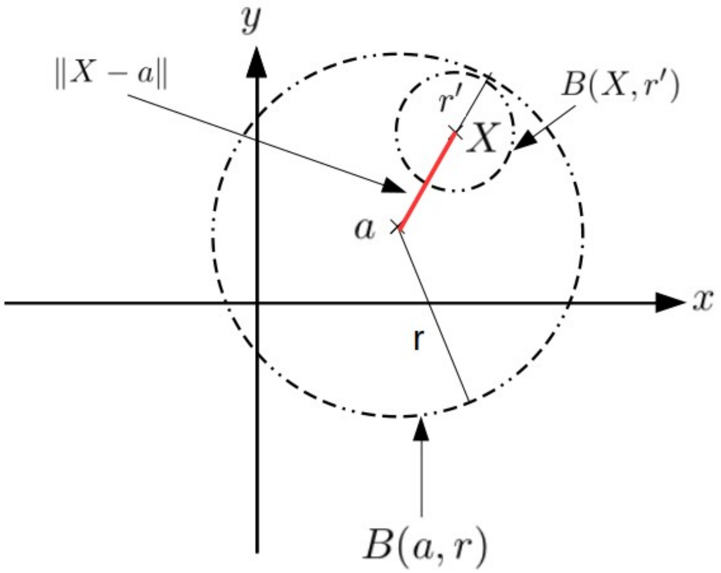


Ph.D. Elian Masnada

<u>Etape 0 :</u> Vérifions que $B(X, r') \subset B(a, r)$ pour $(E, \|\cdot\|)$.

Soit $Y \in B(X, r')$. On peut alors écrire

$$\|Y - X + X - a\| \leq \|Y - X\| + \|X - a\|$$
$$\|Y - a\| < r - \|X - a\| + \|X - a\|$$

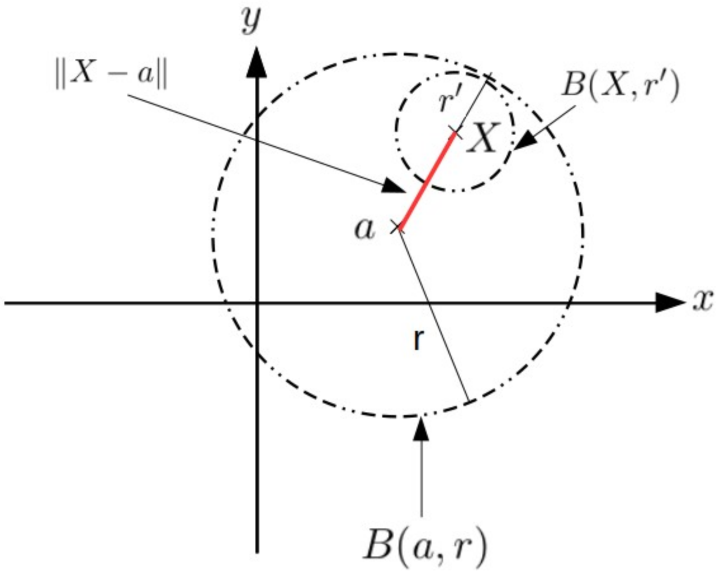


Ph.D. Elian Masnada

Etape 0 : Vérifions que $B(X,r') \subset B(a,r)$ pour $(E, \|\cdot\|)$.

Soit $Y \in B(X,r')$. On peut alors écrire

$$\|Y - X + X - a\| \leq \|Y - X\| + \|X - a\|$$
$$\|Y - a\| < r - \|X - a\| + \|X - a\|$$
$$\|Y - a\| < r$$



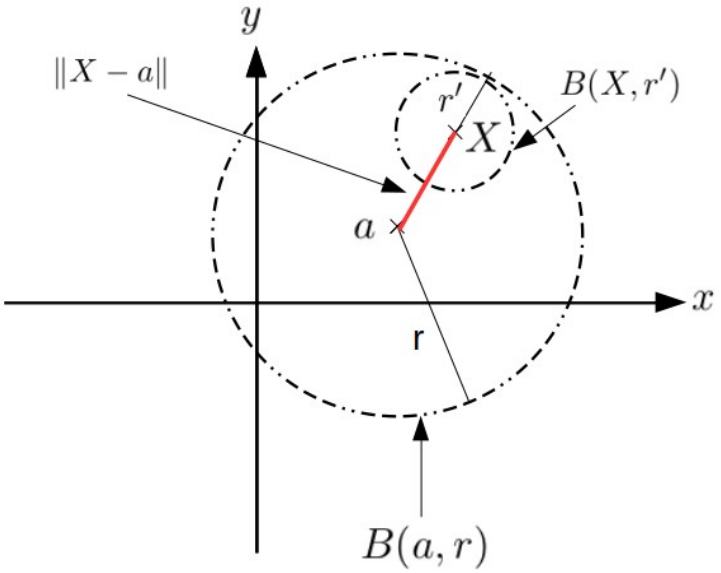
Ph.D. Elian Masnada

Etape 0 : Vérifions que $B(X,r') \subset B(a,r)$ pour $(E, \|\cdot\|)$.

Soit $Y \in B(X,r')$. On peut alors écrire

$$\|Y - X + X - a\| \leq \|Y - X\| + \|X - a\|$$
$$\|Y - a\| < r - \|X - a\| + \|X - a\|$$
$$\|Y - a\| < r$$

Donc $B(X,r') \subset B(a,r)$



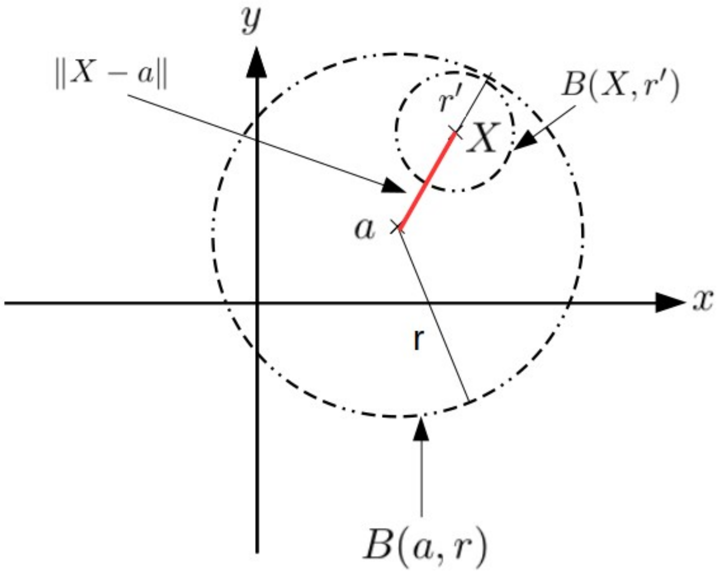
Ph.D. Elian Masnada

Etape 0 : Vérifions que $B(X, r') \subset B(a, r)$ pour $(E, \|\cdot\|)$.

Soit $Y \in B(X, r')$. On peut alors écrire

$$\begin{aligned}
&\|Y - X + X - a\| \leq \|Y - X\| + \|X - a\| \\
&\|Y - a\| < r - \|X - a\| + \|X - a\| \\
&\|Y - a\| < r
\end{aligned}$$

Donc $B(X, r') \subset B(a, r)$



Etape 1 : Vérifions que $B(X, r') \subset B(a, r)$ pour tout X.

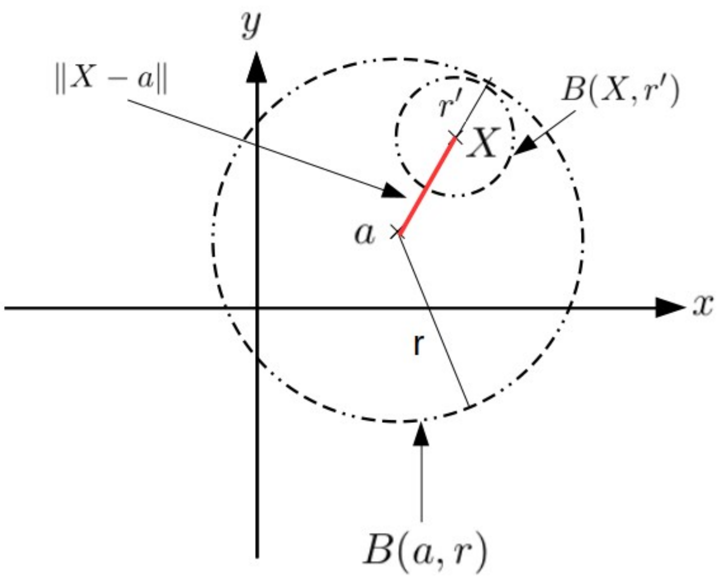
Ph.D. Elian Masnada

Etape 0 : Vérifions que $B(X,r') \subset B(a,r)$ pour $(E,\|\cdot\|)$.

Soit $Y \in B(X,r')$. On peut alors écrire

$$\|Y - X + X - a\| \leq \|Y - X\| + \|X - a\|$$
$$\|Y - a\| < r - \|X - a\| + \|X - a\|$$
$$\|Y - a\| < r$$

Donc $B(X,r') \subset B(a,r)$



Etape 1 : Vérifions que $B(X,r') \subset B(a,r)$ pour tout X.

Or pour $\forall X \in B(X,r')$, $r' > 0$ puisque $r' = r - \|X - a\|$ et $\|X - a\| < r$.
Donc $\forall X \in B(a,r)$, $B(X,r') \subset B(a,r)$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 17 :

Une union quelconque d'ouverts est un ouvert.

Démonstration :

Soit $(U_i)_{i\in I}$ une famille quelconque d'ouverts.

On note $U = \cup_{i\in I} U_i$ l'union.

Soit $x \in U$. Alors $\exists i$ tel que $x \in U_i$.

Or U_i est un ouvert donc il existe $r_i > 0$ tel que $B(x, r_i) \subset U_i \subset U$.

Or ce raisonnement peut-être fait pour tout x

$\Rightarrow$ donc U est un ouvert.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 18 :

Toute intersection finie d'ouverts est un ouvert.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 18</u> :

Toute intersection finie d'ouverts est un ouvert.

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 18 :

Toute intersection finie d'ouverts est un ouvert.

Démonstration :

Soit $(U_i)_{1<i<n}$ une famille finie d'ouverts.

On note $U = \cap_i U_i$ l'intersection de ces ouverts.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 18</u> :

Toute intersection finie d'ouverts est un ouvert.

Démonstration :

Soit $(U_i)_{1<i<n}$ une famille finie d'ouverts.

On note $U = \cap_i U_i$ l'intersection de ces ouverts.

$$\text{Soit } x \in U \iff \begin{cases} x \in U_1 & \text{comme } U_1 \text{ est un ouvert, } U_1 \text{ est un voisinage de } x \\ x \in U_2 & \text{comme } U_2 \text{ est un ouvert, } U_2 \text{ est un voisinage de } x \\ \ldots & \\ x \in U_n & \text{comme } U_n \text{ est un ouvert, } U_n \text{ est un voisinage de } x \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 18 :

Toute intersection finie d'ouverts est un ouvert.

Démonstration :

Soit $(U_i)_{1<i<n}$ une famille finie d'ouverts.

On note $U = \cap_i U_i$ l'intersection de ces ouverts.

$$\text{Soit } x \in U \Longleftrightarrow \begin{cases} x \in U_1 & \text{comme } U_1 \text{ est un ouvert, } U_1 \text{ est un voisinage de } x \\ x \in U_2 & \text{comme } U_2 \text{ est un ouvert, } U_2 \text{ est un voisinage de } x \\ \dots & \\ x \in U_n & \text{comme } U_n \text{ est un ouvert, } U_n \text{ est un voisinage de } x \end{cases}$$

Donc x appartient à une intersection finie de voisinage de x qui est donc un voisinage de x. Donc pour tout $x \in U$, U est un voisinage de x donc U est un ouvert.

Ph.D. Elian Masnada

Corollaire des propriétés précédentes :

Soit $E = \mathbb{R}$ et $a, b \in \mathbb{R}$ tel que $a < b$. Alors, les intervalles suivants sont des ouverts

$$]-\infty, b[\qquad]a, b[\qquad]a, +\infty[$$

Ph.D. Elian Masnada

Corollaire des propriétés précédentes :

Soit $E = \mathbb{R}$ et $a, b \in \mathbb{R}$ tel que $a < b$. Alors, les intervalles suivants sont des ouverts

$$]-\infty, b[\qquad]a, b[\qquad]a, +\infty[$$

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Corollaire des propriétés précédentes :

Soit $E = \mathbb{R}$ et $a, b \in \mathbb{R}$ tel que $a < b$. Alors, les intervalles suivants sont des ouverts

$$]-\infty, b[\qquad]a, b[\qquad]a, +\infty[$$

Démonstration :

$]a, b[= B(\frac{a+b}{2}, \frac{b-a}{2})$. Or une boule ouverte est un ouvert donc $]a, b[$ est un ouvert.

<u>Corollaire des propriétés précédentes</u> :

Soit $E = \mathbb{R}$ et $a, b \in \mathbb{R}$ tel que $a < b$. Alors, les intervalles suivants sont des ouverts

$$]-\infty, b[\qquad]a, b[\qquad]a, +\infty[$$

Démonstration :

$]a, b[= B(\frac{a+b}{2}, \frac{b-a}{2})$. Or une boule ouverte est un ouvert donc $]a, b[$ est un ouvert.

$]a, \infty[= \cup_{\alpha > a}]a, \alpha[$ union infinie d'ouverts donc ouvert.

Corollaire des propriétés précédentes :

Soit $E = \mathbb{R}$ et $a, b \in \mathbb{R}$ tel que $a < b$. Alors, les intervalles suivants sont des ouverts

$$]-\infty, b[\qquad]a, b[\qquad]a, +\infty[$$

Démonstration :

$]a, b[= B(\frac{a+b}{2}, \frac{b-a}{2})$. Or une boule ouverte est un ouvert donc $]a, b[$ est un ouvert.

$]-\infty, b[= \cup_{\alpha<b}]\alpha, b[$ union infinie d'ouverts donc ouvert.

$]a, \infty[= \cup_{\alpha>a}]a, \alpha[$ union infinie d'ouverts donc ouvert.

Ph.D. Elian Masnada

Définition 8 : (Fermé)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et F une partie de E. Alors F est un fermé si, et seulement si, $C_E F$ (complémentaire de F dans E) est un ouvert.

Ph.D. Elian Masnada

Définition 8 : (Fermé)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et F une partie de E. Alors F est un fermé si, et seulement si, $C_E F$ (complémentaire de F dans E) est un ouvert.

Propriété 19 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN, alors $\emptyset$ et E sont des fermés.

Donc E et $\emptyset$ sont à la fois des ouverts et des fermés (voir prop. 15).

Ph.D. Elian Masnada

Définition 8 : (Fermé)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et F une partie de E. Alors F est un fermé si, et seulement si, $C_E F$ (complémentaire de F dans E) est un ouvert.

Propriété 19 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN, alors $\emptyset$ et E sont des fermés.

Donc E et $\emptyset$ sont à la fois des ouverts et des fermés (voir prop. 15).

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

<u>Définition 8</u> : (Fermé)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et F une partie de E. Alors F est un fermé si, et seulement si, $C_E F$ (complémentaire de F dans E) est un ouvert.

<u>Propriété 19</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN, alors $\emptyset$ et E sont des fermés.

Donc E et $\emptyset$ sont à la fois des ouverts et des fermés (voir prop. 15).

Démonstration :

Pour $\emptyset$: $C_E\emptyset = E$ qui est un ouvert donc $\emptyset$ est un fermé.

Ph.D. Elian Masnada

Définition 8 : (Fermé)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et F une partie de E. Alors F est un fermé si, et seulement si, $C_E F$ (complémentaire de F dans E) est un ouvert.

Propriété 19 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN, alors $\emptyset$ et E sont des fermés.

Donc E et $\emptyset$ sont à la fois des ouverts et des fermés (voir prop. 15).

Démonstration :

Pour $\emptyset$: $C_E\emptyset = E$ qui est un ouvert donc $\emptyset$ est un fermé.

Pour E :

Ph.D. Elian Masnada

<u>Définition 8</u> : (Fermé)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et F une partie de E. Alors F est un fermé si, et seulement si, $C_E F$ (complémentaire de F dans E) est un ouvert.

<u>Propriété 19</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN, alors $\emptyset$ et E sont des fermés.

Donc E et $\emptyset$ sont à la fois des ouverts et des fermés (voir prop. 15).

Démonstration :

Pour $\emptyset$: $C_E\emptyset = E$ qui est un ouvert donc $\emptyset$ est un fermé.

Pour E :

$C_E E = \emptyset$ qui est un ouvert (d'après la propriété 15)

Ph.D. Elian Masnada

Définition 8 : (Fermé)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN et F une partie de E. Alors F est un fermé si, et seulement si, $C_E F$ (complémentaire de F dans E) est un ouvert.

Propriété 19 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN, alors $\emptyset$ et E sont des fermés.

Donc E et $\emptyset$ sont à la fois des ouverts et des fermés (voir prop. 15).

Démonstration :

Pour $\emptyset$: $C_E\emptyset = E$ qui est un ouvert donc $\emptyset$ est un fermé.

Pour E :

$C_E E = \emptyset$ qui est un ouvert (d'après la propriété 15)

$\Rightarrow$ E est un fermé.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 20 :

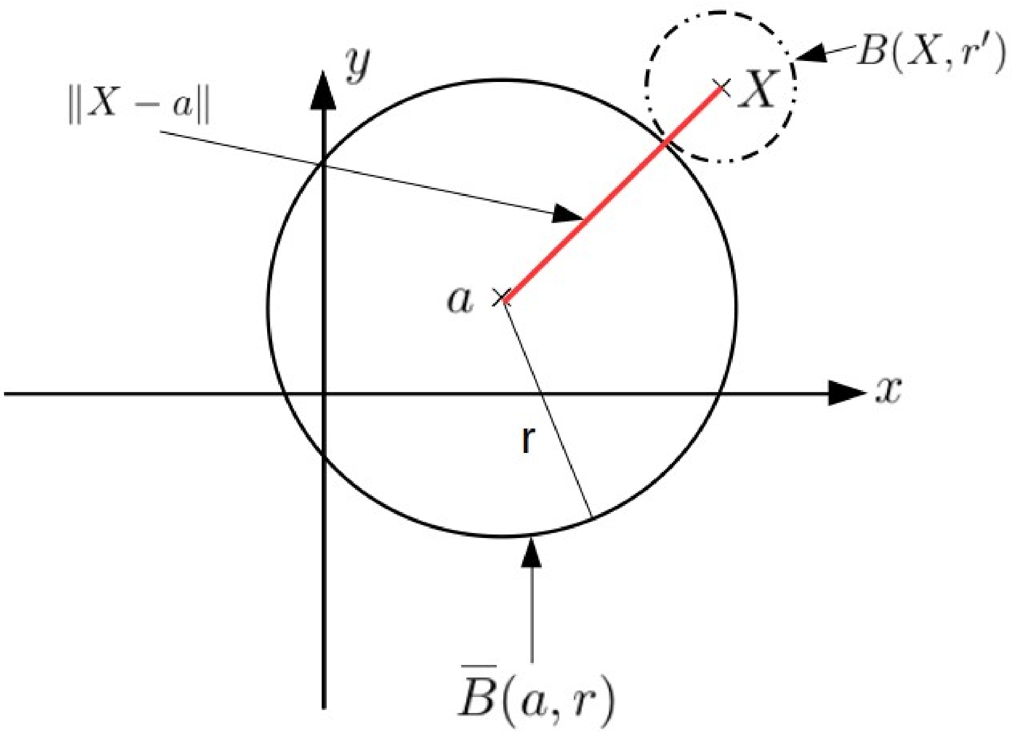
Une boule fermée est un fermé.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 20 :

Une boule fermée est un fermé.

Démonstration : Voir le poly



Ph.D. Elian Masnada

Propriété 21 :

Toute intersection de fermés est un fermé.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 21 :

Toute intersection de fermés est un fermé.

Démonstration :

$\boxed{\text{Rappel : } C_E(\cup_i U_i) = \cap_i (C_E U_i)}$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 21 :

Toute intersection de fermés est un fermé.

Démonstration :

$\boxed{\text{Rappel : } C_E(\cup_i U_i) = \cap_i (C_E U_i)}$

On sait que si $(U_i)_{i\in I}$ est une famille d'ouverts alors :

1. $U = \cup_i U_i$ est un ouvert (propriété 17).
2. $(C_E U_i)_{i\in I}$ est une famille de fermés (puisque le complémentaire de $C_E U_i$ est U_i qui est un ouvert).

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 21 :

Toute intersection de fermés est un fermé.

Démonstration :

Rappel : $C_E(\cup_i U_i) = \cap_i (C_E U_i)$

On sait que si $(U_i)_{i\in I}$ est une famille d'ouverts alors :

1. $U = \cup_i U_i$ est un ouvert (propriété 17).
2. $(C_E U_i)_{i\in I}$ est une famille de fermés (puisque le complémentaire de $C_E U_i$ est U_i qui est un ouvert).

Puisque U est un ouvert $\Rightarrow$ $C_E U$ est un fermé

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 21 :

Toute intersection de fermés est un fermé.

Démonstration : $\boxed{\text{Rappel : } C_E(\cup_i U_i) = \cap_i (C_E U_i)}$

On sait que si $(U_i)_{i\in I}$ est une famille d'ouverts alors :

1. $U = \cup_i U_i$ est un ouvert (propriété 17).
2. $(C_E U_i)_{i\in I}$ est une famille de fermés (puisque le complémentaire de $C_E U_i$ est U_i qui est un ouvert).

Puisque U est un ouvert $\Rightarrow$ $C_E U$ est un fermé

et puisque, pour tout i, U_i est un ouvert $\Rightarrow$ $C_E U_i$ est un fermé

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 21 :

Toute intersection de fermés est un fermé.

Démonstration :

$\boxed{\text{Rappel : } C_E(\cup_i U_i) = \cap_i(C_E U_i)}$

On sait que si $(U_i)_{i\in I}$ est une famille d'ouverts alors :

1. $U = \cup_i U_i$ est un ouvert (propriété 17).
2. $(C_E U_i)_{i\in I}$ est une famille de fermés (puisque le complémentaire de $C_E U_i$ est U_i qui est un ouvert).

Puisque U est un ouvert $\Rightarrow$ $C_E U$ est un fermé

et puisque, pour tout i, U_i est un ouvert $\Rightarrow$ $C_E U_i$ est un fermé

Or

$$C_E U = C_E(\cup_i U_i) = \cap_i(C_E U_i)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 21 :

Toute intersection de fermés est un fermé.

Démonstration :

$\boxed{\text{Rappel : } C_E(\cup_i U_i) = \cap_i(C_E U_i)}$

On sait que si $(U_i)_{i\in I}$ est une famille d'ouverts alors :

1. $U = \cup_i U_i$ est un ouvert (propriété 17).
2. $(C_E U_i)_{i\in I}$ est une famille de fermés (puisque le complémentaire de $C_E U_i$ est U_i qui est un ouvert).

Puisque U est un ouvert $\Rightarrow$ $C_E U$ est un fermé

et puisque, pour tout i, U_i est un ouvert $\Rightarrow$ $C_E U_i$ est un fermé

Or

$$C_E U = C_E(\cup_i U_i) = \cap_i(C_E U_i)$$

$\Rightarrow$ intersection de fermés est fermé

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 22 :

Toute union finie de fermés est un fermé.

Démonstration :
Même chose que précédemment. En passant au complémentaire c'est immédiat.

Propriété 22 :

Toute union finie de fermés est un fermé.

Démonstration :
Même chose que précédemment. En passant au complémentaire c'est immédiat.

Corollaire :

Soit $E = \mathbb{R}$ et $a, b \in \mathbb{R}$ tel que $a < b$. Alors, les intervalles suivants sont des fermés

$$]-\infty, b] \qquad [a, b] \qquad [a, +\infty[$$

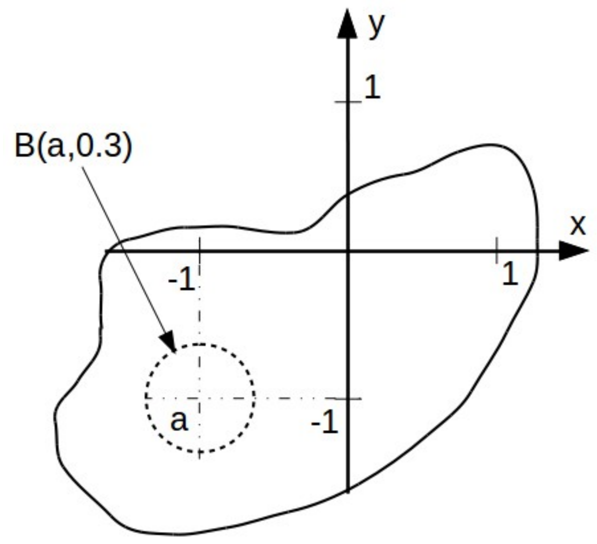
Trivial

Ph.D. Elian Masnada

Définition 9 : (Intérieur)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$ et $a \in E$. On dit que a est intérieur à A si, et seulement si, A est un voisinage de a. On appelle Intérieur de A, que l'on note $\mathring{A}$, l'ensemble des points intérieurs à A.

Formulation mathématique



Ph.D. Elian Masnada

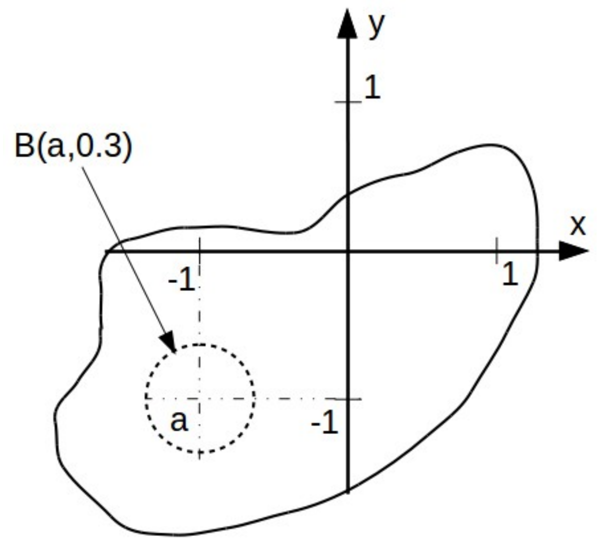
Définition 9 : (Intérieur)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$ et $a \in E$. On dit que a est intérieur à A si, et seulement si, A est un voisinage de a. On appelle Intérieur de A, que l'on note $\mathring{A}$, l'ensemble des points intérieurs à A.

Formulation mathématique

$$x \in \mathring{A} \Longleftrightarrow \exists r > 0 \ / \ B(x,r) \subset A$$

$$x \in \mathring{A} \Longleftrightarrow \exists U \subset A \ / \ U \text{ ouvert et } x \in U$$



Ph.D. Elian Masnada

Propriété 23 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$ et $\mathring{A}$ l'intérieur de A. Alors $\mathring{A} \subset A$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 23 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$ et $\mathring{A}$ l'intérieur de A. Alors $\mathring{A} \subset A$.

Démonstration :

$x \in \mathring{A} \Longleftrightarrow \exists r > 0 \ / \ B(x, r) \subset A$ donc $x \in A$ donc $\mathring{A} \subset A$.

Propriété 23 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$ et $\mathring{A}$ l'intérieur de A. Alors $\mathring{A} \subset A$.

Démonstration :

$x \in \mathring{A} \Longleftrightarrow \exists r > 0 \ / \ B(x,r) \subset A$ donc $x \in A$ donc $\mathring{A} \subset A$.

Propriété 24 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$ et $\mathring{A}$ l'intérieur de A. Alors $\mathring{A}$ est le plus grand ouvert contenu dans A.

Démonstration :

voir polycopié

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 25 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A et B deux parties de E. Alors

1. A ouvert $\iff \mathring{A} = A$
2. $\mathring{\mathring{A}} = \mathring{A}$
3. Si $A \subset B$ alors $\mathring{A} \subset \mathring{B}$

Démonstration :

1. (a) Si A est un ouvert alors le plus grand ouvert contenu dans A est A lui-même. Donc $\mathring{A} = A$.

   (b) Si $\mathring{A} = A$ alors A est un ouvert puisque $\mathring{A}$ est un ouvert.

2. $\mathring{A}$ est un ouvert. Donc le plus grand ouvert contenu dans $\mathring{A}$ est $\mathring{A}$. Finalement $\mathring{\mathring{A}} = \mathring{A}$.

3. Soit $x \in \mathring{A} \iff \exists r > 0 \ / \ B(x,r) \subset A \subset B$ donc $x \in \mathring{B}$. Or ceci est vrai pour tout $x \in \mathring{A}$ donc $\mathring{A} \subset \mathring{B}$.

Quelques exemples :

Dans $\mathbb{R}$:

$$\overset{\circ}{]a,b[} = \overset{\circ}{[a,b[} = \overset{\circ}{]a,b]} = \overset{\circ}{[a,b]} =]a,b[$$

Dans $\mathbb{R}^n$:

$$\mathring{B}(a,r) = B(a,r) \qquad \mathring{\overline{B}}(a,r) = B(a,r)$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 10 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$ et $a \in E$. On dit que a est adhérent à A si, et seulement si, tout voisinage de a rencontre A. On appelle l'adhérent de A, noté $\overline{A}$, l'ensemble des points adhérents à A.

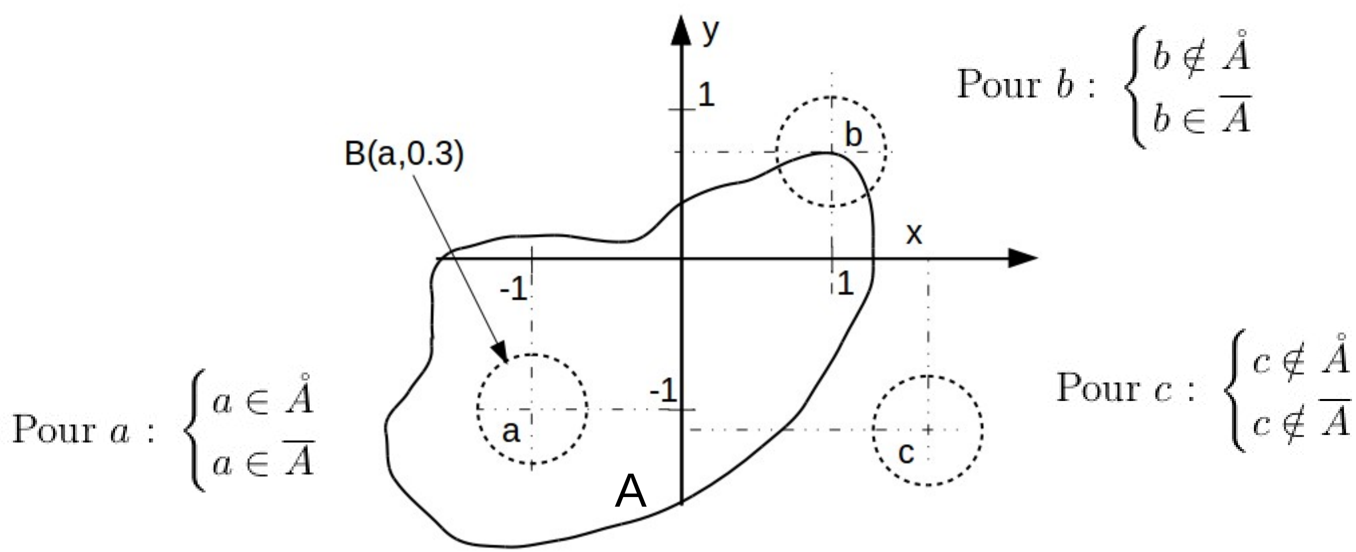
Formulation mathématique :

<u>Définition 10</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$ et $a \in E$. On dit que a est adhérent à A si, et seulement si, tout voisinage de a rencontre A. On appelle l'adhérent de A, noté $\overline{A}$, l'ensemble des points adhérents à A.

Formulation mathématique :

$$x \in \overline{A} \iff \forall r > 0,\ B(x, r) \cap A \neq \emptyset$$



Ph.D. Elian Masnada

Propriété 26 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 26</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 26 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Démonstration :

Soit $x \in A$. Alors $\forall r > 0,\quad x \in B(x,r) \Longrightarrow B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 26 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Démonstration :

Soit $x \in A$. Alors $\forall r > 0, \quad x \in B(x,r) \Longrightarrow B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

Donc $x \in \overline{A}$ et finalement $A \subset \overline{A}$.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 26</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Démonstration :

Soit $x \in A$. Alors $\forall r > 0,\quad x \in B(x,r) \Longrightarrow B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

Donc $x \in \overline{A}$ et finalement $A \subset \overline{A}$.

<u>Propriété 27</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $\overline{A}$ est un fermé

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 26 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Démonstration :

Soit $x \in A$. Alors $\forall r > 0, \quad x \in B(x,r) \Rightarrow B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

Donc $x \in \overline{A}$ et finalement $A \subset \overline{A}$.

Propriété 27 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $\overline{A}$ est un fermé

Démonstration : Pour cela étudions $C_E\overline{A}$: si c'est un ouvert alors $\overline{A}$ est un fermé.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 26</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Démonstration :

Soit $x \in A$. Alors $\forall r > 0, \quad x \in B(x,r) \Longrightarrow B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

Donc $x \in \overline{A}$ et finalement $A \subset \overline{A}$.

<u>Propriété 27</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $\overline{A}$ est un fermé

Démonstration : Pour cela étudions $C_E\overline{A}$: si c'est un ouvert alors $\overline{A}$ est un fermé.

$$x \in \overline{A} \Longleftrightarrow \forall r > 0 \;/\; B(x,r) \cap A \neq \emptyset$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 26 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Démonstration :

Soit $x \in A$. Alors $\forall r > 0,\quad x \in B(x,r) \Rightarrow B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

Donc $x \in \overline{A}$ et finalement $A \subset \overline{A}$.

Propriété 27 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $\overline{A}$ est un fermé

Démonstration : Pour cela étudions $C_E\overline{A}$: si c'est un ouvert alors $\overline{A}$ est un fermé.

$$x \in \overline{A} \iff \forall r > 0 \;/\; B(x,r) \cap A \neq \emptyset$$

Donc pour $\forall x \in C_E\overline{A},\ \exists r > 0$ tel que $B(x,r) \cap A = \emptyset$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 26 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $A \subset \overline{A}$

Démonstration :

Soit $x \in A$. Alors $\forall r > 0$, $x \in B(x,r)$ $\Rightarrow$ $B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

Donc $x \in \overline{A}$ et finalement $A \subset \overline{A}$.

Propriété 27 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie de E. Alors $\overline{A}$ est un fermé

Démonstration : Pour cela étudions $C_E\overline{A}$: si c'est un ouvert alors $\overline{A}$ est un fermé.

$x \in \overline{A} \Longleftrightarrow \forall r > 0 \ / \ B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

Donc pour $\forall x \in C_E\overline{A}$, $\exists r > 0$ tel que $B(x,r) \cap A = \emptyset$

Donc, $\exists r > 0 \ / B(x,r) \subset C_E\overline{A}$ $\Rightarrow$ $C_E\overline{A}$ est un ouvert.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 28 :

$\overline{A}$ est le plus petit fermé contenant A.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 28 :

Admis

$\overline{A}$ est le plus petit fermé contenant A.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 28 :

Admis

$\overline{A}$ est le plus petit fermé contenant A.

Propriété 29 :

1. A est un fermé si, et seulement si, $\overline{A} = A$
2. $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$
3. Si $A \subset B$ alors $\overline{A} \subset \overline{B}$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 28 :

Admis

$\overline{A}$ est le plus petit fermé contenant A.

Propriété 29 :

1. A est un fermé si, et seulement si, $\overline{A} = A$
2. $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$
3. Si $A \subset B$ alors $\overline{A} \subset \overline{B}$

1. (a) Si $\overline{A} = A$ alors comme $\overline{A}$ est un fermé alors A est un fermé.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 28 :

$\overline{A}$ est le plus petit fermé contenant A.

Admis

Propriété 29 :

1. A est un fermé si, et seulement si, $\overline{A} = A$
2. $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$
3. Si $A \subset B$ alors $\overline{A} \subset \overline{B}$

1. (a) Si $\overline{A} = A$ alors comme $\overline{A}$ est un fermé alors A est un fermé.

   (b) Si A est un fermé alors le plus petit fermé qui contient A est A. Donc $\overline{A} = A$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 28 :

Admis

$\overline{A}$ est le plus petit fermé contenant A.

Propriété 29 :

1. A est un fermé si, et seulement si, $\overline{A} = A$
2. $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$
3. Si $A \subset B$ alors $\overline{A} \subset \overline{B}$

1. (a) Si $\overline{A} = A$ alors comme $\overline{A}$ est un fermé alors A est un fermé.
   (b) Si A est un fermé alors le plus petit fermé qui contient A est A. Donc $\overline{A} = A$
2. Soit $\overline{A}$ l'adhérent de A. Donc $\overline{A}$ est un fermé. Donc le plus petit fermé contenant $\overline{A}$ est $\overline{A}$. Finalement $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 28 :

Admis

$\overline{A}$ est le plus petit fermé contenant A.

Propriété 29 :

1. A est un fermé si, et seulement si, $\overline{A} = A$
2. $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$
3. Si $A \subset B$ alors $\overline{A} \subset \overline{B}$

1. (a) Si $\overline{A} = A$ alors comme $\overline{A}$ est un fermé alors A est un fermé.
   (b) Si A est un fermé alors le plus petit fermé qui contient A est A. Donc $\overline{A} = A$
2. Soit $\overline{A}$ l'adhérent de A. Donc $\overline{A}$ est un fermé. Donc le plus petit fermé contenant $\overline{A}$ est $\overline{A}$. Finalement $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$.
3. Soit $a \in \overline{A}$ et V un voisinage de a. On a donc que $A \cap V \neq \emptyset$. Or comme $A \subset B$, on a $A \cap V \subset B \cap V$, il vient que $B \cap V \neq \emptyset$. Finalement $a \in \overline{B}$.

Ph.D. Elian Masnada

Définition 11 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie E. On appelle frontière de A, noté $Fr(a)$ ou ∂A, l'ensemble :

$$\partial A = \overline{A} \backslash \mathring{A}$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 11 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie E. On appelle frontière de A, noté $Fr(a)$ ou ∂A, l'ensemble :

$$\partial A = \overline{A} \setminus \mathring{A}$$

exemple :

$$\begin{cases} \overline{\overline{B}}(a,r) = \overline{B}(a,r) \\ \mathring{\overline{B}}(a,r) = B(a,r) \end{cases} \Rightarrow \partial\overline{B}(a,r) = \overline{B}(a,r) \setminus B(a,r) = S(a,r)$$

Ph.D. Elian Masnada

<u>Définition 11</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit A une partie E. On appelle frontière de A, noté $Fr(a)$ ou ∂A, l'ensemble :

$$\partial A = \overline{A} \backslash \mathring{A}$$

exemple :

$$\begin{cases} \overline{\overline{B}}(a,r) = \overline{B}(a,r) \\ \mathring{\overline{B}}(a,r) = B(a,r) \end{cases} \Longrightarrow \partial \overline{B}(a,r) = \overline{B}(a,r) \backslash B(a,r) = S(a,r)$$

<u>Propriété 30</u> :

1. $\overline{A} = A \cup \partial A$
2. $\mathring{A} = A \backslash \partial A$

Ph.D. Elian Masnada

Point méthodologie :

Ph.D. Elian Masnada

Point méthodologie :

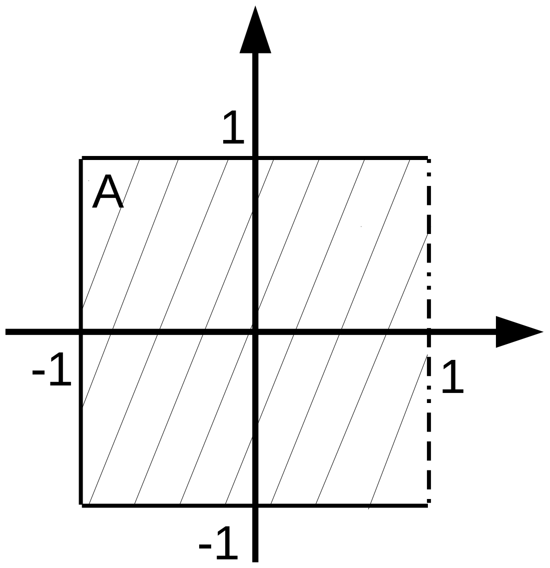
Montrer qu'un ensemble A n'est pas ouvert :

trouver au moins un point (sur la frontière de l'ensemble) tel que quelque soit la taille de la boule ouverte centrée en ce point, une partie de la boule soit en dehors de A

Point méthodologie :

Montrer qu'un ensemble A n'est pas ouvert :

trouver au moins un point (sur la frontière de l'ensemble) tel que quelque soit la taille de la boule ouverte centrée en ce point, une partie de la boule soit en dehors de A

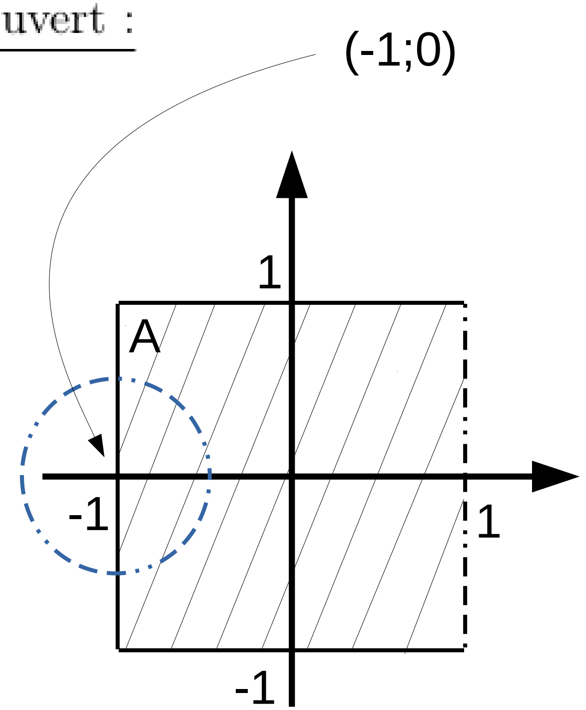


$$A = \left\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \ / \ -1 \leq x < 1, \ -1 \leq y \leq 1\right\}$$

Point méthodologie :

Montrer qu'un ensemble A n'est pas ouvert :

trouver au moins un point (sur la frontière de l'ensemble) tel que quelque soit la taille de la boule ouverte centrée en ce point, une partie de la boule soit en dehors de A



$$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \ / \ -1 \leq x < 1, \ -1 \leq y \leq 1\}$$

Point méthodologie :

Montrer qu'un ensemble A n'est pas fermé :

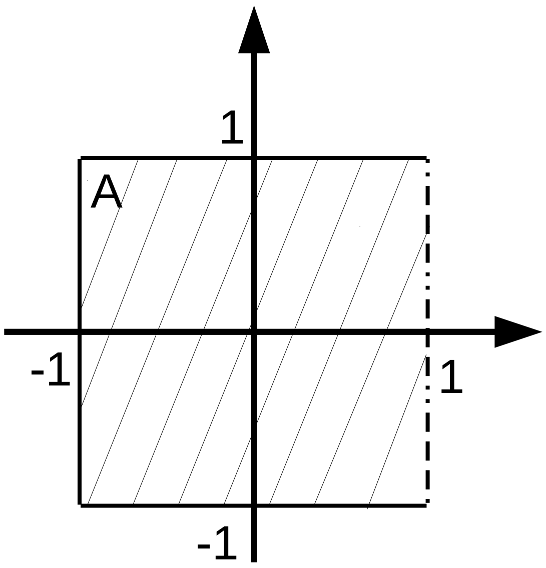
trouver au moins un point de $C_E A$ (sur la frontière de l'ensemble) tel que quelque soit la taille de la boule ouverte centrée en ce point, une partie de la boule soit en dehors de $C_E A$

Ph.D. Elian Masnada

Point méthodologie :

Montrer qu'un ensemble A n'est pas fermé :

trouver au moins un point de $C_E A$ (sur la frontière de l'ensemble) tel que quelque soit la taille de la boule ouverte centrée en ce point, une partie de la boule soit en dehors de $C_E A$

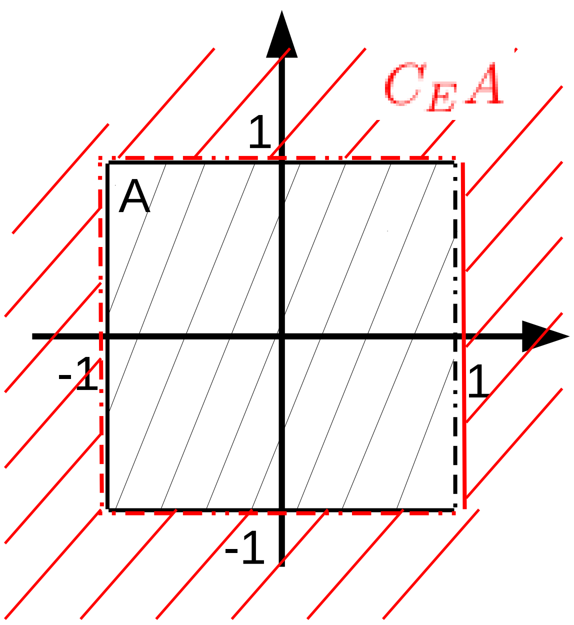


$$A = \left\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \ / \ -1 \leq x < 1,\ -1 \leq y \leq 1\right\}$$

Point méthodologie :

Montrer qu'un ensemble A n'est pas fermé :

trouver au moins un point de $C_E A$ (sur la frontière de l'ensemble) tel que quelque soit la taille de la boule ouverte centrée en ce point, une partie de la boule soit en dehors de $C_E A$



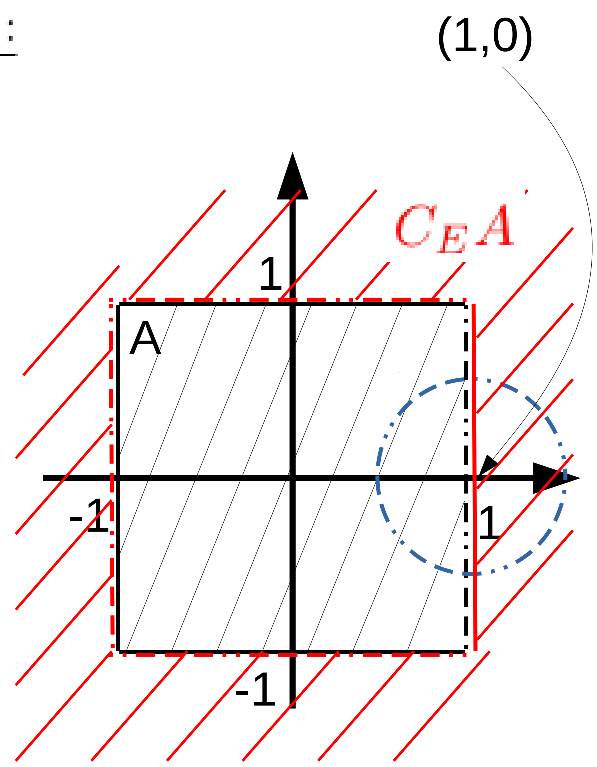
$$A = \left\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \ / \ -1 \leq x < 1, \ -1 \leq y \leq 1\right\}$$

Ph.D. Elian Masnada

Point méthodologie :

Montrer qu'un ensemble A n'est pas fermé :

trouver au moins un point de $C_E A$ (sur la frontière de l'ensemble) tel que quelque soit la taille de la boule ouverte centrée en ce point, une partie de la boule soit en dehors de $C_E A$



$$A = \left\{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \;/\; -1 \leq x < 1,\; -1 \leq y \leq 1\right\}$$

Trouver l'intérieur de A : (démonstration dans le TD3)

Etape 0 : Proposer un candidat B

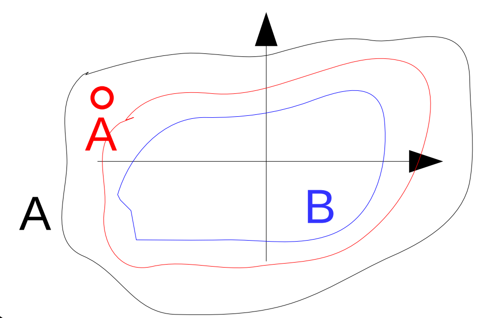
Sachant que $\mathring{A}$ est le plus grand ouvert contenu dans A

Etape 1 : Vérifier que B est un ouvert
Etape 2 : Vérifier que $B \subset A$

$\forall x \in B, \; \exists r > 0$ tel que $B(x,r) \subset A$

$\iff B \subset \mathring{A}$

Mais B peut être trop petit



Etape 3 : Vérifions que $\mathring{A} \subset B$

On doit vérifier que pour $\forall x \in A \backslash B$

$$\forall r > 0, \; B(x,r) \not\subset A$$

$$\mathring{A} = B$$

Trouver l'adhérent de A : (démonstration dans le TD3)

Etape 0 : Proposer un candidat B

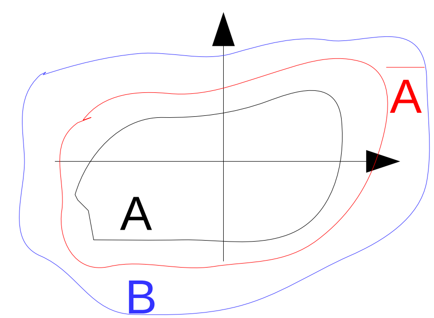
sachant que $\overline{A}$ est le plus petit fermé contenant A

Etape 1 : Vérifier que B est un fermé.
Etape 2 : Vérifier que $A \subset B$.

$\forall x \in C_E B$, on a $\exists r > 0$ / $B(x,r) \cap A = \emptyset$

$\iff \overline{A} \subset B$

Mais B peut être trop grand



Etape 3 : Vérifions que $B \subset \overline{A}$

On doit vérifier que pour $\forall x \in B \backslash A$:

$\forall r > 0,\ B(x,r) \cap A \neq \emptyset$

$\overline{A} = B$

Ph.D. Elian Masnada

Rappel 1 : (Suite d'éléments de $\mathbb{R}$)

Une suite d'éléments de $\mathbb{R}$ est une application de $\mathbb{N}$ dans $\mathbb{R}$. Si x est une suite d'éléments de $\mathbb{R}$ de terme général x_n, on notera la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$

exemples :

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & x_n = \frac{1}{n} \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & x_n = 2.3n \end{array}$$

Rappel 1 : (Suite d'éléments de $\mathbb{R}$)

Une suite d'éléments de $\mathbb{R}$ est une application de $\mathbb{N}$ dans $\mathbb{R}$. Si x est une suite d'éléments de $\mathbb{R}$ de terme général x_n, on notera la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$

exemples :

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & x_n = \frac{1}{n} \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & x_n = 2.3n \end{array}$$

Rappel 2 : (Suite d'éléments de $\mathbb{R}$ qui converge)

La suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de $\mathbb{R}$ converge vers $l \in \mathbb{R}$ si, et seulement si, elle vérifie le critère suivant :

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N,\ |x_n - l| < \epsilon$$

On note alors $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = l$ cette limite.

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Définition 12 : (Suite d'éléments d'un EVN)

Soit E un espace vectoriel normé. Une suite d'éléments de E est une application de $\mathbb{N}$ dans E. Si x est une suite de E de terme général x_n, on notera la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 12 : (Suite d'éléments d'un EVN)

Soit E un espace vectoriel normé. Une suite d'éléments de E est une application de $\mathbb{N}$ dans E. Si x est une suite de E de terme général x_n, on notera la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$

Quelques exemples :

— si $E = \mathbb{R}$, on retombe sur le cas étudié en première année :

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & x_n = 2.3n \end{array}$$

— si $E = \mathbb{R}^3$ (cas étudié en analyse dans $\mathbb{R}^n$) :

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^3 \\ n & \mapsto & \left(\frac{1}{n}; 2n+3; (\frac{3}{2})^n\right) \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 13 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. La suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ de E est dite bornée si, et seulement si, la suite numérique réelle $(\|x_n\|)_{n\in\mathbb{N}}$ est bornée, c'est-à-dire si, et seulement si

$$\exists M > 0 \ / \ \forall n \in \mathbb{N}, \ \|x_n\| \leq M$$

exemple :

Soit $(E, \|\cdot\|) = (\mathbb{R}^3, \|\cdot\|_2)$:

Ph.D. Elian Masnada

Définition 13 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. La suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ de E est dite bornée si, et seulement si, la suite numérique réelle $(\|x_n\|)_{n\in\mathbb{N}}$ est bornée, c'est-à-dire si, et seulement si

$$\exists M > 0 \ / \ \forall n \in \mathbb{N}, \ \|x_n\| \leq M$$

exemple :

Soit $(E, \|\cdot\|) = (\mathbb{R}^3, \|\cdot\|_2)$:
Considérons la suite

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^3 \\ n & \mapsto & x_n = (2n, -3n, 1/n) \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 13 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. La suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ de E est dite bornée si, et seulement si, la suite numérique réelle $(\|x_n\|)_{n\in\mathbb{N}}$ est bornée, c'est-à-dire si, et seulement si

$$\exists M > 0 \;/\; \forall n \in \mathbb{N},\ \|x_n\| \leq M$$

exemple :

Soit $(E, \|\cdot\|) = (\mathbb{R}^3, \|\cdot\|_2)$:
Considérons la suite

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^3 \\ n & \mapsto & x_n = (2n, -3n, 1/n) \end{array}$$

Alors

$$\|x_n\|_2 = \sqrt{4n^2 + 9n^2 + \frac{1}{n^2}} \xrightarrow[n\to+\infty]{} +\infty$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 13 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. La suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ de E est dite bornée si, et seulement si, la suite numérique réelle $(\|x_n\|)_{n\in\mathbb{N}}$ est bornée, c'est-à-dire si, et seulement si

$$\exists M > 0 \ / \ \forall n \in \mathbb{N}, \ \|x_n\| \leq M$$

exemple :

Soit $(E, \|\cdot\|) = (\mathbb{R}^3, \|\cdot\|_2)$:
Considérons la suite

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^3 \\ n & \mapsto & x_n = (2n, -3n, 1/n) \end{array}$$

Alors

$$\|x_n\|_2 = \sqrt{4n^2 + 9n^2 + \frac{1}{n^2}} \underset{n\to+\infty}{\longrightarrow} +\infty$$

donc x_n n'est pas borné.

<u>Définition 14</u> : (Suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $l \in E$. La suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de E convergence vers l si, et seulement si, elle vérifie l'une des 3 propriétés équivalentes suivantes

1. $\forall \epsilon > 0, \ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N, \ \|x_n - l\| < \epsilon.$
2. $\forall \epsilon > 0, \ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N, \ x_n \in B(l, \epsilon).$
3. $\forall V \in \mathcal{V}(l), \ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N, \ x_n \in V.$

Les trois formulations sont bien équivalentes : voir polycopié

Propriété 31 : (Unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Si une suite d'éléments de E, notée $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, converge alors elle admet une limite unique l. On note alors cette limite

$$\lim_{n\to\infty} x_n = l$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 31 : (Unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Si une suite d'éléments de E, notée $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, converge alors elle admet une limite unique l. On note alors cette limite

$$\lim_{n\to\infty} x_n = l$$

Démonstration :

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de $(E, \|\cdot\|)$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 31 : (Unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Si une suite d'éléments de E, notée $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, converge alors elle admet une limite unique l. On note alors cette limite

$$\lim_{n\to\infty} x_n = l$$

Démonstration :

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de $(E, \|\cdot\|)$.

Par hypothèse, posons $l_1, l_2 \in E$ tels que $l_1 \neq l_2$

Propriété 31 : (Unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Si une suite d'éléments de E, notée $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, converge alors elle admet une limite unique l. On note alors cette limite

$$\lim_{n\to\infty} x_n = l$$

Démonstration :

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de $(E, \|\cdot\|)$.

Par hypothèse, posons $l_1, l_2 \in E$ tels que $l_1 \neq l_2$

d'après la définition de la convergence :

$$\forall V_{l_1} \in \mathcal{V}_{l_1},\ \exists N_1 \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N_1,\ x_n \in V_{l_1}$$
$$\forall V_{l_2} \in \mathcal{V}_{l_1},\ \exists N_2 \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N_2,\ x_n \in V_{l_2}$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 31 : (Unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Si une suite d'éléments de E, notée $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, converge alors elle admet une limite unique l. On note alors cette limite

$$\lim_{n\to\infty} x_n = l$$

Démonstration :

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de $(E, \|\cdot\|)$.

Par hypothèse, posons $l_1, l_2 \in E$ tels que $l_1 \neq l_2$

d'après la définition de la convergence :

$$\forall V_{l_1} \in \mathcal{V}_{l_1},\ \exists N_1 \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N_1,\ x_n \in V_{l_1}$$
$$\forall V_{l_2} \in \mathcal{V}_{l_1},\ \exists N_2 \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N_2,\ x_n \in V_{l_2}$$

Or un EVN est séparé donc comme $l_1 \neq l_2$, $\exists V_1 \in \mathcal{V}_{l_1}$ et $\exists V_2 \in \mathcal{V}_{l_2}$ tels $V_1 \cap V_2 = \emptyset$

Propriété 31 : (Unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Si une suite d'éléments de E, notée $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, converge alors elle admet une limite unique l. On note alors cette limite

$$\lim_{n\to\infty} x_n = l$$

Démonstration :

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de $(E, \|\cdot\|)$.

Par hypothèse, posons $l_1, l_2 \in E$ tels que $l_1 \neq l_2$

d'après la définition de la convergence :

$$\forall V_{l_1} \in \mathcal{V}_{l_1},\ \exists N_1 \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N_1,\ x_n \in V_{l_1}$$
$$\forall V_{l_2} \in \mathcal{V}_{l_1},\ \exists N_2 \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N_2,\ x_n \in V_{l_2}$$

Or un EVN est séparé donc comme $l_1 \neq l_2$, $\exists V_1 \in \mathcal{V}_{l_1}$ et $\exists V_2 \in \mathcal{V}_{l_2}$ tels $V_1 \cap V_2 = \emptyset$

en posant $N = max(N_1, N_2)$: $\forall n \geq N, \begin{cases} x_n \in V_1 \\ x_n \in V_2 \end{cases}$, or $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ donc absurde

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 32 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ et $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ deux suites d'éléments de E, convergentes vers l, $l' \in E$ respectivement. On a alors

1. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = l \Longrightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$
2. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = 0_E \Longleftrightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$
3. $\lim\limits_{n\to\infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

Remarque : Quelle est la signification de

$$\lim_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$$

Propriété 32 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ et $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ deux suites d'éléments de E, convergentes vers l, $l' \in E$ respectivement. On a alors

1. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = l \Longrightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$
2. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = 0_E \Longleftrightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$
3. $\lim\limits_{n\to\infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

Remarque : Quelle est la signification de

$$\lim_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$$

La suite $\|x_n\|$ est une suite d'éléments de $\mathbb{N}$ dans $\mathbb{R}^+$

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 32</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ et $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ deux suites d'éléments de E, convergentes vers l, $l' \in E$ respectivement. On a alors

1. $\lim_{n\to\infty} x_n = l \Longrightarrow \lim_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$
2. $\lim_{n\to\infty} x_n = 0_E \Longleftrightarrow \lim_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$
3. $\lim_{n\to\infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

<u>Remarque :</u> Quelle est la signification de

$$\lim_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$$

La suite $\|x_n\|$ est une suite d'éléments de $\mathbb{N}$ dans $\mathbb{R}^+$

Rappel :

$$\lim_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\| \iff \forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N, |\|x_n\| - \|l\|| < \epsilon$$

Propriété 32 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ et $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ deux suites d'éléments de E, convergentes vers l, $l' \in E$ respectivement. On a alors

1. $\lim_{n\to\infty} x_n = l \Longrightarrow \lim_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$
2. $\lim_{n\to\infty} x_n = 0_E \Longleftrightarrow \lim_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$
3. $\lim_{n\to\infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

1. Si $\lim_{n\to\infty} x_n = l$ alors

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N,\ \|x_n - l\| < \epsilon$$

Propriété 32 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ et $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ deux suites d'éléments de E, convergentes vers l, $l' \in E$ respectivement. On a alors

1. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = l \Longrightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$
2. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = 0_E \Longleftrightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$
3. $\lim\limits_{n\to\infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

1. Si $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = l$ alors

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N,\ \|x_n - l\| < \epsilon$$

or d'après la 2nd inégalité triangulaire, $\forall n \in \mathbb{N}$,
$|\,\|x_n\| - \|l\|\,| \leq \|x_n - l\|$, on a donc

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 32 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ et $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ deux suites d'éléments de E, convergentes vers l, $l' \in E$ respectivement. On a alors

1. $\lim_{n\to\infty} x_n = l \Longrightarrow \lim_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$
2. $\lim_{n\to\infty} x_n = 0_E \Longleftrightarrow \lim_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$
3. $\lim_{n\to\infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

1. Si $\lim_{n\to\infty} x_n = l$ alors

$$\forall\epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N,\ \|x_n - l\| < \epsilon$$

or d'après la 2nd inégalité triangulaire, $\forall n \in \mathbb{N}$,
$|\,\|x_n\| - \|l\|\,| \leq \|x_n - l\|$, on a donc

$$\forall\epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N,\ |\,\|x_n\| - \|l\|\,| \leq \|x_n - l\| < \epsilon$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 32 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ et $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ deux suites d'éléments de E, convergentes vers l, $l' \in E$ respectivement. On a alors

1. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = l \Longrightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$
2. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = 0_E \Longleftrightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$
3. $\lim\limits_{n\to\infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

1. Si $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = l$ alors

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N,\ \|x_n - l\| < \epsilon$$

or d'après la 2nd inégalité triangulaire, $\forall n \in \mathbb{N}$,
$|\, \|x_n\| - \|l\| \,| \leq \|x_n - l\|$, on a donc

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N,\ |\, \|x_n\| - \|l\| \,| \leq \|x_n - l\| < \epsilon$$

donc

$$\lim_{n\to\infty} \|x_n\| = \|l\|$$

2. $\lim_{n \to \infty} x_n = 0_E \iff \lim_{n \to \infty} \|x_n\| = 0$

Ph.D. Elian Masnada

2. $\lim_{n\to\infty} x_n = 0_E \Longleftrightarrow \lim_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$

C'est immédiat. En effet,

$$\lim_{n\to\infty} x_n = 0_E \quad \Longleftrightarrow \forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N, \|x_n\| < \epsilon$$

2. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = 0_E \iff \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$

C'est immédiat. En effet,

$$\lim_{n\to\infty} x_n = 0_E \iff \forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N, \|x_n\| < \epsilon$$

$$\lim_{n\to\infty} \|x_n\| = 0_E \iff \forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N, \|x_n\| < \epsilon$$

2. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = 0_E \iff \lim\limits_{n\to\infty} \|x_n\| = 0$

C'est immédiat. En effet,

$$\lim_{n\to\infty} x_n = 0_E \iff \forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N,\ \|x_n\| < \epsilon$$
$$\lim_{n\to\infty} \|x_n\| = 0_E \iff \forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N,\ \|x_n\| < \epsilon$$

Les formulations sont donc identiques.

3. $\lim\limits_{n\to\infty}(x_n+\lambda y_n) = l+\lambda l'$ (avec $\lambda\in\mathbb{R}^*$)

Ph.D. Elian Masnada

3. $\lim\limits_{n \to \infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe $N, N' \in \mathbb{N}$ tels que

$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N \Longrightarrow \|x_n - l\| < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N' \Longrightarrow \|y_n - l\| < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

3. $\lim\limits_{n\to\infty}(x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe $N, N' \in \mathbb{N}$ tels que

$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N \Longrightarrow \|x_n - l\| < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N' \Longrightarrow \|y_n - l\| < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $N_0 = \max(N, N')$.

3. $\lim\limits_{n\to\infty}(x_n+\lambda y_n)=l+\lambda l'$ (avec $\lambda\in\mathbb{R}^*$)

Soit $\epsilon>0$, alors il existe $N,N'\in\mathbb{N}$ tels que

$$\forall n\in\mathbb{N},\ \ n\geq N\Longrightarrow \|x_n-l\|<\frac{\epsilon}{2}$$
$$\forall n\in\mathbb{N},\ \ n\geq N'\Longrightarrow \|y_n-l\|<\frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $N_0=\max(N,N')$. On a alors

$$\forall n\in\mathbb{N},\ \ n\geq N_0\Longrightarrow$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

3. $\lim_{n\to\infty}(x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe $N, N' \in \mathbb{N}$ tels que

$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N \Longrightarrow \|x_n - l\| < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N' \Longrightarrow \|y_n - l\| < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $N_0 = \max(N, N')$. On a alors

$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N_0 \Longrightarrow$$

$$\|(x_n + \lambda y_n) - (l + \lambda l')\| \leq \|x_n - l\| + \|\lambda y_n - \lambda l'\|$$

3. $\lim\limits_{n\to\infty} (x_n + \lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe $N, N' \in \mathbb{N}$ tels que

$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N \Longrightarrow \|x_n - l\| < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N' \Longrightarrow \|y_n - l\| < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $N_0 = \max(N, N')$. On a alors

$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N_0 \Longrightarrow$$

$$\|(x_n + \lambda y_n) - (l + \lambda l')\| \leq \|x_n - l\| + \|\lambda y_n - \lambda l'\|$$
$$= \|x_n - l\| + |\lambda|\|y_n - l'\|$$

Ph.D. Elian Masnada

3. $\lim\limits_{n\to\infty}(x_n+\lambda y_n) = l + \lambda l'$ (avec $\lambda \in \mathbb{R}^*$)

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe $N, N' \in \mathbb{N}$ tels que

$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N \Longrightarrow \|x_n - l\| < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N' \Longrightarrow \|y_n - l\| < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $N_0 = \max(N, N')$. On a alors

$$\forall n \in \mathbb{N},\ n \geq N_0 \Longrightarrow$$

$$\|(x_n+\lambda y_n) - (l+\lambda l')\| \leq \|x_n - l\| + \|\lambda y_n - \lambda l'\|$$
$$= \|x_n - l\| + |\lambda|\|y_n - l'\|$$
$$< \frac{\epsilon}{2} + |\lambda|\frac{\epsilon}{2|\lambda|} = \epsilon$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 33 :

Soit $E = (\mathbb{R}^p, \|\cdot\|)$. On note

$$(x_n)_{n\in\mathbb{N}} = \left((x_n^{(1)})_{n\in\mathbb{N}}, (x_n^{(2)})_{n\in\mathbb{N}} \ , \ \dots \ , \ (x_n^{(p)})_{n\in\mathbb{N}}\right)$$

une suite d'éléments de $\mathbb{R}^p$ où les $\left(x_n^{(i)}\right)_{n\in\mathbb{N}}$ sont des suites d'éléments de $\mathbb{N}$ dans $\mathbb{R}$. Alors

$$\lim_{n\to\infty} x_n = (l_1, l_2, ..., l_p) \text{ avec } l_i = \lim_{n\to\infty} x_n^{(i)}$$

Démonstration : Voir polycopié

Propriété 33 :

Soit $E = (\mathbb{R}^p, \|\cdot\|)$. On note

$$(x_n)_{n\in\mathbb{N}} = \left((x_n^{(1)})_{n\in\mathbb{N}}, (x_n^{(2)})_{n\in\mathbb{N}}\ ,\ \dots\ ,\ (x_n^{(p)})_{n\in\mathbb{N}}\right)$$

une suite d'éléments de $\mathbb{R}^p$ où les $\left(x_n^{(i)}\right)_{n\in\mathbb{N}}$ sont des suites d'éléments de $\mathbb{N}$ dans $\mathbb{R}$. Alors

$$\lim_{n\to\infty} x_n = (l_1, l_2, ..., l_p) \text{ avec } l_i = \lim_{n\to\infty} x_n^{(i)}$$

Exemple :
Soit la suite

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^2 \\ n & \mapsto & x_n = (1 - \frac{1}{n}, \frac{1}{n^2}) \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 33 :

Soit $E = (\mathbb{R}^p, \|\cdot\|)$. On note

$$(x_n)_{n\in\mathbb{N}} = \left((x_n^{(1)})_{n\in\mathbb{N}}, (x_n^{(2)})_{n\in\mathbb{N}} \ , \ \dots \ , \ (x_n^{(p)})_{n\in\mathbb{N}}\right)$$

une suite d'éléments de $\mathbb{R}^p$ où les $\left(x_n^{(i)}\right)_{n\in\mathbb{N}}$ sont des suites d'éléments de $\mathbb{N}$ dans $\mathbb{R}$. Alors

$$\lim_{n\to\infty} x_n = (l_1, l_2, ..., l_p) \text{ avec } l_i = \lim_{n\to\infty} x_n^{(i)}$$

Exemple :
Soit la suite

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^2 \\ n & \mapsto & x_n = (1 - \frac{1}{n}, \frac{1}{n^2}) \end{array}$$

Alors

$$\lim_{n\to\infty} x_n = \left(\lim_{n\to\infty} 1 - \frac{1}{n}, \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n^2}\right) = (1, 0)$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition : (Suite extraite, Rappel)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Soit ϕ une application strictement croissante de $\mathbb{N} \to \mathbb{N}$. On appelle alors suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ (ou sous-suite extraite) la suite $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ définie par

$$y_n = x_{\phi(n)}$$

exemple :

Ph.D. Elian Masnada

<u>Définition</u> : (Suite extraite, Rappel)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Soit ϕ une application strictement croissante de $\mathbb{N} \to \mathbb{N}$. On appelle alors suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ (ou sous-suite extraite) la suite $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ définie par

$$y_n = x_{\phi(n)}$$

exemple :

Soit la suite
$$\begin{array}{rccl} (x_n)_{n\in\mathbb{N}} : & \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^2 \\ & n & \mapsto & x_n = \left(e^{n^2}, n+4\right) \end{array}$$

soit ϕ la fonction
$$\begin{array}{rccl} \phi : & \mathbb{N} & \to & \mathbb{N} \\ & n & \mapsto & \phi(n) = 2n+1 \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition : (Suite extraite, Rappel)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Soit ϕ une application strictement croissante de $\mathbb{N} \to \mathbb{N}$. On appelle alors suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ (ou sous-suite extraite) la suite $(y_n)_{n\in\mathbb{N}}$ définie par

$$y_n = x_{\phi(n)}$$

exemple :

Soit la suite
$$\begin{array}{rccl} (x_n)_{n\in\mathbb{N}} : & \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^2 \\ & n & \mapsto & x_n = \left(e^{n^2}, n+4\right) \end{array}$$

soit ϕ la fonction
$$\begin{array}{rccl} \phi : & \mathbb{N} & \to & \mathbb{N} \\ & n & \mapsto & \phi(n) = 2n+1 \end{array}$$

Alors la suite extraite $y_n = x_{\phi(n)}$ est la suite donnée par

$$\begin{array}{rccl} (y_{\phi(n)})_{n\in\mathbb{N}} : & \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^2 \\ & n & \mapsto & x_n = \left(e^{(2n+1)^2}, 2n+5\right) \end{array}$$

<u>Propriété 35</u> : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Propriété 35 : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 35</u> : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Démonstration :

Etape 1 : comme ϕ est une fonction strictement croissante

$$\forall n \in \mathbb{N},\ \phi(n) \geq n.$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 35 : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Démonstration :

Etape 1 : comme ϕ est une fonction strictement croissante

$$\forall n \in \mathbb{N},\ \phi(n) \geq n.$$

Rang 0 : $\phi(0) \geq 0$ donc OK

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 35 : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Démonstration :

Etape 1 : comme ϕ est une fonction strictement croissante

$$\forall n \in \mathbb{N},\ \phi(n) \geq n.$$

Rang 0 : $\phi(0) \geq 0$ donc OK

Rang n : vérifions que si la propriété est vraie au rang n alors elle est vrae au rang $n+1$.

Vérifions donc que l'on a bien $\phi(n+1) \geq n+1$.

Propriété 35 : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Démonstration :

Etape 1 : comme ϕ est une fonction strictement croissante

$$\forall n \in \mathbb{N},\ \phi(n) \geq n.$$

Rang 0 : $\phi(0) \geq 0$ donc OK

Rang n : vérifions que si la propriété est vraie au rang n alors elle est vrae au rang $n+1$.
Vérifions donc que l'on a bien $\phi(n+1) \geq n+1$.

$$\overbrace{\phi(n+1) > \phi(n)}^{\text{strictement croissante}}$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 35 : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Démonstration :

Etape 1 : comme ϕ est une fonction strictement croissante

$$\forall n \in \mathbb{N},\ \phi(n) \geq n.$$

Rang 0 : $\phi(0) \geq 0$ donc OK

Rang n : vérifions que si la propriété est vraie au rang n alors elle est vrae au rang $n+1$.
Vérifions donc que l'on a bien $\phi(n+1) \geq n+1$.

$$\overbrace{\phi(n+1) > \phi(n)}^{\text{strictement croissante}} \underbrace{\phi(n) \geq n}_{\text{prop. rang n}}$$

Propriété 35 : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Démonstration :

Etape 1 : comme ϕ est une fonction strictement croissante

$$\forall n \in \mathbb{N},\ \phi(n) \geq n.$$

Rang 0 : $\phi(0) \geq 0$ donc OK

Rang n : vérifions que si la propriété est vraie au rang n alors elle est vrae au rang $n+1$.
Vérifions donc que l'on a bien $\phi(n+1) \geq n+1$.

$$\overbrace{\phi(n+1) > \phi(n)}^{\text{strictement croissante}} \underbrace{\geq n}_{\text{prop. rang n}} \Longrightarrow \phi(n+1) \geq n+1$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 35 : (convergence des suites extraites d'une suite convergente)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de E convergent vers $l \in E$. Alors toute suite extraite converge également vers l.

Démonstration :

Etape 2

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite qui converge vers l.

$$(x_n)_{n\in\mathbb{N}} \text{ CV vers } l \iff \forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall n \geq N,\ \|x_n - l\| < \epsilon$$

or $\forall n,\ \phi(n) \geq n$ donc

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ / \ \forall \phi(n) \geq n \geq N,\ \left\|x_{\phi(n)} - l\right\| < \epsilon$$

$$\text{donc finalement } \lim_{n\to\infty} x_{\phi(n)} = l$$

Définition 14 : (Valeur d'adhérence d'une suite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Soit $a \in E$. Alors, on dit que a est valeur d'adhérence de la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, si, et seulement si, l'une des propriétés (équivalentes) suivantes est vérifiés

1. Il existe une suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ qui converge vers a.
2. $\forall \epsilon > 0$, l'ensemble $\{n \in \mathbb{N},\ \|x_n - a\| < \epsilon\}$ est infini.
3. $\forall V \in \mathcal{V}(a)$, l'ensemble $\{n \in \mathbb{N},\ x_n \in V\}$ est infini.

Exemple :

Ph.D. Elian Masnada

Définition 14 : (Valeur d'adhérence d'une suite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Soit $a \in E$. Alors, on dit que a est valeur d'adhérence de la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, si, et seulement si, l'une des propriétés (équivalentes) suivantes est vérifiés

1. Il existe une suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ qui converge vers a.
2. $\forall \epsilon > 0$, l'ensemble $\{n \in \mathbb{N},\ \|x_n - a\| < \epsilon\}$ est infini.
3. $\forall V \in \mathcal{V}(a)$, l'ensemble $\{n \in \mathbb{N},\ x_n \in V\}$ est infini.

Exemple : Soit la suite

$$(x_n)_{n\in\mathbb{N}} : \begin{array}{ccl} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & \begin{cases} x_{2n} = 1 \\ x_{2n+1} = -1 \end{cases} \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

<u>Définition 14</u> : (Valeur d'adhérence d'une suite)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Soit $a \in E$. Alors, on dit que a est valeur d'adhérence de la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$, si, et seulement si, l'une des propriétés (équivalentes) suivantes est vérifiés

1. Il existe une suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ qui converge vers a.
2. $\forall \epsilon > 0$, l'ensemble $\{n \in \mathbb{N},\ \|x_n - a\| < \epsilon\}$ est infini.
3. $\forall V \in \mathcal{V}(a)$, l'ensemble $\{n \in \mathbb{N},\ x_n \in V\}$ est infini.

Exemple : Soit la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}} : \begin{array}{ccl} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & \begin{cases} x_{2n} = 1 \\ x_{2n+1} = -1 \end{cases} \end{array}$

- Alors, il existe une suite extraite, la suite des n paires, qui converge vers 1. Donc 1 est valeur d'adhérence de la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$.

- Il existe une autre suite extraite, la suite des n impaires, qui converge vers -1.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 36 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Si $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ converge vers $l \in E$, alors l est l'unique valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$.

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 36 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Si $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ converge vers $l \in E$, alors l est l'unique valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$.

Démonstration :

— l est valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ car il suffit de prendre comme suite extraite, la suite elle-même ($\phi : n \longrightarrow n$).

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 36 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Si $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ converge vers $l \in E$, alors l est l'unique valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$.

Démonstration :

- l est valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ car il suffit de prendre comme suite extraite, la suite elle-même ($\phi : n \longrightarrow n$).
- Or d'après la propriété 35, toute suite extraite de la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ convergera également vers l.

Propriété 36 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Si $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ converge vers $l \in E$, alors l est l'unique valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$.

Démonstration :

— l est valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ car il suffit de prendre comme suite extraite, la suite elle-même ($\phi : n \longrightarrow n$).

— Or d'après la propriété 35, toute suite extraite de la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ convergera également vers l.

la réciproque est fausse. Une suite peut n'avoir qu'une valeur d'adhérence est être non convergente.

Exemple : $\forall n \in \mathbb{N}, \begin{cases} x_{2n} = 2n \\ x_{2n+1} = 1 \end{cases}$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $1 \Longrightarrow 3$:

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $1 \Longrightarrow 3$:

soit a un point adhérent à A.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $1 \Longrightarrow 3$:

soit a un point adhérent à A.

$$\text{Alors, } \forall n \in \mathbb{N}^* \qquad B\left(a, \frac{1}{n}\right) \cap A \neq \emptyset$$

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $1 \Longrightarrow 3$:

soit a un point adhérent à A.

Alors, $\forall n \in \mathbb{N}^*$ $\quad B\left(a, \frac{1}{n}\right) \cap A \neq \emptyset$

Soit $x_n \in A \cap B(a, 1/n)$. Alors puisque $x_n \in B(a, 1/n)$

$$\|x_n - a\| < \frac{1}{n} \quad \Longrightarrow \quad \lim_{n\to\infty} x_n = a$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $3 \Longrightarrow 1$:

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $3 \Longrightarrow 1$:

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de A qui converge vers a.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 37</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $3 \Longrightarrow 1$:

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de A qui converge vers a.

Soit V un voisinage de a.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 37</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $3 \Longrightarrow 1$:

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de A qui converge vers a.

Soit V un voisinage de a.

Alors, $\exists N \in \mathbb{N}$ tel que $\forall n \geq N$, $x_n \in V$.

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $3 \Longrightarrow 1$:

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de A qui converge vers a.

Soit V un voisinage de a.

Alors, $\exists N \in \mathbb{N}$ tel que $\forall n \geq N$, $x_n \in V$.

Or $x_n \in A$ puisque $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est une suite d'éléments de A.

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $3 \Longrightarrow 1$:

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de A qui converge vers a.

Soit V un voisinage de a.

Alors, $\exists N \in \mathbb{N}$ tel que $\forall n \geq N$, $x_n \in V$.

Or $x_n \in A$ puisque $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est une suite d'éléments de A.

$\Rightarrow$ $x_n \in A \cap V$

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $3 \Longrightarrow 1$:

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de A qui converge vers a.

Soit V un voisinage de a.

Alors, $\exists N \in \mathbb{N}$ tel que $\forall n \geq N$, $x_n \in V$.

Or $x_n \in A$ puisque $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est une suite d'éléments de A.

$\Rightarrow$ $x_n \in A \cap V$ $\Rightarrow$ $A \cap V \neq \emptyset$.

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration : $3 \Longrightarrow 1$:

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de A qui converge vers a.

Soit V un voisinage de a.

Alors, $\exists N \in \mathbb{N}$ tel que $\forall n \geq N$, $x_n \in V$.

Or $x_n \in A$ puisque $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est une suite d'éléments de A.

$\Longrightarrow$ $x_n \in A \cap V$ $\Longrightarrow$ $A \cap V \neq \emptyset$.

vrai pour tout $V \in \mathcal{V}(a)$ $\Longrightarrow$ $a \in \overline{A}$

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration :

$2 \Longrightarrow 3$: On choisit comme suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ la suite qui converge vers a.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

Démonstration :

$2 \Longrightarrow 3$: On choisit comme suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ la suite qui converge vers a.

$3 \Longrightarrow 2$: Comme la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ de A converge vers a alors a est l'unique valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 37 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors, les 3 propositions suivantes sont équivalentes :

1. a est adhérent à A.
2. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A dont a est une valeur d'adhérence.
3. il existe une suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a.

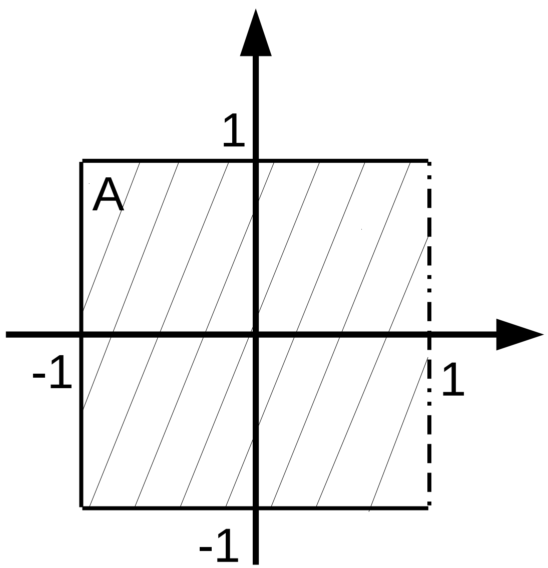
Démonstration :

$2 \Longrightarrow 3$: On choisit comme suite extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ la suite qui converge vers a.

$3 \Longrightarrow 2$: Comme la suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ de A converge vers a alors a est l'unique valeur d'adhérence de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$

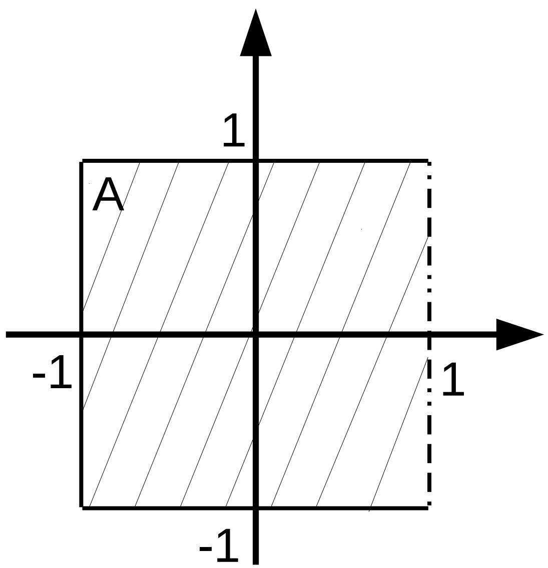
Finalement $1 \Longleftrightarrow 2 \Longleftrightarrow 3$

exemple



$$A = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \;/\; -1 \leq x < 1,\ -1 \leq y \leq 1\}$$

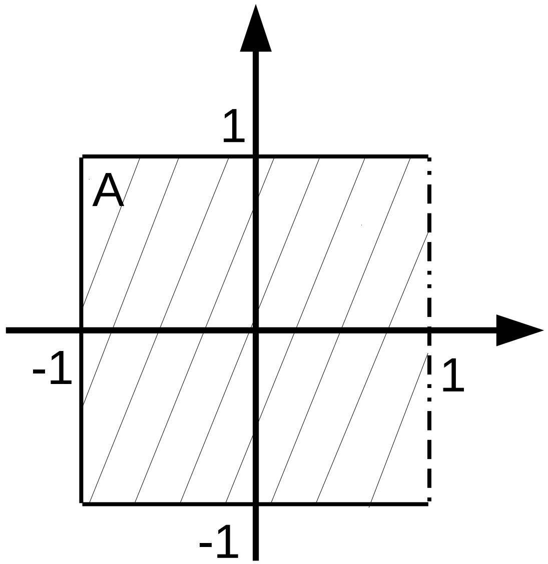
exemple



$$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \\ / \ -1 \leq x < 1, \ -1 \leq y \leq 1\}$$

Considérons le point $a = (0, 1)$:

exemple

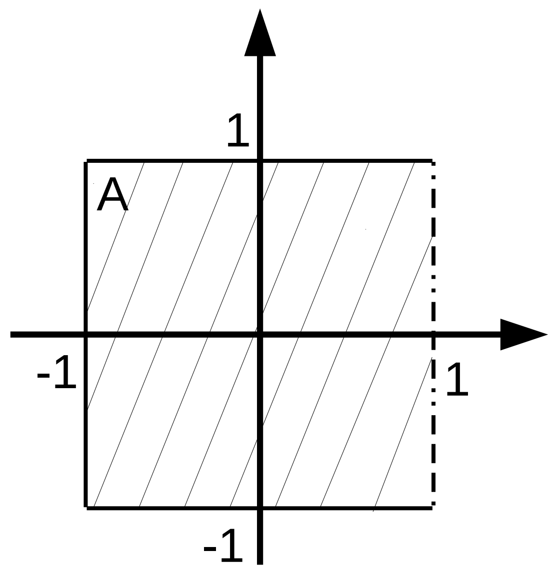


$$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \;/\; -1 \le x < 1,\; -1 \le y \le 1\}$$

Considérons le point $a = (0, 1)$:

1. Clairement $a \in \overline{A}$

exemple



$$A = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \ / \ -1 \leq x < 1, \ -1 \leq y \leq 1\}$$

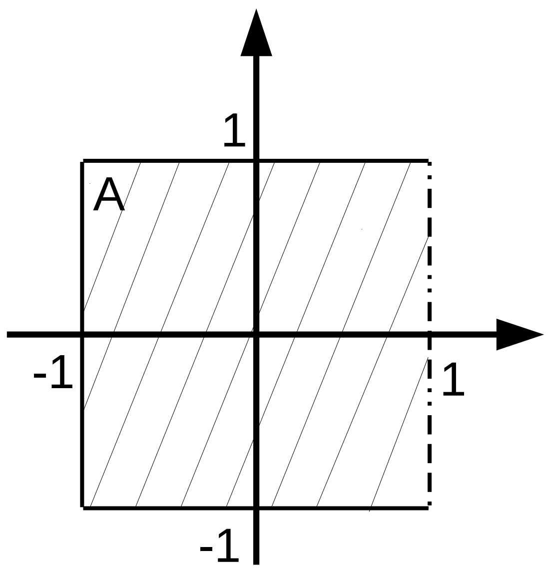
Considérons le point $a = (0,1)$:

1. Clairement $a \in \overline{A}$

2. Prenons la suite d'éléments de A

$$\begin{array}{llll} (x_n)_{n\in\mathbb{N}} & : & \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & n & \mapsto & x_n = \left(0 \ ; \ 1 - \frac{1}{n}\right) \end{array}$$

exemple



$$A = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \;/\; -1 \leq x < 1,\; -1 \leq y \leq 1\}$$

Considérons le point $a = (0,1)$:

1. Clairement $a \in \overline{A}$

2. Prenons la suite d'éléments de A

$$(x_n)_{n\in\mathbb{N}} \;:\; \begin{array}{ccl} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R}^2 \\ n & \mapsto & x_n = \left(0\;;\;1-\frac{1}{n}\right) \end{array}$$

$$\lim_{n\to\infty} x_n = (0,1)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 38 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors

1. $\overline{A}$ est l'ensemble des valeurs d'adhérence des suites d'éléments de A, ou dit autrement, l'ensemble des limites de toutes les suites convergentes d'éléments de A.
2. A est fermé si, et seulement si, toute suite convergence d'éléments de A admet une limite dans A.

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 38 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors

1. $\overline{A}$ est l'ensemble des valeurs d'adhérence des suites d'éléments de A, ou dit autrement, l'ensemble des limites de toutes les suites convergentes d'éléments de A.
2. A est fermé si, et seulement si, toute suite convergence d'éléments de A admet une limite dans A.

Démonstration :

1. $a \in \overline{A} \iff$ il existe une suite d'éléments de A qui converge vers A

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 38 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors

1. $\overline{A}$ est l'ensemble des valeurs d'adhérence des suites d'éléments de A, ou dit autrement, l'ensemble des limites de toutes les suites convergentes d'éléments de A.
2. A est fermé si, et seulement si, toute suite convergence d'éléments de A admet une limite dans A.

Démonstration :

1. $a \in \overline{A} \iff$ il existe une suite d'éléments de A qui converge vers A

$\Rightarrow$ $\overline{A}$ est l'ensemble des limites des suites de A

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 38 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors

1. $\overline{A}$ est l'ensemble des valeurs d'adhérence des suites d'éléments de A, ou dit autrement, l'ensemble des limites de toutes les suites convergentes d'éléments de A.
2. A est fermé si, et seulement si, toute suite convergence d'éléments de A admet une limite dans A.

Démonstration :

1. $a \in \overline{A} \iff$ il existe une suite d'éléments de A qui converge vers A

$\Rightarrow$ $\overline{A}$ est l'ensemble des limites des suites de A

2. $\Longrightarrow$: Si A fermé alors $\overline{A} = A$.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 38 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors

1. $\overline{A}$ est l'ensemble des valeurs d'adhérence des suites d'éléments de A, ou dit autrement, l'ensemble des limites de toutes les suites convergentes d'éléments de A.
2. A est fermé si, et seulement si, toute suite convergence d'éléments de A admet une limite dans A.

Démonstration :

1. $a \in \overline{A} \iff$ il existe une suite d'éléments de A qui converge vers A

$\Rightarrow$ $\overline{A}$ est l'ensemble des limites des suites de A

2. $\Longrightarrow$: Si A fermé alors $\overline{A} = A$.

Or $\overline{A}$ est l'ensemble des limites des suites des éléments de A.

Propriété 38 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors

1. $\overline{A}$ est l'ensemble des valeurs d'adhérence des suites d'éléments de A, ou dit autrement, l'ensemble des limites de toutes les suites convergentes d'éléments de A.
2. A est fermé si, et seulement si, toute suite convergence d'éléments de A admet une limite dans A.

Démonstration :

1. $a \in \overline{A} \iff$ il existe une suite d'éléments de A qui converge vers A

$\Rightarrow$ $\overline{A}$ est l'ensemble des limites des suites de A

2. $\Longrightarrow$: Si A fermé alors $\overline{A} = A$.

Or $\overline{A}$ est l'ensemble des limites des suites des éléments de A.

Donc si A fermé, l'ensemble des suites convergentes de A converge dans A.

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 38 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soient $A \subset E$ et $a \in E$. Alors

1. $\overline{A}$ est l'ensemble des valeurs d'adhérence des suites d'éléments de A, ou dit autrement, l'ensemble des limites de toutes les suites convergentes d'éléments de A.
2. A est fermé si, et seulement si, toute suite convergence d'éléments de A admet une limite dans A.

Démonstration :

1. $a \in \overline{A} \iff$ il existe une suite d'éléments de A qui converge vers A

$\Rightarrow$ $\overline{A}$ est l'ensemble des limites des suites de A

2. $\Longrightarrow$: Si A fermé alors $\overline{A} = A$.

Or $\overline{A}$ est l'ensemble des limites des suites des éléments de A.

Donc si A fermé, l'ensemble des suites convergentes de A converge dans A.

$\Longleftarrow$: la réciproque est tout aussi évidente.

<u>Définition 15</u> : (Suite de Cauchy)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Alors $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est une suite de Cauchy si et seulement si

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N}\ /\ (\forall n \geq N, \forall p \geq N), \|x_p - x_n\| < \epsilon$$

Rappel du critère de convergence

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N}\ /\ \forall n \geq N,\ \|x_n - l\| < \epsilon$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 15 : (Suite de Cauchy)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E. Alors $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ est une suite de Cauchy si et seulement si

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ /\ (\forall n \geq N, \forall p \geq N), \|x_p - x_n\| < \epsilon$$

Rappel du critère de convergence

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} \ /\ \forall n \geq N,\ \|x_n - l\| < \epsilon$$

Propriété 39 :

1. Toute suite convergente est de Cauchy
2. Toute suite de Cauchy est bornée

Démonstration : voir polycopié

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 40 :

Si une suite de Cauchy admet une valeur d'adhérence, alors elle converge vers sa valeur d'adhérence.

Démonstration :

Propriété 40 :

Si une suite de Cauchy admet une valeur d'adhérence, alors elle converge vers sa valeur d'adhérence.

Démonstration : Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN.

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de Cauchy d'éléments de E.

Soit a une valeur d'adhérence de la suite.

Propriété 40 :

Si une suite de Cauchy admet une valeur d'adhérence, alors elle converge vers sa valeur d'adhérence.

Démonstration : Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN.

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de Cauchy d'éléments de E.

Soit a une valeur d'adhérence de la suite.

Alors :

Soit $\epsilon > 0$. Il existe $N_c \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_c$, et $p \geq N_c$,

$$\|x_n - x_p\| < \epsilon/2$$

Propriété 40 :

Si une suite de Cauchy admet une valeur d'adhérence, alors elle converge vers sa valeur d'adhérence.

Démonstration : Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN.

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de Cauchy d'éléments de E.

Soit a une valeur d'adhérence de la suite.

Alors :

Soit $\epsilon > 0$. Il existe $N_c \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_c$, et $p \geq N_c$,

$$\|x_n - x_p\| < \epsilon/2$$

Soit $(x_{\phi(n)})_{n\in\mathbb{N}}$ une suite extraite qui converge vers a.

Propriété 40 :

Si une suite de Cauchy admet une valeur d'adhérence, alors elle converge vers sa valeur d'adhérence.

Démonstration : Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN.

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de Cauchy d'éléments de E.

Soit a une valeur d'adhérence de la suite.

Alors :

Soit $\epsilon > 0$. Il existe $N_c \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_c$, et $p \geq N_c$,

$$\|x_n - x_p\| < \epsilon/2$$

Soit $(x_{\phi(n)})_{n\in\mathbb{N}}$ une suite extraite qui converge vers a.

Alors il existe $N_1 \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_1$,

$$\left\|x_{\phi(n)} - a\right\| < \epsilon/2$$

Propriété 40 :

Si une suite de Cauchy admet une valeur d'adhérence, alors elle converge vers sa valeur d'adhérence.

Démonstration : Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN.

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de Cauchy d'éléments de E.

Soit a une valeur d'adhérence de la suite.

Alors :

Soit $\epsilon > 0$. Il existe $N_c \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_c$, et $p \geq N_c$,

$$\|x_n - x_p\| < \epsilon/2$$

Soit $(x_{\phi(n)})_{n\in\mathbb{N}}$ une suite extraite qui converge vers a.

Alors il existe $N_1 \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_1$,

$$\left\|x_{\phi(n)} - a\right\| < \epsilon/2$$

On note $N = max(N_c, N_1)$ Pour tout $n \geq N$, on a $\phi(n) \geq n \geq N \geq N_c$.

Propriété 40 :

Si une suite de Cauchy admet une valeur d'adhérence, alors elle converge vers sa valeur d'adhérence.

Démonstration : Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN.

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de Cauchy d'éléments de E.

Soit a une valeur d'adhérence de la suite.

Alors :

Soit $\epsilon > 0$. Il existe $N_c \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_c$, et $p \geq N_c$,

$$\|x_n - x_p\| < \epsilon/2$$

Soit $(x_{\phi(n)})_{n\in\mathbb{N}}$ une suite extraite qui converge vers a.

Alors il existe $N_1 \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_1$,

$$\left\|x_{\phi(n)} - a\right\| < \epsilon/2$$

On note $N = max(N_c, N_1)$ Pour tout $n \geq N$, on a $\phi(n) \geq n \geq N \geq N_c$.

D'où

$$\|x_n - a\| \leq \left\|x_n - x_{\phi(n)}\right\| + \left\|x_{\phi(n)} - a\right\| < \epsilon$$

Propriété 40 :

Si une suite de Cauchy admet une valeur d'adhérence, alors elle converge vers sa valeur d'adhérence.

Démonstration : Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN.

Soit $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ une suite de Cauchy d'éléments de E.

Soit a une valeur d'adhérence de la suite.

Alors :

Soit $\epsilon > 0$. Il existe $N_c \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_c$, et $p \geq N_c$,

$$\|x_n - x_p\| < \epsilon/2$$

Soit $(x_{\phi(n)})_{n\in\mathbb{N}}$ une suite extraite qui converge vers a.

Alors il existe $N_1 \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N_1$,

$$\|x_{\phi(n)} - a\| < \epsilon/2$$

On note $N = max(N_c, N_1)$ Pour tout $n \geq N$, on a $\phi(n) \geq n \geq N \geq N_c$.

D'où

$$\|x_n - a\| \leq \|x_n - x_{\phi(n)}\| + \|x_{\phi(n)} - a\| < \epsilon$$

$$\Rightarrow \quad \forall \epsilon > 0,\ \exists N \in \mathbb{N} /\ \forall n \geq N,\ \|x_n - a\| < \epsilon$$

Remarque :

Intuitivement : une suite de Cauchy converge

MAIS elle peut converger en dehors de l'EVN sur lequel elle est définie.

Pour le comprendre, étudions la suite suivante (suite de Héron)

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

$\forall n \in \mathbb{N}$

les x_n sont des rationnels

et $x_n > 0$

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

Ph.D. Elian Masnada

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$x_{n+1}^2 - 2$

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2 + 2}{2x_n}\right)^2 - 2$$

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2 + 2}{2x_n}\right)^2 - 2 = \frac{x_n^4 + 2^2 + 2 \times 2x_n^2}{4x_n^2} - 2$$

Ph.D. Elian Masnada

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2 + 2}{2x_n}\right)^2 - 2 = \frac{x_n^4 + 2^2 + 2 \times 2x_n^2}{4x_n^2} - 2 = \left(\frac{x_n^2 - 2}{2x_n}\right)^2 \geq 0$$

Ph.D. Elian Masnada

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2+2}{2x_n}\right)^2 - 2 = \frac{x_n^4 + 2^2 + 2 \times 2x_n^2}{4x_n^2} - 2 = \left(\frac{x_n^2-2}{2x_n}\right)^2 \geq 0$$

$\Rightarrow$ $x_n \geq \sqrt{2}$.

Ph.D. Elian Masnada

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2+2}{2x_n}\right)^2 - 2 = \frac{x_n^4 + 2^2 + 2 \times 2x_n^2}{4x_n^2} - 2 = \left(\frac{x_n^2-2}{2x_n}\right)^2 \geq 0$$

$\Rightarrow$ $x_n \geq \sqrt{2}.$

De plus, $\forall n \in \mathbb{N}^*$

$$x_{n+1} - x_n$$

Ph.D. Elian Masnada

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2 + 2}{2x_n}\right)^2 - 2 = \frac{x_n^4 + 2^2 + 2 \times 2x_n^2}{4x_n^2} - 2 = \left(\frac{x_n^2 - 2}{2x_n}\right)^2 \geq 0$$

$\Rightarrow$ $x_n \geq \sqrt{2}$.

De plus, $\forall n \in \mathbb{N}^*$

$$x_{n+1} - x_n = \frac{x_n^2 + 2}{2x_n} - x_n$$

Ph.D. Elian Masnada

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2+2}{2x_n}\right)^2 - 2 = \frac{x_n^4 + 2^2 + 2 \times 2x_n^2}{4x_n^2} - 2 = \left(\frac{x_n^2-2}{2x_n}\right)^2 \geq 0$$

$\Rightarrow$ $x_n \geq \sqrt{2}$.

De plus, $\forall n \in \mathbb{N}^*$

$$x_{n+1} - x_n = \frac{x_n^2+2}{2x_n} - x_n = \frac{2 - x_n^2}{2x_n}$$

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2+2}{2x_n}\right)^2 - 2 = \frac{x_n^4 + 2^2 + 2 \times 2x_n^2}{4x_n^2} - 2 = \left(\frac{x_n^2-2}{2x_n}\right)^2 \geq 0$$

$\Rightarrow$ $x_n \geq \sqrt{2}$.

De plus, $\forall n \in \mathbb{N}^*$

$$x_{n+1} - x_n = \frac{x_n^2+2}{2x_n} - x_n = \frac{2 - x_n^2}{2x_n}$$

or puisque $x_n \geq \sqrt{2}$ $\Rightarrow$ $2 - x_n^2 \leq 0$ $\Rightarrow$ $x_{n+1} \leq x_n$

Ph.D. Elian Masnada

$$x_{n+1} = \frac{x_n + \frac{2}{x_n}}{2} \text{ avec } x_0 = 2$$

Déterminons le pont de convergence de cette suite :

$\forall n \in \mathbb{N}$

$$x_{n+1}^2 - 2 = \left(\frac{x_n^2+2}{2x_n}\right)^2 - 2 = \frac{x_n^4 + 2^2 + 2 \times 2x_n^2}{4x_n^2} - 2 = \left(\frac{x_n^2-2}{2x_n}\right)^2 \geq 0$$

$\Rightarrow$ $x_n \geq \sqrt{2}$.

De plus, $\forall n \in \mathbb{N}^*$

$$x_{n+1} - x_n = \frac{x_n^2+2}{2x_n} - x_n = \frac{2-x_n^2}{2x_n}$$

or puisque $x_n \geq \sqrt{2}$ $\Rightarrow$ $2 - x_n^2 \leq 0$ $\Rightarrow$ $x_{n+1} \leq x_n$

la suite est décroissante et positive ce qui implique qu'elle converge

Donc puisque la limite existe, notons la l.

On a donc

$$l = \frac{l + \frac{2}{l}}{2} \Longrightarrow l = \sqrt{2}$$

Donc puisque la limite existe, notons la l.

On a donc

$$l = \frac{l + \frac{2}{l}}{2} \Longrightarrow l = \sqrt{2}$$

La suite est définie sur $\mathbb{Q}$

MAIS

elle converge vers un irrationnel

Donc puisque la limite existe, notons la l.

On a donc

$$l = \frac{l + \frac{2}{l}}{2} \Longrightarrow l = \sqrt{2}$$

La suite est définie sur $\mathbb{Q}$

MAIS

elle converge vers un irrationnel

Définition 16 : (Espace complet, Espace de Banach)

1. Un espace métrique (c'est-à-dire un espace muni d'une distance) est dit complet si, et seulement si, toute suite de Cauchy définie sur cet espace y converge.
2. Un espace vectoriel normé complet est appelé un espace de Banach

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 1 : (de Bolzano-Weierstrass)

Toute suite bornée d'un espace vectoriel de dimension finie possède une suite extraite convergente.

Démonstration : Admis.

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 1 : (de Bolzano-Weierstrass)

Toute suite bornée d'un espace vectoriel de dimension finie possède une suite extraite convergente.

Démonstration : Admis.

Définition 17 : (Compacité)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$. On dit que A est compact dans E si et seulement si toute suite de A admet une suite extraite convergente dans A.

Exemple :

considérons la suite $\quad (u_n)_{n\in\mathbb{N}} \ : \ \begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & u_n = n \end{array}$

<u>Théorème 1</u> : (de Bolzano-Weierstrass)

Toute suite bornée d'un espace vectoriel de dimension finie possède une suite extraite convergente.

Démonstration : Admis.

<u>Définition 17</u> : (Compacité)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$. On dit que A est compact dans E si et seulement si toute suite de A admet une suite extraite convergente dans A.

Exemple :

considérons la suite $\begin{array}{rccc} (u_n)_{n\in\mathbb{N}} : & \mathbb{N} & \to & \mathbb{R} \\ & n & \mapsto & u_n = n \end{array}$

cette suite ne converge pas et aucune suite extraite d'elle ne converge.

<u>Théorème 1</u> : (de Bolzano-Weierstrass)

Toute suite bornée d'un espace vectoriel de dimension finie possède une suite extraite convergente.

Démonstration : Admis.

<u>Définition 17</u> : (Compacité)

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN. Soit $A \subset E$. On dit que A est compact dans E si et seulement si toute suite de A admet une suite extraite convergente dans A.

Exemple :

considérons la suite $(u_n)_{n\in\mathbb{N}} \; : \; \begin{array}{ccc} \mathbb{N} & \to & \mathbb{R} \\ n & \mapsto & u_n = n \end{array}$

cette suite ne converge pas et aucune suite extraite d'elle ne converge.

$\Rightarrow$ $\mathbb{R}$ est un ensemble non compact.

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\iff$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

compact $\Longrightarrow$ fermé :

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

compact $\Longrightarrow$ fermé :

A compact donc de toute suite x_n, on peut
extraire une suite $x_{\phi(n)}$ qui converge vers $l \in A$.

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

compact $\Longrightarrow$ fermé :

A compact donc de toute suite x_n, on peut extraire une suite $x_{\phi(n)}$ qui converge vers $l \in A$.

Or, si la suite x_n converge, elle converge nécessairement vers l.

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\iff$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

compact $\Longrightarrow$ fermé :

A compact donc de toute suite x_n, on peut extraire une suite $x_{\phi(n)}$ qui converge vers $l \in A$.

Or, si la suite x_n converge, elle converge nécessairement vers l.

Donc toute suite convergente d'éléments de A converge dans A

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 41</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\iff$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

<u>compact $\Longrightarrow$ fermé :</u>

A compact donc de toute suite x_n, on peut extraire une suite $x_{\phi(n)}$ qui converge vers $l \in A$.

Or, si la suite x_n converge, elle converge nécessairement vers l.

Donc toute suite convergente d'éléments de A converge dans A

$\Rightarrow$ fermé

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

compact $\Longrightarrow$ borné :

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

compact $\Longrightarrow$ borné : Pour cela prenons la contraposé

<u>Propriété 41</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

<u>compact $\Longrightarrow$ borné :</u> Pour cela prenons la contraposé

$$\text{non borné} \Longrightarrow \text{non compact}$$

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

compact $\Longrightarrow$ borné : Pour cela prenons la contraposé

non borné $\Longrightarrow$ non compact

Si l'ensemble A n'est pas borné, alors on peut prendre une suite telle que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \|x_n\| \geq n.$$

Propriété 41 :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

1. (a) Montrons tout d'abord que : compact $\Longrightarrow$ fermé et borné.

compact $\Longrightarrow$ borné : Pour cela prenons la contraposé

non borné $\Longrightarrow$ non compact

Si l'ensemble A n'est pas borné, alors on peut prendre une suite telle que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \|x_n\| \geq n.$$

On en déduit donc que toute suite

extraite de $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ diverge et donc A n'est pas compact.

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 41</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

(b) Montrons maintenant que borné, fermé $\Longrightarrow$ compact :

Soit A un ensemble borné d'un EVN de dimension finie

Alors toute suite de A est bornée.

Bolzano-Weiestrass $\Rightarrow$ toute suite de A admet donc une suite extraite qui converge

Or A est fermé donc $\overline{A} = A$

$\Rightarrow$ toute suite de A admet donc une suite extraite qui converge dans A

<u>Propriété 41</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

2. l'ensemble vide est fermé et borné donc c'est un compact.

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

<u>Propriété 41</u> :

Soit $(E, \|\cdot\|)$ un EVN de dimension finie. Alors

1. compact $\Longleftrightarrow$ fermé et borné
2. l'ensemble vide est compact.
3. toute partie fermée d'un compact de E est compacte

Démonstration :

2. l'ensemble vide est fermé et borné donc c'est un compact.

3. A compact $\Longrightarrow$ A fermé et borné. Soit $B \subset A$ un fermé. Alors B est également borné (puisque A borné). Donc B est un compact.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 42 :

Tout compact d'un espace vectoriel normé est complet.

Démonstration :

Propriété 42 :

Tout compact d'un espace vectoriel normé est complet.

Démonstration :

Rappel pour la démonstration :

1. complet : toute suite de Cauchy d'éléments de A converge dans A.
2. toute suite convergente est de Cauchy
3. toute suite de Cauchy ayant une valeur d'adhérence converge

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 42 :

Tout compact d'un espace vectoriel normé est complet.

Démonstration :

Rappel pour la démonstration :

1. complet : toute suite de Cauchy d'éléments de A converge dans A.
2. toute suite convergente est de Cauchy
3. toute suite de Cauchy ayant une valeur d'adhérence converge

A est un compact donc toute suite x_n d'éléments de A admet une suite extraite $x_{\phi(n)}$ qui converge dans A.

Propriété 42 :

Tout compact d'un espace vectoriel normé est complet.

Démonstration :

Rappel pour la démonstration :

1. complet : toute suite de Cauchy d'éléments de A converge dans A.
2. toute suite convergente est de Cauchy
3. toute suite de Cauchy ayant une valeur d'adhérence converge

A est un compact donc toute suite x_n d'éléments de A admet une suite extraite $x_{\phi(n)}$ qui converge dans A.

Or si x_n est une suite de Cauchy,

elle admet une valeur d'adhérence dans A et converge donc vers cette valeur

Propriété 42 :

Tout compact d'un espace vectoriel normé est complet.

Démonstration :

Rappel pour la démonstration :

1. complet : toute suite de Cauchy d'éléments de A converge dans A.
2. toute suite convergente est de Cauchy
3. toute suite de Cauchy ayant une valeur d'adhérence converge

A est un compact donc toute suite x_n d'éléments de A admet une suite extraite $x_{\phi(n)}$ qui converge dans A.

Or si x_n est une suite de Cauchy,

elle admet une valeur d'adhérence dans A et converge donc vers cette valeur

$\Rightarrow$ toute suite de Cauchy de A converge dans A

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 43 :

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN. soit $A \subset E$ et $B \subset F$ deux compacts. Alors $A \times B$ est un compact de $E \times F$.

Démonstration technique

Chapitre 3 :

Limite et Continuité d'applications

but de ce chapitre

généraliser les notions $\left\{ \begin{array}{l} \text{de limite de fonctions } \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R} \\ \\ \text{de continuité de fonctions } \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R} \end{array} \right.$

aux fonctions de $\mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$

Ph.D. Elian Masnada

Rappels de préING 1 :

Limite :

Soit f une fonction de $D \subset \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$.

Alors la limite l de f quand x tend vers a est

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists \alpha > 0,\ (\forall x \in D,\ |x-a| < \alpha) \Longrightarrow |f(x)-l| < \epsilon$$

ce que l'on note :

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Rappels de préING 1 :

Limite :

Soit f une fonction de $D \subset \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$.

Alors la limite l de f quand x tend vers a est

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists \alpha > 0,\ (\forall x \in D,\ |x-a| < \alpha) \Longrightarrow |f(x) - l| < \epsilon$$

ce que l'on note :

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

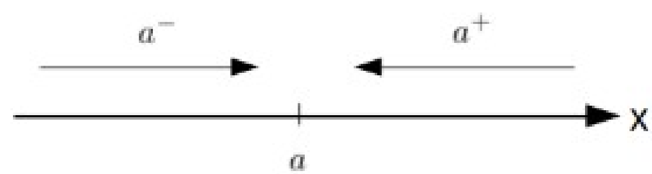
Si a appartient au domaine de définition de la fonction alors

$$\lim_{x \to a} f(x) = f(a)$$

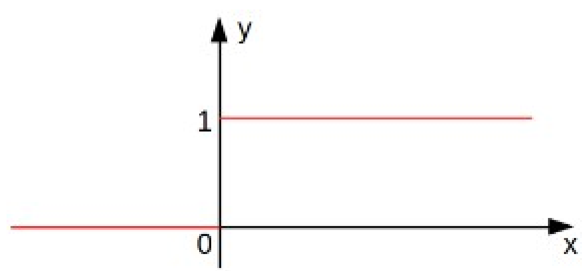
Rappels de préING 1 :

Limite :

$$\lim_{x \to a^-} f(x) = \lim_{x \to a^+} f(x) = f(a)$$



Exemple : **fonction de Heaviside**

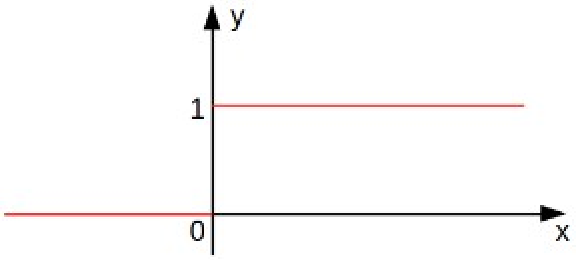


$$\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R} & \to & \mathbb{R} \\ & & x & \mapsto & f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Rappels de préING 1 :

Limite :



$$\forall \epsilon > 0,\ \exists \alpha > 0,\ (\forall x \in D,\ |x - a| < \alpha) \Longrightarrow |f(x) - l| < \epsilon$$

Chapitre 3 :

Limite et Continuité d'applications

a. Introduction du chapitre 3

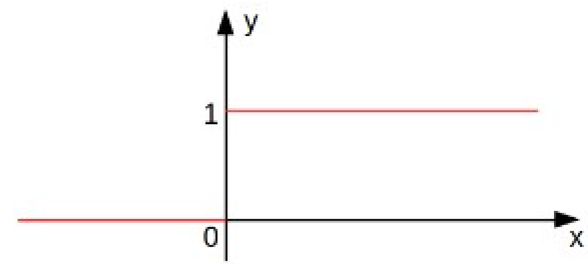
b. Limite et continuité

c. Continuité uniforme

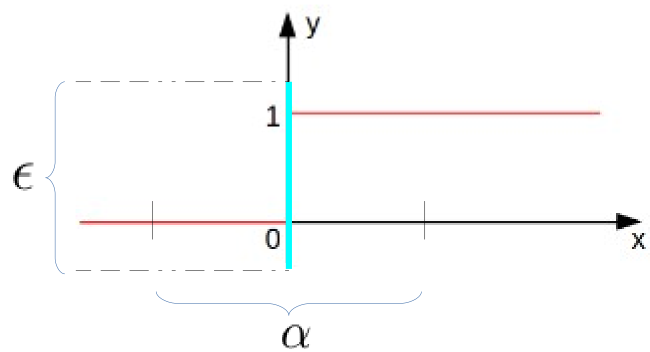
d. Topologie et fonctions continue

Rappels de préING 1 :

Limite :



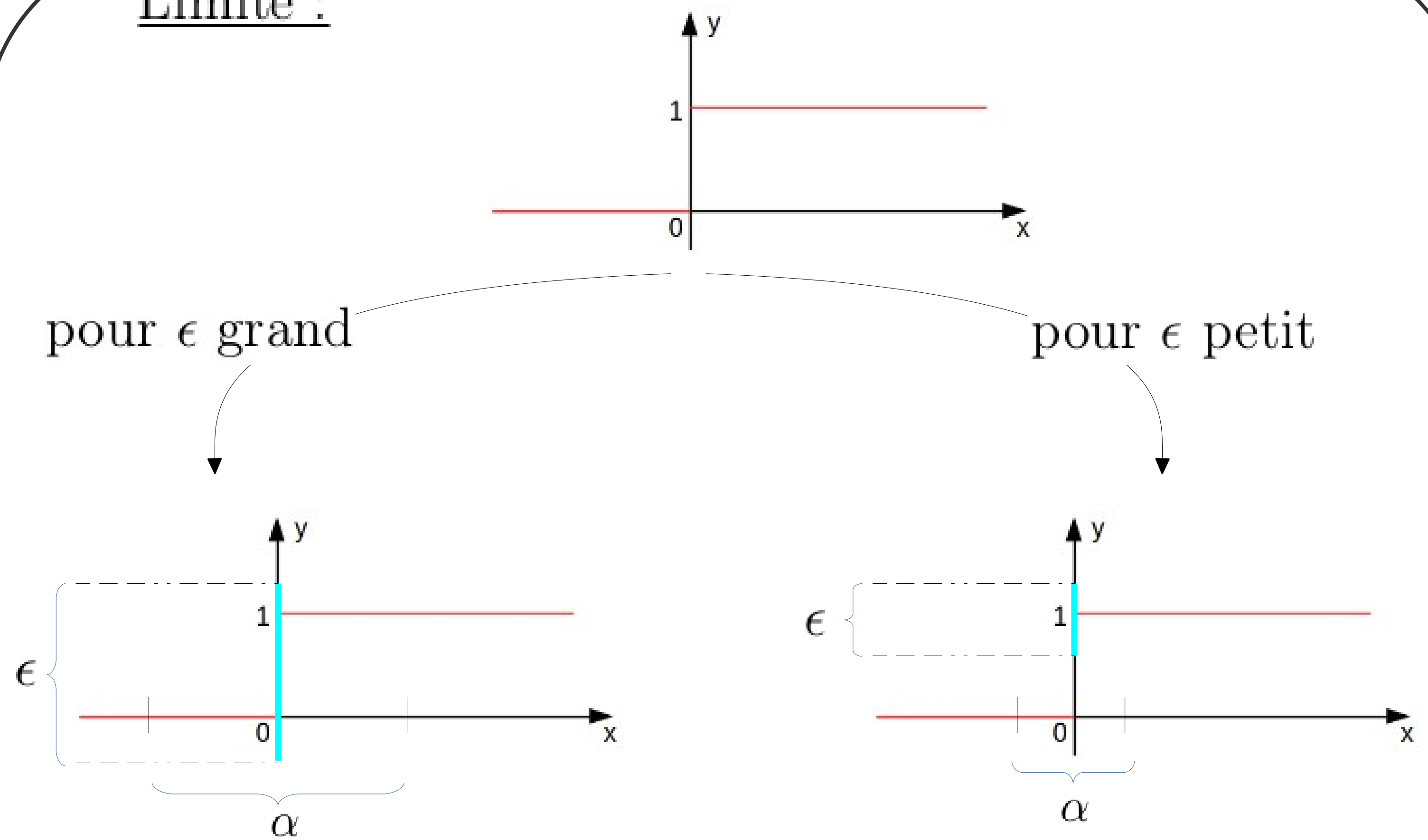
pour ϵ grand



$$\forall \epsilon > 0,\ \exists \alpha > 0,\ (\forall x \in D,\ |x-a| < \alpha) \Longrightarrow |f(x) - l| < \epsilon$$

Rappels de préING 1 :

Limite :



$$\forall \epsilon > 0,\ \exists \alpha > 0,\ (\forall x \in D,\ |x - a| < \alpha) \Longrightarrow |f(x) - l| < \epsilon$$

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$\begin{array}{rccl} g : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & g(x,y) = \left(\frac{x^2+y^2-1}{x} \ ; \ \frac{\sin(x^2)+\sin(y^2)}{\sqrt{x^2+y^2}} \right) \end{array}$$

Limite ? Continuité ?

Ph.D. Elian Masnada

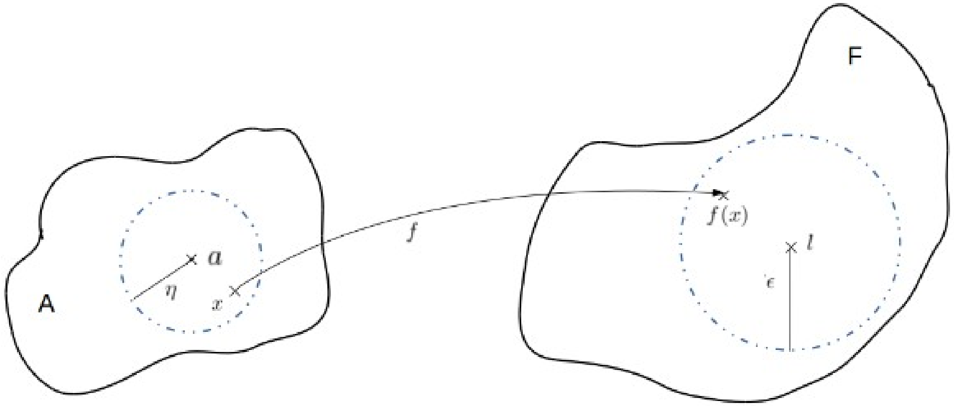
Définition 1 : (limite d'une fonction en un point)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$ et $l \in F$. On dit que f admet une limite l lorsque x tend vers a, si et seulement si, l'une des propriétés (équivalentes) suivantes est vérifiée

1. $\forall \epsilon > 0,\ \exists \eta > 0,\ \forall x \in A, \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon$

2. $\forall \epsilon > 0,\ \exists \eta > 0,\ \forall x \in A, x \in B_E(a, \eta) \Longrightarrow f(x) \in B_F(l, \epsilon)$

3. $\forall V_F \in \mathcal{V}(l),\ \exists V_E \in \mathcal{V}_E(a),\ \forall x \in A,\ (x \in V_E \Longrightarrow f(x) \in V_F)$



Si f est définie en a, alors la limite est $f(a)$.

Exemple :

$$\begin{array}{cccc} f & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

Si f est définie en a, alors la limite est $f(a)$.

Exemple :

$$\begin{array}{rcccl} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

en $a = (1,1)$ $\Rightarrow$ $f(a) = f(1,1) = \frac{1}{2}$

$$\lim_{(x,y)\to(1,1)} f(x,y) = f(1,1) = \frac{1}{2}$$

Si f est définie en a, alors la limite est $f(a)$.

Exemple :

$$\begin{array}{rccl} f \; : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

en $a = (1,1)$ $\Rightarrow$ $f(a) = f(1,1) = \frac{1}{2}$

$$\lim_{(x,y)\to(1,1)} f(x,y) = f(1,1) = \frac{1}{2}$$

en $a = (0,0)$ $\Rightarrow$ forme indeterminée $0/0$

techniques ? ? ?

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite
$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.

Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.
Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A,\ \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A,\ \|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.
Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Prenons $\|x - a\|_E < \min(\eta, \eta')$.

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.
Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A,\ \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A,\ \|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Prenons $\|x - a\|_E < \min(\eta, \eta')$.

$\Longrightarrow$ $\|f(x) - l\| < \epsilon$ et $\|f(x) - l'\| < \epsilon$

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.
Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A, \ \|x-a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A, \ \|x-a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Prenons $\|x - a\|_E < \min(\eta, \eta')$.

$\Rightarrow$ $\|f(x) - l\| < \epsilon$ et $\|f(x) - l'\| < \epsilon$

3ϵ

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.

Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Prenons $\|x - a\|_E < \min(\eta, \eta')$.

$\Rightarrow$ $\|f(x) - l\| < \epsilon$ et $\|f(x) - l'\| < \epsilon$

$3\epsilon = \|l - l'\|_F$

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.
Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Prenons $\|x - a\|_E < \min(\eta, \eta')$.

$\Rightarrow$ $\|f(x) - l\| < \epsilon$ et $\|f(x) - l'\| < \epsilon$

$$3\epsilon = \|l - l'\|_F = \|l - f(x) + f(x) - l'\|_F$$

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite
$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.
Posons alors
$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Prenons $\|x - a\|_E < \min(\eta, \eta')$.

$$\Longrightarrow \quad \|f(x) - l\| < \epsilon \quad \text{et} \quad \|f(x) - l'\| < \epsilon$$

$$3\epsilon = \|l - l'\|_F = \|l - f(x) + f(x) - l'\|_F \leq \|l - f(x)\|_F + \|f(x) - l'\|_F$$

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.
Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A, \ \|x-a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A, \ \|x-a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Prenons $\|x-a\|_E < \min(\eta, \eta')$.

$\Rightarrow$ $\quad \|f(x) - l\| < \epsilon \quad$ et $\quad \|f(x) - l'\| < \epsilon$

$$3\epsilon = \|l - l'\|_F = \|l - f(x) + f(x) - l'\|_F \leq \|l - f(x)\|_F + \|f(x) - l'\|_F < 2\epsilon$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 : (unicité de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$. Soit f une application de A dans F. Soit $a \in \overline{A}$. Si f admet une limite $l \in F$ en a alors elle est unique.

On note alors cette limite

$$\lim_{x \to a} f(x) = l$$

Supposons que f possède deux limites l et l' telles que $l \neq l'$.
Posons alors

$$\epsilon = \frac{1}{3} \|l - l'\|_F > 0.$$

Alors, il existe $\eta, \eta' > 0$ tels que

$$\begin{cases} \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon \\ \forall x \in A, \ \|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|f(x) - l'\|_F < \epsilon \end{cases}$$

Prenons $\|x - a\|_E < \min(\eta, \eta')$.

$$\|f(x) - l\| < \epsilon \qquad \text{et} \qquad \|f(x) - l'\| < \epsilon$$

Donc $l = l'$.

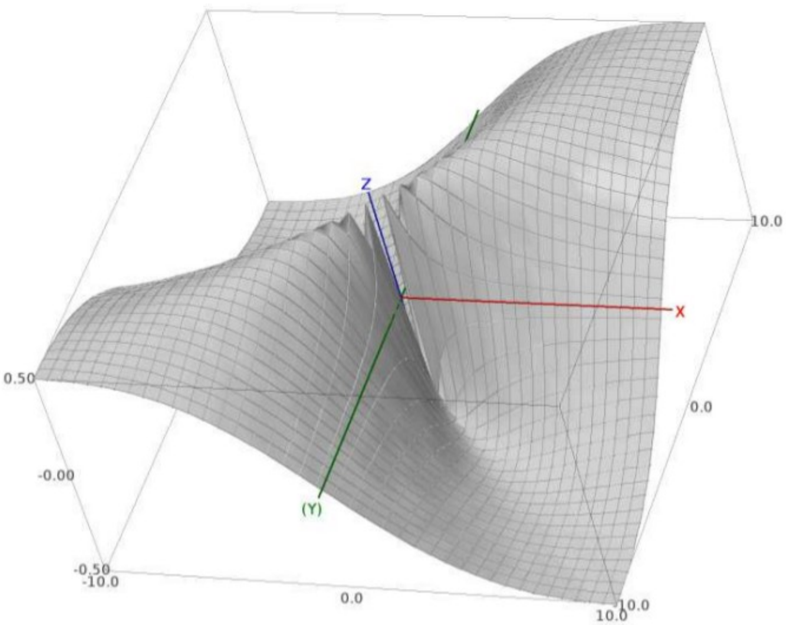
$$\cancel{3\epsilon = \|l - l'\|_F = \|l - f(x) + f(x) - l'\|_F \leq \|l - f(x)\|_F + \|f(x) - l'\|_F < 2\epsilon}$$

Ph.D. Elian Masnada

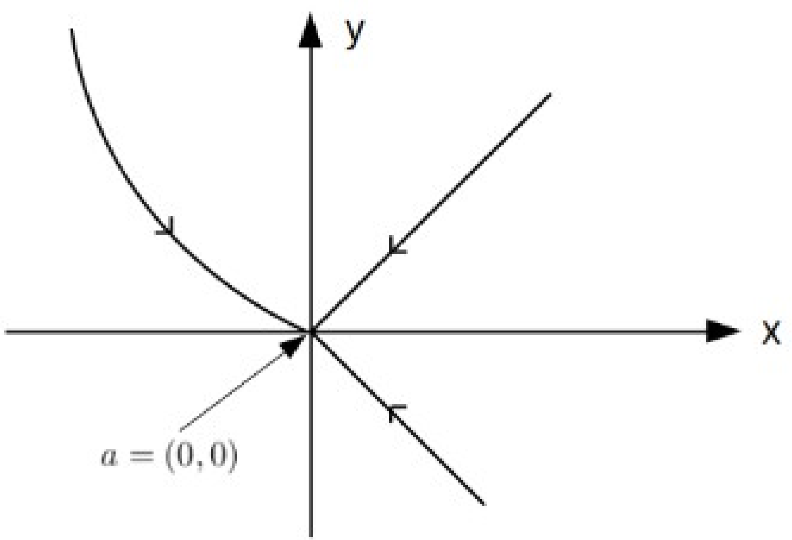
Exemple :

Reprenons l'exemple de fonction précédent

$$\begin{array}{cccc} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$



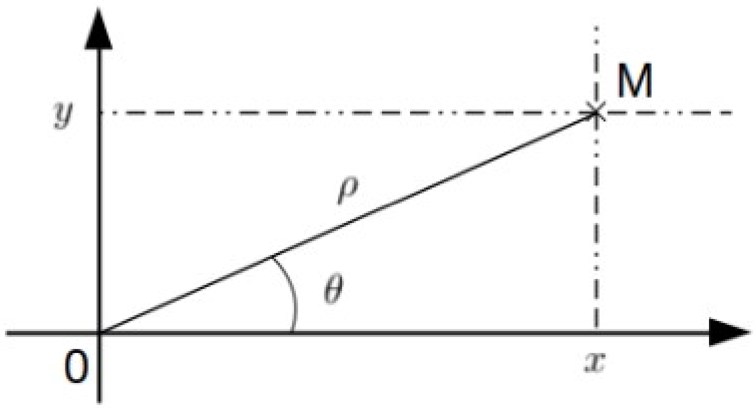
exemples de chemins si $E = \mathbb{R}^2$



On montre aisément, à partir des définitions géométriques des fonctions cosinus et sinus, que

$$\begin{cases} x = \rho\cos\theta \\ y = \rho\sin\theta \end{cases}$$

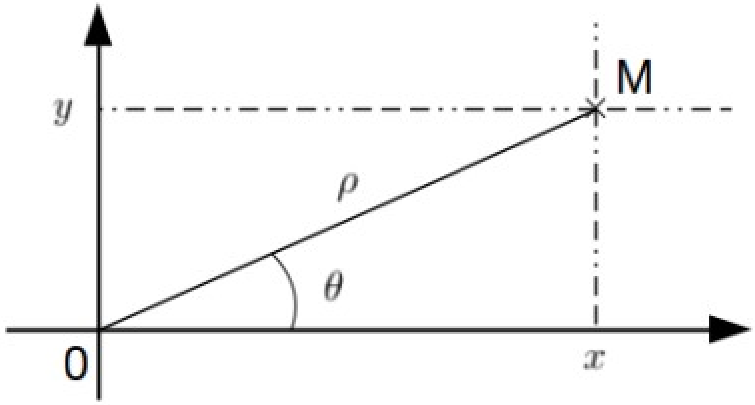
où $\theta \in [0, 2\pi[$ et $\rho \in \mathbb{R}^*$.



On montre aisément, à partir des définitions géométriques des fonctions cosinus et sinus, que

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases}$$

où $\theta \in [0, 2\pi[$ et $\rho \in \mathbb{R}^*$.



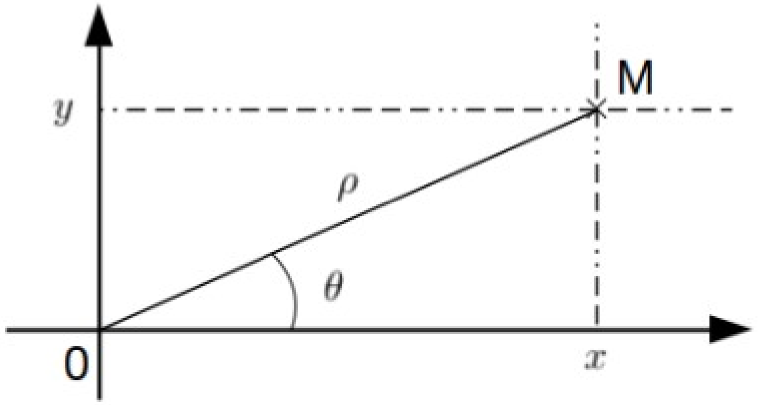
alors, grâce au changement polaire de variables

$$f(x, y) = \frac{xy}{x^2 + y^2} \longrightarrow \tilde{f}(\rho, \theta) = \cos(\theta) \sin(\theta)$$

On montre aisément, à partir des définitions géométriques des fonctions cosinus et sinus, que

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases}$$

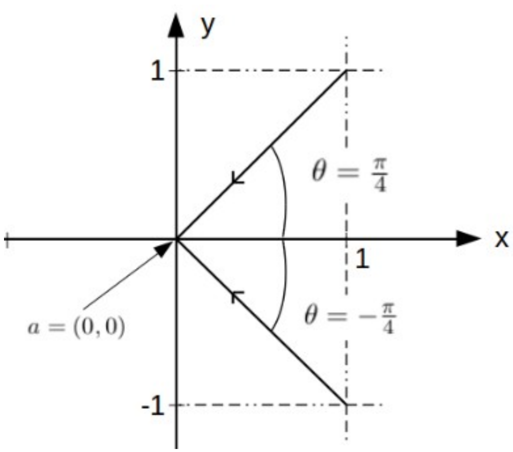
où $\theta \in [0, 2\pi[$ et $\rho \in \mathbb{R}^*$.



alors, grâce au changement polaire de variables

$$f(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$\begin{cases} \lim\limits_{(x,y)\to(0,0)} f(x,y) = \lim\limits_{(\rho,\theta)\to(0,\frac{\pi}{4})} \tilde{f}(\rho,\theta) = \lim\limits_{(\rho,\theta)\to(0,\frac{\pi}{4})} \cos(\theta)\sin(\theta) = \dfrac{1}{2} \\ \lim\limits_{(x,y)\to(0,0)} f(x,y) = \lim\limits_{(\rho,\theta)\to(0,-\frac{\pi}{4})} \tilde{f}(\rho,\theta) = \lim\limits_{(\rho,\theta)\to(0,-\frac{\pi}{4})} \cos(\theta)\sin(\theta) = -\dfrac{1}{2} \end{cases}$$



Propriété 2 :

Changer les normes $\|\cdot\|_E$ et $\|\cdot\|_F$ par des normes équivalentes ne change pas le fait que la limite existe ou non. Si de plus elle existe, elle reste inchangée.

Démonstration :

Voir polycopié

Discussion :

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists \eta > 0,\ \forall x \in A, \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l\|_F < \epsilon$$

changer ces normes n'a d'effet que sur la loi $\eta(\epsilon)$

Propriété 3 :

soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN et $A \subset E$. soit f et g deux applications de A dans F, $a \in \overline{A}$ et $l_1,\ l_2 \in F$. Si

$$\lim_{x \to a} f(x) = l_1 \qquad \text{et} \qquad \lim_{x \to a} g(x) = l_2$$

Alors

$$\lim_{x \to a} f(x) + \lambda g(x) = l_1 + \lambda l_2 \qquad \text{pour } \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

Démonstration :

Propriété 3 :

soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN et $A \subset E$. soit f et g deux applications de A dans F, $a \in \overline{A}$ et $l_1, \; l_2 \in F$. Si

$$\lim_{x \to a} f(x) = l_1 \qquad \text{et} \qquad \lim_{x \to a} g(x) = l_2$$

Alors

$$\lim_{x \to a} f(x) + \lambda g(x) = l_1 + \lambda l_2 \qquad \text{pour } \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

Démonstration :

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe η, $\eta' > 0$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l_1\|_F < \frac{\epsilon}{2}$$

$$\|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|g(x) - l_2\|_F < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 :

soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN et $A \subset E$. soit f et g deux applications de A dans F, $a \in \overline{A}$ et $l_1,\ l_2 \in F$. Si

$$\lim_{x \to a} f(x) = l_1 \qquad \text{et} \qquad \lim_{x \to a} g(x) = l_2$$

Alors

$$\lim_{x \to a} f(x) + \lambda g(x) = l_1 + \lambda l_2 \qquad \text{pour } \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

Démonstration :

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe η, $\eta' > 0$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l_1\|_F < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|g(x) - l_2\|_F < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $\eta_0 = \min(\eta, \eta')$.

Propriété 3 :

soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN et $A \subset E$. soit f et g deux applications de A dans F, $a \in \overline{A}$ et $l_1,\ l_2 \in F$. Si

$$\lim_{x \to a} f(x) = l_1 \qquad \text{et} \qquad \lim_{x \to a} g(x) = l_2$$

Alors

$$\lim_{x \to a} f(x) + \lambda g(x) = l_1 + \lambda l_2 \qquad \text{pour } \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

Démonstration :

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe $\eta,\ \eta' > 0$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l_1\|_F < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|g(x) - l_2\|_F < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $\eta_0 = \min(\eta, \eta')$. On a alors

$$\|x - a\|_E < \eta_0 \Longrightarrow \|f(x) + \lambda g(x) - (l_1 + \lambda l_2)\|_F \leq \|f(x) - l_1\|_F + \|\lambda g(x) - \lambda l_2\|_F$$

Propriété 3 :

soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN et $A \subset E$. soit f et g deux applications de A dans F, $a \in \overline{A}$ et $l_1,\ l_2 \in F$. Si

$$\lim_{x \to a} f(x) = l_1 \qquad \text{et} \qquad \lim_{x \to a} g(x) = l_2$$

Alors

$$\lim_{x \to a} f(x) + \lambda g(x) = l_1 + \lambda l_2 \qquad \text{pour } \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

Démonstration :

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe η, $\eta' > 0$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l_1\|_F < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|g(x) - l_2\|_F < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $\eta_0 = \min(\eta, \eta')$. On a alors

$$\begin{aligned}\|x - a\|_E < \eta_0 \Longrightarrow \|f(x) + \lambda g(x) - (l_1 + \lambda l_2)\|_F &\leq \|f(x) - l_1\|_F + \|\lambda g(x) - \lambda l_2\|_F \\ &= \|f(x) - l_1\|_F + |\lambda| \|g(x) - l_2\|_F\end{aligned}$$

Propriété 3 :

soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN et $A \subset E$. soit f et g deux applications de A dans F, $a \in \overline{A}$ et $l_1,\ l_2 \in F$. Si

$$\lim_{x \to a} f(x) = l_1 \qquad \text{et} \qquad \lim_{x \to a} g(x) = l_2$$

Alors

$$\lim_{x \to a} f(x) + \lambda g(x) = l_1 + \lambda l_2 \qquad \text{pour } \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

Démonstration :

Soit $\epsilon > 0$, alors il existe η, $\eta' > 0$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - l_1\|_F < \frac{\epsilon}{2}$$
$$\|x - a\|_E < \eta' \Longrightarrow \|g(x) - l_2\|_F < \frac{\epsilon}{2|\lambda|}$$

Soit $\eta_0 = \min(\eta, \eta')$. On a alors

$$\begin{aligned} \|x - a\|_E < \eta_0 \Longrightarrow \|f(x) + \lambda g(x) - (l_1 + \lambda l_2)\|_F &\leq \|f(x) - l_1\|_F + \|\lambda g(x) - \lambda l_2\|_F \\ &= \|f(x) - l_1\|_F + |\lambda| \|g(x) - l_2\|_F \\ &< \epsilon \end{aligned}$$

$f, g : E \to \mathbb{R}$

Propriété 4 :

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ un EVN quelconque et $F \subset \mathbb{R}$. Soit $A \subset E$. Soit f et g deux applications de $A \longrightarrow F$. Soit $a \in \overline{A}$. f et g sont telles que

$$\lim_{x \to a} f(x) = l_1 \text{ et } \lim_{x \to a} g(x) = l_2$$

avec $l_1, l_2 \in \mathbb{R}$. Alors

1. $\lim_{x \to a} f(x)g(x) = l_1 l_2$
2. Si $l_2 \neq 0$, $\lim_{x \to a} f(x)/g(x) = l_1/l_2$

Démonstration : laissée en exercice

Ph.D. Elian Masnada

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^n & \to & \mathbb{R}^p \\ & (x_1, x_2, ..., x_n) & \mapsto & f(x_1, x_2, ..., x_n) \\ & & & = \Big(f_1(x_1, x_2, ..., x_n); f_2(x_1, x_2, ..., x_n); \ldots ; f_p(x_1, x_2, ..., x_n)\Big) \end{array}$$

applications composantes de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^n & \to & \mathbb{R}^p \\ & (x_1, x_2, ..., x_n) & \mapsto & f(x_1, x_2, ..., x_n) \\ & & & = \Big(f_1(x_1, x_2, ..., x_n); f_2(x_1, x_2, ..., x_n); \ldots ; f_p(x_1, x_2, ..., x_n) \Big) \end{array}$$

applications composantes de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$

<u>exemple :</u>

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^3 \\ & (x_1, x_2) & \mapsto & f(x_1, x_2) = \Big(x^2 + y^2 \ ; \ x - y \ ; \ y^3 \Big) \end{array}$$

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^n & \to & \mathbb{R}^p \\ & (x_1, x_2, ..., x_n) & \mapsto & f(x_1, x_2, ..., x_n) \\ & & & = \big(f_1(x_1, x_2, ..., x_n); f_2(x_1, x_2, ..., x_n); \ldots; f_p(x_1, x_2, ..., x_n)\big) \end{array}$$

applications composantes de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$

<u>exemple :</u>

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^3 \\ & (x_1, x_2) & \mapsto & f(x_1, x_2) = \left(x^2 + y^2 \;;\; x - y \;;\; y^3\right) \end{array}$$

$$\begin{array}{rccl} f_1 : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x_1, x_2) & \mapsto & f_1(x_1, x_2) = x^2 + y^2 \end{array}$$

$$\begin{array}{rccl} f_3 : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x_1, x_2) & \mapsto & f_3(x_1, x_2) = y^3 \end{array}$$

$$\begin{array}{rccl} f_2 : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x_1, x_2) & \mapsto & f_2(x_1, x_2) = x - y \end{array}$$

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^n & \to & \mathbb{R}^p \\ & (x_1, x_2, ..., x_n) & \mapsto & f(x_1, x_2, ..., x_n) \\ & & & = \Big(f_1(x_1, x_2, ..., x_n); f_2(x_1, x_2, ..., x_n); \ldots ; f_p(x_1, x_2, ..., x_n)\Big) \end{array}$$

applications composantes de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$

Propriété 5 :

Soit $E = \mathbb{R}^n$ et $F = \mathbb{R}^p$. Alors une application f de $E \longrightarrow F$ admet $l = (l_1, l_2, ..., l_p)$ comme limite lorsque x tend vers $a \in E$ si, et seulement si, pour tout entier $[\![1; p]\!]$, la ième "application composante" $f_i \ : \ E \longrightarrow \mathbb{R}$ de f admet l_i pour limite quand x tend vers a.

Démonstration : laissée en exercice

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit l'application
$$f : \begin{array}{ccl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit l'application
$$f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$f_1 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_2 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

Exemple :

Soit l'application

$$f : \begin{array}{rcl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2} \right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$f_1 : \begin{array}{rcl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_2 : \begin{array}{rcl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2}$$

Exemple :

Soit l'application
$$f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$f_1 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_2 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_1(\rho,\theta) = \rho\cos(\theta)\sin^2(\theta)$$

Exemple :

Soit l'application
$$f : \begin{array}{ccl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \;;\; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$f_1 : \begin{array}{ccl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_2 : \begin{array}{ccl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_1(\rho,\theta) = \rho\cos(\theta)\sin^2(\theta)$$

$$\Rightarrow \quad \forall \theta, \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) = 0$$

Exemple :

Soit l'application
$$\begin{array}{rcl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$\begin{array}{rcl} f_1 : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} f_2 : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_1(\rho,\theta) = \rho\cos(\theta)\sin^2(\theta)$$

$$\forall\theta, \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) = 0$$

limite existe et est nulle

Exemple :

Soit l'application
$$f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$f_1 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_2 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_1(\rho,\theta) = \rho\cos(\theta)\sin^2(\theta)$$

$$\forall \theta, \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) = 0$$

limite existe et est nulle

$$f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2}$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit l'application
$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \;;\; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$\begin{array}{rccl} f_1 : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$\begin{array}{rccl} f_2 : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_1(\rho,\theta) = \rho\cos(\theta)\sin^2(\theta)$$

$$\forall \theta, \quad \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) = 0$$

limite existe et est nulle

$$f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_2(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

Exemple :

Soit l'application $f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^2 \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$f_1 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_2 : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_1(\rho,\theta) = \rho\cos(\theta)\sin^2(\theta)$$

$$\forall \theta, \quad \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) = 0$$

limite existe et est nulle

$$f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_2(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$\lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta) = \text{ dépend de } \theta$$

Exemple :

Soit l'application
$$f : \begin{array}{rcl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$f_1 : \begin{array}{rcl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_2 : \begin{array}{rcl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_1(\rho,\theta) = \rho\cos(\theta)\sin^2(\theta)$$

$$\forall\theta, \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) = 0$$

limite existe et est nulle

$$f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_2(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$\lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta) = \text{ dépend de } \theta$$

pas de limite

Exemple :

Soit l'application $\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(\frac{xy^2}{x^2+y^2} \; ; \; \frac{xy}{x^2+y^2}\right) \end{array}$

limite en $a = (0,0)$?

il suffit d'étudier la limite de chacune des applications composantes

$$\begin{array}{rccl} f_1 & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$\begin{array}{rccl} f_2 & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \end{array}$$

$$f_1(x,y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_1(\rho,\theta) = \rho\cos(\theta)\sin^2(\theta)$$

$$\forall \theta, \quad \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) = 0$$

limite existe et est nulle

$$f_2(x,y) = \frac{xy}{x^2+y^2} \longrightarrow \tilde{f}_2(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

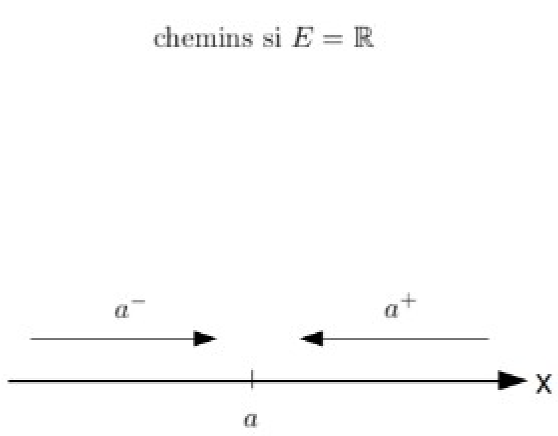
$$\lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta) = \text{ dépend de } \theta$$

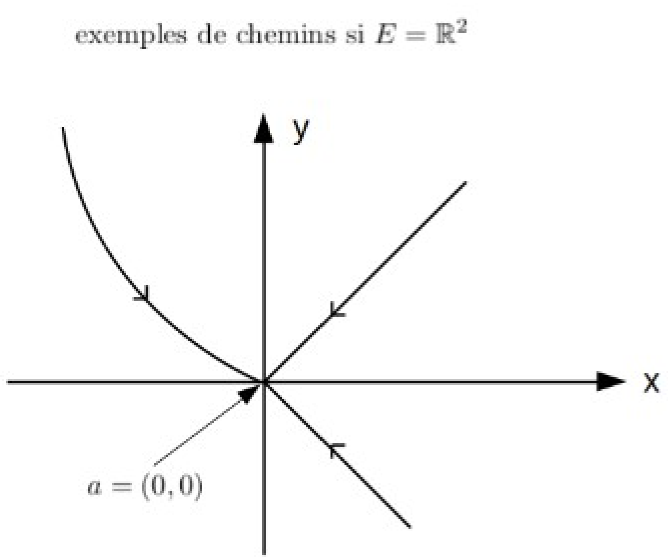
pas de limite

pas de limite

Définition 2 : (Application continue)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$, f une application de $A \longrightarrow F$ et $a \in A$. On dit que f est continue en a si, et seulement si, f admet une limite en a. La fonction f est dite discontinue en a si, et seulement si, f n'est pas continue en a. La fonction est dite continue sur l'ensemble A si, et seulement si, elle est continue en tout point de A. On note $\mathcal{C}(A, F)$ l'ensemble des fonctions continues de A dans F.





Théorème 1 : (Caractérisation séquentielle de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$, f une application de $A \longrightarrow F$ et $a \in \overline{A}$. Alors f admet une limite $l \in F$ quand x tend vers a si, et seulement si, pour toute suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a, la suite $\Big(f(x_n)\Big)_{n\in\mathbb{N}}$ converge vers l.

Démonstration : Admis

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 1 : (Caractérisation séquentielle de la limite)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$, f une application de $A \longrightarrow F$ et $a \in \overline{A}$. Alors f admet une limite $l \in F$ quand x tend vers a si, et seulement si, pour toute suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a, la suite $\Big(f(x_n)\Big)_{n\in\mathbb{N}}$ converge vers l.

Démonstration : Admis

Corollaire : (Caractérisation séquentielle de la continuité)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$, f une application de $A \longrightarrow F$ et $a \in \overline{A}$. Alors f est continue en a si, et seulement si, pour toute suite $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ d'éléments de A qui converge vers a, la suite $\Big(f(x_n)\Big)_{n\in\mathbb{N}}$ converge vers $f(a)$.

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit la fonction
$$\begin{array}{rcl} f \quad : \quad \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2+y^2} & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Exemple :

Soit la fonction
$$\begin{array}{rrcl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2+y^2} & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Prenons par exemple $u_n = (\frac{1}{n}, \frac{1}{n})$

$$\Rightarrow \quad \lim_{n\to\infty} u_n = (0,0)$$

Exemple :

Soit la fonction
$$f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2+y^2} & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Prenons par exemple $u_n = (\frac{1}{n}, \frac{1}{n})$

$$\Rightarrow \quad \lim_{n\to\infty} u_n = (0,0)$$

Or $f(u_n) = n^2/(2n^2) = 1/2$

Exemple :

Soit la fonction
$$\begin{array}{rccl} f: & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2+y^2} & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Prenons par exemple $u_n = (\frac{1}{n}, \frac{1}{n})$

$$\Rightarrow \lim_{n\to\infty} u_n = (0,0)$$

Or $f(u_n) = n^2/(2n^2) = 1/2$

$$\Rightarrow \lim_{n\to\infty} f(u_n) = \frac{1}{2} \neq f(0,0) = 0$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit la fonction
$$f : \begin{array}{ccl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2+y^2} & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Prenons par exemple $u_n = (\frac{1}{n}, \frac{1}{n})$

$$\Rightarrow \quad \lim_{n\to\infty} u_n = (0,0)$$

Or $f(u_n) = n^2/(2n^2) = 1/2$

$$\Rightarrow \quad \lim_{n\to\infty} f(u_n) = \frac{1}{2} \neq f(0,0) = 0$$

$\Rightarrow$ pas continue en $(0,0)$

Méthodologie

Comment calculer $\lim\limits_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y)$ avec $a=(x_0,y_0)$

Méthodologie

Comment calculer $\lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y)$ avec $a = (x_0, y_0)$

Etape 1 :

On calcule $f(x_0, y_0)$ et si on n'obtient pas une forme indeterminée

$$\Rightarrow \lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = f(x_0,y_0)$$

Méthodologie

Comment calculer $\lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y)$ avec $a = (x_0, y_0)$

Etape 1 :

On calcule $f(x_0, y_0)$ et si on n'obtient pas une forme indeterminée

$$\Rightarrow \lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = f(x_0, y_0)$$

Sinon Etape 2 : (on lève l'indétermination)

l'objectif est de montrer :

Ph.D. Elian Masnada

Méthodologie

Comment calculer $\lim\limits_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y)$ avec $a=(x_0,y_0)$

Etape 1 :

On calcule $f(x_0,y_0)$ et si on n'obtient pas une forme indeterminée

$$\Rightarrow \lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = f(x_0,y_0)$$

Sinon Etape 2 : (on lève l'indétermination)

l'objectif est de montrer :

(i) soit que tous les chemins qui tendent vers a aboutissent à la même valeur

Méthodologie

Comment calculer $\lim\limits_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y)$ avec $a=(x_0,y_0)$

Etape 1 :

On calcule $f(x_0,y_0)$ et si on n'obtient pas une forme indeterminée

$$\Rightarrow \lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = f(x_0,y_0)$$

Sinon Etape 2 : (on lève l'indétermination)

l'objectif est de montrer :

(i) soit que tous les chemins qui tendent vers a aboutissent à la même valeur

(ii) soit il existe au moins deux chemins qui tendent vers a mais qui n'aboutissent pas à la même valeur de f

Chapitre 3 :

Limite et Continuité d'applications

a. Introduction du chapitre 3

b. Limite et continuité

c. Continuité uniforme

d. Topologie et fonctions continue

Méthodologie

1. On peut passer en coordonnées polaires
   (si le dénominateur de la fonction à la bonne forme)

$$\begin{cases} x = x_0 + \rho\cos(\theta) \\ y = y_0 + \rho\sin(\theta) \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \quad \tilde{f}(\rho, \theta) = f(x, y)$$

On a alors

$$\lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}(\rho,\theta)$$

Méthodologie

1. On peut passer en coordonnées polaires (si le dénominateur de la fonction à la bonne forme)

$$\begin{cases} x = x_0 + \rho\cos(\theta) \\ y = y_0 + \rho\sin(\theta) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \tilde{f}(\rho, \theta) = f(x, y)$$

On a alors

$$\lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}(\rho,\theta)$$

Si le résultat ne dépend pas de θ alors la fonction f admet une limite

Si le résultat dépend de θ alors la fonction n'admet pas de limite en (x_0, y_0)

Méthodologie

2. Si la fonction n'a pas la bonne forme pour passer en coordonnées polaires, on calcule explicitement la valeur de f pour différents chemins d'approche du point $a = (x_0, y_0)$. Pour cela, on a deux méthodes

   (a) Caractérisation séquentielle :
   Nous savons que si u_n est une suite d'éléments de $\mathbb{N}$ dans $\mathbb{R}^2$ telle que
   $$\lim_{n\to\infty} u_n = (x_0, y_0)$$
   alors si f est continue, on a
   $$\lim_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = \lim_{n\to\infty} f(u_n)$$
   On calcule alors cette limite pour différents chemins, c'est-à-dire pour différentes suites u_n.

   (b) Caractérisation cartésienne :
   On exprime les différents chemins par leur expression cartésienne qui sont de la forme $(x, \alpha(x))$ par exemple (où α est une application de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$).

Si deux chemins donnent des valeurs différentes, quelle que soit la méthode, alors la fonction f n'a pas de limite en a.
Si, par contre, tous les chemins donnent la même valeur, alors cette valeur, notée l_c, est un bon candidat pour être la limite de la fonction. On passe alors à l'étape 3.

Méthodologie

3. Il ne reste plus qu'à calculer $|f(x,y) - l_c|$. Si cette quantité tend vers 0 pour (x,y) tend vers (x_0, y_0) alors :

   — Si $|f(x,y) - l_c| \underset{(x,y)\to(x_0,y_0)}{\longrightarrow} 0$, alors $\lim\limits_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = l_c$

   — Sinon, la fonction n'admet aucune limite en (x_0, y_0)

Méthodologie

3. Il ne reste plus qu'à calculer $|f(x,y) - l_c|$. Si cette quantité tend vers 0 pour (x,y) tend vers (x_0, y_0) alors :

   — Si $|f(x,y) - l_c| \underset{(x,y)\to(x_0,y_0)}{\longrightarrow} 0$, alors $\lim\limits_{(x,y)\to(x_0,y_0)} f(x,y) = l_c$

   — Sinon, la fonction n'admet aucune limite en (x_0, y_0)

Nous allons illustrer la méthodologie sur deux exemples : un qui admet une limite en (0,0) et l'autre pas.

$f_1(x, y) = xy/(x^2 + y^2)$

en $(0, 0)$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

$f_1(x,y) = xy/(x^2+y^2)$

en $(0,0)$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_1(\rho, \theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$f_1(x, y) = xy/(x^2 + y^2)$$

en $(0, 0)$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_1(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$\begin{aligned} \lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) &= \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) \\ &= \cos(\theta)\sin(\theta) \end{aligned}$$

$f_1(x,y) = xy/(x^2+y^2)$

en $(0,0)$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_1(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$\begin{aligned}\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) &= \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) \\ &= \cos(\theta)\sin(\theta)\end{aligned}$$

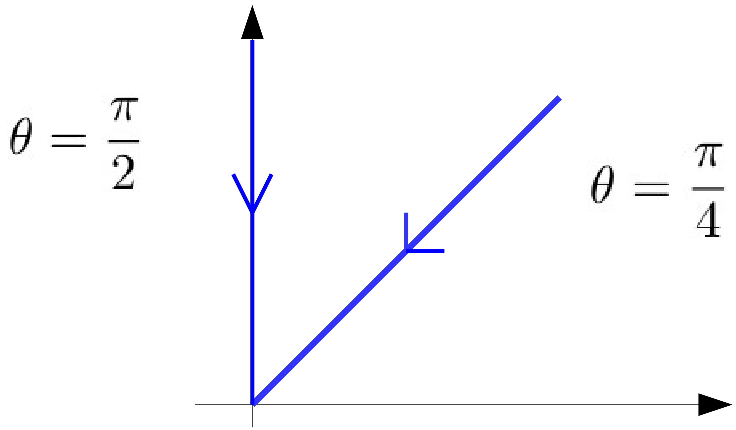
Finalement, on voit que

Si $\theta = \frac{\pi}{4}$, $\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) = \frac{1}{2}$

Si $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) = 0$

$f_1(x,y) = xy/(x^2+y^2)$

en $(0,0)$



pas de limite

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_1(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$\begin{aligned}\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) &= \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta) \\ &= \cos(\theta)\sin(\theta)\end{aligned}$$

Finalement, on voit que

Si $\theta = \frac{\pi}{4}$, $\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) = \frac{1}{2}$

Si $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) = 0$

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(0, \frac{1}{n}\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

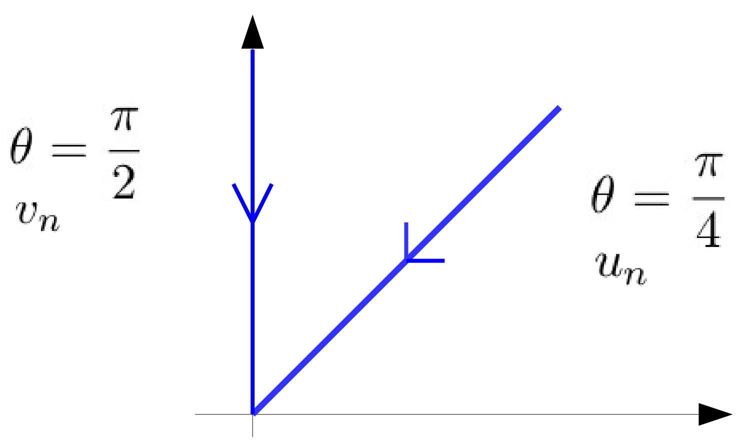
d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_1(u_n) = \frac{1}{2}$$

$$\lim_{n\to\infty} f_1(v_n) = 0$$

$f_1(x,y) = xy/(x^2+y^2)$
en $(0,0)$

pas de limite



coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_1(\rho,\theta) = \cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_1(\rho,\theta)$$
$$= \cos(\theta)\sin(\theta)$$

Finalement, on voit que

Si $\theta = \frac{\pi}{4}$, $\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) = \frac{1}{2}$

Si $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_1(x,y) = 0$

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(0, \frac{1}{n}\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_1(u_n) = \frac{1}{2}$$

$$\lim_{n\to\infty} f_1(v_n) = 0$$

Caractérisation Cartésienne

Chemin 1: (x,x)

$$f_1(x,x) = \frac{1}{2}$$

Chemin 2 : $(0,y)$

$$f_1(0,y) = 0$$

d'où l'on déduit que

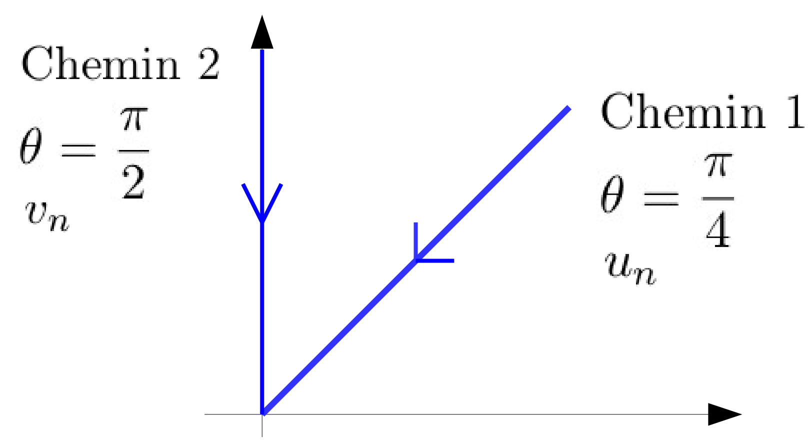
$$\lim_{(x,x)\to(0,0)} f_1(x,y) = 1/2$$

$$\lim_{(0,y)\to(0,0)} f_1(0,y) = 0$$

$f_1(x,y) = xy/(x^2+y^2)$

en $(0,0)$

pas de limite



$$f_2(x,y) = 1 + \frac{x^3}{x^2+y^2}$$

en $(0,0)$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_2(\rho,\theta) = \rho\cos^3(\theta) + 1$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta)$$
$$= 1$$

Finalement, on voit que la fonction est continue

$$f_2(x,y) = 1 + \frac{x^3}{x^2+y^2}$$

en $(0,0)$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_2(\rho,\theta) = \rho\cos^3(\theta) + 1$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta)$$
$$= 1$$

Finalement, on voit que la fonction est continue

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\dfrac{1}{n}, \dfrac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(\dfrac{1}{n}, 0\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

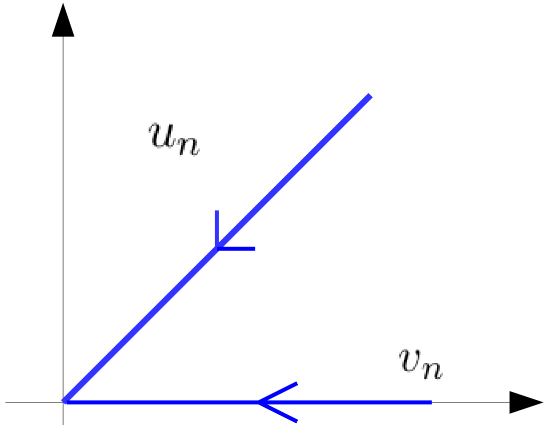
d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_2(u_n) = \lim_{n\to\infty} f_2(v_n) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

$$f_2(x,y) = 1 + \frac{x^3}{x^2+y^2}$$

en $(0,0)$



coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_2(\rho,\theta) = \rho\cos^3(\theta) + 1$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta) = 1$$

Finalement, on voit que la fonction est continue

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(\frac{1}{n}, 0\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_2(u_n) = \lim_{n\to\infty} f_2(v_n) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

Caractérisation Cartésienne

Chemin 1: (x,x)

$$\lim_{(x,x)\to(0,0)} f_2(x,x) = 1$$

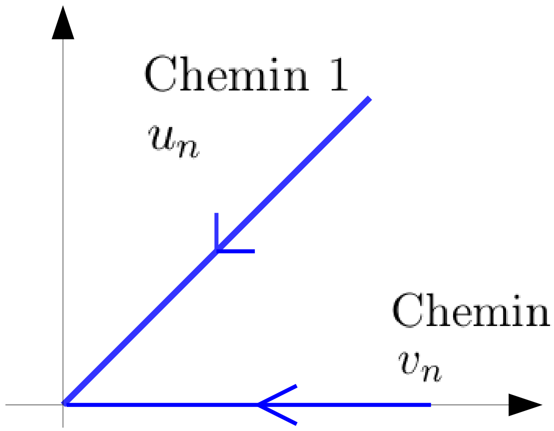
Chemin 2 : $(x,0)$

$$\lim_{(x,0)\to(0,0)} f_2(x,0) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

$$f_2(x,y) = 1 + \frac{x^3}{x^2+y^2}$$

en $(0,0)$



coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_2(\rho,\theta) = \rho\cos^3(\theta) + 1$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta) = 1$$

Finalement, on voit que la fonction est continue

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(\frac{1}{n}, 0\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_2(u_n) = \lim_{n\to\infty} f_2(v_n) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

Caractérisation Cartésienne

Chemin 1: (x,x)

$$\lim_{(x,x)\to(0,0)} f_2(x,x) = 1$$

Chemin 2 : $(x,0)$

$$\lim_{(x,0)\to(0,0)} f_2(x,0) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

$$f_2(x,y) = 1 + \frac{x^3}{x^2+y^2}$$

en $(0,0)$

$$|f_2(x,y) - l_c| = |f_2(x,y) - 1|$$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_2(\rho,\theta) = \rho\cos^3(\theta) + 1$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta) = 1$$

Finalement, on voit que la fonction est continue

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(\frac{1}{n}, 0\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_2(u_n) = \lim_{n\to\infty} f_2(v_n) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

Caractérisation Cartésienne

Chemin 1: (x,x)

$$\lim_{(x,x)\to(0,0)} f_2(x,x) = 1$$

Chemin 2 : $(x,0)$

$$\lim_{(x,0)\to(0,0)} f_2(x,0) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

$$f_2(x,y) = 1 + \frac{x^3}{x^2+y^2}$$

en $(0,0)$

$$|f_2(x,y) - l_c| = |f_2(x,y) - 1| = \left|\frac{x^3}{x^2+y^2}\right|$$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_2(\rho,\theta) = \rho\cos^3(\theta) + 1$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta)$$
$$= 1$$

Finalement, on voit que la fonction est continue

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\frac{1}{n},\frac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(\frac{1}{n},0\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_2(u_n) = \lim_{n\to\infty} f_2(v_n) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

Caractérisation Cartésienne

Chemin 1: (x,x)

$$\lim_{(x,x)\to(0,0)} f_2(x,x) = 1$$

Chemin 2 : $(x,0)$

$$\lim_{(x,0)\to(0,0)} f_2(x,0) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

$$f_2(x,y) = 1 + \frac{x^3}{x^2+y^2}$$

en $(0,0)$

$$|f_2(x,y) - l_c| = |f_2(x,y) - 1| = \left|\frac{x^3}{x^2+y^2}\right| = \frac{x^2}{x^2+y^2}|x|$$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_2(\rho,\theta) = \rho\cos^3(\theta) + 1$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta) = 1$$

Finalement, on voit que la fonction est continue

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(\frac{1}{n}, 0\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_2(u_n) = \lim_{n\to\infty} f_2(v_n) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

Caractérisation Cartésienne

Chemin 1: (x,x)

$$\lim_{(x,x)\to(0,0)} f_2(x,x) = 1$$

Chemin 2 : $(x,0)$

$$\lim_{(x,0)\to(0,0)} f_2(x,0) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

$f_2(x,y) = 1 + \dfrac{x^3}{x^2+y^2}$

en $(0,0)$

$$|f_2(x,y) - l_c| = |f_2(x,y) - 1| = \left|\frac{x^3}{x^2+y^2}\right| = \frac{x^2}{x^2+y^2}|x| \leq |x| \underset{(x,y)\to(0,0)}{\longrightarrow} 0$$

coordonnées polaires

On pose $\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$

d'où l'on déduit que

$$\tilde{f}_2(\rho,\theta) = \rho\cos^3(\theta) + 1$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = \lim_{(\rho,\theta)\to(0,\theta)} \tilde{f}_2(\rho,\theta) = 1$$

Finalement, on voit que la fonction est continue

Caractérisation Séquentielle

Soit $\begin{cases} u_n = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) \\ v_n = \left(\frac{1}{n}, 0\right) \end{cases}$

On a bien

$$\lim_{n\to\infty} u_n = \lim_{n\to\infty} v_n = (0,0)$$

d'où l'on déduit que

$$\lim_{n\to\infty} f_2(u_n) = \lim_{n\to\infty} f_2(v_n) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

Caractérisation Cartésienne

Chemin 1: (x,x)

$$\lim_{(x,x)\to(0,0)} f_2(x,x) = 1$$

Chemin 2 : $(x,0)$

$$\lim_{(x,0)\to(0,0)} f_2(x,0) = 1$$

Mais on ne peut pas conclure

$f_2(x,y) = 1 + \dfrac{x^3}{x^2+y^2}$

en $(0,0)$

$$|f_2(x,y) - l_c| = |f_2(x,y) - 1| = \left|\frac{x^3}{x^2+y^2}\right| = \frac{x^2}{x^2+y^2}|x| \le |x| \underset{(x,y)\to(0,0)}{\longrightarrow} 0$$

$$\Rightarrow \lim_{(x,y)\to(0,0)} f_2(x,y) = 1$$

Définition 2 : (Continuité uniforme)

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Soit $A \subset E$, f une application de $A \longrightarrow F$. On dit que f est uniformément continue sur A si, et seulement si,

$$\forall \epsilon > 0, \exists \eta > 0,\ \forall a \in A,\ \forall x \in A,\ \Big(\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - f(a)\|_F < \epsilon \Big)$$

continuité classique

$$\forall a \in A,\ \forall \epsilon > 0, \exists \eta > 0,\ \forall x \in A,\ \Big(\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - f(a)\|_F < \epsilon \Big)$$

différence

continuité uniforme $\Rightarrow$ η est indépendant de a

Propriété 6 :

Toute application uniformément continue est continue.

Démonstration :

C'est trivial.

Propriété 6 :

Toute application uniformément continue est continue.

Démonstration :

C'est trivial.

Soit f une application de $A \subset E$ dans F.

Alors f est uniformément continue sur A si, et seulement si

$$\forall \epsilon > 0, \exists \eta > 0,\ \forall a \in A,\ \forall x \in A,\ \left(\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - f(a)\|_F < \epsilon \right)$$

Propriété 6 :

Toute application uniformément continue est continue.

Démonstration :

C'est trivial.

Soit f une application de $A \subset E$ dans F.

Alors f est uniformément continue sur A si, et seulement si

$$\forall \epsilon > 0, \exists \eta > 0,\ \forall a \in A,\ \forall x \in A,\ \Big(\|x-a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x)-f(a)\|_F < \epsilon \Big)$$

qui implique évidemment la continuité

$$\forall a \in A,\ \forall \epsilon > 0, \exists \eta > 0,\ \forall x \in A,\ \Big(\|x-a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x)-f(a)\|_F < \epsilon \Big)$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 3 : (Application lipschitzienne)

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Une application $f : E \longrightarrow F$ est dite lipschitzienne si, et seulement si

$$\exists \kappa \geq 0,\ \forall x \in E,\ \forall y \in E,\ \|f(x) - f(y)\|_F \leq \kappa \|x - y\|_E$$

On dit alors que f est κ-lipschitzienne de E dans F.

Remarques :

Définition 3 : (Application lipschitzienne)

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Une application $f : E \longrightarrow F$ est dite lipschitzienne si, et seulement si

$$\exists \kappa \geq 0,\ \forall x \in E,\ \forall y \in E,\ \|f(x) - f(y)\|_F \leq \kappa \|x - y\|_E$$

On dit alors que f est κ-lipschitzienne de E dans F.

Remarques :

en dimension finie $\longrightarrow$ caractère lipschitzien ne dépend pas des normes utilisées

en dimension finie $\longrightarrow$ κ en dépend

Définition 3 : (Application lipschitzienne)

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$, deux EVN. Une application $f : E \longrightarrow F$ est dite lipschitzienne si, et seulement si

$$\exists \kappa \geq 0,\ \forall x \in E,\ \forall y \in E,\ \|f(x) - f(y)\|_F \leq \kappa \|x - y\|_E$$

On dit alors que f est κ-lipschitzienne de E dans F.

Remarques :

en dimension finie

- caractère lipschitzien ne dépend pas des normes utilisées
- κ en dépend

$$\kappa = 0 \Longleftrightarrow f \text{ est constante}$$

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN

f une application κ-lipschitzienne de E dans F

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN

f une application κ-lipschitzienne de E dans F

1. Si $\kappa = 0$ alors f est une fonction constante.

   Donc pour tout $a \in E$ et $\forall x \in E$, $\|f(x) - f(a)\|_F = 0 < \epsilon$.

   $\Rightarrow$ f est uniformément continue.

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN

f une application κ-lipschitzienne de E dans F

1. Si $\kappa = 0$ alors f est une fonction constante.

   Donc pour tout $a \in E$ et $\forall x \in E$, $\|f(x) - f(a)\|_F = 0 < \epsilon$.

   ➡ f est uniformément continue.

2. Si $\kappa \neq 0$, alors posons $\eta = \epsilon/\kappa > 0$.

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN

f une application κ-lipschitzienne de E dans F

1. Si $\kappa = 0$ alors f est une fonction constante.

   Donc pour tout $a \in E$ et $\forall x \in E$, $\|f(x) - f(a)\|_F = 0 < \epsilon$.

   $\Rightarrow$ f est uniformément continue.

2. Si $\kappa \neq 0$, alors posons $\eta = \epsilon/\kappa > 0$.

   Soit $a \in E$ et $x \in E$ tels que

$\|x - a\|_E < \eta$

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN

f une application κ-lipschitzienne de E dans F

1. Si $\kappa = 0$ alors f est une fonction constante.

   Donc pour tout $a \in E$ et $\forall x \in E$, $\|f(x) - f(a)\|_F = 0 < \epsilon$.

   $\Rightarrow$ f est uniformément continue.

2. Si $\kappa \neq 0$, alors posons $\eta = \epsilon/\kappa > 0$.

   Soit $a \in E$ et $x \in E$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \quad \Rightarrow \quad \|f(x) - f(a)\|_F \leq \kappa \|x - a\|_E$$

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN

f une application κ-lipschitzienne de E dans F

1. Si $\kappa = 0$ alors f est une fonction constante.

   Donc pour tout $a \in E$ et $\forall x \in E$, $\|f(x) - f(a)\|_F = 0 < \epsilon$.

   $\Rightarrow$ f est uniformément continue.

2. Si $\kappa \neq 0$, alors posons $\eta = \epsilon/\kappa > 0$.

   Soit $a \in E$ et $x \in E$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \quad \Rightarrow \quad \|f(x) - f(a)\|_F \leq \kappa \|x - a\|_E < \kappa\eta = \epsilon$$

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN

f une application κ-lipschitzienne de E dans F

1. Si $\kappa = 0$ alors f est une fonction constante.

   Donc pour tout $a \in E$ et $\forall x \in E$, $\|f(x) - f(a)\|_F = 0 < \epsilon$.

   $\Rightarrow$ f est uniformément continue.

2. Si $\kappa \neq 0$, alors posons $\eta = \epsilon/\kappa > 0$.

   Soit $a \in E$ et $x \in E$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \quad \Rightarrow \quad \|f(x) - f(a)\|_F \leq \kappa \|x - a\|_E < \kappa\eta = \epsilon$$

On vient donc de montrer que

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists \eta > 0,\ \forall a \in E,\ \forall x \in E,\ \Big(\|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - f(a)\|_F < \epsilon \Big)$$

Propriété 7 :

Toute application lipschitzienne est uniformément continue.

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN

f une application κ-lipschitzienne de E dans F

1. Si $\kappa = 0$ alors f est une fonction constante.

   Donc pour tout $a \in E$ et $\forall x \in E$, $\|f(x) - f(a)\|_F = 0 < \epsilon$.

   $\Rightarrow$ f est uniformément continue.

2. Si $\kappa \neq 0$, alors posons $\eta = \epsilon/\kappa > 0$.

   Soit $a \in E$ et $x \in E$ tels que

$$\|x - a\|_E < \eta \quad \Rightarrow \quad \|f(x) - f(a)\|_F \leq \kappa \|x - a\|_E < \kappa\eta = \epsilon$$

On vient donc de montrer que

$$\forall \epsilon > 0,\ \exists \eta > 0,\ \forall a \in E,\ \forall x \in E,\ \Big(\ \|x - a\|_E < \eta \Longrightarrow \|f(x) - f(a)\|_F < \epsilon\Big)$$

$\Rightarrow$ f est uniformément continue.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 8 :

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ un EVN. Alors l'application $\|\cdot\|_E$ est 1-lipschitzienne de E dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Démonstration :

Propriété 8 :

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ un EVN. Alors l'application $\|\cdot\|_E$ est 1-lipschitzienne de E dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Démonstration :

f est donc ici l'application $\|\cdot\|_E$.

Il suffit donc de montrer que

$$\exists \kappa \geq 0,\ \forall x \in E,\ \forall y \in E,\ |\,\|x\|_E - \|y\|_E\,| \leq \kappa\,\|x - y\|_E$$

avec $\kappa = 1$.

Propriété 8 :

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ un EVN. Alors l'application $\|\cdot\|_E$ est 1-lipschitzienne de E dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Démonstration :

f est donc ici l'application $\|\cdot\|_E$.

Il suffit donc de montrer que

$$\exists \kappa \geq 0,\ \forall x \in E,\ \forall y \in E,\ \left|\, \|x\|_E - \|y\|_E \,\right| \leq \kappa \|x - y\|_E$$

avec $\kappa = 1$.

Or d'après la 2nd inégalité triangulaire

$$\forall x, y \in E,\ \left|\, \|x\|_E - \|y\|_E \,\right| \leq \|x - y\|_E$$

Propriété 8 :

Soit $(E, \|\cdot\|_E)$ un EVN. Alors l'application $\|\cdot\|_E$ est 1-lipschitzienne de E dans $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.

Démonstration :

f est donc ici l'application $\|\cdot\|_E$.

Il suffit donc de montrer que

$$\exists \kappa \geq 0,\ \forall x \in E,\ \forall y \in E,\ |\, \|x\|_E - \|y\|_E \,| \leq \kappa \|x - y\|_E$$

avec $\kappa = 1$.

Or d'après la 2nd inégalité triangulaire

$$\forall x, y \in E,\ |\, \|x\|_E - \|y\|_E \,| \leq \|x - y\|_E$$

CQFD.

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 2 : (théorème de Heine)

Toute application continue sur un compact y est uniformément continue

Théorème 3 : (Images réciproques d'ouverts, de fermés)

1. L'image réciproque d'un ouvert par une application continue est un ouvert.
2. L'image réciproque d'un fermé par une application continue est un fermé.

Théorème 4 : (Image directe d'un compact)

Soient $(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux EVN. Soit f une application continue de E dans F, alors l'image direct d'un compact de E par f est un compact de F.

Ph.D. Elian Masnada

Chapitre 4 :

Calcul différentiel du 1er ordre

Ph.D. Elian Masnada

objectif de ce chapitre

→ généraliser des notions que vous avez étudié dans le cas des applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

→ introduire rigoureusement des concepts que vous avez déjà utilisé en physique

Ph.D. Elian Masnada

objectif de ce chapitre

- ► généraliser des notions que vous avez étudié dans le cas des applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$
- ► introduire rigoureusement des concepts que vous avez déjà utilisé en physique

1. dérivée première $\longrightarrow$ dérivée partiel du premier ordre :

Chapitre 4 :

Calcul différentiel du 1er ordre

objectif de ce chapitre

→ généraliser des notions que vous avez étudié dans le cas des applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

→ introduire rigoureusement des concepts que vous avez déjà utilisé en physique

1. dérivée première $\longrightarrow$ dérivée partiel du premier ordre :

exemple

$$\begin{array}{cccc} f & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^3 \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(x+y, x^2-y^2, x^2y\right) \end{array}$$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (1, 2x, 2xy) \qquad \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (1, -2y, x^2)$$

Ph.D. Elian Masnada

Chapitre 4 :

Calcul différentiel du 1er ordre

objectif de ce chapitre

→ généraliser des notions que vous avez étudié dans le cas des applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

→ introduire rigoureusement des concepts que vous avez déjà utilisé en physique

1. dérivée première $\longrightarrow$ dérivée partiel du premier ordre :

exemple

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^3 \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \left(x+y, x^2-y^2, x^2y\right) \end{array}$$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (1, 2x, 2xy) \qquad \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (1, -2y, x^2)$$

On introduira également la notion de gradient

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

objectif de ce chapitre

→ généraliser des notions que vous avez étudié dans le cas des applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

→ introduire rigoureusement des concepts que vous avez déjà utilisé en physique

2. différentiabilité, différentielle, classe $\mathcal{C}^1$

exemple

$$dU(T_0, V_0) = \left.\frac{\partial U}{\partial T}\right|_{T_0,V_0} dT + \left.\frac{\partial U}{\partial V}\right|_{T_0,V_0} dV$$

3. Nous généraliserons la notion d'équation différentielle d'ordre 1 en introduisons les équations aux dérivées partielles du 1er ordre

exemple

$$\frac{\partial E_x(x,y,z)}{\partial x} + \frac{\partial E_y(x,y,z)}{\partial y} + \frac{\partial E_z(x,y,z)}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Définition 1 : (Dérivée partielle)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in \mathbb{R}^p$ et f une application de U dans F (où F est un EVN). Soit $(e_1, e_2, ..., e_p)$ la base canonique de $\mathbb{R}^p$. On dit dit que f admet une dérivée partielle première en a par rapport à la jème variable si, et seulement si, l'application

$$\phi_j = \begin{cases} D_j \to F \\ \quad t \mapsto f(a + te_j) \end{cases}$$

est dérivable en 0 avec $D_j = \{t \in \mathbb{R} \ / \ a + te_j \in U\}$. On a alors :

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \phi_j'(0) = \lim_{t \to 0} \frac{f(a + te_j) - f(a)}{t}$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 1 : (Dérivée partielle)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in \mathbb{R}^p$ et f une application de U dans F (où F est un EVN). Soit $(e_1, e_2, ..., e_p)$ la base canonique de $\mathbb{R}^p$. On dit dit que f admet une dérivée partielle première en a par rapport à la jème variable si, et seulement si, l'application

$$\phi_j = \begin{cases} D_j \to F \\ \quad t \mapsto f(a + te_j) \end{cases}$$

est dérivable en 0 avec $D_j = \{t \in \mathbb{R} \ / \ a + te_j \in U\}$. On a alors :

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \phi_j'(0) = \lim_{t \to 0} \frac{f(a + te_j) - f(a)}{t}$$

$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a$ $\Longleftrightarrow$ dérivée de f par rapport à la jème variable au point a (dit autrement on évalue cette dérivée au point a)

Autres notations : $\dfrac{\partial f(a)}{\partial x_j}$ $\quad \dfrac{\partial f}{\partial x_j}(a)$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit f l'application suivante

$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 3x^2 + xy - 2y^2 \end{array}$$

Exemple :

Soit f l'application suivante

$$\begin{array}{rcccl} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 3x^2 + xy - 2y^2 \end{array}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)} = \lim_{t\to 0} \frac{f\Big((x,y)+(t,0)\Big) - f(x,y)}{t}$$

Exemple :

Soit f l'application suivante

$$f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 3x^2 + xy - 2y^2 \end{array}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)} = \lim_{t \to 0} \frac{f\Big((x,y) + (t,0)\Big) - f(x,y)}{t}$$

$$= \lim_{t \to 0} \frac{f\Big(x+t, y\Big) - f(x,y)}{t}$$

Exemple :

Soit f l'application suivante

$$f : \begin{array}{ccl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x, y) & \mapsto & f(x, y) = 3x^2 + xy - 2y^2 \end{array}$$

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)} &= \lim_{t \to 0} \frac{f\Big((x, y) + (t, 0)\Big) - f(x, y)}{t} \\ &= \lim_{t \to 0} \frac{f\Big(x + t, y\Big) - f(x, y)}{t} \\ &= \lim_{t \to 0} \frac{3(x+t)^2 + (x+t)y - 2y^2 - 3x^2 - xy + 2y^2}{t} \end{aligned}$$

Chapitre 4 :

Calcul différentiel du 1er ordre

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit f l'application suivante

$$f \ : \ \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 3x^2 + xy - 2y^2 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)} &= \lim_{t\to 0} \frac{f\Big((x,y)+(t,0)\Big) - f(x,y)}{t} \\
&= \lim_{t\to 0} \frac{f\Big(x+t,y\Big) - f(x,y)}{t} \\
&= \lim_{t\to 0} \frac{3(x+t)^2 + (x+t)y - 2y^2 - 3x^2 - xy + 2y^2}{t} \\
&= \lim_{t\to 0} \frac{3t^2 + 6xt + ty}{t} = \lim_{t\to 0} \left(3t + 6x + y\right) = 6x + y
\end{aligned}$$

Exemple :

Soit f l'application suivante

$$f : \begin{array}{ccl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 3x^2 + xy - 2y^2 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)} &= \lim_{t\to 0} \frac{f\Big((x,y)+(t,0)\Big) - f(x,y)}{t} \\
&= \lim_{t\to 0} \frac{f\Big(x+t,y\Big) - f(x,y)}{t} \\
&= \lim_{t\to 0} \frac{3(x+t)^2 + (x+t)y - 2y^2 - 3x^2 - xy + 2y^2}{t} \\
&= \lim_{t\to 0} \frac{3t^2 + 6xt + ty}{t} = \lim_{t\to 0} \big(3t + 6x + y\big) = 6x + y
\end{aligned}$$

Ce qui est bien équivalent à fixer y et à dériver par rapport à x :

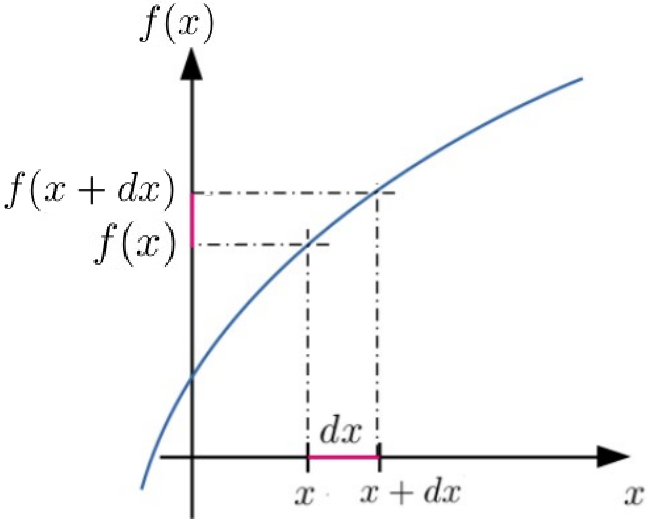
$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)} = 6x + y$$

Signification graphique :

Rappel : dérivée en x

variation de f en x

$$\lim_{dx \to 0} \frac{f(x+dx) - f(x)}{dx} = f'(x)$$

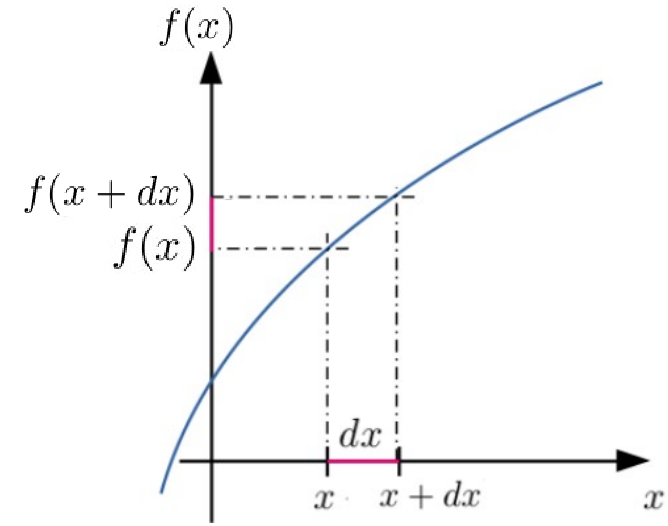


Signification graphique :

Rappel : dérivée en x

variation de f en x

$$\lim_{dx \to 0} \frac{f(x+dx) - f(x)}{dx} = f'(x)$$



Supposons maintenant que l'on a une fonction f de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$

On peut alors étudier les variations de f en (x, y)

dans la direction x (en fixant y)

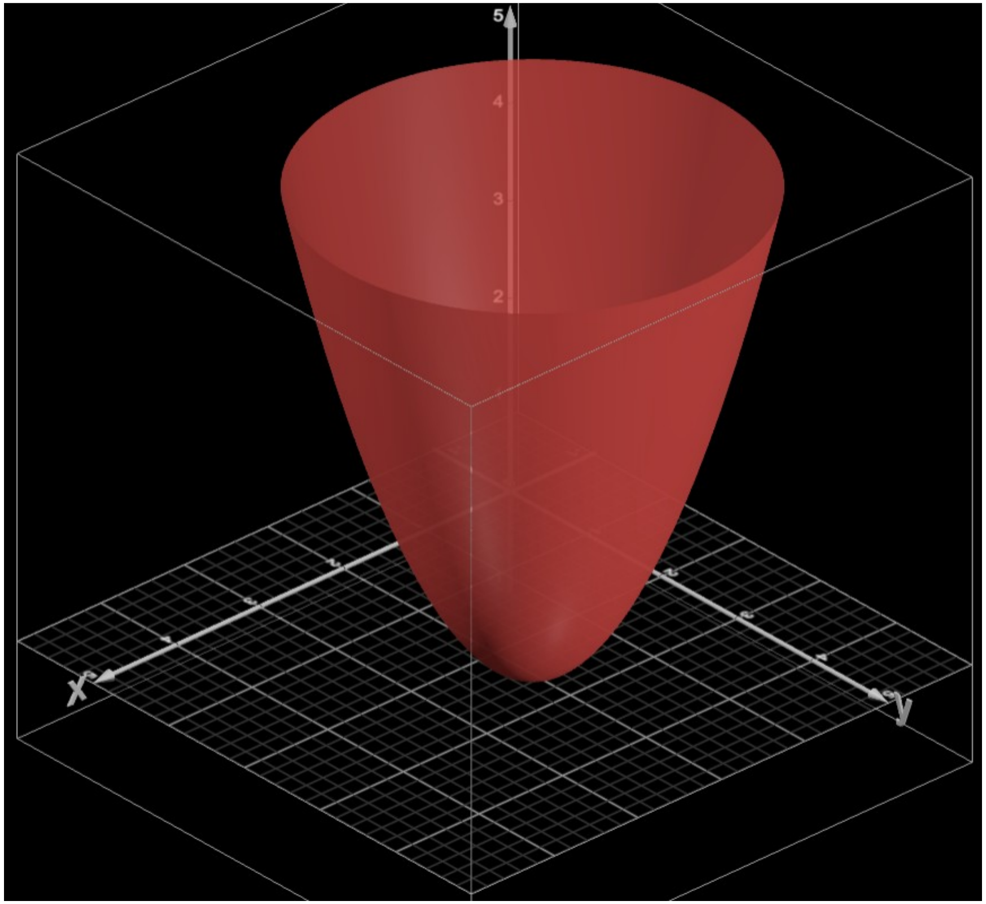
$$\lim_{dx \to 0} \frac{f(x+dx, y) - f(x, y)}{dx} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$$

dans la direction y (en fixant x)

$$\lim_{dy \to 0} \frac{f(x, y+dy) - f(x, y)}{dy} = \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{(x,y)}$$

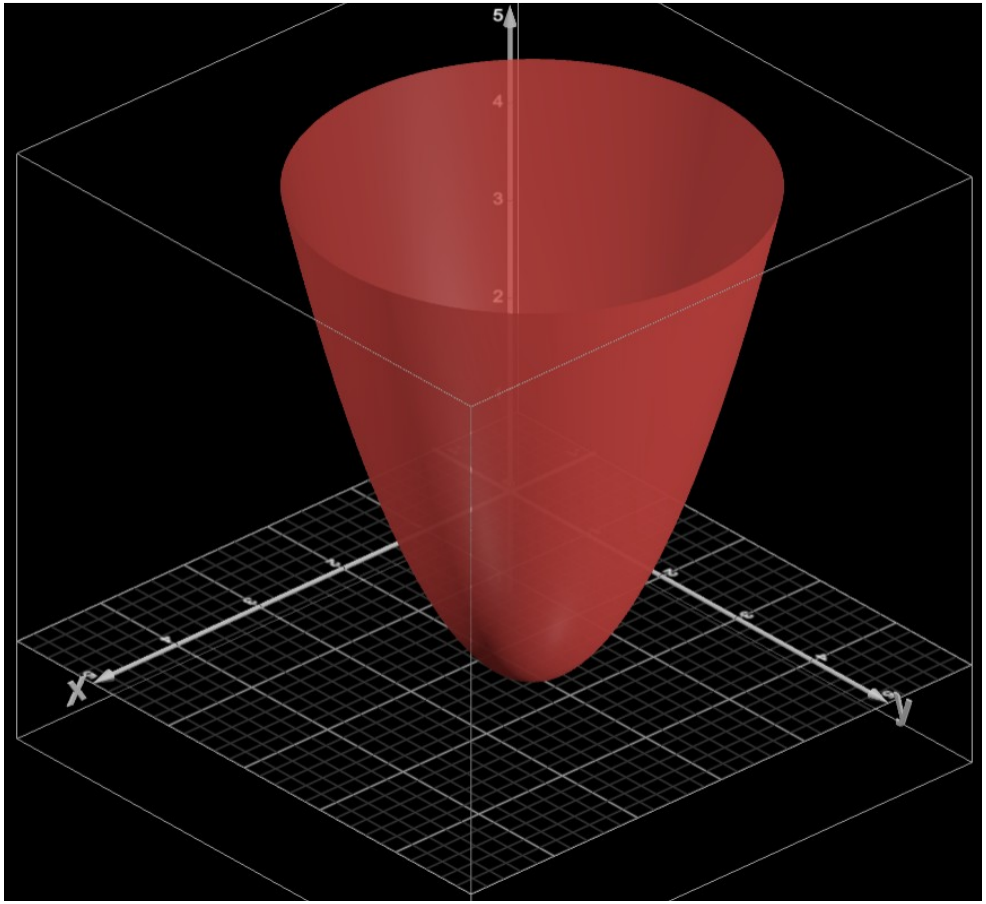
dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\displaystyle\lim_{dx\to 0} \frac{f(x+dx,y)-f(x,y)}{dx} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$

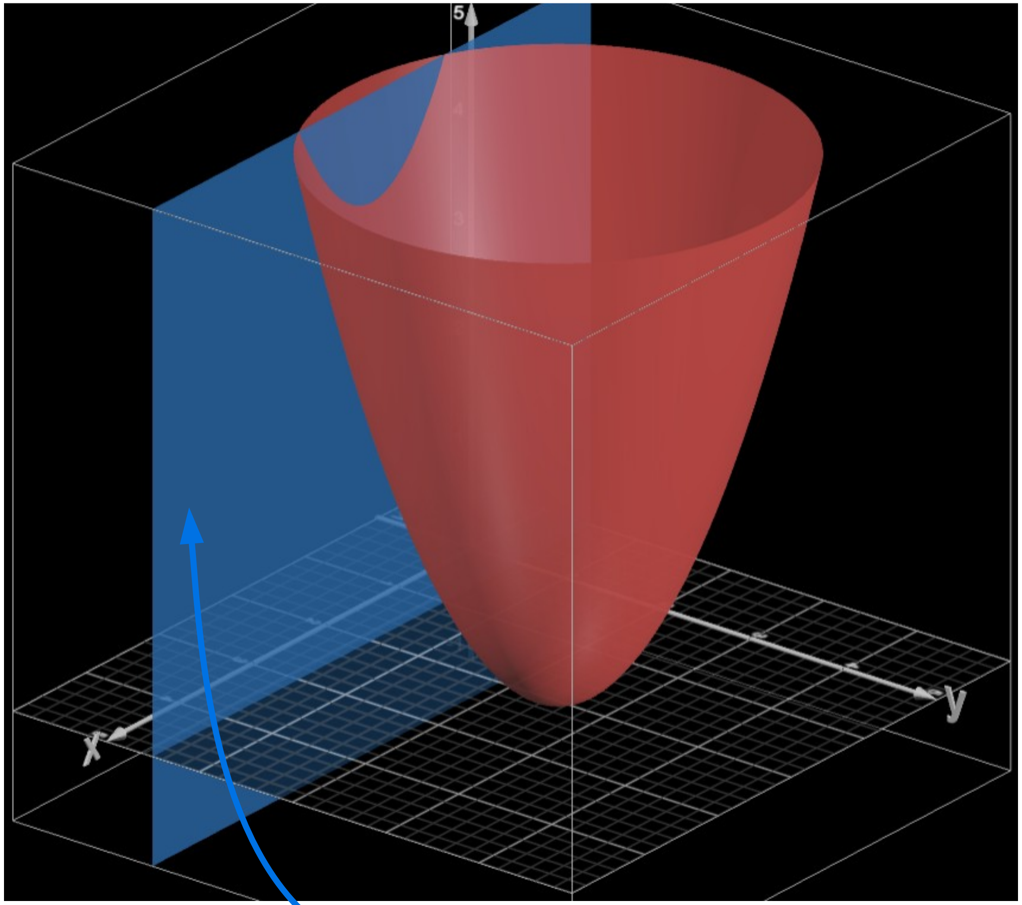


dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\lim\limits_{dx \to 0} \dfrac{f(x+dx,y)-f(x,y)}{dx} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$



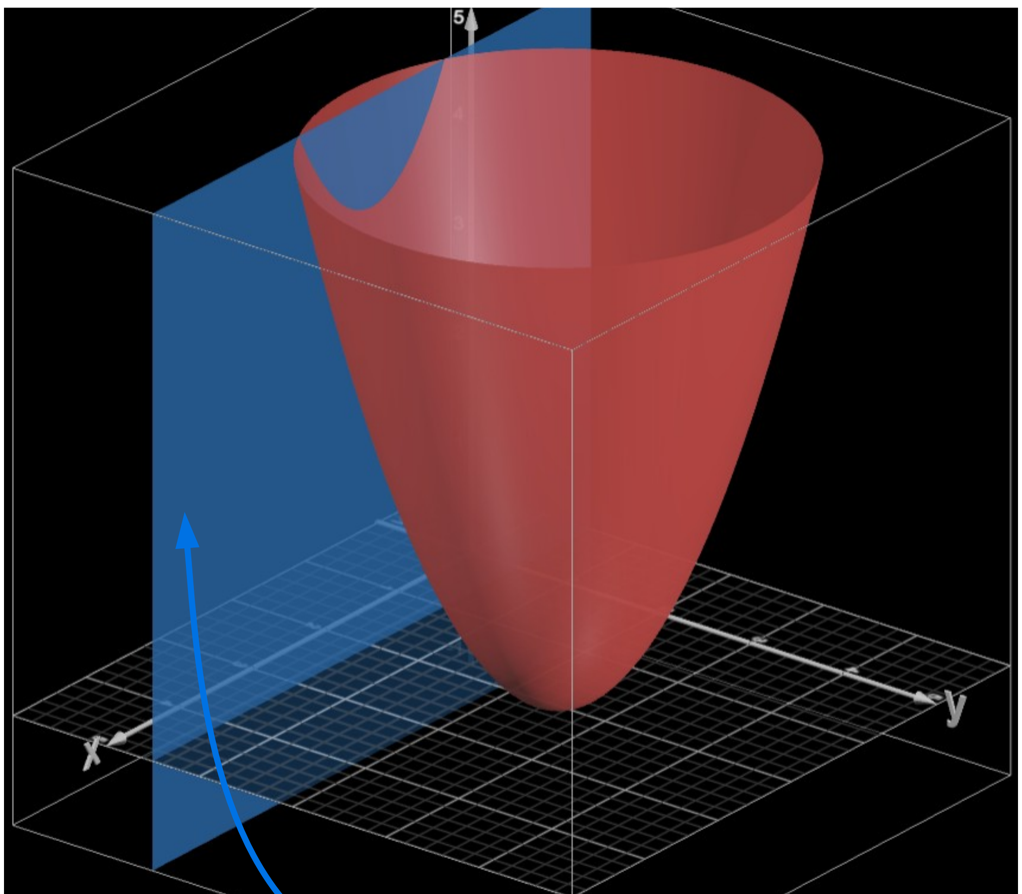
$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$



$y = 0.5$

dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\displaystyle\lim_{dx\to 0} \frac{f(x+dx,y)-f(x,y)}{dx} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

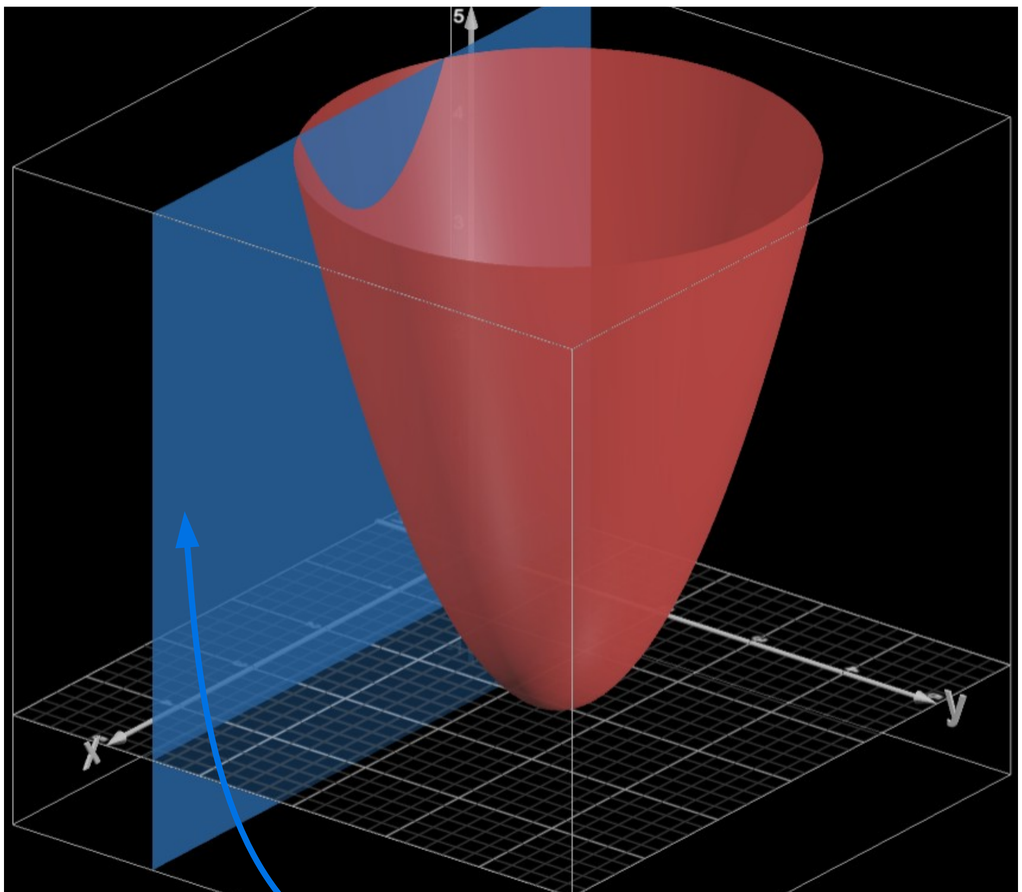
$$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$$



$y = 0.5$

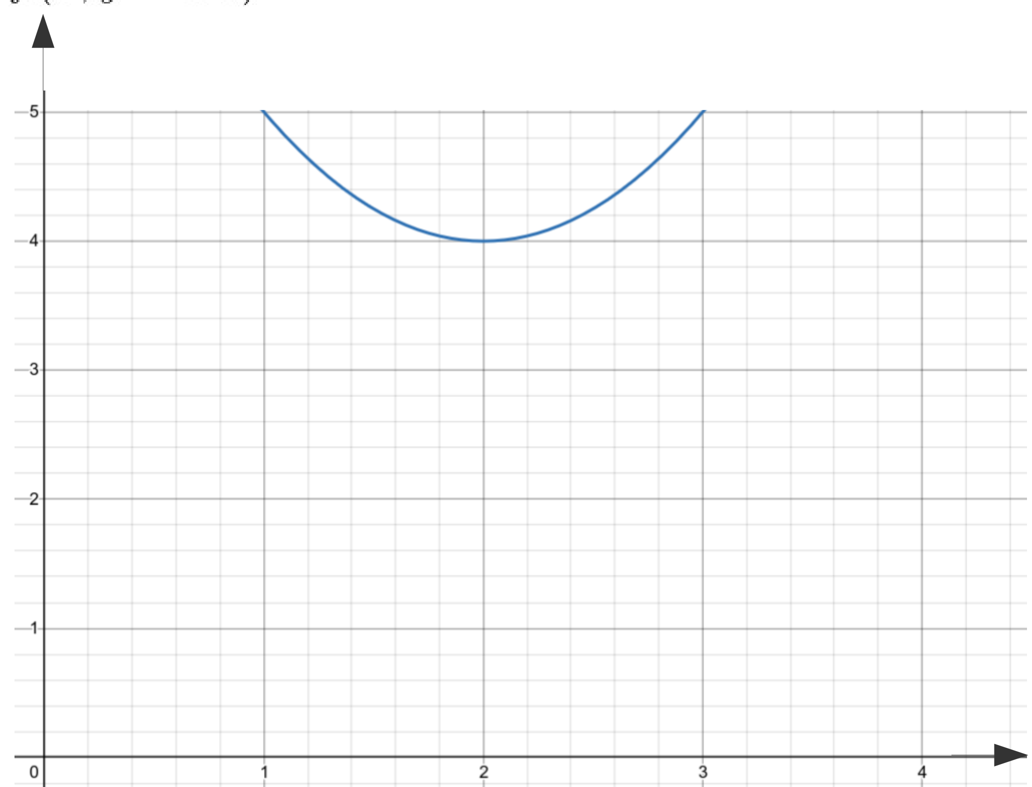
dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\displaystyle\lim_{dx\to 0}\frac{f(x+dx,y)-f(x,y)}{dx}=\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

$f(x,y)=(x-2)^2+(y-2.5)^2$



$y = 0.5$

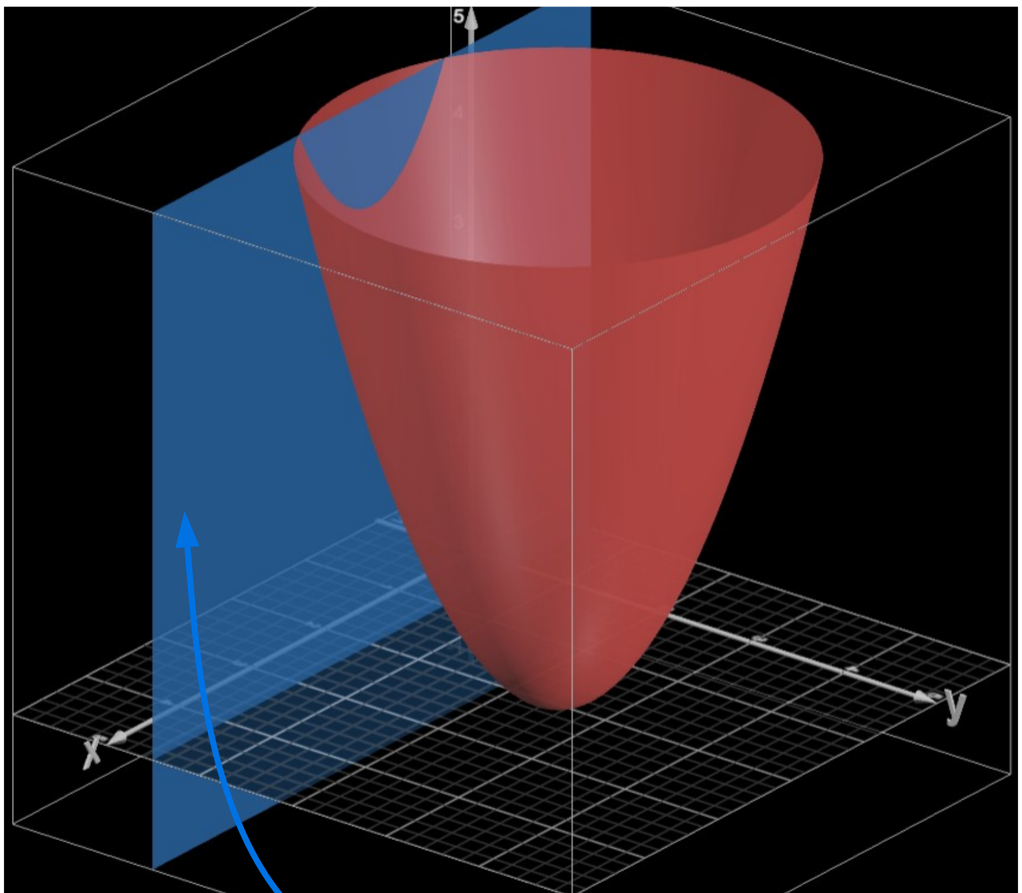
$f(x, y = 0.5)$



x

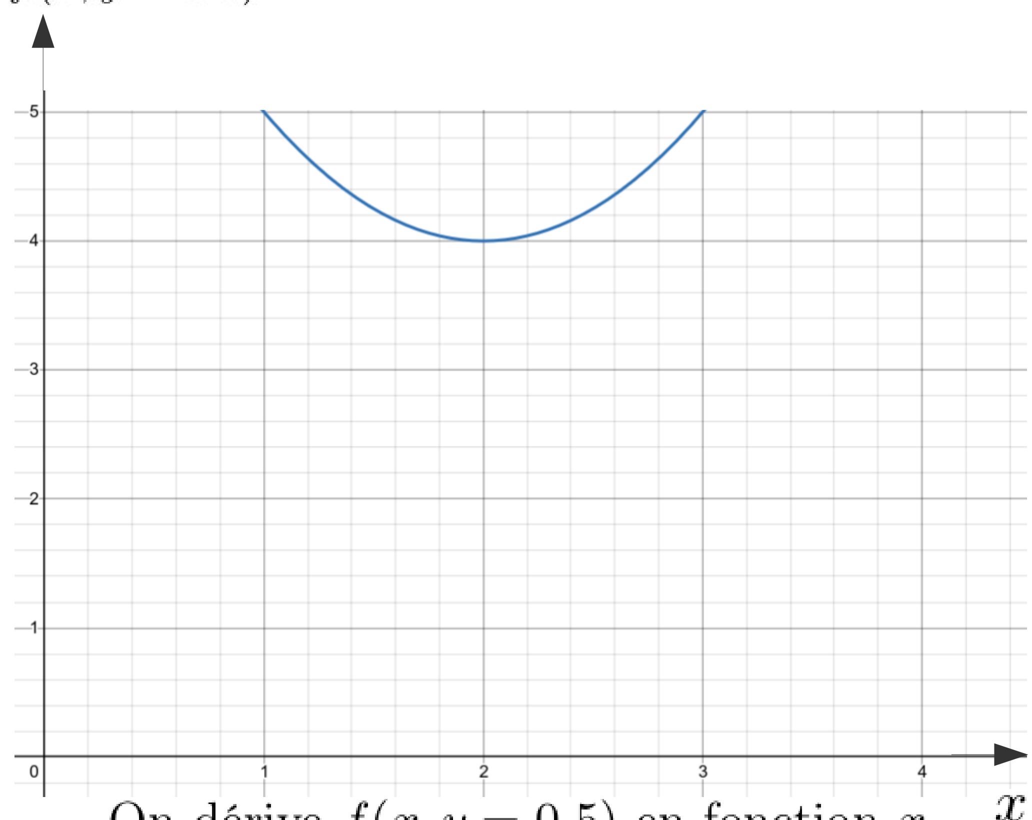
dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\displaystyle \lim_{dx \to 0} \frac{f(x+dx, y) - f(x,y)}{dx} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$



$y = 0.5$

$f(x, y = 0.5)$



On dérive $f(x, y = 0.5)$ en fonction x

$$f'(x, y = 0.5) = \frac{\partial f}{\partial x}$$

dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\displaystyle\lim_{dx\to 0}\frac{f(x+dx,y)-f(x,y)}{dx} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

$$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$$

dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\displaystyle\lim_{dx\to 0} \frac{f(x+dx,y)-f(x,y)}{dx} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

$$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$$

Ainsi, techniquement parlant, $\frac{\partial f}{\partial x}$ revient à dériver f par rapport à x en considérant y fixé

dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\displaystyle\lim_{dx\to 0} \frac{f(x+dx,y)-f(x,y)}{dx} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

$$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$$

Ainsi, techniquement parlant, $\frac{\partial f}{\partial x}$ revient à dériver f par rapport à x en considérant y fixé

si y fixé, alors la dérivée
par rapport à x est nulle

la dérivée par rapport à
x de ce terme est

$$2(x-2)$$

dans la direction x (en fixant y) $\longrightarrow$ $\displaystyle\lim_{dx\to 0} \frac{f(x+dx,y)-f(x,y)}{dx} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)}$

$$f(x,y) = (x-2)^2 + (y-2.5)^2$$

Ainsi, techniquement parlant, $\frac{\partial f}{\partial x}$ revient à dériver f par rapport à x en considérant y fixé

si y fixé, alors la dérivée par rapport à x est nulle

la dérivée par rapport à x de ce terme est

$$2(x-2)$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(x,y)} = 2(x-2)$$

Propriété 1 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de $U \to \mathbb{R}^n$. f admet une dérivée première par rapport à la jème variable ($j \in [\![1;p]\!]$) si, et seulement si, pour $\forall i \in [\![1;n]\!]$, $\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a$ est définie. Dans ce cas, on a

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \left(\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_a ; \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_a ; \ldots ; \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_a \right)$$

Démonstration :

Propriété 1 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de $U \to \mathbb{R}^n$. f admet une dérivée première par rapport à la jème variable ($j \in [\![1;p]\!]$) si, et seulement si, pour $\forall i \in [\![1;n]\!]$, $\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a$ est définie. Dans ce cas, on a

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \left(\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_a ; \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_a ; \ldots ; \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_a \right)$$

Démonstration : Soit f une application de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$.

Propriété 1 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de $U \to \mathbb{R}^n$. f admet une dérivée première par rapport à la jème variable ($j \in [\![1;p]\!]$) si, et seulement si, pour $\forall i \in [\![1;n]\!]$, $\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a$ est définie. Dans ce cas, on a

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \left(\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_a \ ; \ \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_a \ ; \ \ldots \ ; \ \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_a \right)$$

Démonstration : Soit f une application de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$.

Alors en toute généralité cette application peut s'écrire

$$\begin{array}{rccl} f \ : & U \subset \mathbb{R}^p & \to & \mathbb{R}^n \\ & (x_1, \ldots, x_p) & \mapsto & f(x_1, \ldots, x_p) = \big(f_1(x_1, \ldots, x_p) \ ; \ \ldots \ ; \ f_n(x_1, \ldots, x_p)\big) \end{array}$$

CY TECH

Chapitre 4 :

Calcul différentiel du 1er ordre

Propriété 1 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de $U \to \mathbb{R}^n$. f admet une dérivée première par rapport à la jème variable ($j \in [\![1;p]\!]$) si, et seulement si, pour $\forall i \in [\![1;n]\!]$, $\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a$ est définie. Dans ce cas, on a

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \left(\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \dots \; ; \; \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_a \right)$$

Démonstration : Soit f une application de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$.

Alors en toute généralité cette application peut s'écrire

$$\begin{array}{rccl} f \; : & U \subset \mathbb{R}^p & \to & \mathbb{R}^n \\ & (x_1, \dots, x_p) & \mapsto & f(x_1, \dots, x_p) = \big(f_1(x_1, \dots, x_p) \; ; \; \dots \; ; \; f_n(x_1, \dots, x_p) \big) \end{array}$$

applications composantes de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}$

Propriété 1 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de $U \to \mathbb{R}^n$. f admet une dérivée première par rapport à la jème variable ($j \in [\![1;p]\!]$) si, et seulement si, pour $\forall i \in [\![1;n]\!]$, $\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a$ est définie. Dans ce cas, on a

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \left(\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \dots \; ; \; \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_a \right)$$

Démonstration : Soit f une application de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$.

Alors en toute généralité cette application peut s'écrire

$$\begin{array}{rccl} f \; : & U \subset \mathbb{R}^p & \to & \mathbb{R}^n \\ & (x_1, \dots, x_p) & \mapsto & f(x_1, \dots, x_p) = \big(f_1(x_1, \dots, x_p) \; ; \; \dots \; ; \; f_n(x_1, \dots, x_p) \big) \end{array}$$

applications composantes de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}$

dérivée par rapport à x_j :

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \lim_{t \to 0} \frac{f(a + te_j) - f(a)}{t}$$

Chapitre 4 :

Calcul différentiel du 1er ordre

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 1 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de $U \to \mathbb{R}^n$. f admet une dérivée première par rapport à la jème variable ($j \in [\![1;p]\!]$) si, et seulement si, pour $\forall i \in [\![1;n]\!]$, $\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a$ est définie. Dans ce cas, on a

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \left(\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \ldots \; ; \; \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_a \right)$$

Démonstration : Soit f une application de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$.

Alors en toute généralité cette application peut s'écrire

$$\begin{array}{cccl} f \; : & U \subset \mathbb{R}^p & \to & \mathbb{R}^n \\ & (x_1, \ldots, x_p) & \mapsto & f(x_1, \ldots, x_p) = \big(f_1(x_1, \ldots, x_p) \; ; \; \ldots \; ; \; f_n(x_1, \ldots, x_p)\big) \end{array}$$

applications composantes de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}$

dérivée par rapport à x_j :

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a &= \lim_{t \to 0} \frac{f(a + te_j) - f(a)}{t} \\ &= \lim_{t \to 0} \left(\frac{f_1(a + te_j) - f_1(a)}{t} \; ; \; \ldots \; ; \; \frac{f_n(a + te_j) - f_n(a)}{t} \right) \end{aligned}$$

<u>Propriété 1</u> :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de $U \to \mathbb{R}^n$. f admet une dérivée première par rapport à la jème variable ($j \in [\![1;p]\!]$) si, et seulement si, pour $\forall i \in [\![1;n]\!]$, $\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a$ est définie. Dans ce cas, on a

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \left(\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \ldots \; ; \; \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_a \right)$$

Démonstration : Soit f une application de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$.

Alors en toute généralité cette application peut s'écrire

$$\begin{array}{rccl} f \;:\; & U \subset \mathbb{R}^p & \to & \mathbb{R}^n \\ & (x_1, \ldots, x_p) & \mapsto & f(x_1, \ldots, x_p) = \big(f_1(x_1, \ldots, x_p) \; ; \; \ldots \; ; \; f_n(x_1, \ldots, x_p)\big) \end{array}$$

applications composantes de $U \subset \mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}$

dérivée par rapport à x_j :

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a &= \lim_{t \to 0} \frac{f(a + te_j) - f(a)}{t} \\ &= \lim_{t \to 0} \left(\frac{f_1(a + te_j) - f_1(a)}{t} \; ; \; \ldots \; ; \; \frac{f_n(a + te_j) - f_n(a)}{t} \right) \\ &= \left(\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right|_a \; ; \; \ldots \; ; \; \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_j}\right|_a \right) \end{aligned}$$

Définition 2 : (Fonction différentiable)

Soit U un ouvert de $(\mathbb{R}^p, \|\cdot\|_p)$. Soit $a \in U$. Soit f une application de U dans $(F, \|\cdot\|_F)$. Soit U_0 l'ensemble définie par

$$U_0 = \{h \in \mathbb{R}^p \ / \ a + h \in U\}$$

On dit que f est différentiable en a si, et seulement si, il existe une **application linéaire** l de $\mathbb{R}^p$ dans F et une application ϵ de U_0 dans F telles que :

1. $\lim\limits_{h \to 0_{\mathbb{R}^p}} \epsilon(h) = 0_F$
2. $\forall h \in U_0, \ f(a+h) = f(a) + l(h) + \|h\|_p \, \epsilon(h)$

Le second point est le développement limité à l'ordre 1 de f en a. On dit que f est différentiable sur U si, et seulement si, f est différentiable en tout point de U.

Ph.D. Elian Masnada

$$\lim_{h \to 0_{\mathbb{R}^p}} \epsilon(h) = 0_F$$

$$\forall h \in U_0,\ f(a+h) = f(a) + l(h) + \|h\|_p \epsilon(h)$$

Théorème 1 : (différentielle)

Soit U un ouvert de $E = (\mathbb{R}^p, \|\cdot\|_E)$. Soit $a \in U$. Soit f une application de U dans $(F, \|\cdot\|_F)$. Si f est différentiable en a alors l'application l est unique. Cette application est appelé différentielle de f en a et est notée $D_a f$.

Démonstration : voir polycopié

Propriété 2 :

Toute application linéaire ϕ de $\mathbb{R}^p$ dans un EVN quelconque F est différentiable et pour $\forall a \in \mathbb{R}^p$, $D_a\phi = \phi$

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 2 :

Toute application linéaire ϕ de $\mathbb{R}^p$ dans un EVN quelconque F est différentiable et pour $\forall a \in \mathbb{R}^p$, $D_a\phi = \phi$

Démonstration :

ϕ est linéaire.

Propriété 2 :

Toute application linéaire ϕ de $\mathbb{R}^p$ dans un EVN quelconque F est différentiable et pour $\forall a \in \mathbb{R}^p$, $D_a\phi = \phi$

Démonstration :

ϕ est linéaire.

Donc, $\forall a, h \in \mathbb{R}^p$, on a

$$\phi(a+h) = \phi(a) + \phi(h) + 0_F$$

Propriété 2 :

Toute application linéaire ϕ de $\mathbb{R}^p$ dans un EVN quelconque F est différentiable et pour $\forall a \in \mathbb{R}^p$, $D_a\phi = \phi$

Démonstration :

ϕ est linéaire.

Donc, $\forall a, h \in \mathbb{R}^p$, on a

$$\phi(a+h) = \phi(a) + \phi(h) + 0_F$$

on a donc juste à poser que $D_a\phi = \phi$ et $\epsilon(h) = 0_F$

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rcccl} D_a f & : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & & h = (h_1, \ldots, h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

Démonstration :

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rccl} D_a f & : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

Démonstration : Etudions tout d'abord les dérivées

$$\forall j \in [\![1;p]\!] \;:\; \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \lim_{t \to 0} \frac{f(a + te_j) - f(a)}{t}$$

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rccl} D_a f & : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

Démonstration : Etudions tout d'abord les dérivées

$$\forall j \in [\![1;p]\!] \ : \ \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \lim_{t \to 0} \frac{f(a+te_j) - f(a)}{t}$$

f est différentiable par hypothèse. Il existe donc une différentielle $D_a f$ telle que

$$f(a+te_j) = f(a) + D_a f(te_j) + \|te_j\| \, \epsilon(te_j)$$

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rcccl} D_a f & : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^p h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

Démonstration : Etudions tout d'abord les dérivées

$$\forall j \in [\![1;p]\!] \ : \ \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \lim_{t\to 0} \frac{f(a+te_j) - f(a)}{t}$$

f est différentiable par hypothèse. Il existe donc une différentielle $D_a f$ telle que

$$f(a+te_j) = f(a) + D_a f(te_j) + \|te_j\| \, \epsilon(te_j)$$

$$\Rightarrow \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \lim_{t\to 0} \frac{D_a f(te_j) + \|te_j\| \, \epsilon(te_j)}{t} = \lim_{t\to 0} \Big(D_a f(e_j) + \|e_j\| \, \epsilon(te_j)\Big)$$

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rccl} D_af & : & \mathbb{R}^p & \to F \\ & & h=(h_1,...,h_p) & \mapsto D_af(h)=\sum_{i=1}^p h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

Démonstration : Etudions tout d'abord les dérivées

$$\forall j \in [\![1;p]\!] \ : \ \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \lim_{t\to 0} \frac{f(a+te_j)-f(a)}{t}$$

f est différentiable par hypothèse. Il existe donc une différentielle D_af telle que

$$f(a+te_j)=f(a)+D_af(te_j)+\|te_j\|\,\epsilon(te_j)$$

$$\Rightarrow \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = \lim_{t\to 0}\frac{D_af(te_j)+\|te_j\|\,\epsilon(te_j)}{t} = \lim_{t\to 0}\Big(D_af(e_j)+\|e_j\|\,\epsilon(te_j)\Big)$$

$$\Rightarrow \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = D_af(e_j)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rcccl} D_a f & : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = D_a f(e_j)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rccl} D_a f & : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = D_a f(e_j)$$

Prenons donc $h = (h_1, h_2, ..., h_p) = \displaystyle\sum_{i=1}^{p} h_i e_i$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rccl} D_a f & : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = D_a f(e_j)$$

Prenons donc $h = (h_1, h_2, ..., h_p) = \sum_{i=1}^{p} h_i e_i$

Alors par linéarité de $D_a f$ on a

$$D_a f(h) = D_a f(\sum_{i=1}^{p} h_i e_i)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rccl} D_a f & : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^p h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = D_a f(e_j)$$

Prenons donc $h = (h_1, h_2, ..., h_p) = \sum_{i=1}^{p} h_i e_i$

Alors par linéarité de $D_a f$ on a

$$D_a f(h) = D_a f(\sum_{i=1}^{p} h_i e_i) = \sum_{i=1}^{p} h_i D_a f(e_i)$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 3 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$ et f une application de $U \to F$. Si f est différentiable en a, alors, ses dérivées partielles premières par rapport à toutes ses variables sont définies en a et sa différentielle en ce point est donnée par

$$\begin{array}{rccl} D_a f \ : & \mathbb{R}^p & \to & F \\ & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & D_a f(h) = \sum_{i=1}^p h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \end{array}$$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = D_a f(e_j)$$

Prenons donc $h = (h_1, h_2, ..., h_p) = \sum_{i=1}^{p} h_i e_i$

Alors par linéarité de $D_a f$ on a

$$D_a f(h) = D_a f(\sum_{i=1}^{p} h_i e_i) = \sum_{i=1}^{p} h_i D_a f(e_i)$$

$$D_a f(h) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a$$

Ph.D. Elian Masnada

Interprétation de la différentielle et Lien avec la physique (voir TD)

$D_a f(h)$ correspond à la variation de la fonction f au point a lorsque l'on se déplace du vecteur h à partir du point a (lorsque h tend vers 0)

$$\forall h \in U_0,\ f(a+h) = f(a) + D_a f(h) + \|h\|_E\, \epsilon(h)$$
$$\text{avec } \lim_{h \to 0} \epsilon(h) = 0_F$$

Soit U l'énergie interne d'un système.

U dépend de la température et du volume par exemple

$$\Longrightarrow U(T, V)$$

La différentielle de U au point(T_0, V_0) est

$$dU(T_0, V_0) = \left.\frac{\partial U}{\partial T}\right|_{T_0, V_0} dT + \left.\frac{\partial U}{\partial V}\right|_{T_0, V_0} dV$$

Ph.D. Elian Masnada

Interprétation de la différentielle et Lien avec la physique (voir TD)

$$D_a f(h) = \sum_{i=1}^p h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \quad \text{avec} \quad \begin{array}{ccc} U & \longrightarrow & f \\ (T,V) & \longrightarrow & (x_1,x_2) \\ (T_0,V_0) & \longrightarrow & a \\ dU & \longrightarrow & D_a f \\ (dT,dV) & \longrightarrow & h=(h_1,h_2) \end{array}$$

$$dU(T_0,V_0) = \left.\frac{\partial U}{\partial T}\right|_{T_0,V_0} dT + \left.\frac{\partial U}{\partial V}\right|_{T_0,V_0} dV$$

variation d'énergie interne U lorsque

$$\begin{cases} \text{la température passe de } T_0 \text{ à } T_0 + dT \\ \text{et le volume passe de } V_0 \text{ à } V_0 + dV \end{cases}$$

Propriété 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de $U \to F$. Alors si f est différentiable en a, alors f est continue en a.

Démonstration :

Propriété 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de $U \to F$. Alors si f est différentiable en a, alors f est continue en a.

Démonstration :

Rappel :

f différentiable en a

$$\Longleftrightarrow \begin{cases} \forall h = (h_1, \ldots, h_p) \in U_0 \text{ avec } U_0 = \{h \in \mathbb{R}^p \ / \ a + h \in U\} \\ f(a+h) = f(a) + \displaystyle\sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \, \epsilon(h) \end{cases}$$

Propriété 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de $U \to F$. Alors si f est différentiable en a, alors f est continue en a.

Démonstration :

Rappel :

f différentiable en a

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \forall h = (h_1, ..., h_p) \in U_0 \text{ avec } U_0 = \{h \in \mathbb{R}^p \ / \ a + h \in U\} \\ f(a+h) = f(a) + \displaystyle\sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \, \epsilon(h) \end{cases}$$

En prenant la norme de l'expression précédente

$$\|f(a+h) - f(a)\|_F = \left\| \sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \, \epsilon(h) \right\|_F$$

Propriété 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de $U \to F$. Alors si f est différentiable en a, alors f est continue en a.

Démonstration :

Rappel :

f différentiable en a

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \forall h = (h_1, ..., h_p) \in U_0 \text{ avec } U_0 = \{h \in \mathbb{R}^p \ / \ a + h \in U\} \\ f(a+h) = f(a) + \displaystyle\sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \, \epsilon(h) \end{cases}$$

En prenant la norme de l'expression précédente

$$\|f(a+h) - f(a)\|_F = \left\| \sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \, \epsilon(h) \right\|_F \leq \left\| \sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \right\|_F + \| \|h\|_E \, \epsilon(h)\|_F$$

Propriété 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de $U \to F$. Alors si f est différentiable en a, alors f est continue en a.

Démonstration :

Rappel :

f différentiable en a $\Longleftrightarrow$ $\begin{cases} \forall h = (h_1, ..., h_p) \in U_0 \text{ avec } U_0 = \{h \in \mathbb{R}^p \;/\; a + h \in U\} \\ f(a+h) = f(a) + \displaystyle\sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \,\epsilon(h) \end{cases}$

En prenant la norme de l'expression précédente

$$\|f(a+h) - f(a)\|_F = \left\| \sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \,\epsilon(h) \right\|_F \leq \left\| \sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \right\|_F + \| \|h\|_E \,\epsilon(h)\|_F$$

$$\leq \sum_{j=1}^{p} |h_j| \left| \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \right| + \|h\|_E \,\|\epsilon(h)\|_F \longrightarrow 0_F$$

Propriété 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $a \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de $U \to F$. Alors si f est différentiable en a, alors f est continue en a.

Démonstration :

Rappel :

f différentiable en a

$$\Longleftrightarrow \begin{cases} \forall h = (h_1, ..., h_p) \in U_0 \text{ avec } U_0 = \{h \in \mathbb{R}^p \ / \ a + h \in U\} \\ f(a+h) = f(a) + \displaystyle\sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \, \epsilon(h) \end{cases}$$

En prenant la norme de l'expression précédente

$$\|f(a+h) - f(a)\|_F = \left\| \sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \|h\|_E \, \epsilon(h) \right\|_F \leq \left\| \sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \right\|_F + \| \|h\|_E \, \epsilon(h) \|_F$$

$$\leq \sum_{j=1}^{p} |h_j| \left| \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a \right| + \|h\|_E \, \|\epsilon(h)\|_F \longrightarrow 0_F$$

$$\Rightarrow \lim_{h \to 0_E} f(a+h) = f(a)$$

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x, y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x, y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1, h_2)\|} \left(f\left(x+h_1, y+h_2\right) - f(x, y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} \right) = 0_F \longleftrightarrow (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration :

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x, y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x, y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1, h_2)\|} \left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x, y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} \right) = 0_F \longleftrightarrow (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration : Etape 1 : f différentiable $\Rightarrow$ (1) ?

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x,y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x,y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right)=0_F \longleftrightarrow (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration : Etape 1 : f différentiable $\Longrightarrow$ (1) ?

f est différentiable au point (x,y)

$$\Longleftrightarrow \quad f(x+h_1,y+h_2)=f(x,y)+h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}+h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}+\|(h_1,h_2)\|\,\epsilon(h_1,h_2)$$

avec $\lim\limits_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \epsilon(h_1,h_2)=0_F$

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x,y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x,y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F \quad \longleftrightarrow \quad (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration : Etape 1 : f différentiable $\Longrightarrow$ (1) ?

f est différentiable au point (x,y)

$$\Longleftrightarrow \quad f(x+h_1,y+h_2) = f(x,y)+h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}+h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}+\|(h_1,h_2)\|\,\epsilon(h_1,h_2)$$

avec $\displaystyle\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \epsilon(h_1,h_2) = 0_F$

$$\frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right)$$

$$= \epsilon(h_1,h_2)$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x,y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x,y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F \quad \longleftrightarrow \quad (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration : Etape 1 : f différentiable $\Longrightarrow$ (1) ?

f est différentiable au point (x,y)

$$\Longleftrightarrow \quad f(x+h_1,y+h_2) = f(x,y)+h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}+h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}+\|(h_1,h_2)\|\,\epsilon(h_1,h_2)$$
avec $\displaystyle\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \epsilon(h_1,h_2) = 0_F$

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right)$$
$$= \lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \epsilon(h_1,h_2) = 0_F$$

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x, y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x, y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x,y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F \longleftrightarrow (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration : Etape 2 : (1) $\Rightarrow$ f différentiable ?

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x, y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x, y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1, h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x, y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F \quad \longleftrightarrow \quad (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration : Etape 2 : (1) $\Rightarrow$ f différentiable ?

Par hypothèse

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1, h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x, y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x, y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x, y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1, h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x, y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F \longleftrightarrow (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration : Etape 2 : (1) $\Rightarrow$ f différentiable ?

Par hypothèse

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1, h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x, y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

posons

$$\epsilon(h_1, h_2) = \frac{1}{\|(h_1, h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x, y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right)$$

Théorème 2 : (Différentiabilité sur $\mathbb{R}^2$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Soit $(x, y) \in U$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Et enfin, soit f une application de U dans F. Alors f est différentiable en (x, y), si, et seulement si

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x,y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F \quad \longleftrightarrow \quad (1)$$

Où la norme utilisée n'a pas d'influence sur le résultat final.

Démonstration : Etape 2 : (1) $\Rightarrow$ f différentiable ?

Par hypothèse

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x,y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

posons

$$\epsilon(h_1,h_2) = \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1, y+h_2) - f(x,y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right)$$

il ne reste plus qu'à réarranger les termes

$$f(x+h_1, y+h_2) = f(x,y) + h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} + h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} + \|(h_1,h_2)\|\, \epsilon(h_1,h_2)$$

Dénition 3 : (Fonction de classe $\mathcal{C}^1$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de U dans F. Alors f est dite de classe $\mathcal{C}^1$ sur U si, et seulement si, toutes les fonctions dérivées partielles premières de f sont définies et continues en tout point $a \in U$. On note $\mathcal{C}^1(U, F)$ l'ensemble des applications de U dans F de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.

Dénition 3 : (Fonction de classe $\mathcal{C}^1$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de U dans F. Alors f est dite de classe $\mathcal{C}^1$ sur U si, et seulement si, toutes les fonctions dérivées partielles premières de f sont définies et continues en tout point $a \in U$. On note $\mathcal{C}^1(U, F)$ l'ensemble des applications de U dans F de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.

Propriété 5 :

Toute application ϕ linéaire de $\mathbb{R}^p$ dans F est de classe $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^p$.

Démonstration : Soit $\{e_i\}$ la base canonique de $\mathbb{R}^p$.

Alors, si $a \in \mathbb{R}^p$: $\left.\dfrac{\partial \phi}{\partial x_i}\right|_a = \lim\limits_{t \to 0} \left(\dfrac{\phi(a + te_i) - \phi}{t} \right) = \lim\limits_{t \to 0} \phi \left(\dfrac{a + te_i - a}{t} \right) = \phi(e_i)$

$\Rightarrow$ pour tout $i \in [\![1, p]\!]$, les dérivées partielles sont définies.

De plus, la fonction $\dfrac{\partial \phi}{\partial x_i} : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^p & \to & F \\ a & \mapsto & \left.\dfrac{\partial \phi}{\partial x_i}\right|_a = \phi(e_i) \end{array}$ continue

Théorème 3 :

Soit U un ouvert de $E = \mathbb{R}^p$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de U dans F. Si f est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U, alors

1. f est différentiable sur U.
2. f est continue sur U.

Démonstration :

Théorème 3 :

Soit U un ouvert de $E = \mathbb{R}^p$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de U dans F. Si f est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U, alors

1. f est différentiable sur U.
2. f est continue sur U.

Démonstration :

1. Admis
2. Si f est $\mathcal{C}^1$ alors f est différentiable sur U

f est différentiable sur U $\Rightarrow$ f est continue sur U (propriété 4)

Théorème 3 :

Soit U un ouvert de $E = \mathbb{R}^p$. Soit $(F, \|\cdot\|_F)$ un EVN. Soit f une application de U dans F. Si f est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U, alors

1. f est différentiable sur U.
2. f est continue sur U.

Démonstration :

1. Admis
2. Si f est $\mathcal{C}^1$ alors f est différentiable sur U

f est différentiable sur U $\longrightarrow$ f est continue sur U (propriété 4)

$$\begin{tikzcd} & & f \text{ est continue en } a \in U \\ f \in \mathscr{C}^1(U;F) \arrow[r, Rightarrow] & f \text{ est différentiable en } a \in U \arrow[ur, Rightarrow] \arrow[dr, Rightarrow] & \\ & & f \text{ admet toutes ses dérivées partielles en } a \end{tikzcd}$$

Illustration :

Soit la fonction

$$\begin{array}{rcl} f \;:\; U \subset \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Illustration :

Soit la fonction

$$\begin{array}{rccl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \rightarrow \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Continuité en $(0,0)$?

Illustration :

Soit la fonction

$$\begin{array}{rccl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Continuité en $(0,0)$?

$|f(x,y)| =$

Illustration :

Soit la fonction

$$\begin{array}{rccl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Continuité en $(0,0)$?

$$|f(x,y)| = \left|(x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)\right|$$

Illustration :

Soit la fonction

$$\begin{array}{rccl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Continuité en $(0,0)$?

$$|f(x,y)| = \left|(x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)\right| \leq |x^2+y^2| \underset{(0,0)}{\longrightarrow} 0$$

Ph.D. Elian Masnada

Illustration :

Soit la fonction

$$\begin{array}{rccl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Continuité en $(0,0)$?

$$|f(x,y)| = \left|(x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)\right| \leq |x^2+y^2| \underset{(0,0)}{\longrightarrow} 0$$

$$\lim_{(x,y)\to(0,0)} f(x,y) = 0$$

f_1 est continue sur $\mathbb{R}^2$.

Illustration :

$$\begin{array}{rccl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \to \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Différentiabilité en $(0,0)$?

Illustration :

$$\begin{array}{rcl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Différentiabilité en $(0,0)$?

Une fonction de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ est différentiable, en (x,y), si, et seulement si :

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

Ph.D. Elian Masnada

Illustration :

$$\begin{array}{rcll} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \to \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Différentiabilité en $(0,0)$?

Une fonction de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ est différentiable, en (x,y), si, et seulement si :

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

calculons tout d'abord les dérivées partielles

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(0,0)} =$$

Ph.D. Elian Masnada

Illustration :

$$\begin{array}{rccl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \to \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Différentiabilité en $(0,0)$?

Une fonction de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ est différentiable, en (x,y), si, et seulement si :

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2) - f(x,y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

calculons tout d'abord les dérivées partielles

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(0,0)} = \lim_{t\to 0} \frac{f(t,0) - f(0,0)}{t}$$

Illustration :

$$\begin{array}{rccl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Différentiabilité en $(0,0)$?

Une fonction de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ est différentiable, en (x,y), si, et seulement si :

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

calculons tout d'abord les dérivées partielles

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(0,0)} = \lim_{t\to 0}\frac{f(t,0)-f(0,0)}{t} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(t^2\sin\frac{1}{|t|}-0\right)$$

Illustration :

$$\begin{array}{rcl} f & : & U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Différentiabilité en $(0,0)$?

Une fonction de $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ est différentiable, en (x,y), si, et seulement si :

$$\lim_{(h_1,h_2)\rightarrow(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2)-f(x,y)-h_1\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y}-h_2\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

calculons tout d'abord les dérivées partielles

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(0,0)} = \lim_{t\rightarrow 0}\frac{f(t,0)-f(0,0)}{t} = \lim_{t\rightarrow 0}\frac{1}{t}\left(t^2\sin\frac{1}{|t|}-0\right)$$

$$= \lim_{t\rightarrow 0} t\sin\frac{1}{|t|} = 0$$

Illustration :

$$\begin{array}{rcl} f : U \subset \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases} \end{array}$$

Différentiabilité en $(0,0)$?

Une fonction de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ est différentiable, en (x,y), si, et seulement si :

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2) - f(x,y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

calculons tout d'abord les dérivées partielles

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(0,0)} &= \lim_{t\to 0} \frac{f(t,0)-f(0,0)}{t} = \lim_{t\to 0} \frac{1}{t}\left(t^2 \sin\frac{1}{|t|} - 0\right) \\ &= \lim_{t\to 0} t \sin\frac{1}{|t|} = 0 = \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{(0,0)} \end{aligned}$$

Illustration : $f \;:\; U \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$

$$(x,y) \mapsto f(x,y) = \begin{cases} (x^2+y^2)\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases}$$

Différentiabilité en $(0,0)$?

Une fonction de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ est différentiable, en (x,y), si, et seulement si :

$$\lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\|(h_1,h_2)\|}\left(f(x+h_1,y+h_2) - f(x,y) - h_1 \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - h_2 \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y}\right) = 0_F$$

calculons tout d'abord les dérivées partielles

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(0,0)} = \lim_{t\to 0} \frac{f(t,0)-f(0,0)}{t} = \lim_{t\to 0} \frac{1}{t}\left(t^2 \sin\frac{1}{|t|} - 0\right)$$
$$= \lim_{t\to 0} t \sin\frac{1}{|t|} = 0 = \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{(0,0)}$$

$$\Rightarrow \lim_{(h_1,h_2)\to(0,0)} \frac{1}{\sqrt{h_1^2+h_2^2}}\left((h_1^2+h_2^2)\sin\frac{1}{\sqrt{h_1^2+h_2^2}}\right) \longrightarrow 0$$

Donc f est différentiable en $(0,0)$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Mais les dérivées ne sont pas continue en $(0, 0)$:

Mais les dérivées ne sont pas continue en $(0,0)$:

Pour cela calculons la dérivée par rapport à x en (x,y) quelconque

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$$

Mais les dérivées ne sont pas continue en $(0,0)$:

Pour cela calculons la dérivée par rapport à x en (x,y) quelconque

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$$

Donc la dérivée première par rapport à x est donnée

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y)\neq(0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y)=(0,0) \end{cases}$$

Mais les dérivées ne sont pas continue en $(0,0)$:

Pour cela calculons la dérivée par rapport à x en (x,y) quelconque

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$$

Donc la dérivée première par rapport à x est donnée

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases}$$

Or, en prenant $u_n = (1/n, 0)$, alors

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{u_n} = \frac{2}{n}\sin(n) - \frac{1}{n}(n^2)^{3/2}\cos(n)$$

Ph.D. Elian Masnada

Mais les dérivées ne sont pas continue en $(0,0)$:

Pour cela calculons la dérivée par rapport à x en (x,y) quelconque

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$$

Donc la dérivée première par rapport à x est donnée

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases}$$

Or, en prenant $u_n = (1/n, 0)$, alors

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{u_n} &= \frac{2}{n}\sin(n) - \frac{1}{n}(n^2)^{3/2}\cos(n) \\ &= \frac{\sin n}{n} - n^2\cos(n) \end{aligned}$$

Ph.D. Elian Masnada

Mais les dérivées ne sont pas continue en $(0,0)$:

Pour cela calculons la dérivée par rapport à x en (x,y) quelconque

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$$

Donc la dérivée première par rapport à x est donnée

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y)\neq(0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y)=(0,0) \end{cases}$$

Or, en prenant $u_n = (1/n, 0)$, alors

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{u_n} &= \frac{2}{n}\sin(n) - \frac{1}{n}(n^2)^{3/2}\cos(n) \\ &= \frac{\sin n}{n} - n^2\cos(n) \quad \text{qui ne converge pas vers } 0 \end{aligned}$$

Ph.D. Elian Masnada

Mais les dérivées ne sont pas continue en $(0,0)$:

Pour cela calculons la dérivée par rapport à x en (x,y) quelconque

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$$

Donc la dérivée première par rapport à x est donnée

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases}$$

Or, en prenant $u_n = (1/n, 0)$, alors

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{u_n} &= \frac{2}{n}\sin(n) - \frac{1}{n}(n^2)^{3/2}\cos(n) \\ &= \frac{\sin n}{n} - n^2\cos(n) \quad \text{qui ne converge pas vers } 0 \end{aligned}$$

la fonction n'est pas $\mathcal{C}^1$

Ph.D. Elian Masnada

Mais les dérivées ne sont pas continue en $(0,0)$:

Pour cela calculons la dérivée par rapport à x en (x,y) quelconque

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$$

Donc la dérivée première par rapport à x est donnée

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} 2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \frac{x}{(x^2+y^2)^{3/2}}\cos\left(\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases}$$

Or, en prenant $u_n = (1/n, 0)$, alors

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{u_n} &= \frac{2}{n}\sin(n) - \frac{1}{n}(n^2)^{3/2}\cos(n) \\ &= \frac{\sin n}{n} - n^2\cos(n) \quad \text{qui ne converge pas vers } 0 \end{aligned}$$

la fonction n'est pas $\mathcal{C}^1$

$$\text{en } (0,0) \begin{cases} f \text{ est continue} \\ \text{dérivées partielles premières existent} \\ \text{dérivées partielles premières ne sont pas continues} \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit F un EVN quelconque. L'ensemble $\mathcal{C}^1(U, F)$ est un sous espace vectoriel des fonctions continues de U dans F, c'est-à-dire de $\mathcal{C}(U, F)$.

Démonstration :

Théorème 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit F un EVN quelconque. L'ensemble $\mathcal{C}^1(U, F)$ est un sous espace vectoriel des fonctions continues de U dans F, c'est-à-dire de $\mathcal{C}(U, F)$.

Démonstration :

1. La fonction nulle est le 0 de l'espace vectoriel $\mathcal{C}(U, F)$. Or la fonction nulle a pour dérivées partielles la fonction nulle. Donc la fonction nulle a ses dérivées partielles continues. Finallement la fonction nulle apprtient à $\mathcal{C}^1(U, F)$.

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit F un EVN quelconque. L'ensemble $\mathcal{C}^1(U, F)$ est un sous espace vectoriel des fonctions continues de U dans F, c'est-à-dire de $\mathcal{C}(U, F)$.

Démonstration :

1. La fonction nulle est le 0 de l'espace vectoriel $\mathcal{C}(U, F)$. Or la fonction nulle a pour dérivées partielles la fonction nulle. Donc la fonction nulle a ses dérivées partielles continues. Finallement la fonction nulle apprtient à $\mathcal{C}^1(U, F)$.

2. De plus pour $\forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall f, g \in \mathcal{C}^1(U, F)$, $f + \lambda g$ est également de classe $\mathcal{C}^1$ sur U car la somme de fonctions continues et continues et de même pour la dérivée (laissé en exercice). Donc $f + \lambda g \in \mathcal{C}^1(U, F)$

Théorème 5 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit F un EVN quelconque. Alors, pour $\forall f, g \in \mathcal{C}^1(U, F)$, $f \times g \in \mathcal{C}^1(U, F)$.

Démonstration : exercice.

Théorème 6 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application de classe $\mathcal{C}^1$ de U dans $\mathcal{R}^q$. Soit V un ouvert de $\mathbb{R}^q$ et g une application de classe $\mathcal{C}^1$ de V dans $\mathbb{R}^n$. Si $f(U) \subset V$, alors $g \circ f$ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.

Démonstration : Admis.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 6 :

Soit $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ une fonction de classe $\mathcal{C}^1$ sur un ouvert U. Soit $u_1,\ u_2, \ldots,\ u_n$, n fonctions de classe $\mathcal{C}^1$ sur un intervalle $I \subset \mathbb{R}$ telles que pour $\forall t \in I$, $\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ; \ldots ;\ u_n(t)\Big) \in U$.

Alors la fonction

$$\begin{array}{rcccl} g & : & I & \to & \mathbb{R} \\ & & t & \mapsto & g(t) = f\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ;\ldots;\ u_n(t)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur I et de plus, $\forall t \in I$

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_1}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)} + \ldots + u_n'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)}$$

Démonstration : voir polycopié

$$\begin{array}{rcl} g : I & \to & \mathbb{R} \\ t & \mapsto & g(t) = f\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ; ...;\ u_n(t)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur I et de plus, $\forall t \in I$

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_1}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)} + ... + u_n'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)}$$

Exemple :

$$\begin{array}{rccl} g & : & I & \to & \mathbb{R} \\ & & t & \mapsto & g(t) = f\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ;...;\ u_n(t)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur I et de plus, $\forall t \in I$

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_1}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)} + \ldots + u_n'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = xyz + y^2 + z \end{array}$

On introduit alors les fonctions $x = u_1(t) = 2t + 3$, $y = u_2(t) = e^t$ et $z = t^2$.

On cherche alors la dérivée de la fonction

$$g(t) = f\Big(u_1(t), u_2(t), u_3(t)\Big)$$

$$\begin{array}{rcl} g : I & \to & \mathbb{R} \\ t & \mapsto & g(t) = f\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ; ...;\ u_n(t)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur I et de plus, $\forall t \in I$

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_1}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)} + \ldots + u_n'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rcll} f & : & \mathbb{R}^3 & \to \mathbb{R} \\ & & (x,y,z) & \mapsto f(x,y,z) = xyz + y^2 + z \end{array}$

On introduit alors les fonctions $x = u_1(t) = 2t+3$, $y = u_2(t) = e^t$ et $z = t^2$.

On cherche alors la dérivée de la fonction

$$g(t) = f\Big(u_1(t), u_2(t), u_3(t)\Big)$$

Deux méthodes :

1. On fait le calcul explicitement

$$\begin{array}{rccl} g & : & I & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & t & \mapsto & g(t) = f\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ;\ldots;\ u_n(t)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur I et de plus, $\forall t \in I$

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_1}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)} + \ldots + u_n'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par :
$$\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^3 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = xyz + y^2 + z \end{array}$$

On introduit alors les fonctions $x = u_1(t) = 2t+3$, $y = u_2(t) = e^t$ et $z = t^2$.

On cherche alors la dérivée de la fonction

$$g(t) = f\Big(u_1(t), u_2(t), u_3(t)\Big)$$

Deux méthodes :

1. On fait le calcul explicitement

$$g(t) = (2t+3)t^2e^t + e^{2t} + t^2$$

$$\begin{array}{rccl} g & : & I & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & t & \mapsto & g(t) = f\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ; ...;\ u_n(t)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur I et de plus, $\forall t \in I$

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_1}\Big|_{u_1(t),\dots,u_n(t)} + \dots + u_n'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\Big|_{u_1(t),\dots,u_n(t)}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par :
$$\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^3 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & (x, y, z) & \mapsto & f(x, y, z) = xyz + y^2 + z \end{array}$$

On introduit alors les fonctions $x = u_1(t) = 2t + 3$, $y = u_2(t) = e^t$ et $z = t^2$.

On cherche alors la dérivée de la fonction

$$g(t) = f\Big(u_1(t), u_2(t), u_3(t)\Big)$$

Deux méthodes :

1. On fait le calcul explicitement

$$g(t) = (2t + 3)t^2e^t + e^{2t} + t^2$$

$$\Rightarrow g'(t) = (2t^3 + 9t^2 + 6t)e^t + 2t + 2e^{2t}$$

$$\begin{array}{rcrcl} g & : & I & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & t & \mapsto & g(t) = f\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ;\ \ldots;\ u_n(t)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur I et de plus, $\forall t \in I$

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_1}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)} + \ldots + u_n'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rcrcl} f & : & \mathbb{R}^3 & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = xyz + y^2 + z \end{array}$

On introduit alors les fonctions $x = u_1(t) = 2t+3$, $y = u_2(t) = e^t$ et $z = t^2$.

On cherche alors la dérivée de la fonction

$$g(t) = f\Big(u_1(t), u_2(t), u_3(t)\Big)$$

Deux méthodes :

1. On fait le calcul explicitement

$$g(t) = (2t+3)t^2e^t + e^{2t} + t^2$$

$$\Rightarrow\quad g'(t) = (2t^3 + 9t^2 + 6t)e^t + 2t + 2e^{2t}$$

2. On utilise la relation de la propriété 6

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x}\bigg|_{u_1(t),u_2(t),u_3(t)} + u_2'(t)\ \frac{\partial f}{\partial y}\bigg|_{u_1(t),u_2(t),u_3(t)} + u_3'(t)\ \frac{\partial f}{\partial z}\bigg|_{u_1(t),u_2(t),u_3(t)}$$

$$\begin{array}{rccl} g & : & I & \to & \mathbb{R} \\ & & t & \mapsto & g(t) = f\Big(u_1(t)\ ;\ u_2(t)\ ;\ldots;\ u_n(t)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur I et de plus, $\forall t \in I$

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_1}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)} + \ldots + u_n'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\bigg|_{u_1(t),\ldots,u_n(t)}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = xyz + y^2 + z \end{array}$

On introduit alors les fonctions $x = u_1(t) = 2t+3$, $y = u_2(t) = e^t$ et $z = t^2$.

On cherche alors la dérivée de la fonction

$$g(t) = f\Big(u_1(t), u_2(t), u_3(t)\Big)$$

Deux méthodes :

1. On fait le calcul explicitement

$$g(t) = (2t+3)t^2e^t + e^{2t} + t^2$$

$$\Rightarrow \quad g'(t) = (2t^3 + 9t^2 + 6t)e^t + 2t + 2e^{2t}$$

2. On utilise la relation de la propriété 6

$$g'(t) = u_1'(t)\ \frac{\partial f}{\partial x}\bigg|_{u_1(t),u_2(t),u_3(t)} + u_2'(t)\ \frac{\partial f}{\partial y}\bigg|_{u_1(t),u_2(t),u_3(t)} + u_3'(t)\ \frac{\partial f}{\partial z}\bigg|_{u_1(t),u_2(t),u_3(t)}$$

$$\Rightarrow \quad g'(t) = (2t^3 + 9t^2 + 6t)e^t + 2t + 2e^{2t}$$

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall(u,v) \in V$, $\Big(g_1(u,v), g_2(u,v)\Big) \in U$.

Alors la fonction $\begin{array}{cccl} h & : & V & \to \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto h(u,v) = f\Big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\Big) \end{array}$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall(u,v) \in V$ $\left\{\begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial u}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial u}\Big|_{u,v} \\ \\ \frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial v}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial v}\Big|_{u,v} \end{array}\right.$

Démonstration :

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall (u,v) \in V$, $\Big(g_1(u,v), g_2(u,v)\Big) \in U$.

Alors la fonction $$\begin{array}{rccl} h & : & V & \to \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto h(u,v) = f\Big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall (u,v) \in V$ $$\left\{\begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial u}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial u}\Big|_{u,v} \\ \\ \frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial v}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial v}\Big|_{u,v} \end{array}\right.$$

Démonstration :

Nous n'allons montrer ici que la première égalité la seconde se démontrant strictement de la même façon.

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall (u,v) \in V$, $\Big(g_1(u,v), g_2(u,v)\Big) \in U$.

Alors la fonction $\begin{array}{rccl} h & : & V & \to \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto h(u,v) = f\Big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\Big) \end{array}$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall (u,v) \in V$ $\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial u}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial u}\Big|_{u,v} \\ \frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial v}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial v}\Big|_{u,v} \end{cases}$

Démonstration :

Nous n'allons montrer ici que la première égalité la seconde se démontrant strictement de la même façon.

on cherche à exprimer $\left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v}$ en fonction des dérivées de g_1 et g_2.

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall (u,v) \in V$, $\Big(g_1(u,v), g_2(u,v)\Big) \in U$.

Alors la fonction $$\begin{array}{cccl} h & : & V & \to & \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto & h(u,v) = f\Big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall (u,v) \in V$ $$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial u}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial u}\Big|_{u,v} \\ \frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial v}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial v}\Big|_{u,v} \end{cases}$$

Démonstration :

Nous n'allons montrer ici que la première égalité la seconde se démontrant strictement de la même façon.

on cherche à exprimer $\displaystyle \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v}$ en fonction des dérivées de g_1 et g_2.

prendre la dérivée partielle de h par rapport à u revient à étudier la variation de h en fonction de u lorsque v est fixé.

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall(u,v) \in V$, $\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) \in U$.

$$\text{Alors la fonction} \quad \begin{array}{rcccl} h & : & V & \to & \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto & h(u,v) = f\big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall(u,v) \in V$

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v} \\ \left.\dfrac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_1}{\partial v}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_2}{\partial v}\right|_{u,v} \end{cases}$$

Démonstration :

Nous n'allons montrer ici que la première égalité la seconde se démontrant strictement de la même façon.

on cherche à exprimer $\left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v}$ en fonction des dérivées de g_1 et g_2.

prendre la dérivée partielle de h par rapport à u revient à étudier la variation de h en fonction de u lorsque v est fixé.

Introduisons donc les fonctions

$$g_1^v(u) = g_1(u,v)$$
$$g_2^v(u) = g_2(u,v)$$
$$H(u) = h(u,v) = f(g_1^v(u)\ ;\ g_2^v(u))$$

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall(u,v) \in V$, $\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) \in U$.

$$\text{Alors la fonction} \quad \begin{array}{rccl} h & : & V & \to \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto h(u,v) = f\big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall(u,v) \in V$

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v} \\ \left.\dfrac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_1}{\partial v}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_2}{\partial v}\right|_{u,v} \end{cases}$$

Démonstration :

Nous n'allons montrer ici que la première égalité la seconde se démontrant strictement de la même façon.

on cherche à exprimer $\left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v}$ en fonction des dérivées de g_1 et g_2.

prendre la dérivée partielle de h par rapport à u revient à étudier la variation de h en fonction de u lorsque v est fixé.

Introduisons donc les fonctions

$$g_1^v(u) = g_1(u,v)$$
$$g_2^v(u) = g_2(u,v)$$
$$H(u) = h(u,v) = f(g_1^v(u)\ ;\ g_2^v(u))$$

$$\left.\frac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = H'(u)$$

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall (u,v) \in V$, $\Big(g_1(u,v), g_2(u,v)\Big) \in U$.

Alors la fonction $$\begin{array}{rccl} h & : & V & \to \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto h(u,v) = f\Big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\Big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall (u,v) \in V$ $$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v} \\ \left.\dfrac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_1}{\partial v}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\dfrac{\partial g_2}{\partial v}\right|_{u,v} \end{cases}$$

Démonstration :

$$H(u) = h(u,v) = f(g_1^v(u)\ ;\ g_2^v(u))$$

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall (u,v) \in V$, $\Big(g_1(u,v), g_2(u,v)\Big) \in U$.

Alors la fonction $\begin{array}{rcl} h \ : \quad V & \to & \mathbb{R} \\ (u,v) & \mapsto & h(u,v) = f\Big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\Big) \end{array}$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall (u,v) \in V$ $\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial u}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial u}\Big|_{u,v} \\ \frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial v}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial v}\Big|_{u,v} \end{cases}$

Démonstration :

$$H(u) = h(u,v) = f(g_1^v(u)\ ;\ g_2^v(u))$$

d'après la propriété 6

$$H'(u) = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1^v(u),g_2^v(u)} (g_1^v)'(u) + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1^v(u),g_2^v(u)} (g_2^v)'(u)$$

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall(u,v) \in V$, $\Big(g_1(u,v), g_2(u,v)\Big) \in U$.

Alors la fonction $\begin{array}{rccl} h & : & V & \to & \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto & h(u,v) = f\Big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\Big) \end{array}$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall(u,v) \in V$ $\left\{\begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial u}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial u}\Big|_{u,v} \\ \\ \frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_1}{\partial v}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \frac{\partial g_2}{\partial v}\Big|_{u,v} \end{array}\right.$

Démonstration :

$$H(u) = h(u,v) = f(g_1^v(u)\ ;\ g_2^v(u))$$

d'après la propriété 6

$$H'(u) = \frac{\partial f}{\partial x}\bigg|_{g_1^v(u),g_2^v(u)} (g_1^v)'(u) + \frac{\partial f}{\partial y}\bigg|_{g_1^v(u),g_2^v(u)} (g_2^v)'(u)$$

or $\qquad (g_1^v)'(u) = \frac{\partial g_1}{\partial u}\bigg|_{u,v} \qquad (g_2^v)'(u) = \frac{\partial g_2}{\partial u}\bigg|_{u,v}$

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall (u,v) \in V$, $\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) \in U$.

Alors la fonction
$$\begin{array}{rccl} h & : & V & \rightarrow \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto h(u,v) = f\big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall (u,v) \in V$
$$\left\{ \begin{array}{l} \left.\frac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v} \\ \left.\frac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_1}{\partial v}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_2}{\partial v}\right|_{u,v} \end{array} \right.$$

Démonstration :

$$H(u) = h(u,v) = f(g_1^v(u)\ ;\ g_2^v(u))$$

d'après la propriété 6

$$H'(u) = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1^v(u),g_2^v(u)} (g_1^v)'(u) + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1^v(u),g_2^v(u)} (g_2^v)'(u)$$

or $\qquad (g_1^v)'(u) = \left.\dfrac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} \qquad (g_2^v)'(u) = \left.\dfrac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v}$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v}$$

Propriété 7 :

Soient U et V deux ouverts de $\mathbb{R}^2$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$. Soient g_1 et g_2 deux applications de V dans $\mathbb{R}$. f, g_1 et g_2 sont $\mathcal{C}^1$ sur leur domaine de définition respectif. Pour $\forall (u,v) \in V$, $\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) \in U$.

Alors la fonction
$$\begin{array}{rccl} h & : & V & \rightarrow \mathbb{R} \\ & & (u,v) & \mapsto h(u,v) = f\big(g_1(u,v)\ ;\ g_2(u,v)\big) \end{array}$$

est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V et de plus, $\forall (u,v) \in V$
$$\begin{cases} \left.\frac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v} \\ \left.\frac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_1}{\partial v}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_2}{\partial v}\right|_{u,v} \end{cases}$$

Démonstration :

$$H(u) = h(u,v) = f(g_1^v(u)\ ;\ g_2^v(u))$$

d'après la propriété 6

$$H'(u) = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1^v(u),g_2^v(u)} (g_1^v)'(u) + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1^v(u),g_2^v(u)} (g_2^v)'(u)$$

or
$$(g_1^v)'(u) = \left.\frac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} \qquad (g_2^v)'(u) = \left.\frac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v}$$

$$\Longrightarrow \quad \left.\frac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_1}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{g_1(u,v),g_2(u,v)} \left.\frac{\partial g_2}{\partial u}\right|_{u,v}$$

CQFD

Exemple :

Soit la fonction définie par :
$$\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rcl} f \; : \quad \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u+v \\ y = g_2(u,v) = u-v \end{cases}$

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u+v \\ y = g_2(u,v) = u-v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{cccl} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u+v \\ y = g_2(u,v) = u-v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u+v \\ y = g_2(u,v) = u-v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

1. On fait le calcul explicitement

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{cccc} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u + v \\ y = g_2(u,v) = u - v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

1. On fait le calcul explicitement

$$\begin{aligned} h(u,v) &= 2(u+v)^2(u-v) + (u-v)^2 + u + v \\ &= 2u^3 - 2v^3 + 2u^2v - 2v^2u + u^2 + v^2 - 2uv + u + v \end{aligned}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u+v \\ y = g_2(u,v) = u-v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

1. On fait le calcul explicitement

$$\begin{aligned} h(u,v) &= 2(u+v)^2(u-v) + (u-v)^2 + u + v \\ &= 2u^3 - 2v^3 + 2u^2v - 2v^2u + u^2 + v^2 - 2uv + u + v \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = 6u^2 - 2v^2 + 2u - 2v + 4uv + 1 \\ \left.\dfrac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = 2u^2 - 6v^2 + 1 - 2u + 2v - 4uv \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rcl} f \ : \ \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x, y) & \mapsto & f(x, y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u, v) = u + v \\ y = g_2(u, v) = u - v \end{cases}$

et $h(u, v) = f\big(g_1(u, v), g_2(u, v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

2. On utilise la relation de la propriété 7

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u+v \\ y = g_2(u,v) = u-v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

2. On utilise la relation de la propriété 7

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} \left.\dfrac{\partial x}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} \left.\dfrac{\partial y}{\partial u}\right|_{u,v} \\ \left.\dfrac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} \left.\dfrac{\partial x}{\partial v}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} \left.\dfrac{\partial y}{\partial v}\right|_{u,v} \end{cases}$$

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{cccc} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u + v \\ y = g_2(u,v) = u - v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

2. On utilise la relation de la propriété 7

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} \left.\dfrac{\partial x}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} \left.\dfrac{\partial y}{\partial u}\right|_{u,v} \\ \left.\dfrac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} \left.\dfrac{\partial x}{\partial v}\right|_{u,v} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} \left.\dfrac{\partial y}{\partial v}\right|_{u,v} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \left.\dfrac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = (4xy+1) \times 1 + (2x^2 + 2y) \times 1 \\ \left.\dfrac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = (4xy+1) \times 1 + (2x^2 + 2y) \times (-1) \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit la fonction définie par : $f : \begin{array}{ccl} \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u + v \\ y = g_2(u,v) = u - v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

2. On utilise la relation de la propriété 7

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x,y} \frac{\partial x}{\partial u}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{x,y} \frac{\partial y}{\partial u}\Big|_{u,v} \\ \frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{u,v} = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x,y} \frac{\partial x}{\partial v}\Big|_{u,v} + \frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{x,y} \frac{\partial y}{\partial v}\Big|_{u,v} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial h}{\partial u}\Big|_{u,v} = (4xy+1) \times 1 + (2x^2+2y) \times 1 \\ \frac{\partial h}{\partial v}\Big|_{u,v} = (4xy+1) \times 1 + (2x^2+2y) \times (-1) \end{cases}$$

or $x = u + v$ et $y = u - v$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit la fonction définie par : $\begin{array}{cccc} f & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y) & \mapsto & f(x,y) = 2x^2y + y^2 + x \end{array}$

On introduit alors les fonctions $\begin{cases} x = g_1(u,v) = u+v \\ y = g_2(u,v) = u-v \end{cases}$

et $h(u,v) = f\big(g_1(u,v), g_2(u,v)\big) = f \circ g$ avec $g = (g_1, g_2)$

On cherche à calculer les dérivées partielles premières de h

2. On utilise la relation de la propriété 7

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} \left.\frac{\partial x}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} \left.\frac{\partial y}{\partial u}\right|_{u,v} \\ \left.\frac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} \left.\frac{\partial x}{\partial v}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} \left.\frac{\partial y}{\partial v}\right|_{u,v} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \left.\frac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = (4xy+1)\times 1 + (2x^2+2y)\times 1 \\ \left.\frac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = (4xy+1)\times 1 + (2x^2+2y)\times(-1) \end{cases}$$

or $x = u+v$ et $y = u-v$

$$\Rightarrow \begin{cases} \left.\frac{\partial h}{\partial u}\right|_{u,v} = 6u^2 - 2v^2 + 2u - 2v + 4uv + 1 \\ \left.\frac{\partial h}{\partial v}\right|_{u,v} = 2u^2 - 6v^2 + 1 - 2u + 2v - 4uv \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 4 : (Matrice de Jacobi)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application, différentiable en a, de U dans $\mathbb{R}^n$. On définit la matrice de Jacobi (ou matrice jacobienne) de f en a, notée $J_f(a)$, la matrice à n lignes et p colonnes de $D_f(a)$ relativement aux bases canoniques de $\mathbb{R}^n$ et $\mathbb{R}^p$, c'est-à-dire la matrice

$$J_f(a) = \left(\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a \right) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_p}\right|_a \\ . & . & . \\ \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_p}\right|_a \end{pmatrix}$$

Si $n = p$, on appelle jacobien de f en a, le déterminant de la matrice $J_f(a)$ de f en a.

Définition 4 : (Matrice de Jacobi)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application, différentiable en a, de U dans $\mathbb{R}^n$. On définit la matrice de Jacobi (ou matrice jacobienne) de f en a, notée $J_f(a)$, la matrice à n lignes et p colonnes de $D_f(a)$ relativement aux bases canoniques de $\mathbb{R}^n$ et $\mathbb{R}^p$, c'est-à-dire la matrice

$$J_f(a) = \left(\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a \right) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_p}\right|_a \\ . & . & . \\ \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_p}\right|_a \end{pmatrix}$$

Si $n = p$, on appelle jacobien de f en a, le déterminant de la matrice $J_f(a)$ de f en a.

Soit la fonction $f \; : \; \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R}^3 \\ (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = (xyz, ye^x, ze^z) \end{array}$

qui est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^3$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 4 : (Matrice de Jacobi)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application, différentiable en a, de U dans $\mathbb{R}^n$. On définit la matrice de Jacobi (ou matrice jacobienne) de f en a, notée $J_f(a)$, la matrice à n lignes et p colonnes de $D_f(a)$ relativement aux bases canoniques de $\mathbb{R}^n$ et $\mathbb{R}^p$, c'est-à-dire la matrice

$$J_f(a) = \left(\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a \right) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_p}\right|_a \\ . & . & . \\ \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_p}\right|_a \end{pmatrix}$$

Si $n = p$, on appelle jacobien de f en a, le déterminant de la matrice $J_f(a)$ de f en a.

Soit la fonction $f \ : \ \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R}^3 \\ (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = (xyz, ye^x, ze^z) \end{array}$

qui est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^3$

$$\Rightarrow \quad J_f(x,y,z) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} yz & xz & xy \\ ye^x & e^x & 0 \\ 0 & 0 & (1+z)e^z \end{pmatrix}$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 4 : (Matrice de Jacobi)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application, différentiable en a, de U dans $\mathbb{R}^n$. On définit la matrice de Jacobi (ou matrice jacobienne) de f en a, notée $J_f(a)$, la matrice à n lignes et p colonnes de $D_f(a)$ relativement aux bases canoniques de $\mathbb{R}^n$ et $\mathbb{R}^p$, c'est-à-dire la matrice

$$J_f(a) = \left(\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_a \right) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_p}\right|_a \\ . & . & . \\ \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_p}\right|_a \end{pmatrix}$$

Si $n = p$, on appelle jacobien de f en a, le déterminant de la matrice $J_f(a)$ de f en a.

Soit la fonction $f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R}^3 \\ (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = (xyz, ye^x, ze^z) \end{array}$

qui est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^3$

$$J_f(x,y,z) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} yz & xz & xy \\ ye^x & e^x & 0 \\ 0 & 0 & (1+z)e^z \end{pmatrix}$$

$$|J_f(x,y,z)| = yz(1+z)(1-x)e^{x+z}$$

Définition 5 : (Gradient)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application, différentiable en a, de U dans $\mathbb{R}$. On définit alors le gradient de f en a, noté $\vec{grad}(f)(a)$ ou $\vec{\nabla}_a f$, par

$$\vec{\nabla}_a f = {}^t J_f(a) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|_a \\ \vdots \\ \left.\frac{\partial f}{\partial x_p}\right|_a \end{pmatrix}$$

Exemple :

Définition 5 : (Gradient)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application, différentiable en a, de U dans $\mathbb{R}$. On définit alors le gradient de f en a, noté $\overrightarrow{grad}(f)(a)$ ou $\vec{\nabla}_a f$, par

$$\vec{\nabla}_a f = {}^tJ_f(a) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|_a \\ . \\ \left.\frac{\partial f}{\partial x_p}\right|_a \end{pmatrix}$$

Exemple :

Soit la fonction $\begin{array}{cccc} f & : & \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R} \\ & & (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = xyz + ye^x + z^2 \end{array}$

Définition 5 : (Gradient)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application, différentiable en a, de U dans $\mathbb{R}$. On définit alors le gradient de f en a, noté $\vec{grad}(f)(a)$ ou $\vec{\nabla}_a f$, par

$$\vec{\nabla}_a f = {}^t J_f(a) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|_a \\ . \\ \left.\frac{\partial f}{\partial x_p}\right|_a \end{pmatrix}$$

Exemple :

Soit la fonction $f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R} \\ (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = xyz + ye^x + z^2 \end{array}$

qui est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^3$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 5 : (Gradient)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application, différentiable en a, de U dans $\mathbb{R}$. On définit alors le gradient de f en a, noté $\overrightarrow{grad}(f)(a)$ ou $\vec{\nabla}_a f$, par

$$\vec{\nabla}_a f = {}^t J_f(a) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|_a \\ \cdot \\ \left.\frac{\partial f}{\partial x_p}\right|_a \end{pmatrix}$$

Exemple :

Soit la fonction $\begin{array}{rccl} f & : & \mathbb{R}^3 & \to \mathbb{R} \\ & & (x,y,z) & \mapsto f(x,y,z) = xyz + ye^x + z^2 \end{array}$

qui est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^3$

$$\vec{\nabla}_{(x,y,z)} f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} yz + ye^x \\ xz + e^x \\ xy + 2z \end{pmatrix}$$

Propriété 8 : (gradient et différentielle)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application, différentiable en $a \in U$, de U dans $\mathbb{R}$. Alors

$$\forall (a,h) \in U^2,\ D_a f(h) = \vec{\nabla}_a f \cdot h$$

où $\vec{\nabla}_a f \cdot h$ est le produit scalaire entre les deux vecteurs.

Démonstration :

Propriété 8 : (gradient et différentielle)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application, différentiable en $a \in U$, de U dans $\mathbb{R}$. Alors

$$\forall (a,h) \in U^2,\ D_a f(h) = \vec{\nabla}_a f \cdot h$$

où $\vec{\nabla}_a f \cdot h$ est le produit scalaire entre les deux vecteurs.

Démonstration :

$$\vec{\nabla}_a f \cdot h = \left(\left.\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|_a \ ; \ \dots \ ; \ \left.\frac{\partial f}{\partial x_p}\right|_a \right) \cdot (h_1 \ ; \ \dots \ ; \ h_p) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_i}\right|_a$$

Propriété 8 : (gradient et différentielle)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application, différentiable en $a \in U$, de U dans $\mathbb{R}$. Alors

$$\forall (a,h) \in U^2,\ D_a f(h) = \vec{\nabla}_a f \cdot h$$

où $\vec{\nabla}_a f \cdot h$ est le produit scalaire entre les deux vecteurs.

Démonstration :

$$\vec{\nabla}_a f \cdot h = \left(\left.\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|_a ; \dots ; \left.\frac{\partial f}{\partial x_p}\right|_a \right) \cdot (h_1 ; \dots ; h_p) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_i}\right|_a$$

Exemple :

Soit la fonction $\begin{array}{rccl} f : & \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = xyz + ye^x + z^2 \end{array}$

$$\Rightarrow \quad \vec{\nabla}_{(x,y,z)} f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} yz + ye^x \\ xz + e^x \\ xy + 2z \end{pmatrix}$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 8 : (gradient et différentielle)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application, différentiable en $a \in U$, de U dans $\mathbb{R}$. Alors

$$\forall (a,h) \in U^2,\ D_a f(h) = \vec{\nabla}_a f \cdot h$$

où $\vec{\nabla}_a f \cdot h$ est le produit scalaire entre les deux vecteurs.

Démonstration :

$$\vec{\nabla}_a f \cdot h = \left(\left.\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|_a ; \dots ; \left.\frac{\partial f}{\partial x_p}\right|_a \right) \cdot (h_1 ; \dots ; h_p) = \sum_{i=1}^{p} h_i \left.\frac{\partial f}{\partial x_i}\right|_a$$

Exemple :

Soit la fonction $\begin{array}{llll} f : & \mathbb{R}^3 & \to & \mathbb{R} \\ & (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = xyz + ye^x + z^2 \end{array}$

$$\vec{\nabla}_{(x,y,z)} f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} yz + ye^x \\ xz + e^x \\ xy + 2z \end{pmatrix}$$

$$D_{(x,y,z)} f(h) = \vec{\nabla}_{(x,y,z)} f \cdot h = (yz + ye^x)h_1 + (xz + e^x)h_2 + (xy + 2z)h_3$$

Propriété 9 : (interprétation du gradient)

Le gradient d'une fonction f, de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$, est un vecteur perpendiculaire aux directions où f est constante et pointant dans la direction où la variation de f est maximale (de plus grande pente). La norme du gradient est d'autant plus grande qu'au point où il est calculé, la variation de f est grande.

Démonstration :

Propriété 9 : (interprétation du gradient)

Le gradient d'une fonction f, de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$, est un vecteur perpendiculaire aux directions où f est constante et pointant dans la direction où la variation de f est maximale (de plus grande pente). La norme du gradient est d'autant plus grande qu'au point où il est calculé, la variation de f est grande.

Démonstration : Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$ où U est un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Soit a un point de $\mathbb{R}^n$.

Considérons le point $p(t) = a + tv$ avec $\begin{cases} t \in \mathbb{R} \\ v \in \mathbb{R}^n \end{cases}$ telle que $p(t) \in U$

Propriété 9 : (interprétation du gradient)

Le gradient d'une fonction f, de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$, est un vecteur perpendiculaire aux directions où f est constante et pointant dans la direction où la variation de f est maximale (de plus grande pente). La norme du gradient est d'autant plus grande qu'au point où il est calculé, la variation de f est grande.

Démonstration : Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$ où U est un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Soit a un point de $\mathbb{R}^n$.

Considérons le point $p(t) = a + tv$ avec $\begin{cases} t \in \mathbb{R} \\ v \in \mathbb{R}^n \end{cases}$ telle que $p(t) \in U$

propriété 6 $\Rightarrow$ $\left.\dfrac{d}{dt} f\left(p(t)\right)\right|_{t=0} = \vec{\nabla}_a f \cdot p'(t=0) = \vec{\nabla}_a f \cdot v$

Propriété 9 : (interprétation du gradient)

Le gradient d'une fonction f, de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$, est un vecteur perpendiculaire aux directions où f est constante et pointant dans la direction où la variation de f est maximale (de plus grande pente). La norme du gradient est d'autant plus grande qu'au point où il est calculé, la variation de f est grande.

Démonstration : Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$ où U est un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Soit a un point de $\mathbb{R}^n$.

Considérons le point $p(t) = a + tv$ avec $\begin{cases} t \in \mathbb{R} \\ v \in \mathbb{R}^n \end{cases}$ telle que $p(t) \in U$

propriété 6 $\Longrightarrow$ $\left.\dfrac{d}{dt} f\left(p(t)\right)\right|_{t=0} = \vec{\nabla}_a f \cdot p'(t=0) = \vec{\nabla}_a f \cdot v$

$v \cdot \vec{\nabla}_a f = 0 \Longleftrightarrow \left.\dfrac{d}{dt} f\left(p(t)\right)\right|_{t=0} = 0 \Longleftrightarrow f$ est constante.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 9 : (interprétation du gradient)

Le gradient d'une fonction f, de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$, est un vecteur perpendiculaire aux directions où f est constante et pointant dans la direction où la variation de f est maximale (de plus grande pente). La norme du gradient est d'autant plus grande qu'au point où il est calculé, la variation de f est grande.

Démonstration : Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$ où U est un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Soit a un point de $\mathbb{R}^n$.

Considérons le point $p(t) = a + tv$ avec $\begin{cases} t \in \mathbb{R} \\ v \in \mathbb{R}^n \end{cases}$ telle que $p(t) \in U$

propriété 6 $\Longrightarrow$ $\left.\dfrac{d}{dt} f(p(t))\right|_{t=0} = \vec{\nabla}_a f \cdot p'(t=0) = \vec{\nabla}_a f \cdot v$

$v \cdot \vec{\nabla}_a f = 0$ $\Longleftrightarrow$ $\left.\dfrac{d}{dt} f(p(t))\right|_{t=0} = 0$ $\Longleftrightarrow$ f est constante.

$\|v\| = 1$ $\Longleftrightarrow$ produit scalaire est maximum si colinéaire dans le même sens que $\vec{\nabla}_a f$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 9 : (interprétation du gradient)

Le gradient d'une fonction f, de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$, est un vecteur perpendiculaire aux directions où f est constante et pointant dans la direction où la variation de f est maximale (de plus grande pente). La norme du gradient est d'autant plus grande qu'au point où il est calculé, la variation de f est grande.

Démonstration : Soit f une application de U dans $\mathbb{R}$ où U est un ouvert de $\mathbb{R}^n$.
Soit a un point de $\mathbb{R}^n$.

Considérons le point $p(t) = a + tv$ avec $\begin{cases} t \in \mathbb{R} \\ v \in \mathbb{R}^n \end{cases}$ telle que $p(t) \in U$

propriété 6 $\Rightarrow$ $\left.\dfrac{d}{dt}f(p(t))\right|_{t=0} = \vec{\nabla}_a f \cdot p'(t=0) = \vec{\nabla}_a f \cdot v$

$v \cdot \vec{\nabla}_a f = 0 \Leftrightarrow \left.\dfrac{d}{dt}f(p(t))\right|_{t=0} = 0 \Leftrightarrow$ f est constante.

$\|v\| = 1 \Leftrightarrow$ produit scalaire est maximum si colinéaire dans le même sens que $\vec{\nabla}_a f$

$v = \vec{\nabla}_a f \Leftrightarrow \left.\dfrac{d}{dt}f(p(t))\right|_{t=0} = \left\|\vec{\nabla}_a f\right\|^2 > 0 \Leftrightarrow$ $\vec{\nabla}_a f \nearrow$ variation de $f \nearrow$

Théorème 7 : (inégalité des accroissements finis)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
Soit a et b deux points de U tels que $[a,b] = \{(1-\lambda)a + \lambda b / \lambda \in [0,1]\} \subset U$.
Si il existe un réel M tel que

$$\forall x \in [a,b],\ \left\|\vec{\nabla}_x f\right\|_1 = \sum_{j=1}^{p} \left| \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_x \right| \leq M$$

alors

$$|f(b) - f(a)| \leq M \, \|b-a\|_1$$

Démonstration : remise à plus tard.

Ph.D. Elian Masnada

Définition 6 : (Partie convexe)

Soit E un espace vectoriel quelconque. Une partie C de E est dite convexe si, et seulement si

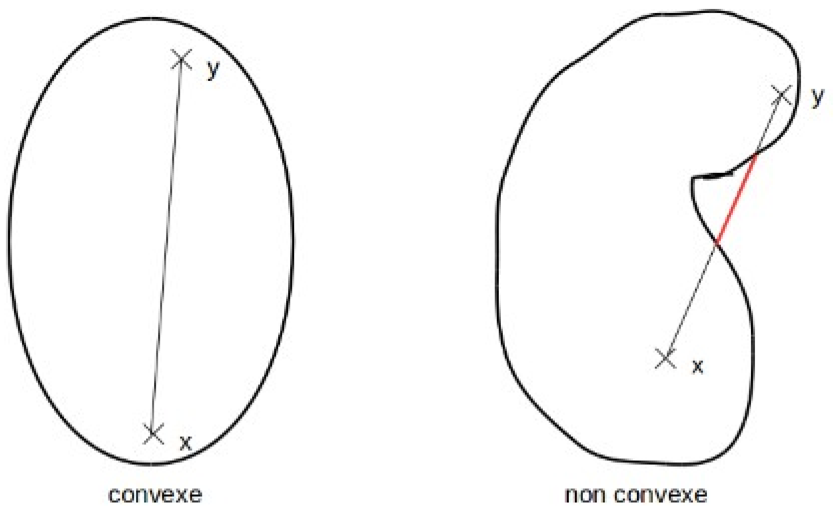
$$\forall (x, y) \in C^2,\ \forall \lambda \in [0, 1],\ (1 - \lambda)x + \lambda y \in C$$

Définition 6 : (Partie convexe)

Soit E un espace vectoriel quelconque. Une partie C de E est dite convexe si, et seulement si

$$\forall (x, y) \in C^2,\ \forall \lambda \in [0, 1],\ (1-\lambda)x + \lambda y \in C$$

un ensemble C est convexe si, et seulement si, tout segment joignant toute paire de points de C est contenu dans C



Propriété 10 :

Soit U un ouvert convexe de $\mathbb{R}^p$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^1$ sur U. Si il existe un réel M tel que pour tout point $a \in U$ on a

$$\left\|\vec{\nabla}_x f\right\|_1 = \sum_{j=1}^{p} \left| \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_x \right| \leq M$$

alors f est M-lipschitzienne sur U.

Démonstration :

Propriété 10 :

Soit U un ouvert convexe de $\mathbb{R}^p$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^1$ sur U. Si il existe un réel M tel que pour tout point $a \in U$ on a

$$\left\|\vec{\nabla}_x f\right\|_1 = \sum_{j=1}^{p} \left| \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_x \right| \leq M$$

alors f est M-lipschitzienne sur U.

Démonstration :

Rappel : Si il existe un réel M tel que

$$\forall x \in [a,b],\ \left\|\vec{\nabla}_x f\right\|_1 = \sum_{j=1}^{p} \left| \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_x \right| \leq M$$

alors $\quad |f(b) - f(a)| \leq M \|b-a\|_1$

Propriété 10 :

Soit U un ouvert convexe de $\mathbb{R}^p$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^1$ sur U. Si il existe un réel M tel que pour tout point $a \in U$ on a

$$\left\|\vec{\nabla}_x f\right\|_1 = \sum_{j=1}^{p} \left| \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_x \right| \leq M$$

alors f est M-lipschitzienne sur U.

Démonstration :

Rappel : Si il existe un réel M tel que

$$\forall x \in [a,b],\ \left\|\vec{\nabla}_x f\right\|_1 = \sum_{j=1}^{p} \left| \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_x \right| \leq M$$

alors $\quad |f(b) - f(a)| \leq M \|b - a\|_1$

appliquer le théorème des accroissements finis à toutes les paires de points de U

$$\Rightarrow \quad \forall (a,b) \in U,\ |f(b) - f(a)| \leq M \|b - a\|_1$$

ce qui est la définition d'une application M-lipschitzienne.

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 11 : (fonction constante)

Soit U un ouvert convexe de $\mathbb{R}^p$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^1$ sur U. Alors f est constante sur U si, et seulement si, $\vec{\nabla}_a f$ est nul pour tout $a \in U$, c'est-à-dire

$$\forall j \in [\![1, p]\!], \ \forall a \in U, \ \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a = 0$$

alors f est M-lipschitzienne sur U.

Démonstration :

$$f \text{ constante} \iff f \text{ 0-lipschitzienne}$$

On considère dans cette partie, les équations aux dérivées partielles du 1er ordre

c'est-à-dire des équations fonctionnelles de la forme

$$F\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, f, x, y\right) = 0$$

où la fonction f inconnue est une fonction de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$.

On considère dans cette partie, les équations aux dérivées partielles du 1er ordre

c'est-à-dire des équations fonctionnelles de la forme

$$F\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, f, x, y\right) = 0$$

où la fonction f inconnue est une fonction de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$.

exemples :

$$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} + 3\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 e^y$$

$$2y\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} + 3x\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = xy$$

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 8 :

Soit $g : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ une application continue sur un ouvert $U \subset \mathbb{R}^2$. Les solutions de classe $\mathcal{C}^1$ sur U de l'EDP

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \tag{4.4}$$

sont de la forme

$$f(x,y) = K(y) + \int g(x,y)dx$$

où $\int g(x,y)dx$ est une primitive quelconque de g par rapport à la variable x. K est une fonction quelconque de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^1$ sur un ouvert de $\mathbb{R}$ correspondant à la projection de U sur l'axe Oy.

Démonstration : trivial

$\Rightarrow$ pas aussi simple que l'EDP précédente

$\Rightarrow$ on cherchera des solutions à des EDP du 1er ordre un peu plus complexe.

$\longrightarrow$ pas de méthodes générales

$\longrightarrow$ résolution par changement de variables ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

$\mathcal{C}^1$-difféomorphisme et changement de variables

Définition 7 : ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V.

$\mathcal{C}^1$-difféomorphisme et changement de variables

Définition 7 : ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V.

Quel est l'intérêt d'introduire le concept de $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ?

Ph.D. Elian Masnada

$\mathcal{C}^1$-difféomorphisme et changement de variables

Définition 7 : ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V.

Quel est l'intérêt d'introduire le concept de $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ?

Considérons une EDP portant sur la fonction inconnue f

$$F\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, f, x, y\right) = 0$$

trop dur

$\mathcal{C}^1$-difféomorphisme et changement de variables

Définition 7 : ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V.

Quel est l'intérêt d'introduire le concept de $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ?

Considérons une EDP portant sur la fonction inconnue f

Soit ϕ un changement de variables. $(x, y) = \phi(u, v)$

Alors $h = f \circ \phi$

$$F\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, f, x, y\right) = 0$$

trop dur

$\mathcal{C}^1$-difféomorphisme et changement de variables

Définition 7 : ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V.

Quel est l'intérêt d'introduire le concept de $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ?

Considérons une EDP portant sur la fonction inconnue f

Soit ϕ un changement de variables. $(x, y) = \phi(u, v)$

Alors $h = f \circ \phi$

1. Si ϕ est $\mathcal{C}^1$ alors h est $\mathcal{C}^1$ par composition de fonctions $\mathcal{C}^1$

$$F\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, f, x, y\right) = 0$$

trop dur

$\mathcal{C}^1$-difféomorphisme et changement de variables

Définition 7 : ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V.

Quel est l'intérêt d'introduire le concept de $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ?

Considérons une EDP portant sur la fonction inconnue f

Soit ϕ un changement de variables. $(x, y) = \phi(u, v)$

Alors $h = f \circ \phi$

1. Si ϕ est $\mathcal{C}^1$ alors h est $\mathcal{C}^1$ par composition de fonctions $\mathcal{C}^1$
2. Si ϕ est une bijection

nouvelles variables $\longleftrightarrow$ anciennes variables

$$F\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, f, x, y\right) = 0$$

trop dur

$\mathcal{C}^1$-difféomorphisme et changement de variables

Définition 7 : ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V.

Quel est l'intérêt d'introduire le concept de $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ?

Considérons une EDP portant sur la fonction inconnue f

Soit ϕ un changement de variables. $(x, y) = \phi(u, v)$

Alors $h = f \circ \phi$

1. Si ϕ est $\mathcal{C}^1$ alors h est $\mathcal{C}^1$ par composition de fonctions $\mathcal{C}^1$
2. Si ϕ est une bijection

   nouvelles variables $\longleftrightarrow$ anciennes variables
3. Si ϕ^{-1} est $\mathcal{C}^1$ alors $f = h \circ \phi^{-1}$ et f est bien $\mathcal{C}^1$

$$F\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, f, x, y\right) = 0$$

trop dur

$\mathcal{C}^1$-difféomorphisme et changement de variables

Définition 7 : ($\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^1$ sur V.

Quel est l'intérêt d'introduire le concept de $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ?

Considérons une EDP portant sur la fonction inconnue f

Soit ϕ un changement de variables. $(x, y) = \phi(u, v)$

Alors $h = f \circ \phi$

1. Si ϕ est $\mathcal{C}^1$ alors h est $\mathcal{C}^1$ par composition de fonctions $\mathcal{C}^1$
2. Si ϕ est une bijection

   nouvelles variables $\longleftrightarrow$ anciennes variables
3. Si ϕ^{-1} est $\mathcal{C}^1$ alors $f = h \circ \phi^{-1}$ et f est bien $\mathcal{C}^1$

$$F\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, f, x, y\right) = 0 \quad \overset{\phi}{\longleftrightarrow} \quad H\left(\frac{\partial h}{\partial u}, \frac{\partial h}{\partial v}, h, u, v\right) = 0$$

$\mathcal{C}^1$-difféomorphe

trop dur

plus facile

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 12 :

Si ϕ est une application linéaire bijective de $\mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$, alors $p = n$ et ϕ est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme.

Démonstration :

→ Une application linéaire est une bijection si et seulement si $n = p$

→ ϕ est linéaire ⇒ $\mathcal{C}^1$

→ ϕ^{-1} est linéaire ⇒ $\mathcal{C}^1$

⇒ Finalement l'application linéaire est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme

Propriété 13 : (caractérisation rapide d'un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Si l'application ϕ de U dans V vérifie les 3 prorpiétés suivantes

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U
2. ϕ réalise une bijection de U dans V
3. pour tout point a de U, $D_a\phi$ est une application linéaire bijective de $\mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$.

alors $p = n$ et ϕ est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U sur V.

Démonstration : Admis.

Propriété 13 : (caractérisation rapide d'un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Si l'application ϕ de U dans V vérifie les 3 prorpiétés suivantes

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^1$ sur U
2. ϕ réalise une bijection de U dans V
3. pour tout point a de U, $D_a\phi$ est une application linéaire bijective de $\mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}^n$.

alors $p = n$ et ϕ est un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme de U sur V.

Démonstration : Admis.

Propriété 14 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et $a \in U$. Soit ϕ une application de U dans $\mathbb{R}^n$. Si le jacobien associé à l'application ϕ, en a, est non nul alors $D_a\phi$ est une application linéaire bijective en a.

Démonstration : voir polycopié

Ph.D. Elian Masnada

Exemple : Soit U et V les deux ensembles définis par

$$U = \mathbb{R}_+^* \times]0, 2\pi[\times]0, \pi[$$
$$V = \mathbb{R}^3 \backslash \{\mathbb{R}_+ \times \{0\} \times \mathbb{R}\}$$

et l'application

$$\begin{array}{rccl} f & : & U & \to & V \\ & & (\rho, \theta, \phi) & \mapsto & f(\rho, \theta, \phi) = (\rho \sin\theta \sin\phi, \rho \sin\theta \sin\phi, \rho\cos\phi) \\ & & & & = (f_1, f_2, f_3) \end{array}$$

Exemple : Soit U et V les deux ensembles définis par

$$U = \mathbb{R}_+^* \times]0, 2\pi[\times]0, \pi[$$
$$V = \mathbb{R}^3 \backslash \{\mathbb{R}_+ \times \{0\} \times \mathbb{R}\}$$

et l'application

$$\begin{array}{rccl} f : & U & \to & V \\ & (\rho, \theta, \phi) & \mapsto & f(\rho, \theta, \phi) = (\rho \sin\theta \sin\phi, \rho \sin\theta \sin\phi, \rho\cos\phi) \\ & & & = (f_1, f_2, f_3) \end{array}$$

alors f est bien un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme. En effet

Ph.D. Elian Masnada

Exemple : Soit U et V les deux ensembles définis par

$$U = \mathbb{R}_+^* \times]0, 2\pi[\times]0, \pi[$$
$$V = \mathbb{R}^3 \backslash \{\mathbb{R}_+ \times \{0\} \times \mathbb{R}\}$$

et l'application

$$\begin{array}{rccl} f & : & U & \rightarrow & V \\ & & (\rho, \theta, \phi) & \mapsto & f(\rho, \theta, \phi) = (\rho \sin\theta \sin\phi, \rho \sin\theta \sin\phi, \rho\cos\phi) \\ & & & & = (f_1, f_2, f_3) \end{array}$$

alors f est bien un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme. En effet

1. f est $\mathcal{C}^1$ sur U car toutes les applications composantes le sont.

Ph.D. Elian Masnada

Exemple : Soit U et V les deux ensembles définis par

$$U = \mathbb{R}_+^* \times]0, 2\pi[\times]0, \pi[$$
$$V = \mathbb{R}^3 \backslash \{\mathbb{R}_+ \times \{0\} \times \mathbb{R}\}$$

et l'application

$$\begin{array}{rcccl} f & : & U & \to & V \\ & & (\rho, \theta, \phi) & \mapsto & f(\rho, \theta, \phi) = (\rho \sin\theta \sin\phi, \rho \sin\theta \sin\phi, \rho \cos\phi) \\ & & & & \qquad\qquad\; = (f_1, f_2, f_3) \end{array}$$

alors f est bien un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme. En effet

1. f est $\mathcal{C}^1$ sur U car toutes les applications composantes le sont.
2. f est une bijection de U dans V

Exemple : Soit U et V les deux ensembles définis par

$$U = \mathbb{R}_+^* \times]0, 2\pi[\times]0, \pi[$$
$$V = \mathbb{R}^3 \backslash \{\mathbb{R}_+ \times \{0\} \times \mathbb{R}\}$$

et l'application

$$\begin{array}{rcccl} f & : & U & \to & V \\ & & (\rho, \theta, \phi) & \mapsto & f(\rho, \theta, \phi) = (\rho \sin\theta \sin\phi, \rho \sin\theta \sin\phi, \rho\cos\phi) \\ & & & & \qquad\qquad\;\; = (f_1, f_2, f_3) \end{array}$$

alors f est bien un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme. En effet

1. f est $\mathcal{C}^1$ sur U car toutes les applications composantes le sont.
2. f est une bijection de U dans V
3. montrons maintenant que $D_a f$ pour tout $a \in U$ est bijective. Pour cela déterminons le jacobien

$$J_f(a) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_1}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_1}{\partial \phi}\right|_a \\ \left.\frac{\partial f_2}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_2}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_2}{\partial \phi}\right|_a \\ \left.\frac{\partial f_3}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_3}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_3}{\partial \phi}\right|_a \end{pmatrix}$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple : Soit U et V les deux ensembles définis par

$$U = \mathbb{R}_+^* \times]0, 2\pi[\times]0, \pi[$$
$$V = \mathbb{R}^3 \backslash \{\mathbb{R}_+ \times \{0\} \times \mathbb{R}\}$$

et l'application

$$\begin{array}{rcl} f \quad : \quad U & \to & V \\ (\rho, \theta, \phi) & \mapsto & f(\rho, \theta, \phi) = (\rho \sin\theta \sin\phi, \rho \sin\theta \sin\phi, \rho\cos\phi) \\ & & \qquad\qquad\; = (f_1, f_2, f_3) \end{array}$$

alors f est bien un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme. En effet

1. f est $\mathcal{C}^1$ sur U car toutes les applications composantes le sont.
2. f est une bijection de U dans V
3. montrons maintenant que $D_a f$ pour tout $a \in U$ est bijective. Pour cela déterminons le jacobien

$$J_f(a) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_1}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_1}{\partial \phi}\right|_a \\ \left.\frac{\partial f_2}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_2}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_2}{\partial \phi}\right|_a \\ \left.\frac{\partial f_3}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_3}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_3}{\partial \phi}\right|_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta\sin\phi & -\rho\sin\theta\sin\phi & \rho\cos\theta\cos\phi \\ \sin\theta\sin\phi & \rho\cos\theta\sin\phi & \rho\sin\theta\cos\phi \\ \cos\phi & 0 & -\rho\sin\phi \end{pmatrix}$$

Exemple : Soit U et V les deux ensembles définis par

$$U = \mathbb{R}_+^* \times]0, 2\pi[\times]0, \pi[$$
$$V = \mathbb{R}^3 \backslash \{\mathbb{R}_+ \times \{0\} \times \mathbb{R}\}$$

et l'application

$$\begin{array}{rccl} f & : & U & \rightarrow & V \\ & & (\rho, \theta, \phi) & \mapsto & f(\rho, \theta, \phi) = (\rho \sin\theta \sin\phi, \rho \sin\theta \sin\phi, \rho \cos\phi) \\ & & & & = (f_1, f_2, f_3) \end{array}$$

alors f est bien un $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme. En effet

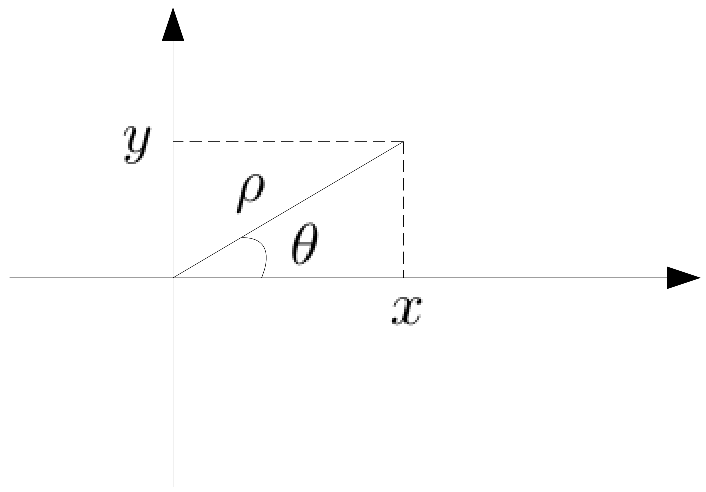
1. f est $\mathcal{C}^1$ sur U car toutes les applications composantes le sont.
2. f est une bijection de U dans V
3. montrons maintenant que $D_a f$ pour tout $a \in U$ est bijective. Pour cela déterminons le jacobien

$$J_f(a) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_1}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_1}{\partial \phi}\right|_a \\ \left.\frac{\partial f_2}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_2}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_2}{\partial \phi}\right|_a \\ \left.\frac{\partial f_3}{\partial \rho}\right|_a & \left.\frac{\partial f_3}{\partial \theta}\right|_a & \left.\frac{\partial f_3}{\partial \phi}\right|_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \sin\phi & -\rho \sin\theta \sin\phi & \rho \cos\theta \cos\phi \\ \sin\theta \sin\phi & \rho \cos\theta \sin\phi & \rho \sin\theta \cos\phi \\ \cos\phi & 0 & -\rho \sin\phi \end{pmatrix}$$

et donc $|J_f(a)| = -\rho^2 \sin\phi \neq 0$ pour tout $a \in U$.

Ph.D. Elian Masnada

Changement de variable en coordonnées polaires

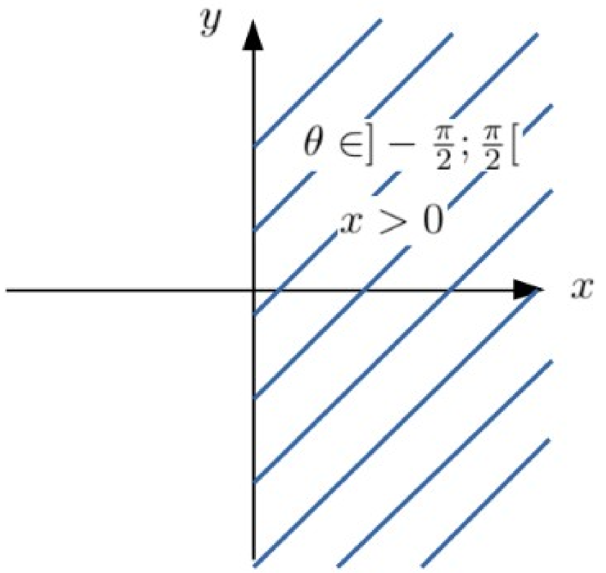


$$\begin{cases} x = \rho\cos(\theta) \\ y = \rho\sin(\theta) \end{cases}$$

Question : Comment créer un $\mathcal{C}^1$-diffeomorphisme ?

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

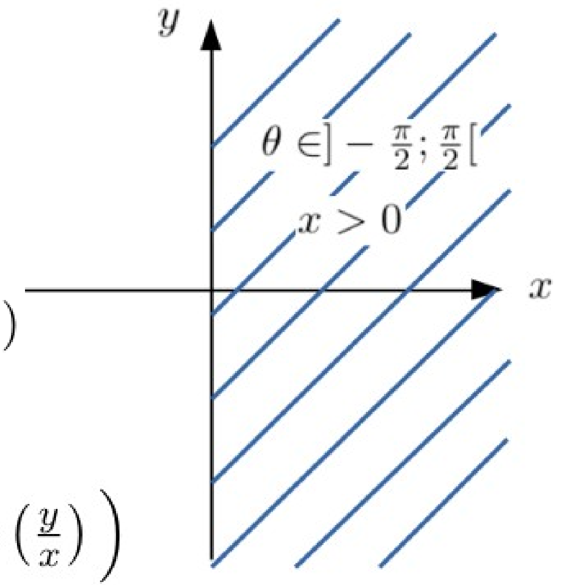


Chapitre 4 :

Calcul différentiel du 1er ordre

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

Introduisons les applications suivantes



$$\phi \quad : \quad \mathbb{R}_+^* \times]-\tfrac{\pi}{2};\tfrac{\pi}{2}[\quad \to \quad \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}$$

$$(\rho,\theta) \quad \mapsto \quad (x,y) = (\rho\cos(\theta), \rho\sin(\theta))$$

$$\phi^{-1} \quad : \quad \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R} \quad \to \quad \mathbb{R}_+^* \times]-\tfrac{\pi}{2};\tfrac{\pi}{2}[$$

$$(x,y) \quad \mapsto \quad (\rho,\theta) = \left(\sqrt{x^2+y^2}, Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)$$

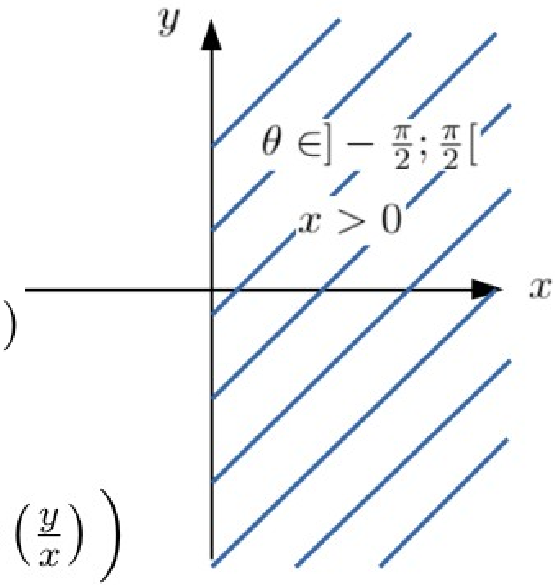
Ph.D. Elian Masnada

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

Introduisons les applications suivantes

$$\begin{array}{rcccl} \phi & : & \mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[& \to & \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R} \\ & & (\rho,\theta) & \mapsto & (x,y) = (\rho\cos(\theta), \rho\sin(\theta)) \end{array}$$

$$\begin{array}{rcccl} \phi^{-1} & : & \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R} & \to & \mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[\\ & & (x,y) & \mapsto & (\rho,\theta) = \left(\sqrt{x^2+y^2}, Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) \end{array}$$



Vérifions qu'il s'agit d'un $\mathcal{C}^1$-diffeomorphisme de $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ dans $\mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}$

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

<u>ϕ est-elle $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$?</u>

Ph.D. Elian Masnada

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ est-elle $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$?

ϕ est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$ car ses applications compopsantes $x = \rho\cos(\theta)$ et $y = \rho\sin(\theta)$ sont $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$ comme produit de fonctions $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$.

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ est-elle $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$?

ϕ est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ car ses applications compopsantes $x = \rho\cos(\theta)$ et $y = \rho\sin(\theta)$ sont $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ comme produit de fonctions $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$.

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ est-elle $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$?

ϕ est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ car ses applications compopsantes $x = \rho\cos(\theta)$ et $y = \rho\sin(\theta)$ sont $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ comme produit de fonctions $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$.

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

$$\begin{aligned}(\phi^{-1}\circ\phi)(\rho,\theta) &= \phi^{-1}\big(\phi(\rho,\theta)\big) = \phi^{-1}\big(\rho\cos(\theta),\rho\sin(\theta)\big)\\ &= \left(\sqrt{\rho^2\cos^2(\theta)+\rho^2\sin^2(\theta)}, Arctan\left(\frac{\rho\sin(\theta)}{\rho\cos(\theta)}\right)\right)\end{aligned}$$

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ est-elle $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$?

ϕ est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ car ses applications compopsantes $x = \rho\cos(\theta)$ et $y = \rho\sin(\theta)$ sont $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ comme produit de fonctions $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$.

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

$$\begin{aligned}(\phi^{-1}\circ\phi)(\rho,\theta) &= \phi^{-1}\big(\phi(\rho,\theta)\big) = \phi^{-1}\big(\rho\cos(\theta),\rho\sin(\theta)\big)\\ &= \Big(\sqrt{\rho^2\cos^2(\theta)+\rho^2\sin^2(\theta)}, Arctan\Big(\frac{\rho\sin(\theta)}{\rho\cos(\theta)}\Big)\Big)\end{aligned}$$

$\sqrt{\rho^2} = \rho$
puisque $\rho > 0$

$$Arctan\Big(\frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)}\Big) = Arctan\Big(\tan(\theta)\Big) = \theta$$

Ph.D. Elian Masnada

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ est-elle $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$?

ϕ est bien $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ car ses applications compopsantes $x = \rho\cos(\theta)$ et $y = \rho\sin(\theta)$ sont $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$ comme produit de fonctions $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$.

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

$$(\phi^{-1}\circ\phi)(\rho,\theta) = \phi^{-1}\big(\phi(\rho,\theta)\big) = \phi^{-1}\big(\rho\cos(\theta),\rho\sin(\theta)\big)$$
$$= \left(\sqrt{\rho^2\cos^2(\theta)+\rho^2\sin^2(\theta)}, Arctan\left(\frac{\rho\sin(\theta)}{\rho\cos(\theta)}\right)\right)$$

$\phi^{-1}\circ\phi =$ identité

Ph.D. Elian Masnada

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

$$(\phi\circ\phi^{-1})(x,y) = \phi(\phi^{-1}(x,y)) = \phi\left(\sqrt{x^2+y^2}; Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)$$

$$= \left(\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right); \sqrt{x^2+y^2}\sin\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)$$

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

$$(\phi \circ \phi^{-1})(x,y) = \phi(\phi^{-1}(x,y)) = \phi\left(\sqrt{x^2+y^2}; Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)$$

$$= \left(\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right); \sqrt{x^2+y^2}\sin\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)$$

$$\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) = \sqrt{\cos^2\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)} = \sqrt{\frac{1}{1+\tan^2\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)}}$$

$$= \sqrt{\frac{x^2}{x^2+y^2}} = \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}$$

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

<u>ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?</u>

$$(\phi \circ \phi^{-1})(x, y) = \phi(\phi^{-1}(x, y)) = \phi\left(\sqrt{x^2 + y^2}; Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)$$

$$= \left(\sqrt{x^2 + y^2}\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right); \sqrt{x^2 + y^2}\sin\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)$$

$$\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) = \sqrt{\cos^2\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)} = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)}}$$

$$= \sqrt{\frac{x^2}{x^2 + y^2}} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$x > 0$

Ph.D. Elian Masnada

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

$$(\phi \circ \phi^{-1})(x,y) = \phi(\phi^{-1}(x,y)) = \phi\left(\sqrt{x^2+y^2}; Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)$$

$$= \left(\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right); \sqrt{x^2+y^2}\sin\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)$$

$$\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) = \sqrt{\cos^2\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)} = \sqrt{\frac{1}{1+\tan^2\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)}}$$

$$= \sqrt{\frac{x^2}{x^2+y^2}} = \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}$$

$$\sin\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) = \tan\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) = \frac{y}{x} \times \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}$$

$$= \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}$$

Ph.D. Elian Masnada

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

$$(\phi \circ \phi^{-1})(x,y) = \phi(\phi^{-1}(x,y)) = \phi\left(\sqrt{x^2+y^2}; Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)$$

$$= \left(\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right); \sqrt{x^2+y^2}\sin\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)$$

$$\Downarrow$$

$$(\phi \circ \phi^{-1})(x,y) = (x,y) \Longleftrightarrow \phi \circ \phi^{-1} = \mathbb{1}$$

Ph.D. Elian Masnada

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

ϕ et ϕ^{-1} sont-elles en bijection ?

$$(\phi \circ \phi^{-1})(x,y) = \phi(\phi^{-1}(x,y)) = \phi\left(\sqrt{x^2+y^2}; Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)$$

$$= \left(\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right); \sqrt{x^2+y^2}\sin\left(Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)$$

$$(\phi \circ \phi^{-1})(x,y) = (x,y) \Longleftrightarrow \phi \circ \phi^{-1} = \mathbb{1}$$

Donc bijection

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

Calcul du Jacobien de ϕ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

Calcul du Jacobien de ϕ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$

$$J_\phi(\rho,\theta) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \rho} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial \rho} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\rho\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \rho\cos(\theta) \end{pmatrix}$$

Chapitre 4 :

Calcul différentiel du 1er ordre

a. Introduction du chapitre 4

b. Dérivées partielles du 1er ordre

c. Fonctions différentiables

d. EDP du 1er ordre et C^1-difféomorphisme

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

Calcul du Jacobien de ϕ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$

$$J_\phi(\rho,\theta) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \rho} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial \rho} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\rho\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \rho\cos(\theta) \end{pmatrix}$$

pour $(\rho,\theta) \in \mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}[$

$$|J_\phi(\rho,\theta)| = \rho\cos^2(\theta) + \rho\sin^2(\theta) = \rho > 0$$

A) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x > 0$

Calcul du Jacobien de ϕ sur $\mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$

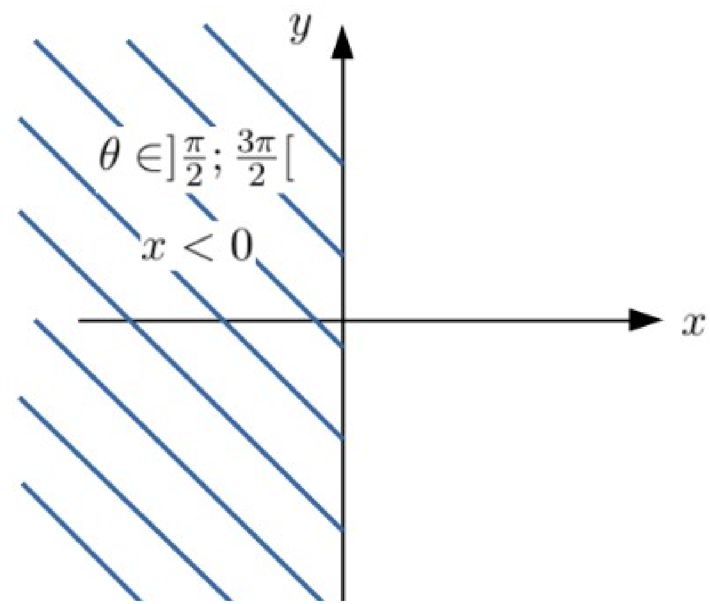
$$J_\phi(\rho, \theta) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \rho} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial \rho} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\rho \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \rho \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

pour $(\rho, \theta) \in \mathbb{R}_+^* \times]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$

$$|J_\phi(\rho, \theta)| = \rho \cos^2(\theta) + \rho \sin^2(\theta) = \rho > 0$$

Pour conclure, les transformations ϕ et ϕ^{-1} réalise donc bien un $\mathcal{C}^1$ diffeo-morphisme du demi-plan $x > 0$.

B) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $x < 0$

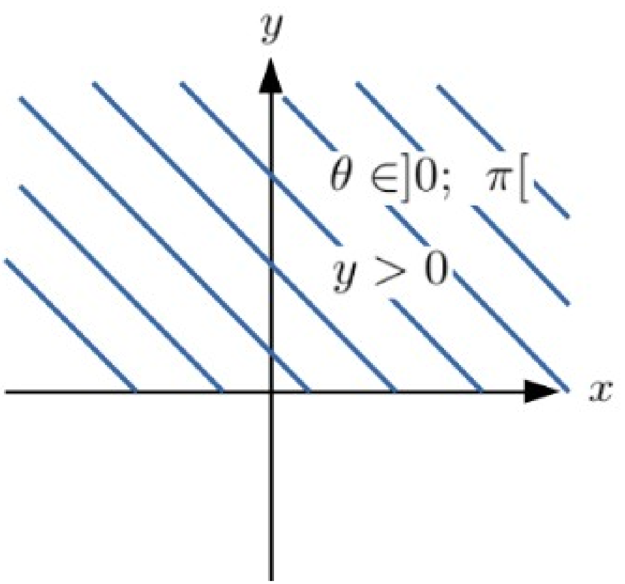


Alors le $\mathcal{C}^1$-diffeomorphisme est défini par

$$\begin{array}{llll} \phi & : & \mathbb{R}_+^* \times]\frac{\pi}{2};\frac{3\pi}{2}[& \to & \mathbb{R}_-^* \times \mathbb{R} \\ & & (\rho,\theta) & \mapsto & (x,y) = (\rho\cos(\theta), \rho\sin(\theta)) \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \phi^{-1} & : & \mathbb{R}_-^* \times \mathbb{R} & \to & \mathbb{R}_+^* \times]\frac{\pi}{2};\frac{3\pi}{2}[\\ & & (x,y) & \mapsto & (\rho,\theta) = \left(\sqrt{x^2+y^2}, \pi + Arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) \end{array}$$

C) Changement de coordonnées polaires pour le demi-plan $y > 0$



Alors le $\mathcal{C}^1$-diffeomorphisme est défini par

$$\begin{array}{cccc} \phi & : & \mathbb{R}_+^* \times]0;\pi[& \rightarrow & \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+^* \\ & & (\rho, \theta) & \mapsto & (x, y) = (\rho\cos(\theta), \rho\sin(\theta)) \end{array}$$

$$\begin{array}{cccc} \phi^{-1} & : & \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+^* & \rightarrow & \mathbb{R}_+^* \times]0;\pi[\\ & & (x, y) & \mapsto & (\rho, \theta) = \left(\sqrt{x^2+y^2}, Arccos\left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)\right) \end{array}$$

Résolution des EDPs par changement de variables

Direct	Indirect
$(x;y)=\varphi(u,v)$ $\varphi : \begin{cases} V \longrightarrow U \\ (u;v) \longmapsto (x(u,v);y(u,v)) \end{cases}$	$(u;v)=\varphi(x,y)$ $\varphi : \begin{cases} U \longrightarrow V \\ (x;y) \longmapsto (u(x,y);v(x,y)) \end{cases}$
φ est un $\mathscr{C}^1$-difféomorphisme de U sur V.	
Posons $g = f\circ\varphi$ avec $f\in\mathscr{C}^1(U;\mathbb{R})$ Ainsi $g\in\mathscr{C}^1(V;\mathbb{R})$	Posons $g = f\circ\varphi^{-1}$, c'est-à-dire $f = g\circ\varphi$, avec $f\in\mathscr{C}^1(U;\mathbb{R})$ Ainsi $g\in\mathscr{C}^1(V;\mathbb{R})$
Changement de variables	
$\begin{cases} \frac{\partial g}{\partial u} = \boxed{\frac{\partial f}{\partial x}}\frac{\partial x}{\partial u} + \boxed{\frac{\partial f}{\partial y}}\frac{\partial y}{\partial u} \\ \frac{\partial g}{\partial v} = \boxed{\frac{\partial f}{\partial x}}\frac{\partial x}{\partial v} + \boxed{\frac{\partial f}{\partial y}}\frac{\partial y}{\partial v} \end{cases}$ Exprimer (E) à l'aide de $\frac{\partial g}{\partial u}$ et $\frac{\partial g}{\partial v}$ en reportant $\frac{\partial f}{\partial x}$ et $\frac{\partial f}{\partial y}$ en fonction de $\frac{\partial g}{\partial u}$ et $\frac{\partial g}{\partial v}$ Si le changement de variable est simple, il vaut parfois mieux l'inverser pour passer dans le cas « Indirect ».	$\begin{cases} \boxed{\frac{\partial f}{\partial x}} = \frac{\partial g}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial v}\frac{\partial v}{\partial x} \\ \boxed{\frac{\partial f}{\partial y}} = \frac{\partial g}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial g}{\partial v}\frac{\partial v}{\partial y} \end{cases}$ Injecter directement $\frac{\partial f}{\partial x}$ et $\frac{\partial f}{\partial y}$ dans (E) en fonction de $\frac{\partial g}{\partial u}$ et $\frac{\partial g}{\partial v}$
Résoudre l'équation $(E') : F\left(\frac{\partial g}{\partial u};\frac{\partial g}{\partial v};g;u;v\right)=0$	
Revenir, si le changement de variable est simple à inverser, aux variables initiales x et y en utilisant $(u;v)=\varphi^{-1}(x,y)$	Revenir aux variables initiales x et y en utilisant $(u;v)=\varphi(x,y)$.

Exemple :

$$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Exemple : $2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ???

Exemple : $2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{cccc} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ???

a) φ est trivialement $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$ car il s'agit d'une application linéaire

Exemple : $2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{cccc} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ???

a) φ est trivialement $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$ car il s'agit d'une application linéaire

b) bijection de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$?

$$\begin{cases} u = x \\ v = x + 2y \end{cases}$$

Exemple : $2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u, v) = (x, x + 2y)$

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{rccl} \varphi : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ???

a) φ est trivialement $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$ car il s'agit d'une application linéaire

b) bijection de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$?

$$\begin{cases} u = x \\ v = x + 2y \end{cases} \Longleftrightarrow \begin{cases} x = u \\ v = u + 2y \end{cases}$$

Exemple :

$$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{rccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \to \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ???

a) φ est trivialement $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$ car il s'agit d'une application linéaire

b) bijection de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$?

$$\begin{cases} u = x \\ v = x + 2y \end{cases} \iff \begin{cases} x = u \\ v = u + 2y \end{cases} \iff \begin{cases} x = u \\ y = (v-u)/2 \end{cases}$$

CY TECH

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ???

a) φ est trivialement $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$ car il s'agit d'une application linéaire

b) bijection de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$?

$$\begin{cases} u = x \\ v = x + 2y \end{cases} \iff \begin{cases} x = u \\ v = u + 2y \end{cases} \iff \begin{cases} x = u \\ y = (v-u)/2 \end{cases}$$

$$\left\{\begin{array}{l} \text{bijection} \\ \begin{array}{cccl} \varphi^{-1} & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ & & (u,v) & \mapsto \varphi^{-1}(u,v) = \Big(x(u,v), y(u,v)\Big) = (u, (v-u)/2) \end{array} \end{array}\right.$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{rcccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^1$-difféomorphisme ???

a) φ est trivialement $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$ car il s'agit d'une application linéaire

b) bijection de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$?

$$\begin{cases} u = x \\ v = x + 2y \end{cases} \iff \begin{cases} x = u \\ v = u + 2y \end{cases} \iff \begin{cases} x = u \\ y = (v-u)/2 \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{bijection} \\ \begin{array}{rcccl} \varphi^{-1} & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (u,v) & \mapsto & \varphi^{-1}(u,v) = \Big(x(u,v), y(u,v)\Big) = (u, (v-u)/2) \end{array} \end{array} \right.$$

c) φ^{-1} est trivialement $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$ car il s'agit d'une application linéaire

Exemple : $\quad 2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{rccl} \varphi : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 2 : Introduction de la nouvelle fonction g :

Exemple :

$$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u, v) = (x, x + 2y)$

$$\begin{array}{rccl} \varphi \ : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x, y) & \mapsto & \varphi(x, y) = \Big(u(x, y), v(x, y)\Big) = (x, x + 2y) \end{array}$$

<u>Etape 2</u> : Introduction de la nouvelle fonction g :

$$g = f \circ \varphi \Longleftrightarrow g(u, v) = (f \circ \varphi)(u, v) = f(\varphi(u, v))$$

Exemple : $2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{cccc} \varphi : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 2 : Introduction de la nouvelle fonction g :

$$g = f \circ \varphi \Longleftrightarrow g(u,v) = (f \circ \varphi)(u,v) = f(\varphi(u,v))$$

$$f = g \circ \varphi \Longleftrightarrow f(x,y) = (g \circ \varphi)(x,y) = g(\varphi(x,y))$$

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \to \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 2 : Introduction de la nouvelle fonction g :

$$\cancel{g = f \circ \varphi \Longleftrightarrow g(u,v) = (f\circ\varphi)(u,v) = f(\varphi(u,v))}$$

$$f = g \circ \varphi \Longleftrightarrow f(x,y) = (g\circ\varphi)(x,y) = g(\varphi(x,y))$$

Exemple :
$$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{lcccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 2 : Introduction de la nouvelle fonction g :

$$\cancel{g = f \circ \varphi \Longleftrightarrow g(u,v) = (f\circ\varphi)(u,v) = f(\varphi(u,v))}$$

$$f = g \circ \varphi \Longleftrightarrow f(x,y) = (g\circ\varphi)(x,y) = g(\varphi(x,y))$$

$$\Longleftrightarrow g = f \circ \varphi^{-1}$$

Exemple :
$$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{rccl} \varphi : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 2 : Introduction de la nouvelle fonction g :

$$\cancel{g = f \circ \varphi \Longleftrightarrow g(u,v) = (f \circ \varphi)(u,v) = f(\varphi(u,v))}$$

$$f = g \circ \varphi \Longleftrightarrow f(x,y) = (g \circ \varphi)(x,y) = g(\varphi(x,y))$$

$$\Longleftrightarrow g = f \circ \varphi^{-1}$$

Comme f et φ sont $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$ par stabilité de la propriété $\mathcal{C}^1$ par composition, g est également $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}^2$.

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{rccl} \varphi \ : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

<u>Etape 3</u> : Expression des dérivées partielles de f en fct de celles de g :

Exemple : $2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 3 : Expression des dérivées partielles de f en fct de celles de g :

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} \left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{x,y} + \left.\frac{\partial g}{\partial v}\right|_{u,v} \left.\frac{\partial v}{\partial x}\right|_{x,y} \\ \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} \left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{x,y} + \left.\frac{\partial g}{\partial v}\right|_{u,v} \left.\frac{\partial v}{\partial y}\right|_{x,y} \end{cases}$$

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 3 : Expression des dérivées partielles de f en fct de celles de g :

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} \left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{x,y} + \left.\frac{\partial g}{\partial v}\right|_{u,v} \left.\frac{\partial v}{\partial x}\right|_{x,y} \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} \left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{x,y} + \left.\frac{\partial g}{\partial v}\right|_{u,v} \left.\frac{\partial v}{\partial y}\right|_{x,y} \end{cases}$$

ce qui donne $$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} + \left.\frac{\partial g}{\partial v}\right|_{u,v} \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = 2\left.\frac{\partial g}{\partial v}\right|_{u,v} \end{cases}$$

Exemple : $2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{rccl} \varphi : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 4 : On injecte les expressions obtenues à l'étape 3 dans l'EDP

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{cccc} \varphi : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 4 : On injecte les expressions obtenues à l'étape 3 dans l'EDP

$$2\left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} = x^2 y = u^2 \times \frac{v-u}{2}$$

Exemple :
$$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$
en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{rccl} \varphi : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 4 : On injecte les expressions obtenues à l'étape 3 dans l'EDP

$$2\left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} = x^2 y = u^2 \times \frac{v-u}{2} \iff \left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} = \frac{1}{4}(u^2 v - u^3)$$

Exemple :

$$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \to \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 4 : On injecte les expressions obtenues à l'étape 3 dans l'EDP

$$2\left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} = x^2 y = u^2 \times \frac{v-u}{2} \iff \left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} = \frac{1}{4}(u^2 v - u^3)$$

Etape 5 : On résoud la nouvelle EDP sur g

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 4 : On injecte les expressions obtenues à l'étape 3 dans l'EDP

$$2\left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} = x^2 y = u^2 \times \frac{v-u}{2} \quad \Longleftrightarrow \quad \left.\frac{\partial g}{\partial u}\right|_{u,v} = \frac{1}{4}(u^2 v - u^3)$$

Etape 5 : On résoud la nouvelle EDP sur g

$$g(u,v) = \frac{u^3 v}{12} - \frac{u^4}{16} + K(v)$$

où K est une fonction quelconque, $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}$.

Exemple : $$2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{rccl} \varphi : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 6 : On revient à f

$$f = g \circ \varphi$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple : $2\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = x^2 y$

en utilisant le changement de variables $(u,v) = (x, x+2y)$

$$\begin{array}{cccl} \varphi & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,y) & \mapsto & \varphi(x,y) = \Big(u(x,y), v(x,y)\Big) = (x, x+2y) \end{array}$$

Etape 6 : On revient à f

$$f = g \circ \varphi$$

$$\boxed{f(x,y) = g(x, x+2y) = \frac{x^3(x+2y)}{12} - \frac{x^4}{16} + K(x+2y)}$$

→ définition des dérivées partielles d'ordre supérieur ou égal à 2

→ résolution des systèmes d'EDPs d'ordre 1

→ résolution des EDPs d'ordre 2

→ recherche des extremums des fonctions de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$

Définition 1 : (Dérivées partielles d'ordre supérieur)

Soient U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, f une application de U dans $\mathbb{R}^n$ et $a \in U$. Soient $k \in \mathbb{N}^*$ et $(i_1, i_2, .., i_k) \in [\![1, p]\!]^k$ un k-uplet d'entiers.

On dit que f admet une dérivée partielle kème en a par rapport aux variables numéro $i_1, ..., i_k$ si, et seulement si

— f admet une dérivée $(k-1)$ème par rapport aux variables numéro $i_1, i_2, ..., i_{k-1}$ sur un voisinage de a.

— cette dérivée partielle $(k-1)$ème admet, elle-même, une dérivée partielle première en a par rapport à la variable $k$ème.

Dans ce cas, cette dernière dérivée est appelée la dérivée partielle $k$ème en a par rapport aux variables numéro $i_1, i_2, ..., i_k$. On note cette dérivée

$$\left.\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_k} ... \partial x_{i_2} \partial x_{i_1}}\right|_a$$

Ph.D. Elian Masnada

Définition 1 : (Dérivées partielles d'ordre supérieur)

Soient U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, f une application de U dans $\mathbb{R}^n$ et $a \in U$. Soient $k \in \mathbb{N}^*$ et $(i_1, i_2, .., i_k) \in [\![1, p]\!]^k$ un k-uplet d'entiers.

On dit que f admet une dérivée partielle kème en a par rapport aux variables numéro $i_1, ..., i_k$ si, et seulement si

- f admet une dérivée $(k-1)$ème par rapport aux variables numéro $i_1, i_2, ..., i_{k-1}$ sur un voisinage de a.
- cette dérivée partielle $(k-1)$ème admet, elle-même, une dérivée partielle première en a par rapport à la variable $k$ème.

Dans ce cas, cette dernière dérivée est appelée la dérivée partielle $k$ème en a par rapport aux variables numéro $i_1, i_2, ..., i_k$. On note cette dérivée

$$\left.\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_k} ... \partial x_{i_2} \partial x_{i_1}}\right|_a$$

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_a \qquad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}\right|_a \qquad \left.\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y \partial z}\right|_a$$

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit $f(x, y, z) = xy^2z^3$

Exemple :

Soit $f(x, y, z) = xy^2z^3$

Alors

$$\left.\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y \partial z}\right|_{x,y,z}$$

Exemple :

Soit $f(x,y,z) = xy^2z^3$

Alors

$$\left.\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y \partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial f}{\partial z}\right|_{x,y,z}$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit $f(x,y,z) = xy^2z^3$

Alors

$$\left.\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y \partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial f}{\partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2 (3xy^2z^2)}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z}$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit $f(x,y,z) = xy^2z^3$

Alors

$$\left.\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y \partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial f}{\partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2 (3xy^2z^2)}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z}$$

$$= \left.\frac{\partial}{\partial x}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial (3xy^2z^2)}{\partial y}\right|_{x,y,z}$$

Exemple :

Soit $f(x,y,z) = xy^2z^3$

Alors

$$\left.\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y \partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial f}{\partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2(3xy^2z^2)}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z}$$
$$= \left.\frac{\partial}{\partial x}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial(3xy^2z^2)}{\partial y}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial(6xyz^2)}{\partial x}\right|_{x,y,z}$$

Exemple :

Soit $f(x, y, z) = xy^2z^3$

Alors

$$\left.\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y \partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial f}{\partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2 (3xy^2z^2)}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z}$$

$$= \left.\frac{\partial}{\partial x}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial (3xy^2z^2)}{\partial y}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial (6xyz^2)}{\partial x}\right|_{x,y,z} = 6yz^2$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

Soit $f(x,y,z) = xy^2z^3$

Alors

$$\left.\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y \partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial f}{\partial z}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial^2 (3xy^2z^2)}{\partial x \partial y}\right|_{x,y,z}$$

$$= \left.\frac{\partial}{\partial x}\right|_{x,y,z} \left.\frac{\partial (3xy^2z^2)}{\partial y}\right|_{x,y,z} = \left.\frac{\partial (6xyz^2)}{\partial x}\right|_{x,y,z} = 6yz^2$$

Définition 2 : (fonction de classe $\mathcal{C}^k$, $\mathcal{C}^\infty$)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}^n$. L'application f est dite de classe $\mathcal{C}^k$ sur U, si, et seulement si, toutes ses dérivées partielles d'ordre k existent et sont continues sur U. L'application f est dite de classe $\mathcal{C}^\infty$ si, et seulement si, pour tout $k \in \mathbb{N}$, elle est $\mathcal{C}^k$.

Propriété 1 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$. Soit f une application de U dans $\mathbb{R}^n$. f est $\mathcal{C}^k$ sur U. Alors toutes les dérivées partielles d'ordre inférieur ou égal à k sont définies et continues.

Démonstration : Admis.

structure algébrique de l'espace $\mathcal{C}^k(U,F)$
(espace des fonctions $\mathcal{C}^k$ sur $U \subset \mathbb{R}^p$)

$\longleftrightarrow$ structure algébrique de l'espace $\mathcal{C}^1(U,F)$

- espace vectoriel
- si $f,\ g \in \mathcal{C}^k(U,F)$ alors $f \times g \in \mathcal{C}^k(U,F)$
- **Théorème 1 : (stabilité de $\mathcal{C}^k$ par composition)**

  Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^k$ de U dans $\mathbb{R}^q$. Soit V un ouvert de $\mathbb{R}^q$ et g une application de classe $\mathcal{C}^k$ de V dans $\mathbb{R}^n$. Si $f(U) \subset V$, alors $g \circ f$ est de classe $\mathcal{C}^k$ sur U.

Démonstration : Admis.

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 2 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^k$ de U dans $\mathbb{R}^n$. On a équivalence entre

1. la fonction f est de classe $\mathcal{C}^k$.
2. les fonctions coordonnées de f dans la base $\mathbb{R}^n$ sont de classe $\mathcal{C}^k$.

Démonstration : évident.

$$\begin{array}{rcl} f \;:\; U \subset \mathbb{R}^p & \to & \mathbb{R}^n \\ (x,y,z) & \mapsto & f(x,y,z) = \Big(f_1(x_1,...,x_p),...,f_n(x_1,...,x_p)\Big) \end{array}$$

où les f_i sont des applications de $\mathbb{R}^p$ dans $\mathbb{R}$.

Alors, si : $\forall i \in [\![1\ ,\ n]\!]$, $f_i \in \mathcal{C}^k(U,\mathbb{R})$ $\Longleftrightarrow$ $f \in \mathcal{C}^k(U,\mathbb{R}^n)$

Théorème 3 : (théorème de Schwarz)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^1$ de U dans $\mathbb{R}^q$. Soit $a \in U$ et $(i,j) \in [\![1,p]\!]^2$. Si $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$ et $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ sont définies et continues en a alors

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a$$

Démonstration : Admis.

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 3 : (théorème de Schwarz)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^1$ de U dans $\mathbb{R}^q$. Soit $a \in U$ et $(i,j) \in [\![1,p]\!]^2$. Si $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$ et $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ sont définies et continues en a alors

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a$$

Remarque 1 :
Nous utiliserons toujours ce théorème dans le cas où f est une appli de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$. Alors le théorème stipule que si f est $\mathcal{C}^1$ en a et que $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$ et que $\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$ sont continues en a, alors

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}\right|_a$$

Remarque 2 :
f $\mathcal{C}^2$ en a est une condition suffisante pour que

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}\right|_a$$

Théorème 3 : (théorème de Schwarz)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^1$ de U dans $\mathbb{R}^q$. Soit $a \in U$ et $(i,j) \in [\![1,p]\!]^2$. Si $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$ et $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ sont définies et continues en a alors

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a$$

exemple 1 :

Soit la fonction $f(x,y) = x\sin(x)\sin(y)$

Théorème 3 : (théorème de Schwarz)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^1$ de U dans $\mathbb{R}^q$. Soit $a \in U$ et $(i,j) \in [\![1,p]\!]^2$. Si $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$ et $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ sont définies et continues en a alors

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a$$

exemple 1 :

Soit la fonction $f(x,y) = x\sin(x)\sin(y)$

f est $\mathcal{C}^\infty$ sur $\mathbb{R}^2$

produit de fonctions $\mathcal{C}^\infty$

Théorème 3 : (théorème de Schwarz)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^1$ de U dans $\mathbb{R}^q$. Soit $a \in U$ et $(i,j) \in [\![1,p]\!]^2$. Si $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$ et $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ sont définies et continues en a alors

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a$$

exemple 1 :

Soit la fonction $f(x,y) = x\sin(x)\sin(y)$

f est $\mathcal{C}^\infty$ sur $\mathbb{R}^2$

produit de fonctions $\mathcal{C}^\infty$ $\Rightarrow$ Schwarz

Théorème 3 : (théorème de Schwarz)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^1$ de U dans $\mathbb{R}^q$. Soit $a \in U$ et $(i,j) \in [\![1,p]\!]^2$. Si $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$ et $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ sont définies et continues en a alors

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a$$

exemple 1 :

Soit la fonction $f(x,y) = x\sin(x)\sin(y)$

f est $\mathcal{C}^\infty$ sur $\mathbb{R}^2$

produit de fonctions $\mathcal{C}^\infty$ $\Rightarrow$ Schwarz

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = \big(\sin(x) + x\cos(x)\big)\sin(y) \\ \frac{\partial f}{\partial y} = x\sin(x)\cos(y) \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Théorème 3 : (théorème de Schwarz)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et f une application $\mathcal{C}^1$ de U dans $\mathbb{R}^q$. Soit $a \in U$ et $(i,j) \in [\![1,p]\!]^2$. Si $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$ et $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ sont définies et continues en a alors

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a$$

exemple 1 :

Soit la fonction $f(x,y) = x\sin(x)\sin(y)$

f est $\mathcal{C}^\infty$ sur $\mathbb{R}^2$

produit de fonctions $\mathcal{C}^\infty$ $\Rightarrow$ Schwarz

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = \big(\sin(x) + x\cos(x)\big)\sin(y) \\ \frac{\partial f}{\partial y} = x\sin(x)\cos(y) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = \big(\sin(x) + x\cos(x)\big)\cos(y) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \big(\sin(x) + x\cos(x)\big)\cos(y) \end{cases}$$

exemple 2 : cas où il n'y a pas égalité

Soit la fonction $f(x,y) = \begin{cases} \frac{xy(x^2-y^2)}{x^2+y^2} & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases}$

exemple 2 : cas où il n'y a pas égalité

Soit la fonction $f(x,y) = \begin{cases} \frac{xy(x^2-y^2)}{x^2+y^2} & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases}$

Calculons les dérivées partielles du 1er ordre en $(0,0)$

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{0,0} = \lim\limits_{t\to 0}\left(\frac{f(t,0)-f(0,0)}{t}\right) = 0 \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0} = \lim\limits_{t\to 0}\left(\frac{f(0,t)-f(0,0)}{t}\right) = 0 \end{cases}$$

exemple 2 : cas où il n'y a pas égalité

Soit la fonction $f(x,y) = \begin{cases} \frac{xy(x^2-y^2)}{x^2+y^2} & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) = (0,0) \end{cases}$

Calculons les dérivées partielles du 1er ordre en $(0,0)$

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{0,0} = \lim\limits_{t\to 0} \left(\frac{f(t,0)-f(0,0)}{t}\right) = 0 \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0} = \lim\limits_{t\to 0} \left(\frac{f(0,t)-f(0,0)}{t}\right) = 0 \end{cases}$$

en un point $(x,y) \neq (0,0)$

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0} = -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

coordonnées polaires $\Rightarrow$ applications continues

Ph.D. Elian Masnada

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

coordonnées polaires $\longrightarrow$ applications continues

Etudions maintenant les dérivées secondes croisées en $(0,0)$

$$\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right|_{0,0}$$

Ph.D. Elian Masnada

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

coordonnées polaires → applications continues

Etudions maintenant les dérivées secondes croisées en $(0,0)$

$$\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{t,0} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0}\right)$$

Ph.D. Elian Masnada

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

coordonnées polaires $\Rightarrow$ applications continues

Etudions maintenant les dérivées secondes croisées en $(0,0)$

$$\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{t,0} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0}\right) = \lim_{t\to 0}\frac{t^5}{t^5} = 1$$

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

coordonnées polaires $\Rightarrow$ applications continues

Etudions maintenant les dérivées secondes croisées en $(0,0)$

$$\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{t,0} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0}\right) = \lim_{t\to 0}\frac{t^5}{t^5} = 1$$

$$\left.\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\right|_{0,0}$$

Ph.D. Elian Masnada

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

coordonnées polaires $\Rightarrow$ applications continues

Etudions maintenant les dérivées secondes croisées en $(0,0)$

$$\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{t,0} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0}\right) = \lim_{t\to 0}\frac{t^5}{t^5} = 1$$

$$\left.\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{0,t} - \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{0,0}\right)$$

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

coordonnées polaires $\Rightarrow$ applications continues

Etudions maintenant les dérivées secondes croisées en $(0,0)$

$$\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{t,0} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0}\right) = \lim_{t\to 0}\frac{t^5}{t^5} = 1$$

$$\left.\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{0,t} - \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{0,0}\right) = \lim_{t\to 0}-\frac{t^5}{t^5} = -1$$

Ph.D. Elian Masnada

Les fonctions dérivées partielles premières sont donc

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} \frac{y(4x^2y^2+x^4-y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \begin{cases} -\frac{x(4x^2y^2-x^4+y^4)}{(x^2+y^2)^2} & \text{si } (x,y) = (0,0) \\ 0 & \text{si } (x,y) \neq (0,0) \end{cases}$$

coordonnées polaires $\Rightarrow$ applications continues

Etudions maintenant les dérivées secondes croisées en $(0,0)$

$$\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{t,0} - \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{0,0}\right) = \lim_{t\to 0}\frac{t^5}{t^5} = 1$$

$$\left.\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\right|_{0,0} = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\left(\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{0,t} - \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{0,0}\right) = \lim_{t\to 0} -\frac{t^5}{t^5} = -1$$

$$\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right|_{0,0} \neq \left.\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\right|_{0,0}$$

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

<u>Etape 1 :</u> On vérifie que $\left.\dfrac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\dfrac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$

En effet

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 1 :

On vérifie que $\left.\frac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$

En effet

g et h sont $\mathcal{C}^1$ $\Rightarrow$ $\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial y}$ sont continues

Ph.D. Elian Masnada

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 1 : On vérifie que $\left.\dfrac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\dfrac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$

En effet

g et h sont $\mathcal{C}^1$ $\Rightarrow$ $\frac{\partial g}{\partial x}$, $\frac{\partial g}{\partial y}$, $\frac{\partial h}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial y}$ sont continues

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{\partial h}{\partial y} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial g}{\partial x} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = \frac{\partial g}{\partial y}$$

$\Rightarrow$ continues

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 1 : On vérifie que $\left.\dfrac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\dfrac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$

En effet

g et h sont $\mathcal{C}^1$ $\Rightarrow$ $\frac{\partial g}{\partial x}$, $\frac{\partial g}{\partial y}$, $\frac{\partial h}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial y}$ sont continues

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{\partial h}{\partial y} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial g}{\partial x} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = \frac{\partial g}{\partial y}$$

$\Rightarrow$ continues $\Rightarrow$ f est $\mathcal{C}^2$

Ph.D. Elian Masnada

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 1 : On vérifie que $\left.\dfrac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\dfrac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$

En effet

g et h sont $\mathcal{C}^1$ $\Rightarrow$ $\frac{\partial g}{\partial x}$, $\frac{\partial g}{\partial y}$, $\frac{\partial h}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial y}$ sont continues

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{\partial h}{\partial y} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial g}{\partial x} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = \frac{\partial g}{\partial y}$$

$\Rightarrow$ continues $\Rightarrow$ f est $\mathcal{C}^2$

Schwarz

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

<u>Etape 1 :</u> On vérifie que $\left.\frac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$

En effet

g et h sont $\mathcal{C}^1$ $\Rightarrow$ $\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial y}$ sont continues

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{\partial h}{\partial y} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial g}{\partial x} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = \frac{\partial g}{\partial y}$$

$\Rightarrow$ continues $\Rightarrow$ f est $\mathcal{C}^2$

Schwarz $\Rightarrow$ $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

<u>Etape 1 :</u> On vérifie que $\left.\dfrac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\dfrac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$

En effet

g et h sont $\mathcal{C}^1$ $\Rightarrow$ $\frac{\partial g}{\partial x}$, $\frac{\partial g}{\partial y}$, $\frac{\partial h}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial y}$ sont continues

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{\partial h}{\partial y} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial g}{\partial x} \qquad \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = \frac{\partial g}{\partial y}$$

$\Rightarrow$ continues $\Rightarrow$ f est $\mathcal{C}^2$

Schwarz $\Rightarrow$ $\dfrac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \dfrac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$ $\Rightarrow$ $\dfrac{\partial g}{\partial y} = \dfrac{\partial h}{\partial x}$

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 2 :

On résoud l'une des deux équations aux dérivées partielles.

par exemple la première :

$$f(x,y) = G(x,y) + K_1(y)$$

où G est une primtive selon x de g et K_1 est une fonction quelconque $\mathcal{C}^2$

Ph.D. Elian Masnada

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 2 :

On résoud l'une des deux équations aux dérivées partielles.

par exemple la première :

$$f(x,y) = G(x,y) + K_1(y)$$

où G est une primtive selon x de g et K_1 est une fonction quelconque $\mathcal{C}^2$

Etape 3 :

On dérive maintenant par l'autre variable la solution obtenue à l'étape 2.

Puis on injecte cette dérivée dans l'EDP pas encore été utilisée

→ équation sur K_1

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 4 :

On résoud l'équation obtenue à l'étape 3.

Ph.D. Elian Masnada

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 4 :

On résoud l'équation obtenue à l'étape 3.

Etape 5 :

On écrit alors la solution obtenue à l'étape 2 et l'étape 4

On cherche ici à résoudre le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = g(x,y) \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = h(x,y) \end{cases} \qquad \text{où } f,\ g \text{ et } h \text{ sont } \mathcal{C}^1$$

Etape 4 :

On résoud l'équation obtenue à l'étape 3.

Etape 5 :

On écrit alors la solution obtenue à l'étape 2 et l'étape 4

Exemple :

On cherche à résoudre, sur $\mathbb{R}^2$, le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) + \sin(x+y) - \sin x = g(x,y) \\ \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) = h(x,y) \end{cases}$$

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

On cherche à résoudre, sur $\mathbb{R}^2$, le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) + \sin(x+y) - \sin x = g(x,y) \\ \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) = h(x,y) \end{cases}$$

Exemple :

On cherche à résoudre, sur $\mathbb{R}^2$, le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) + \sin(x+y) - \sin x = g(x,y) \\ \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) = h(x,y) \end{cases}$$

Etape 1 :
On vérifie que

$$\left.\frac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$$

alors

$$\frac{\partial g}{\partial y} = -(x+1)\sin(x+y) + \cos(x+y) = \frac{\partial h}{\partial x}$$

donc, il est possible de trouver des solutions à ce système d'équations.

Ph.D. Elian Masnada

Chapitre 5 :

Calcul différentiel d'ordre supérieur

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

On cherche à résoudre, sur $\mathbb{R}^2$, le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) + \sin(x+y) - \sin x = g(x,y) \\ \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) = h(x,y) \end{cases}$$

Etape 1 :

On vérifie que

$$\left.\frac{\partial g}{\partial y}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x,y}$$

alors

$$\frac{\partial g}{\partial y} = -(x+1)\sin(x+y) + \cos(x+y) = \frac{\partial h}{\partial x}$$

donc, il est possible de trouver des solutions à ce système d'équations.

Etape 2 :

On intégre par rapport à y la seconde EDP (car elle est plus simple à intégrer). On obtient alors

$$f(x,y) = (x+1)\sin(x+y) + K_1(x)$$

où K_1 est une fonction $\mathcal{C}^2$ sur $\mathbb{R}$.

Chapitre 5 :

Calcul différentiel d'ordre supérieur

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

On cherche à résoudre, sur $\mathbb{R}^2$, le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) + \sin(x+y) - \sin x = g(x,y) \\ \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) = h(x,y) \end{cases}$$

Etape 3 :

On dérive maintenant l'expression précédente par rapport à x (l'autre variable)

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \sin(x+y) + (x+1)\cos(x+y) + \frac{\partial K_1}{\partial x}$$

On injecte cette expression dans l'EDP qui n'a pas encore été utilisée

$$\sin(x+y) + (x+1)\cos(x+y) + \frac{\partial K_1}{\partial x} = (x+1)\cos(x+y) + \sin(x+y) - \sin x$$

et finalement

$$\frac{\partial K_1}{\partial x} = -\sin x$$

Chapitre 5 :

Calcul différentiel
d'ordre supérieur

Ph.D. Elian Masnada

Exemple :

On cherche à résoudre, sur $\mathbb{R}^2$, le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) + \sin(x+y) - \sin x = g(x,y) \\ \\ \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) = h(x,y) \end{cases}$$

Etape 4 :

On intègre maintenant l'équation précédente

$$K_1(x) = \cos(x) + C$$

où $C \in \mathbb{R}$ est une constante d'intégration.

Exemple :

On cherche à résoudre, sur $\mathbb{R}^2$, le système d'équations aux dérivées partielles

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) + \sin(x+y) - \sin x = g(x,y) \\[2ex] \left.\dfrac{\partial f}{\partial y}\right|_{x,y} = (x+1)\cos(x+y) = h(x,y) \end{cases}$$

Etape 4 :
On intègre maintenant l'équation précédente

$$K_1(x) = \cos(x) + C$$

où $C \in \mathbb{R}$ est une constante d'intégration.

Etape 5 :
On peut maintenant écrire la solution

$$\begin{aligned} f(x,y) &= (x+1)\sin(x+y) + K_1(x) \\ &= (x+1)\sin(x+y) + \cos(x) + C \end{aligned}$$

avec $C \in \mathbb{R}$.

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Résolution des EDP d'ordre 2, c'est-à-dire les EDP qui font cette fois-ci apparaître les dérivées secondes de la fonction inconnue

Théorème 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Les solutions de classe $\mathcal{C}^2$ de l'équation $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0$ sont de la forme

$$f(x, y) = xG(y) + H(y)$$

où G et H sont des fonctions $\mathcal{C}^2$ sur la projection de U sur l'axe Oy.

Démonstration : il suffit d'intégrer deux fois en utilisant le théorème d'intégration des EDP du chapitre précédent.

Théorème 4 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Les solutions de classe $\mathcal{C}^2$ de l'équation $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0$ sont de la forme

$$f(x, y) = xG(y) + H(y)$$

où G et H sont des fonctions $\mathcal{C}^2$ sur la projection de U sur l'axe Oy.

Démonstration : il suffit d'intégrer deux fois en utilisant le théorème d'intégration des EDP du chapitre précédent.

Théorème 5 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$. Les solutions de classe $\mathcal{C}^2$ de l'équation $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = 0$ sont de la forme

$$f(x, y) = G(x) + H(y)$$

où G et H sont des fonctions $\mathcal{C}^2$ sur la projection de U sur l'axe Ox et $0y$ respectivement.

Démonstration : tout autant trivial.

Ph.D. Elian Masnada

Comme pour les EDPs du 1er ordre

on va utiliser des $\underbrace{\text{changements de variables}}$ pour simplifier l'EDP

$\mathcal{C}^2$-difféomorphisme

Définition 3 : ($\mathcal{C}^2$-difféomorphisme)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$ et V un ouvert de $\mathbb{R}^n$. Une application ϕ de U dans V est un $\mathcal{C}^2$-difféomorphisme de U dans V, si, et seulement si, les propriétés suivantes sont vérifiées

1. ϕ est de classe $\mathcal{C}^2$ sur U.
2. ϕ réalise une bijection de U dans V.
3. ϕ^{-1} est de classe $\mathcal{C}^2$ sur V.

Ph.D. Elian Masnada

Exemple de résolution d'une EDP du 2nd ordre :

Trouver les applications f de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur $\mathbb{R}^2$ solutions de

$$\forall (x,t) \in \mathbb{R}^2, \quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2}\left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X,Y) = (x+ct, x-ct)$.

Exemple de résolution d'une EDP du 2nd ordre :

Trouver les applications f de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur $\mathbb{R}^2$ solutions de

$$\forall (x,t) \in \mathbb{R}^2, \quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2} \left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X,Y) = (x+ct, x-ct)$.

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{cccl} \phi & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,t) & \mapsto & (X,Y) = \phi(x,t) = (x+ct, x-ct) \end{array}$$

Chapitre 5 :

Calcul différentiel d'ordre supérieur

Ph.D. Elian Masnada

Exemple de résolution d'une EDP du 2nd ordre :

Trouver les applications f de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur $\mathbb{R}^2$ solutions de

$$\forall (x,t) \in \mathbb{R}^2, \quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2}\left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X,Y) = (x+ct, x-ct)$.

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{rccl} \phi & : & \mathbb{R}^2 & \rightarrow & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,t) & \mapsto & (X,Y) = \phi(x,t) = (x+ct, x-ct) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^2$-difféomorphisme ???

Commençons par vérifier qu'il s'agit bien d'un $\mathcal{C}^2$-difféomorphisme. ϕ réalise clairement une bijection de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$ car $\ker(\phi) = 0_{\mathbb{R}^2}$. De plus ϕ est clairement $\mathcal{C}^2$ car chaque application composante est $\mathcal{C}^2$. Il en va de même de ϕ^{-1}. Donc ϕ est un $\mathcal{C}^2$-difféomorphisme

Exemple de résolution d'une EDP du 2nd ordre :

Trouver les applications f de $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur $\mathbb{R}^2$ solutions de

$$\forall (x,t) \in \mathbb{R}^2, \quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2}\left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X, Y) = (x + ct, x - ct)$.

Etape 0 : identification de φ

$$\begin{array}{cccl} \phi & : & \mathbb{R}^2 & \to & \mathbb{R}^2 \\ & & (x,t) & \mapsto & (X,Y) = \phi(x,t) = (x+ct, x-ct) \end{array}$$

Etape 1 : $\mathcal{C}^2$-difféomorphisme ???

Commençons par vérifier qu'il s'agit bien d'un $\mathcal{C}^2$-difféomorphisme. ϕ réalise clairement une bijection de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$ car $\ker(\phi) = 0_{\mathbb{R}^2}$. De plus ϕ est clairement $\mathcal{C}^2$ car chaque application composante est $\mathcal{C}^2$. Il en va de même de ϕ^{-1}. Donc ϕ est un $\mathcal{C}^2$-difféomorphisme

Etape 2 : Introduction de la nouvelle fonction g :

$$f = g \circ \phi \iff f(x,t) = (g \circ \phi)(x,t) = g \circ \phi(x,t) = g(x+ct, x-ct) = g(X,Y)$$

Donc $g = f \circ \phi^{-1}$. Or la stabilité par composition de la propriété $\mathcal{C}^2$, la fonction g est bien $\mathcal{C}^2$ puisque ϕ^{-1} et f le sont.

$$\forall(x,t)\in\mathbb{R}^2,\quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2}\left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X,Y)=(x+ct,x-ct)$.

Etape 3 : Expression des dérivées partielles de f en fct de celles de g :

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,t} = \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial X}{\partial x}\right|_{x,t} + \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial Y}{\partial x}\right|_{x,t} \\ \left.\frac{\partial f}{\partial t}\right|_{x,t} = \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial X}{\partial t}\right|_{x,t} + \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial Y}{\partial t}\right|_{x,t} \end{cases}$$

$$\forall (x,t) \in \mathbb{R}^2, \quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2} \left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X, Y) = (x + ct, x - ct)$.

Etape 3 : Expression des dérivées partielles de f en fct de celles de g :

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,t} = \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial X}{\partial x}\right|_{x,t} + \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial Y}{\partial x}\right|_{x,t} \\ \left.\frac{\partial f}{\partial t}\right|_{x,t} = \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial X}{\partial t}\right|_{x,t} + \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial Y}{\partial t}\right|_{x,t} \end{cases}$$

ce qui donne

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} + \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \\ \left.\frac{\partial f}{\partial t}\right|_{x,y} = c \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} - c \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \end{cases}$$

$$\forall (x,t)\in\mathbb{R}^2,\quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2}\left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X,Y) = (x+ct, x-ct)$.

Etape 3 : Expression des dérivées partielles de f en fct de celles de g :

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,t} = \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial X}{\partial x}\right|_{x,t} + \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial Y}{\partial x}\right|_{x,t} \\ \left.\frac{\partial f}{\partial t}\right|_{x,t} = \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial X}{\partial t}\right|_{x,t} + \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \left.\frac{\partial Y}{\partial t}\right|_{x,t} \end{cases}$$

ce qui donne

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x,y} = \left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} + \left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \\ \left.\frac{\partial f}{\partial t}\right|_{x,y} = c\left.\frac{\partial g}{\partial X}\right|_{X,Y} - c\left.\frac{\partial g}{\partial Y}\right|_{X,Y} \end{cases}$$

en effectuant le même développement pour les dérivées secondes, on obtient

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} = \left.\frac{\partial^2 g}{\partial X^2}\right|_{X,Y} + \left.\frac{\partial^2 g}{\partial Y^2}\right|_{X,Y} + 2\left.\frac{\partial^2 g}{\partial X\partial Y}\right|_{X,Y} \\ \left.\frac{\partial^2 f}{\partial t^2}\right|_{x,t} = c^2\left.\frac{\partial^2 g}{\partial X^2}\right|_{X,Y} + c^2\left.\frac{\partial^2 g}{\partial Y^2}\right|_{X,Y} - 2c^2\left.\frac{\partial^2 g}{\partial X\partial Y}\right|_{X,Y} \end{cases}$$

$$\forall (x,t) \in \mathbb{R}^2, \quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2}\left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X,Y) = (x+ct, x-ct)$.

Etape 4 : On injecte les expressions obtenues à l'étape 3 dans l'EDP

$$\left.\frac{\partial^2 g}{\partial X^2}\right|_{X,Y} = 0$$

$$\forall (x,t) \in \mathbb{R}^2, \quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2}\left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X,Y) = (x+ct, x-ct)$.

Etape 4 : On injecte les expressions obtenues à l'étape 3 dans l'EDP

$$\left.\frac{\partial^2 g}{\partial X^2}\right|_{X,Y} = 0$$

Etape 5 : On résoud la nouvelle EDP sur g

cette EDP a pour solution

$$g(X,Y) = h(Y) + k(X)$$

où h et k sont des fonctions quelconques $\mathcal{C}^2$ sur $\mathbb{R}$

$$\forall (x,t) \in \mathbb{R}^2, \quad \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_{x,t} - \frac{1}{c^2} \left.\frac{\partial^2 f}{\partial T^2}\right|_{x,t} = 0$$

en utilisant le changement de variable $(X, Y) = (x + ct, x - ct)$.

Etape 4 : On injecte les expressions obtenues à l’étape 3 dans l’EDP

$$\left.\frac{\partial^2 g}{\partial X^2}\right|_{X,Y} = 0$$

Etape 5 : On résoud la nouvelle EDP sur g

cette EDP a pour solution

$$g(X, Y) = h(Y) + k(X)$$

où h et k sont des fonctions quelconques $\mathcal{C}^2$ sur $\mathbb{R}$

Etape 6 : On revient à f

$$f = g \circ \varphi$$

$$f(x,t) = (g \circ \phi)(x,t) = g(x + ct, x - ct) = h(x - ct) + k(x + ct)$$

Introduction

La recherche d'extremums (c'est-à-dire de minimums et de maximums) de fonctions de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$ occupe une place importante en mathématiques et dans les sciences en général car elle intervient dès lors qu'on cherche à optimiser une certaine quantité.

Ph.D. Elian Masnada

Introduction

La recherche d'extremums (c'est-à-dire de minimums et de maximums) de fonctions de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$ occupe une place importante en mathématiques et dans les sciences en général car elle intervient dès lors qu'on cherche à optimiser une certaine quantité.

- $\longrightarrow$ économie (maximiser les profits et minimiser les coûts)
- $\longrightarrow$ physique (principes variationnels)
- $\longrightarrow$ intelligence artificielle
- $\longrightarrow$ etc...

Introduction

La recherche d'extremums (c'est-à-dire de minimums et de maximums) de fonctions de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$ occupe une place importante en mathématiques et dans les sciences en général car elle intervient dès lors qu'on cherche à optimiser une certaine quantité.

- économie (maximiser les profits et minimiser les coûts)
- physique (principes variationnels)
- intelligence artificielle
- etc...

Dans ce chapitre, nous allons donc, après avoir défini rigoureusement les notions d'extremums locaux et globaux, montrer quelles sont les méthodes mathématiques à notre disposition pour trouver les extremums de fonctions $\mathcal{C}^2$ (dans la suite de votre formation, vous étudierez également des algorithmes permettant de trouver numériquement les minimums locaux comme la méthode du gradient conjugué). Nous ferons également le lien avec la recherche d'extremum des fonctions de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$ car vous connaissez ce cas de figure depuis le lycée.

Chapitre 5 :

Calcul différentiel d'ordre supérieur

a. Introduction du chapitre 5

b. Dérivées partielles d'ordre Supérieur à 1

c. Systèmes d'EDPs d'ordre 1

d. EDP d'ordre 2

e. Extremums de fonctions à valeurs dans R

Ph.D. Elian Masnada

Définitions des extremums locaux et globaux

Définition 4 : (maximum local ou strict, minimum local ou strict)

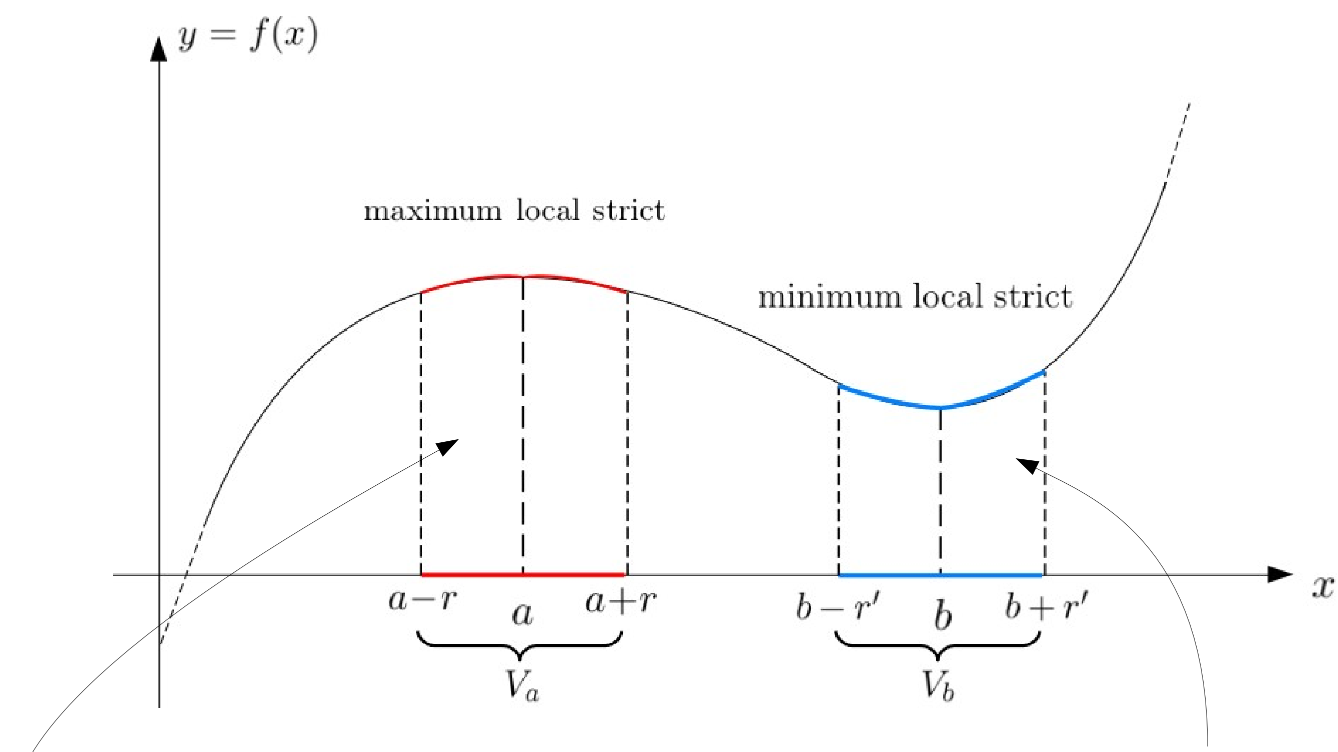
Soit A une partie quelconque de $\mathbb{R}^n$ (ouvert, fermé ou aucun des deux), $a \in \mathring{A}$ et f une fonction de A dans $\mathbb{R}$. Alors :

1. f admet un minimum local en a, si, et seulement si, il existe un voisinage $V \subset A$ de a tel que
$$\forall x \in V,\ f(x) \geq f(a)$$
2. f admet un minimum local strict en a, si, et seulement si, il existe un voisinage $V \subset A$ de a tel que
$$\forall x \in V \backslash \{a\},\ f(x) > f(a)$$
3. f admet un maximum local en a, si, et seulement si, il existe un voisinage $V \subset A$ de a tel que
$$\forall x \in V,\ f(x) \leq f(a)$$
4. f admet un maximum local strict en a, si, et seulement si, il existe un voisinage $V \subset A$ de a tel que
$$\forall x \in V \backslash \{a\},\ f(x) < f(a)$$

On appelle, de manière générique, les maximums et les minimums des extremums.

Définitions des extremums locaux et globaux

Illustration pour des applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

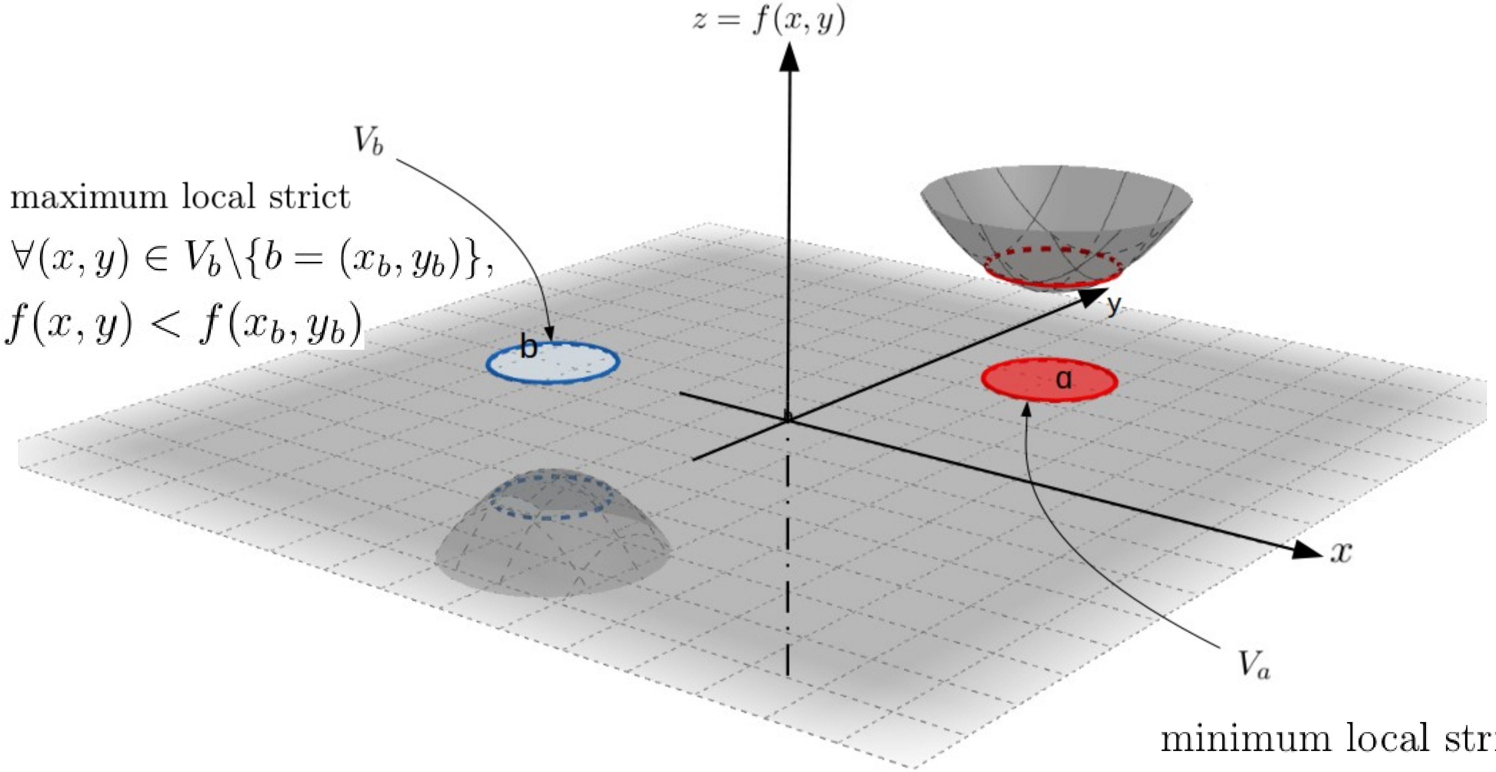


$$\forall x \in V_b =]b-r, b+r[\setminus\{b\},\ \ f(x) > f(b)$$

$$\forall x \in V_a =]a-r, a+r[\setminus\{a\},\ \ f(x) < f(a)$$

Définitions des extremums locaux et globaux

Illustration pour des applications de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$



maximum local strict

$\forall (x,y) \in V_b \backslash \{b = (x_b, y_b)\}$,

$f(x,y) < f(x_b, y_b)$

minimum local strict

$\forall (x,y) \in V_a \backslash \{a = (x_a, y_a)\}$,

$f(x,y) > f(x_a, y_a)$

Ph.D. Elian Masnada

Définitions des extremums locaux et globaux

Définition 5 : (extremum global)
Soit A une partie quelconque de $\mathbb{R}^n$ (ouvert, fermé ou aucun des deux), $a \in A$ et f une application de A dans $\mathbb{R}$. Alors :

1. f admet un minimum global en a, si, et seulement si

$$\forall x \in A, \ f(x) \geq f(a)$$

2. f admet un maximum global en a, si, et seulement si

$$\forall x \in A, \ f(x) \leq f(a)$$

Définitions des extremums locaux et globaux

Définition 5 : (extremum global)
Soit A une partie quelconque de $\mathbb{R}^n$ (ouvert, fermé ou aucun des deux), $a \in A$ et f une application de A dans $\mathbb{R}$. Alors :

1. f admet un minimum global en a, si, et seulement si

$$\forall x \in A, \ \ f(x) \geq f(a)$$

2. f admet un maximum global en a, si, et seulement si

$$\forall x \in A, \ \ f(x) \leq f(a)$$

Si A est un fermé alors un extremum global (contrairement à un extremum local) peut être sur la frontière de A.

Définitions des extremums locaux et globaux

Définition 5 : (extremum global)
Soit A une partie quelconque de $\mathbb{R}^n$ (ouvert, fermé ou aucun des deux), $a \in A$ et f une application de A dans $\mathbb{R}$. Alors :

1. f admet un minimum global en a, si, et seulement si

$$\forall x \in A, \ f(x) \geq f(a)$$

2. f admet un maximum global en a, si, et seulement si

$$\forall x \in A, \ f(x) \leq f(a)$$

Si A est un fermé alors un extremum global (contrairement à un extremum local) peut être sur la frontière de A.

Si f n'est pas minorée alors on dira qu'il n'y a pas de minimum global

Si f n'est pas majorée alors on dira qu'il n'y a pas de maximum global

Ph.D. Elian Masnada

Ph.D. Elian Masnada

Recherche des extremums locaux des fonctions de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Recherche des extremums locaux des fonctions de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Soit f une fonction $\mathcal{C}^2$ de $A \subset \mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Soit $a \in \mathring{A}$

Recherche des extremums locaux des fonctions de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Soit f une fonction $\mathcal{C}^2$ de $A \subset \mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Soit $a \in \mathring{A}$

Condition nécessaire pour que a soit un extremum	$f'(a) = 0$

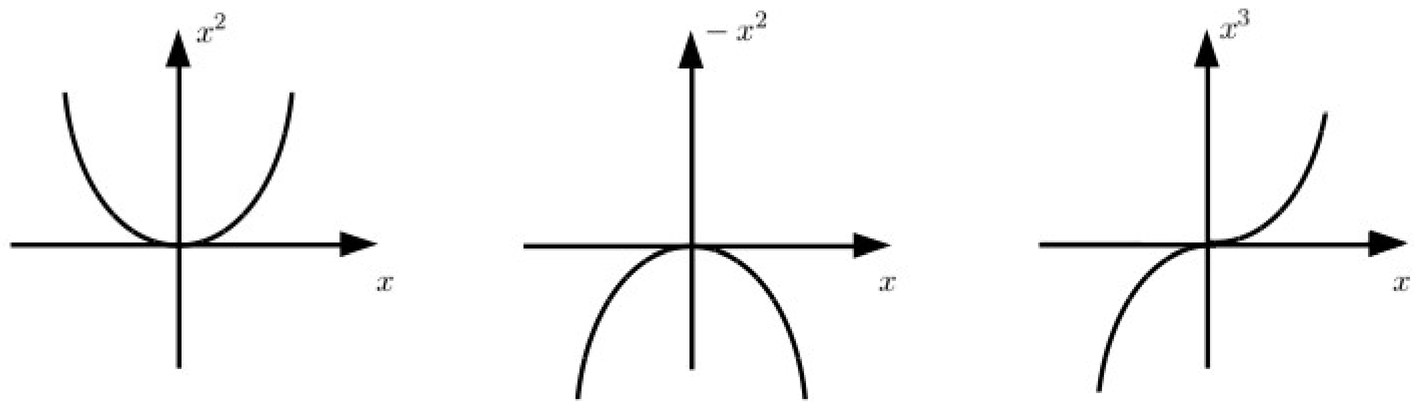
Recherche des extremums locaux des fonctions de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Soit f une fonction $\mathcal{C}^2$ de $A \subset \mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

Soit $a \in \mathring{A}$

Condition nécessaire pour que a soit un extremum	$f'(a) = 0$

mais ce n'est pas suffisant



$f''(a) > 0$	$f''(a) < 0$	$f''(a) = 0$
$f'(a) = 0$	$f'(a) = 0$	$f'(a) = 0$

c'est la dérivée seconde qui permet de conclure

Recherche des extremums locaux des fonctions de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$

Définition 6 : (point critique)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$. On dit que a est un point critique de f, si, et seulement si, toutes les dérivées partielles premières de f en a sont définies et égales à 0, c'est-à-dire, si, et seulement si, le gradient de f en a est défini et nul :

$$\vec{\nabla}_a f = 0_{\mathbb{R}^p}$$

Recherche des extremums locaux des fonctions de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$

Définition 6 : (point critique)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$. On dit que a est un point critique de f, si, et seulement si, toutes les dérivées partielles premières de f en a sont définies et égales à 0, c'est-à-dire, si, et seulement si, le gradient de f en a est défini et nul :

$$\vec{\nabla}_a f = 0_{\mathbb{R}^p}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f}{\partial x_3} \\ . \\ . \\ \frac{\partial f}{\partial x_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ . \\ . \\ 0 \end{pmatrix}$$

Propriété 2 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$. Si f admet un extremum local en a et que toutes les dérivées partielles de f en a sont définies, alors a est un point critique de f.

Démonstration : cas où a est un minimum local

Propriété 2 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$. Si f admet un extremum local en a et que toutes les dérivées partielles de f en a sont définies, alors a est un point critique de f.

Démonstration : cas où a est un minimum local

Il existe alors $r > 0$ tel que $B(a, r) \subset U$ et pour $\forall x \in B(a, r)$, $f(x) \geq f(a)$

Propriété 2 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$. Si f admet un extremum local en a et que toutes les dérivées partielles de f en a sont définies, alors a est un point critique de f.

Démonstration : cas où a est un minimum local

Il existe alors $r > 0$ tel que $B(a, r) \subset U$ et pour $\forall x \in B(a, r)$, $f(x) \geq f(a)$

Soit $(e_1, e_2, ..., e_p)$ une base de $\mathbb{R}^p$
Soit $i \in [\![1, p]\!]$

$$\Rightarrow \quad \left.\frac{\partial f}{\partial x_i}\right|_a = \lim_{h \to 0} \frac{f(a + he_i) - f(a)}{h}$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 2 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$. Si f admet un extremum local en a et que toutes les dérivées partielles de f en a sont définies, alors a est un point critique de f.

Démonstration : cas où a est un minimum local

Il existe alors $r > 0$ tel que $B(a,r) \subset U$ et pour $\forall x \in B(a,r)$, $f(x) \geq f(a)$

Soit $(e_1, e_2, ..., e_p)$ une base de $\mathbb{R}^p$
Soit $i \in [\![1, p]\!]$ $\Rightarrow$ $\left.\dfrac{\partial f}{\partial x_i}\right|_a = \lim\limits_{h \to 0} \dfrac{f(a + he_i) - f(a)}{h}$

Or si $|h| < r$ (ce qui est le cas à partir d'un moment puisque h tend vers 0)

nous avons $a + he_i \in B(a,r)$ $\Rightarrow$ $f(a + he_i) - f(a) \geq 0$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 2 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$. Si f admet un extremum local en a et que toutes les dérivées partielles de f en a sont définies, alors a est un point critique de f.

Démonstration : cas où a est un minimum local

Il existe alors $r > 0$ tel que $B(a,r) \subset U$ et pour $\forall x \in B(a,r)$, $f(x) \geq f(a)$

Soit $(e_1, e_2, ..., e_p)$ une base de $\mathbb{R}^p$
Soit $i \in [\![1, p]\!]$ $\Rightarrow$ $\left.\dfrac{\partial f}{\partial x_i}\right|_a = \lim\limits_{h \to 0} \dfrac{f(a+he_i) - f(a)}{h}$

Or si $|h| < r$ (ce qui est le cas à partir d'un moment puisque h tend vers 0)

nous avons $a + he_i \in B(a,r)$ $\Rightarrow$ $f(a+he_i) - f(a) \geq 0$

$$\Rightarrow \left.\begin{aligned} &\lim_{h \to 0^+} \frac{f(a+he_i) - f(a)}{h} \geq 0 \\ &\lim_{h \to 0^-} \frac{f(a+he_i) - f(a)}{h} \leq 0 \end{aligned}\right\} \text{ d'où une limite nulle}$$

Ph.D. Elian Masnada

Propriété 2 :

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^p$, $a \in U$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$. Si f admet un extremum local en a et que toutes les dérivées partielles de f en a sont définies, alors a est un point critique de f.

Démonstration : cas où a est un minimum local

Il existe alors $r > 0$ tel que $B(a,r) \subset U$ et pour $\forall x \in B(a,r)$, $f(x) \geq f(a)$

Soit $(e_1, e_2, \ldots, e_p)$ une base de $\mathbb{R}^p$
Soit $i \in [\![1, p]\!]$ $\Rightarrow$ $\left.\dfrac{\partial f}{\partial x_i}\right|_a = \lim\limits_{h \to 0} \dfrac{f(a + he_i) - f(a)}{h}$

Or si $|h| < r$ (ce qui est le cas à partir d'un moment puisque h tend vers 0)

nous avons $a + he_i \in B(a,r)$ $\Rightarrow$ $f(a + he_i) - f(a) \geq 0$

$$\Rightarrow \left.\begin{array}{l} \lim\limits_{h \to 0^+} \dfrac{f(a + he_i) - f(a)}{h} \geq 0 \\ \lim\limits_{h \to 0^-} \dfrac{f(a + he_i) - f(a)}{h} \leq 0 \end{array}\right\} \text{ d'où une limite nulle}$$

Comme cela est vrai pour tout $i \in [\![1, p]\!]$, $\vec{\nabla}_a f = 0_{\mathbb{R}^p}$

Comme dans le cas des fonctions de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$

il faut étudier les dérivées du second ordre pour conclure

Propriété 3 : (Développement limité d'ordre 2)

soit U un ouvert de $(\mathbb{R}^p, \|\cdot\|)$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur U. Soit $a \in U$ et $U_0 = \{h \in \mathbb{R}^p / a + h \in U\}$. Alors, il existe une application $\epsilon : U_0 \to \mathbb{R}$ telle que $\lim_{h \to 0_{\mathbb{R}^p}} \epsilon(h) = 0$ et

$$\forall h = (h_1, ..., h_p) \in U_0,$$

$$f(a+h) = f(a) + \sum_{j=1}^{p} h_j \left.\frac{\partial f}{\partial x_j}\right|_a + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{p} h_i h_j \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a + \|h\|^2 \epsilon(h)$$

Cette relation est appelée développement limité de f à l'ordre 2 en a.

Démonstration : admis.

Théorème 6 : (Condition suffisante d'ordre 2)

Soient U un ouvert de $(\mathbb{R}^p, \|\cdot\|)$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur U. Soit a un point critique de f. On introduit la fonction Q

$$\begin{array}{rcccl} Q & : & \mathbb{R}^p & \rightarrow & \mathbb{R} \\ & & h=(h_1,\ldots,h_p) & \mapsto & Q(h)=\sum_{i=1}^p\sum_{j=1}^p h_ih_j \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a \end{array}$$

S'il existe un voisinage de $0_{\mathbb{R}^p}$ sur lequel

1. Q est positive et ne s'annule qu'en $h=0$, alors f admet un minimum local strict en a
2. Q est négative et ne s'annule qu'en $h=0$, alors f admet un maximum local strict en a.

Si pour tout voisinage de $0_{\mathbb{R}^p}$, Q admet des valeurs positives et négatives, alors f n'admet pas d'extremum local en a.

Démonstration :

Théorème 6 : (Condition suffisante d'ordre 2)

Soient U un ouvert de $(\mathbb{R}^p, \|\cdot\|)$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur U. Soit a un point critique de f. On introduit la fonction Q

$$\begin{array}{llll} Q & : & \mathbb{R}^p & \to \mathbb{R} \\ & & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto Q(h) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p h_i h_j \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a \end{array}$$

S'il existe un voisinage de $0_{\mathbb{R}^p}$ sur lequel

1. Q est positive et ne s'annule qu'en $h = 0$, alors f admet un minimum local strict en a
2. Q est négative et ne s'annule qu'en $h = 0$, alors f admet un maximum local strict en a.

Si pour tout voisinage de $0_{\mathbb{R}^p}$, Q admet des valeurs positives et négatives, alors f n'admet pas d'extremum local en a.

Démonstration :

Pour h suffisamment petit, $\vec{\nabla}_{(a+h)} f \approx 0_{\mathbb{R}^p}$ puisque a est un point critique

Théorème 6 : (Condition suffisante d'ordre 2)

Soient U un ouvert de $(\mathbb{R}^p, \|\cdot\|)$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur U. Soit a un point critique de f. On introduit la fonction Q

$$\begin{array}{rccl} Q \; : & \mathbb{R}^p & \to & \mathbb{R} \\ & h = (h_1, ..., h_p) & \mapsto & Q(h) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p h_i h_j \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a \end{array}$$

S'il existe un voisinage de $0_{\mathbb{R}^p}$ sur lequel

1. Q est positive et ne s'annule qu'en $h = 0$, alors f admet un minimum local strict en a
2. Q est négative et ne s'annule qu'en $h = 0$, alors f admet un maximum local strict en a.

Si pour tout voisinage de $0_{\mathbb{R}^p}$, Q admet des valeurs positives et négatives, alors f n'admet pas d'extremum local en a.

Démonstration :

Pour h suffisamment petit, $\vec{\nabla}_{(a+h)} f \approx 0_{\mathbb{R}^p}$ puisque a est un point critique

Donc
$$f(a+h) - f(a) \approx \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p h_i h_j \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right|_a = Q(h)$$

Si Q est positif alors $f(a+h) > f(a)$ donc minimum.
Si Q est négatif alors $f(a+h) < f(a)$ donc maximum

Définition 8 : (Matrice hessienne)

Soit U un ouvert de $(\mathbb{R}^p, \|\cdot\|)$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur U. Soit $a \in U$ un point critique de f. On définit alors la matrice hessienne de f en a, notée $H_f(a)$, par

$$H_f(a) = \begin{pmatrix} \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_p}\right|_a \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_p \partial x_1}\right|_a & \cdots & \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x_p^2}\right|_a \end{pmatrix}$$

Définition 9 : (Notations de Monge)

Soit U un ouvert de $\mathbb{R}^2$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur U. Soit $a \in U$ un point critique de f. On définit alors les notations de Monge comme

$$r = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right|_a \qquad s = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}\right|_a = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}\right|_a \qquad t = \left.\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right|_a$$

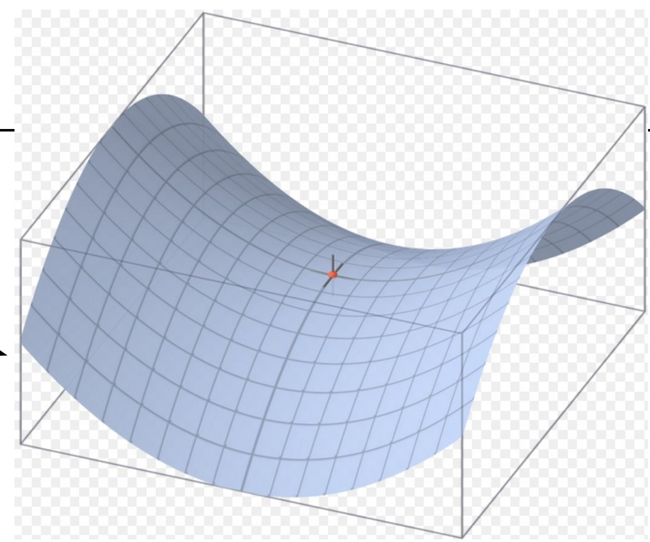
alors avec ces notations

$$H_f(a) = \begin{pmatrix} r & s \\ s & t \end{pmatrix}$$

Théorème 7 : (Condition suffisante d'ordre 2)

Soient U un ouvert de $\mathbb{R}^2$ et f une application de U dans $\mathbb{R}$ de classe $\mathcal{C}^2$ sur U. Soit a un point critique de f. Alors

1. Si $\det\left(H_f(a)\right) = rt - s^2 > 0$:
   (a) si $r > 0$, alors f admet un minimum local strict en a.
   (b) si $r < 0$, alors f admet un maximum local strict en a.
2. Si $\det\left(H_f(a)\right) = rt - s^2 < 0$, alors f n'a pas d'extremum local en a. Dans ce cas, a est appelé point-col, ou point-selle de f.
3. Si $\det\left(H_f(a)\right) = rt - s^2 = 0$, alors on ne peut pas conclure sans faire une étude locale poussée.



Ph.D. Elian Masnada

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$.

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l'ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

Ph.D. Elian Masnada

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l’ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

On note alors $Q : (h;k) \mapsto rh^2 + 2shk + tk^2$. Nous allons tenter d’écrire Q sous la forme de somme de carrés, afin d’en déduire le signe.

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l’ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

On note alors $Q : (h;k) \mapsto rh^2 + 2shk + tk^2$. Nous allons tenter d’écrire Q sous la forme de somme de carrés, afin d’en déduire le signe.

— Si $rt - s^2 > 0$, alors r est non nul et

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l'ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

On note alors $Q : (h;k) \mapsto rh^2 + 2shk + tk^2$. Nous allons tenter d'écrire Q sous la forme de somme de carrés, afin d'en déduire le signe.

— Si $rt - s^2 > 0$, alors r est non nul et

$$\begin{aligned} Q(h,k) = rh^2 + 2shk + tk^2 &= r\left(h^2 + 2\frac{s}{r}hk\right) + tk^2 \\ &= r\left[\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 - \frac{s^2}{r^2}k^2\right] + tk^2 \\ &= r\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 + \frac{rt - s^2}{r}k^2 \end{aligned}$$

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l'ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

On note alors $Q : (h;k) \mapsto rh^2 + 2shk + tk^2$. Nous allons tenter d'écrire Q sous la forme de somme de carrés, afin d'en déduire le signe.

— Si $rt - s^2 > 0$, alors r est non nul et

$$\begin{aligned} Q(h,k) = rh^2 + 2shk + tk^2 &= r\left(h^2 + 2\frac{s}{r}hk\right) + tk^2 \\ &= r\left[\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 - \frac{s^2}{r^2}k^2\right] + tk^2 \\ &= r\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 + \frac{rt - s^2}{r}k^2 \end{aligned}$$

Ainsi $Q(h,k) = 0 \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{rcl} h + \frac{s}{t}k & = & 0 \\ k & = & 0 \end{array} \right. \Leftrightarrow (h;k) = (0;0)$ Finalement :

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l'ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

On note alors $Q : (h;k) \mapsto rh^2 + 2shk + tk^2$. Nous allons tenter d'écrire Q sous la forme de somme de carrés, afin d'en déduire le signe.

— Si $rt - s^2 > 0$, alors r est non nul et

$$\begin{aligned} Q(h,k) = rh^2 + 2shk + tk^2 &= r\left(h^2 + 2\frac{s}{r}hk\right) + tk^2 \\ &= r\left[\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 - \frac{s^2}{r^2}k^2\right] + tk^2 \\ &= r\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 + \frac{rt - s^2}{r}k^2 \end{aligned}$$

Ainsi $Q(h,k) = 0 \Leftrightarrow \left\{\begin{array}{rcl} h + \frac{s}{t}k & = & 0 \\ k & = & 0 \end{array}\right. \Leftrightarrow (h;k) = (0;0)$ Finalement :

— Si $r > 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h;k) \geq 0$ et a est un minimum local de f.

— Si $r < 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h;k) \leq 0$ et a est un maximum local de f.

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l’ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

On note alors $Q : (h;k) \mapsto rh^2 + 2shk + tk^2$. Nous allons tenter d’écrire Q sous la forme de somme de carrés, afin d’en déduire le signe.

— Si $rt - s^2 > 0$, alors r est non nul et

$$\begin{aligned} Q(h,k) = rh^2 + 2shk + tk^2 &= r\left(h^2 + 2\frac{s}{r}hk\right) + tk^2 \\ &= r\left[\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 - \frac{s^2}{r^2}k^2\right] + tk^2 \\ &= r\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 + \frac{rt - s^2}{r}k^2 \end{aligned}$$

Ainsi $Q(h,k) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} h + \frac{s}{t}k & = & 0 \\ k & = & 0 \end{cases} \Leftrightarrow (h;k) = (0;0)$ Finalement :

— Si $r > 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h;k) \geq 0$ et a est un minimum local de f.

— Si $r < 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h;k) \leq 0$ et a est un maximum local de f.

— Si $rt - s^2 < 0$, alors on distingue plusieurs cas :

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l'ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

On note alors $Q : (h;k) \mapsto rh^2 + 2shk + tk^2$. Nous allons tenter d'écrire Q sous la forme de somme de carrés, afin d'en déduire le signe.

— Si $rt - s^2 > 0$, alors r est non nul et

$$\begin{aligned} Q(h,k) = rh^2 + 2shk + tk^2 &= r\left(h^2 + 2\frac{s}{r}hk\right) + tk^2 \\ &= r\left[\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 - \frac{s^2}{r^2}k^2\right] + tk^2 \\ &= r\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 + \frac{rt - s^2}{r}k^2 \end{aligned}$$

Ainsi $Q(h,k) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} h + \frac{s}{r}k &= 0 \\ k &= 0 \end{cases} \Leftrightarrow (h;k) = (0;0)$ Finalement :

— Si $r > 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h;k) \geq 0$ et a est un minimum local de f.

— Si $r < 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h;k) \leq 0$ et a est un maximum local de f.

— Si $rt - s^2 < 0$, alors on distingue plusieurs cas :

— Si $r \neq 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h,0) = rh^2$ est du signe de r et $Q\left(\frac{-sk}{r}, k\right) = \frac{rt-s^2}{r}k^2$ est du signe de $-r$. Donc quelque soit le voisinage de $(0;0)$, Q change de signe.

Démonstration. Comme a est un point critique de f, nous avons $\frac{\partial f}{\partial x}(a) = \frac{\partial f}{\partial y}(a) = 0$. En utilisant les notations de Monge, le développement limité à l’ordre deux de f devient :

$$\forall (h;k) \in U_0,\ f(a+h,k) - f(a) = \frac{1}{2}\left(rh^2 + 2shk + tk^2\right) + \|(h;k)\|^2 \varepsilon(h;k)$$

On note alors $Q : (h;k) \mapsto rh^2 + 2shk + tk^2$. Nous allons tenter d’écrire Q sous la forme de somme de carrés, afin d’en déduire le signe.

— Si $rt - s^2 > 0$, alors r est non nul et

$$\begin{aligned} Q(h,k) = rh^2 + 2shk + tk^2 &= r\left(h^2 + 2\frac{s}{r}hk\right) + tk^2 \\ &= r\left[\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 - \frac{s^2}{r^2}k^2\right] + tk^2 \\ &= r\left(h + \frac{s}{r}k\right)^2 + \frac{rt - s^2}{r}k^2 \end{aligned}$$

Ainsi $Q(h,k) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} h + \frac{s}{t}k &= 0 \\ k &= 0 \end{cases} \Leftrightarrow (h;k) = (0;0)$ Finalement :

— Si $r > 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h;k) \geq 0$ et a est un minimum local de f.

— Si $r < 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h;k) \leq 0$ et a est un maximum local de f.

— Si $rt - s^2 < 0$, alors on distingue plusieurs cas :

— Si $r \neq 0$, alors pour tout $(h;k)$, $Q(h,0) = rh^2$ est du signe de r et $Q\left(\frac{-sk}{r}, k\right) = \frac{rt-s^2}{r}k^2$ est du signe de $-r$. Donc quelque soit le voisinage de $(0;0)$, Q change de signe.

— Si $r = 0$, alors nécessairement $s \neq 0$ (sinon $rt - s^2 = 0$) et

— Si $t \neq 0$, alors pour tout h, $Q(th, sh) \cdot Q(th, -sh) = (3ts^2h^2) \cdot (-ts^2h^2) = -3t^2s^4h^4 < 0$. Donc quelque soit le voisinage de $(0;0)$, Q change de signe.

— Si $t = 0$, alors pour tout h, $Q(h,h) \cdot Q(h,-h) = (2sh^2)(-2sh^2) = -4s^2h^4 < 0$. Donc quelque soit le voisinage de $(0;0)$, Q change de signe.

Donc Q admet à la fois des valeurs strictement positives et strictement négatives et a n’est pas un extremum local. $\square$

$$\boxed{\text{Plan général de recherche d'extrema de } f : U \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}}$$

$$\boxed{\text{Plan général de recherche d'extrema de } f : U \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}}$$

Étape 0 Vérification du caractère $\mathscr{C}^2$ de f sur U.

$$\boxed{\text{Plan général de recherche d'extrema de } f : U \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}}$$

Étape 0 Vérification du caractère $\mathscr{C}^2$ de f sur U.

Étape 1 Recherche des points critiques $(x;y)$ de f en résolvant le système

$$\left\{ \begin{array}{rcl} \frac{\partial f}{\partial x}(x,y) & = & 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x,y) & = & 0 \end{array} \right.$$

$\boxed{\text{Plan général de recherche d'extrema de } f : U \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}}$

Étape 0 Vérification du caractère $\mathscr{C}^2$ de f sur U.

Étape 1 Recherche des points critiques $(x;y)$ de f en résolvant le système

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x}(x,y) & = & 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x,y) & = & 0 \end{cases}$$

Étape 2 Pour chaque point critique, calculer r, s, et t, puis :

- Si $rt - s^2 > 0$ et $r > 0$, c'est un minimum local strict.
- Si $rt - s^2 > 0$ et $r < 0$, c'est un maximum local strict.
- Si $rt - s^2 < 0$, c'est un point-selle.
- Si $rt - s^2 = 0$, il faut faire une étude locale (DL à l'ordre 3 par exemple)

Plan général de recherche d'extrema de $f : U \subset \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$

Étape 0 Vérification du caractère $\mathscr{C}^2$ de f sur U.

Étape 1 Recherche des points critiques $(x;y)$ de f en résolvant le système

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x}(x,y) &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x,y) &= 0 \end{cases}$$

Étape 2 Pour chaque point critique, calculer r, s, et t, puis :

— Si $rt - s^2 > 0$ et $r > 0$, c'est un minimum local strict.

— Si $rt - s^2 > 0$ et $r < 0$, c'est un maximum local strict.

— Si $rt - s^2 < 0$, c'est un point-selle.

— Si $rt - s^2 = 0$, il faut faire une étude locale (DL à l'ordre 3 par exemple)

Étape 3

— Recherche de minima globaux :

  — Si f n'est pas minorée, pas de minimum global.

— Recherche de maxima globaux :

  — Si f n'est pas majorée, pas de maximum global.

Chapitre 5 :

Calcul différentiel
d'ordre supérieur

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

BONNE CONTINUATION ET A BIENTOT
POUR LE COURS D'ALGO QUANTIQUE

Ph.D. Elian Masnada