

# Chapitre 4 : Topologie des espaces métriques et des espaces vectoriels normés

## I Distances et normes

Soit  $X$  un ensemble quelconque (dans la suite supposé non nul).

**Définition :** Une distance  $d$  sur  $X$  est une application  $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}_+$  qui vérifie les axiomes suivants :

1.  $\forall (x, y) \in X^2, d(x, y) = d(y, x)$  (symétrie)
2.  $\forall x, y, z \in X, d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$  (inégalité triangulaire)
3.  $\forall (x, y) \in X^2, d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$  (séparation)

**Vocabulaire :** On appelle **espace métrique** un couple  $(X, d)$  où  $X$  est un ensemble et  $d$  une distance sur  $X$ .

### Exemple :

- $\mathbb{R}$  muni de la distance  $d(x, y) = |x - y|$ , où  $|\cdot|$  est la valeur absolue.
- $\mathbb{C}$  muni de la distance  $d(z_1, z_2) = |z_1 - z_2|$ , où  $|\cdot|$  est le module.
- Une autre façon de voir l'exemple 2, on considère l'ensemble  $\mathbb{R}^2$  muni de la distance suivante :  
Si  $A = (x_A, y_A)$  et  $B = (x_B, y_B)$  sont deux points de  $\mathbb{R}^2$ , on définit la distance  $d(A, B) = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$ .  
On appelle cette distance la **distance euclidienne** sur  $\mathbb{R}^2$ .
- Prenons  $X =$  cercle unité muni de la distance  $d(A, B) = \arccos(\cos(\theta_2 - \theta_1))$  où  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont les arguments des points  $A$  et  $B$  respectivement. (voir schéma OneNote)

**Remarque :** On peut voir l'exemple 1 comme un cas particulier de l'exemple 2, en identifiant  $\mathbb{R}$  à l'axe des réels dans le plan complexe.

**Remarque :** On peut généraliser l'exemple 3 à  $\mathbb{R}^n$  muni de la distance euclidienne définie par :

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{A_i} - x_{B_i})^2}$$

où  $A = (x_{A_1}, x_{A_2}, \dots, x_{A_n})$  et  $B = (x_{B_1}, x_{B_2}, \dots, x_{B_n})$  sont deux points de  $\mathbb{R}^n$ .

Il se trouve que les exemples 1, 2 et 3 proviennent d'espaces vectoriels normés, qu'on verra (très) rapidement.

### Proposition : Inégalités triangulaires

Soit  $(X, d)$  un espace métrique.

On a :

1.  $\forall (x, y, z) \in X^3, d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$  (inégalité triangulaire)
2.  $\forall (x, y, z) \in X^3, |d(x, y) - d(x, z)| \leq d(y, z)$  (inégalité triangulaire généralisée)

### Preuve :

1. C'est l'axiome 2 de la définition d'une distance.
2. On a  $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$  d'après l'inégalité triangulaire.  
Donc  $d(x, y) - d(x, z) \leq d(z, y) = d(y, z)$ .  
De plus,  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$  d'après l'inégalité triangulaire.  
Donc  $d(x, z) - d(x, y) \leq d(y, z)$ .  
En combinant les deux, on obtient  $|d(x, y) - d(x, z)| \leq d(y, z)$ .

**Construction d'espaces métriques : Restriction** (*admis*)

On part de  $(X, d)$  un espace métrique.

Soit  $Y \subset X$ . Alors  $(Y, d|_{Y \times Y})$  est un espace métrique.

**Vocabulaire** : On dit que  $d|_{Y \times Y}$  est la **distance sur  $Y$  induite** par la distance sur  $X$ .

**Remarque** : Ainsi, tout sous-ensemble d'un espace métrique est muni d'une "structure d'espace métrique" induite : c'est la distance induite.

**Exemple** :  $(X, d_X) = (\mathbb{C}, |\cdot|)$  un espace métrique. Alors pour  $Y = \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$ ,  $d_Y$  n'est autre que la distance usuelle sur  $\mathbb{R}$ .  
Idem pour  $\mathbb{Q}$ .

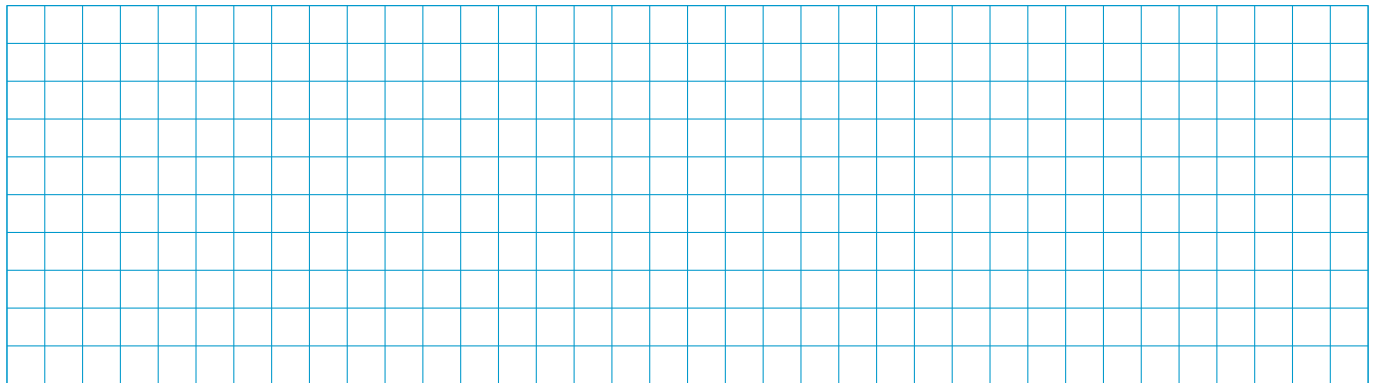
**Construction d'espaces métriques : Bijection** (*admis*)

Soient  $(X, d_X)$  et  $Y$  un ensemble quelconque et  $f : Y \rightarrow X$  bijective.

Alors  $(Y, d_Y)$  est un espace métrique, où  $d_Y(y_1, y_2) = d_X(f(y_1), f(y_2))$  pour tout  $y_1, y_2 \in Y$ .

Autrement dit,  $d_Y : \overset{Y \times Y \rightarrow \mathbb{R}_+}{(y_1, y_2) \mapsto d_X(f(y_1), f(y_2))}$ .

**Application** : Démontrer le théorème ci-dessus. (*vérifier que  $d_Y$  satisfait bien les axiomes d'une distance.*)



## A Espaces vectoriels normés

On a plus un ensemble  $X$  quelconque mais on considère  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel ( $\mathbb{K} = \mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$ ). (a priori pas de dimension finie)

### 1 Définitions

**Définition** : Une norme  $N$  sur  $E$  est une application  $N : E \rightarrow \mathbb{R}_+$  souvent notée  $\|\cdot\|$  qui vérifie les axiomes suivants :

1.  $\forall u \in E, \forall \lambda \in \mathbb{K}, \|\lambda u\| = |\lambda| \cdot \|u\|$  (homogénéité)
2.  $\forall (u, v) \in E^2, \|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$  (inégalité triangulaire)
3.  $\forall u \in E, \|u\| = 0 \Leftrightarrow u = 0_E$  (séparation)

**Vocabulaire** : On dit que le couple  $(E, N) = (E, \|\cdot\|)$  est un **espace vectoriel normé**. Il est commun d'écrire *e.v.n.*.

**Remarque :**  $\forall x \in E, N(-x) = N(x)$  d'après l'axiome 1.

### Théorème : Association norme-distance

Soit  $(E, \|\cdot\|)$  un espace vectoriel normé.

Alors c'est en particulier un espace métrique pour la distance définie par  $d_N(u, v) = \|v - u\|$ .

**Preuve :** Il suffit de vérifier les axiomes d'une distance.

1. Symétrie :  $d_N(u, v) = \|v - u\| = \|(u - v)\| = \|u - v\| = d_N(v, u)$ .
2. Inégalité triangulaire :  $d_N(u, w) = \|w - u\| = \|(w - v) + (v - u)\| \leq \|w - v\| + \|v - u\| = d_N(u, v) + d_N(v, w)$ .
3. Séparation :  $d_N(u, v) = 0 \Leftrightarrow \|v - u\| = 0 \Leftrightarrow v - u = 0_E \Leftrightarrow u = v$ .

**Remarque :** Hors programme : espaces euclidiens  $\subset$  espaces vectoriels normés  $\subset$  espaces métriques.

**Exemple :** En fait, les exemples 1, 2 et 3 dans "Espaces métriques" sont des evn :  $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ ,  $(\mathbb{C}, |\cdot|)$  et  $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|_2)$  où  $\|(x_1, \dots, x_n)\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} = \|\cdot\|_{\text{euclidienne}}$ .

**Application :** Définissons  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \mapsto \|X\|_\infty = \max(|x_1|, |x_2|, \dots, |x_n|)$ .

Montrer que  $\|\cdot\|_\infty$  est une norme sur  $\mathbb{R}^n$ .

**Observation :**  $\|X\|_\infty = |x_{i_0}|$  où  $i_0 \in \{1, 2, \dots, n\}$  réalise le maximum.

**Homogénéité :**  $\forall i \in \{1, \dots, n\}, |x_i| \leq |x_{i_0}|$

$\forall \lambda \in \mathbb{R}, |\lambda| \cdot |x_i| \leq |\lambda| \cdot |x_{i_0}| \forall i \in \{1, \dots, n\}$

D'où  $\forall \lambda \in \mathbb{R}, |\lambda x_i| \leq |\lambda| \cdot |x_{i_0}| \forall i \in \{1, \dots, n\}$

Or  $\lambda X = (\lambda x_1, \dots, \lambda x_n)$ ,  $i_0$  réalise le maximum de  $(|\lambda x_1|, \dots, |\lambda x_n|)$

Donc  $\|\lambda X\|_\infty = |\lambda| \cdot |x_{i_0}| = |\lambda| \cdot \|X\|_\infty$ .

**Inégalité triangulaire :** Soient  $X = (x_1, \dots, x_n)$  et  $Y = (y_1, \dots, y_n)$  dans  $\mathbb{R}^n$ .

$\|X + Y\|_\infty = \max(|x_1 + y_1|, \dots, |x_n + y_n|)$ .

On a  $\forall i \in \{1, \dots, n\}, |x_i + y_i| \leq |x_i| + |y_i| \leq \|X\|_\infty + \|Y\|_\infty$ .

En prenant le  $\max$  sur  $i$ , on obtient  $\|X + Y\|_\infty \leq \|X\|_\infty + \|Y\|_\infty$ .

**Séparation :** Soit  $X = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ .

$\|X\|_\infty = 0 \Leftrightarrow \max(|x_1|, \dots, |x_n|) = 0$ .

Or  $\forall k \in \{1, \dots, n\}, |x_k| \leq \max(|x_1|, \dots, |x_n|) = 0 \Rightarrow x_k = 0 \Rightarrow X = 0_{\mathbb{R}^n}$ .

### Application :

1. Montrer que  $\|\cdot\|_1 : X \mapsto \sum_{i=1}^n |x_i|$  est une norme sur  $\mathbb{R}^n$ .
2. **Plus difficile.** Plus généralement, montrer que pour  $p \in \mathbb{R}_+$ ,  $\|\cdot\|_p : X \mapsto (\sum_{i=1}^n |x_i|^p)^{1/p}$  est une norme sur  $\mathbb{R}^n$ .

**Exemple :** Exemples de normes sur des espaces de dimension infinie :

- Considérons  $E = \mathcal{C}([0, 1], \mathbb{R})$  l'espace vectoriel des fonctions continues de  $[0, 1]$  dans  $\mathbb{R}$ . On définit la norme  $\|f\|_\infty = \sup_{x \in [0, 1]} |f(x)|$  pour  $f \in E$ . En effet,

**Homogénéité :** Soit  $f \in E$  et  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

On a  $\|\lambda f\|_\infty = \sup_{x \in [0, 1]} |\lambda f(x)| = |\lambda| \cdot \sup_{x \in [0, 1]} |f(x)| = |\lambda| \cdot \|f\|_\infty$ .

**Inégalité triangulaire :** Soient  $f, g \in E$ .

On a  $\|f + g\|_\infty = \sup_{x \in [0, 1]} |f(x) + g(x)|$ .

Or  $\forall x \in [0, 1], |f(x) + g(x)| \leq |f(x)| + |g(x)| \leq \|f\|_\infty + \|g\|_\infty$ .

En prenant le supremum sur  $x$ , on obtient  $\|f + g\|_\infty \leq \|f\|_\infty + \|g\|_\infty$ .

**Séparation :** Soit  $f \in E$ .

On a  $\|f\|_\infty = 0 \Leftrightarrow \sup_{x \in [0, 1]} |f(x)| = 0$ .

Or  $\forall x \in [0, 1], |f(x)| \leq \sup_{x \in [0, 1]} |f(x)| = 0 \Rightarrow f(x) = 0$  pour tout  $x$  dans  $[0, 1] \Rightarrow f = 0_E$ .

- Considérons  $E = \{f : I \rightarrow \mathbb{R}, f \in \mathcal{C}^0(I) \mid \int_I |f|(t)dt \text{ converge}\} = L_1$  où  $I$  est un intervalle de  $\mathbb{R}$ . On définit la norme  $\|f\|_1 = \int_I |f(t)|dt$  pour  $f \in E$ .

✗ **Attention** ✗  $\|f\|_\infty$  existe car  $\sup |f(t)| < +\infty$  pour  $f$  continue sur le compact  $[0, 1]$ .

💡 **Contre-Exemple** :  $f \in \mathcal{C}^0(]0, 1], \mathbb{R})$  définie par  $f(x) = \frac{1}{x}$ . Alors  $\|f\|_\infty$  n'existe pas car  $\sup_{x \in ]0, 1]} |f(x)| = +\infty$ .

## 2 Propriétés

### Propriété : Vecteurs unitaires (admise)

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel non nul, soit  $x \in E \setminus \{0_E\}$  et soit  $N$  une norme sur  $E$ .

Alors  $\frac{x}{N(x)}$  est un vecteur unitaire (ou vecteur normé), c'est-à-dire  $N\left(\frac{x}{N(x)}\right) = 1$ . (existe car  $N(x) \neq 0$  par séparation)

### Propriété : (admise)

Soit  $(E, N)$  un espace vectoriel normé.

Alors  $\forall (x_1, x_2, \dots, x_n) \in E^n, \forall (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \in \mathbb{K}^n$ , on a :

$$N\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^n |\lambda_i| \cdot N(x_i)$$

### Propriété : Inégalité triangulaire renversée

Soit  $(E, N)$  un espace vectoriel normé.

1.  $\forall (x, y) \in E^2, N(x + y) \leq N(x) + N(y)$
2.  $\forall (x, y) \in E^2, |N(x) - N(y)| \leq N(x - y)$

**Preuve :**

1. C'est l'axiome 2 de la définition d'une norme.
2. On a  $N(x) = N((x - y) + y) \leq N(x - y) + N(y)$  d'après l'inégalité triangulaire.  
Donc  $N(x) - N(y) \leq N(x - y)$ .  
De plus,  $N(y) = N((y - x) + x) \leq N(y - x) + N(x)$  d'après l'inégalité triangulaire.  
Donc  $N(y) - N(x) \leq N(y - x) = N(x - y)$ .  
En combinant les deux, on obtient  $|N(x) - N(y)| \leq N(x - y)$ .

## II Topologie sur les espaces métriques

### A Ouverts et fermés

💡 **Remarque** : Un evn étant un espace métrique avec la distance  $d(x, y) = N(y - x)$ , toutes les notions de topologie vues ici s'appliquent aux evn.

**Définition** : Soit  $(X, d)$  un espace métrique.

Une boule ouverte de centre  $a \in X$  de rayon  $r > 0$  est  $B(a, r) = \{x \in X \mid d(x, a) = d(a, x) < r\}$ .

**Définition** : Soit  $(X, d)$  un espace métrique.

Une boule fermée de centre  $a \in X$  de rayon  $r > 0$  est  $B_F(a, r) = \{x \in X \mid d(a, x) \leq r\}$ .

**Définition :** Soit  $(X, d)$  un espace métrique.

La sphère de centre  $a \in X$  de rayon  $r > 0$  est  $S(a, r) = \{x \in X \mid d(a, x) = r\}$ .

💡 **Exemple :** Dans  $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ ,  $B(1, 1) = ]0, 2[$

💡 **Exemple :** Dans  $\mathbb{R}^2$  avec trois métriques :

$d_1 = \|y - x\|_1$ ,  $d_2 = \|y - x\|_2$  et  $d_\infty = \|y - x\|_\infty$ .

Traçons les boules de centre 0 de rayon 1 associées à chaque distance.

$B(0, 1) = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid d(x, 0) < 1\}$ .

On a :  $\|x\|_{1,2,\infty} < 1$ .

- Pour  $d_1 : \|x\|_1 = |x_1| + |x_2| < 1$ . C'est un losange.
- Pour  $d_2 : \|x\|_2 = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} < 1$ . C'est un disque.
- Pour  $d_\infty : \|x\|_\infty = \max(|x_1|, |x_2|) < 1$ . C'est un carré.

📌 **Remarque :** Les bordures correspondent aux sphères  $S(0, 1)$  associées à chaque distance. Les boules fermées  $B_F(0, 1)$  correspondent aux mêmes figures mais en incluant les bordures.

**Définition :** Une partie  $U$  de  $X$  est un ouvert de  $(X, d)$  si  $\forall x \in U, \exists r > 0$  tel que  $B(x, r) \subset U$ .

💡 **Exemple :**  $]0, 1[ \subset \mathcal{C}(]0, 1[, \mathbb{R})$  est un ouvert :  $\forall x \in ]0, 1[, B(x, \min(x, 1 - x)) \subset ]0, 1[$ .

**Définition :** Une topologie sur  $(X, d)$  est l'ensemble des ouverts de  $(X, d)$ . Autrement dit,  $\tau = \{U \subset X \mid U \text{ est un ouvert de } (X, d)\}$ .

**Proposition :**

1. Toute boule ouverte de  $(X, d)$  est un ouvert de  $(X, d)$ .
2. Si  $(U_i)_{i \in I}$  est une famille d'ouverts de  $(X, d)$ , alors  $\bigcup_{i \in I} U_i$  est un ouvert de  $(X, d)$ . (I un ensemble quelconque)
3. Si  $(U_1, U_2, \dots, U_n)$  est une famille finie d'ouverts de  $(X, d)$ , alors  $\bigcap_{i=1}^n U_i$  est un ouvert de  $(X, d)$ .

**Preuve :**

1. Soit  $B(a, r)$  une boule ouverte de  $(X, d)$ . Soit  $x \in B(a, r)$ . On a  $d(a, x) < r$ . Posons  $s = r - d(a, x) > 0$ . Montrons que  $B(x, s) \subset B(a, r)$ .  
Soit  $y \in B(x, s)$ . On a  $d(x, y) < s$ . D'après l'inégalité triangulaire, on a  $d(a, y) \leq d(a, x) + d(x, y) < d(a, x) + s = d(a, x) + (r - d(a, x)) = r$ . Donc  $y \in B(a, r)$ . Ainsi,  $B(x, s) \subset B(a, r)$  et donc  $B(a, r)$  est un ouvert de  $(X, d)$ .
2. Soit  $x \in (U_i)_{i \in I}$ . Alors  $\exists i_0 \in I$  tel que  $x \in U_{i_0}$ . Comme  $U_{i_0}$  est un ouvert de  $(X, d)$ , il existe  $r > 0$  tel que  $B(x, r) \subset U_{i_0} \subset \bigcup_{i \in I} U_i$ . Donc  $\bigcup_{i \in I} U_i$  est un ouvert de  $(X, d)$ .
3. Soit  $x \in \bigcap_{i=1}^n U_i$ , où on a écrit  $I = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $n \in \mathbb{N}^*$ .  
Alors  $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \exists r_i > 0$  tel que  $B(x, r_i) \subset U_i$ . Posons  $r = \min(r_1, r_2, \dots, r_n) > 0$ . Alors  $B(x, r) \subset \bigcap_{i=1}^n U_i$  pour tout  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ .  
En effet, soit  $z \in B(x, r)$ ,  $d(z, x) < r \leq r_i$  donc  $z \in B(x, r_i) \subset U_i$  pour tout  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Donc  $z \in \bigcap_{i=1}^n U_i$ .  
Ainsi,  $\bigcap_{i=1}^n U_i$  est un ouvert de  $(X, d)$ .

💡 **Contre-Exemple :** Si  $I$  est infini, la propriété 3 n'est pas vraie en général. Par exemple, dans  $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ , considérons la famille d'ouverts  $U_n = ]-1/n, 1/n[$  pour  $n \in \mathbb{N}^*$ . Alors  $\bigcap_{n=1}^\infty U_n = \{0\}$  qui n'est pas un ouvert de  $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ .

**Définition :** Soit  $(X, d)$  un espace métrique.

Une partie  $F$  de  $X$  est un fermé de  $(X, d)$  si son complémentaire  $X \setminus F$  est un ouvert de  $(X, d)$ .

**Proposition :**

1. Toute boule fermée de  $(X, d)$  est un fermé de  $(X, d)$ .
2. Si  $(F_i)_{i \in I}$  est une famille de fermés de  $(X, d)$ , alors  $\bigcap_{i \in I} F_i$  est un fermé de  $(X, d)$ . (I un ensemble quelconque)
3. Si  $(F_1, F_2, \dots, F_n)$  est une famille finie de fermés de  $(X, d)$ , alors  $\bigcup_{i=1}^n F_i$  est un fermé de  $(X, d)$ .

**Preuve :**

1. Soit  $B_F(x, r)$  une boule fermée de  $(X, d)$ . C'est un fermé  $\Leftrightarrow X \setminus B_F(x, r)$  est un ouvert de  $(X, d)$ .  
Soit  $y \in X \setminus B_F(x, r)$ . On a  $d(x, y) > r$ . Posons  $\varrho = d(y, x) - r > 0$ . Montrons que  $B(y, \varrho) \subset X \setminus B_F(x, r)$ .  
Soit  $z \in B(y, \varrho)$ . On a  $d(y, z) < \varrho$ .  
 $d(z, y) < d(y, x) - r \Rightarrow r < d(y, x) - d(z, y) \leq d(z, x)$  (inégalité triangulaire)  $\Rightarrow z \in X \setminus B_F(x, r)$ .  
Ainsi,  $B(y, \varrho) \subset X \setminus B_F(x, r)$  et donc  $X \setminus B_F(x, r)$  est un ouvert de  $(X, d)$ .  
Donc  $B_F(x, r)$  est un fermé de  $(X, d)$ .
2. Laissé en exercice au lecteur.
3. Laissé en exercice au lecteur.

**Remarque :** Dans  $(\mathbb{R}, |\cdot|)$ , tout intervalle fermé est un fermé, et tout intervalle ouvert est un ouvert. ( $\mathbb{R}$  est ouvert).  
On a :  $]a, +\infty[ = \bigcup_{n=1}^{\infty } ]a, a+n[$  est un ouvert.

**Remarque :**  $X$  et  $\emptyset$  sont des ouverts et des fermés de  $(X, d)$  (prendre  $r$  arbitrairement grand pour  $X$  et  $r$  quelconque pour  $\emptyset$ ).

**Définition :** Soit  $\mathcal{V} \subset X$  une partie de l'espace métrique  $(X, d)$ .

On dit que  $\mathcal{V}$  est un voisinage de  $a \in X$  si  $\exists r > 0$  tel que  $B(a, r) \subset \mathcal{V}$ .

**Proposition :**

On dit aussi que  $U$  est un ouvert de  $(X, d)$  si et seulement si  $U$  est un voisinage de chacun de ses points.

## B Intérieur et adhérence

Soit  $(X, d)$  un espace métrique.

**Définition :** Soit  $A \subset X$  une partie de l'espace métrique  $(X, d)$ .

On appelle intérieur de  $A$  l'ensemble des points  $a \in A$  tels que  $A$  est un voisinage de  $a$ . On le note :  $\overset{\circ}{A}$ .

On a :

$$\overset{\circ}{A} = \bigcup \{U \subset A \mid U \text{ est un ouvert de } (X, d)\}$$

**Définition :** Soit  $A \subset X$  une partie de l'espace métrique  $(X, d)$ .

On appelle adhérence de  $A$  l'ensemble des points  $x \in X$  tels que  $\forall r > 0, B(x, r) \cap A \neq \emptyset$ . On le note :  $\overline{A}$ .

On a :

$$\overline{A} = \bigcap_{F \supset A, F \text{ fermé de } (X, d)} F$$

**Proposition : Lien avec les ouverts**

Soit  $A \subset X$  une partie de l'espace métrique  $(X, d)$ .

1.  $\overset{\circ}{A}$  est un ouvert contenu dans  $A$ .
2. Si  $U \subset A$  est un ouvert de  $(X, d)$ , alors  $U \subset \overset{\circ}{A}$ .  
Autrement dit,  $\overset{\circ}{A}$  est le plus grand ouvert contenu dans  $A$ .

**Preuve :**

1. C'est une union quelconque d'ouverts indus dans  $A$ , donc  $\overset{\circ}{A}$  est un ouvert. De plus, par définition,  $\overset{\circ}{A} \subset A$ .
2. Par définition  $\overset{\circ}{A} = \bigcup \{U \subset A \mid U \text{ est un ouvert de } (X, d)\}$ . Donc si  $U \subset A$  est un ouvert de  $(X, d)$ , alors  $U$  est dans la famille indexée par l'union, donc  $U \subset \overset{\circ}{A}$ .

**Proposition : Lien avec les fermés**

Soit  $A \subset X$  une partie de l'espace métrique  $(X, d)$ .

1.  $\overline{A}$  est un fermé contenant  $A$ .
2. Si  $F \supset A$  est un fermé de  $(X, d)$ , alors  $\overline{A} \subset F$ .  
Autrement dit,  $\overline{A}$  est le plus petit fermé contenant  $A$ .

**Preuve :**

1. C'est une intersection quelconque de fermés contenant  $A$ , donc  $\overline{A}$  est un fermé. De plus, par définition,  $A \subset \overline{A}$ .
2. Par définition  $\overline{A} = \bigcap_{F \supset A, F \text{ fermé de } (X, d)} F$ . Donc si  $F \supset A$  est un fermé de  $(X, d)$ , alors  $F$  est dans la famille indexée par l'intersection, donc  $\overline{A} \subset F$ .

**Proposition :**

1.  $\overset{\circ}{A} = X \setminus \overline{(X \setminus A)}$
2.  $\overline{A} = X \setminus (X \setminus \overset{\circ}{A})$
3.  $x \in \overline{A} \Leftrightarrow \forall r > 0, B(x, r) \cap A \neq \emptyset$

**Preuve :**

1.  $(\Rightarrow) x \in \overset{\circ}{A}$ . Par définition d'un ouvert,  $\exists r > 0$  tel que  $B(x, r) \subset \overset{\circ}{A} \subset A$ .  
 $(\Leftarrow)$  On a  $B(x, r) \subset A$  qui est un ouvert.  
Donc  $B(x, r) \subset \overset{\circ}{A}$  car  $\overset{\circ}{A}$  est le plus grand ouvert contenu dans  $A$ . Donc  $x \in \overset{\circ}{A}$ , donc  $x \in \overset{\circ}{A}$ .
2.  $\overset{\circ}{A} \Leftrightarrow X \setminus \overline{(X \setminus A)}$ .  
Or  $\overset{\circ}{A} = \bigcup \{U \subset A \mid U \text{ est un ouvert de } (X, d)\}$ .  
Donc  $X \setminus \overset{\circ}{A} = X \setminus \bigcup \{U \subset A \mid U \text{ est un ouvert de } (X, d)\} = \bigcap_{F \supset X \setminus A, F \text{ fermé de } (X, d)} F = \overline{(X \setminus A)}$ .  
Faire de même avec  $\overline{A} = X \setminus (X \setminus \overset{\circ}{A})$ .
3.  $x \in \overline{A} \Leftrightarrow x \in X \setminus (X \setminus \overset{\circ}{A})$  (d'après 2)  $\Leftrightarrow x \notin (X \setminus \overset{\circ}{A}) \Leftrightarrow$  pour tout  $r > 0, B(x, r) \not\subset X \setminus A \Leftrightarrow$  pour tout  $r > 0, B(x, r) \cap A \neq \emptyset$ .

**Proposition :**

- $U$  est ouvert  $\Leftrightarrow \overset{\circ}{U} = U$ .
- $F$  est fermé  $\Leftrightarrow \overline{F} = F$ .

## C Suites dans un espace métrique

### 1 Définitions

**Définition :** On dit qu'une suite  $(x_n)$ ,  $x_n \in X$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , converge si  $\exists x \in X$  tel que  $d(x_n, x) \rightarrow 0$  quand  $n \rightarrow +\infty$ .

Autrement dit,

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \geq N, d(x_n, x) < \varepsilon$$

**Remarque :** Si  $(X, d) = (\mathbb{R}, |\cdot|)$ , on retrouve la définition usuelle de la convergence des suites réelles.

**Définition :** On dit que  $x \in X$  est une valeur d'adhérence d'une suite  $(x_n)$  si il existe une sous suite qui converge vers  $x$ . i.e.  $\exists (n_k)_{k \in \mathbb{N}}$  strictement croissante telle que  $d(x_{n_k}, x) \rightarrow 0$  quand  $k \rightarrow +\infty$ .

#### Proposition :

Soit  $(x_n)$  une suite de  $(X, d)$  qui converge vers  $x$ .

Alors  $x$  est la seule valeur d'adhérence de  $(x_n)$ . En particulier, la limite de  $(x_n)$  est unique.

#### Preuve :

Soit  $x$  la limite de  $(x_n)$ . Supposons qu'il existe une sous-suite  $(x_{n_k})$  qui converge vers une autre valeur  $y \neq x$ .

On a  $d(x, y) > 0$ . Posons  $\varepsilon = \frac{d(x, y)}{2} > 0$ .

$\exists k_1, (\varepsilon, y) \in \mathbb{N}, \forall k \geq k_1, d(x_{n_k}, y) < \varepsilon$ . (convergence de la sous-suite)

Et comme  $x_n \rightarrow x$ , alors  $x_{n_k} \rightarrow x$  aussi.

Donc  $\exists k_2, (\varepsilon, x) \in \mathbb{N}, \forall k \geq k_2, d(x_{n_k}, x) < \varepsilon$ .

Alors on a pour  $k \geq \max(k_1, k_2)$  :

$d(x, y) \leq d(x, x_{n_k}) + d(x_{n_k}, y) < \varepsilon + \varepsilon = 2\varepsilon = d(x, y)$ , ce qui est absurde. Donc  $x$  est la seule valeur d'adhérence de  $(x_n)$ .

#### Fermés

Soit  $A$  une partie quelconque de l'espace métrique  $(X, d)$ .

#### Proposition : Caractérisation de l'adhérence par des suites

$$\overline{A} = \{x \in X \mid \exists (x_n) \text{ suite de } A, x_n \rightarrow x\}.$$

#### Preuve :

( $\subset$ ) Soit  $x \in X$  tq  $\exists (x_n) \in A$  avec  $d(x_n, x) \rightarrow 0$ .

On veut montrer que  $x \in \overline{A} \Rightarrow$  pour tout  $r > 0, B(x, r) \cap A \neq \emptyset$ .

Soit  $r > 0$ . Comme  $d(x_n, x) \rightarrow 0$ , il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que  $\forall n \geq N, d(x_n, x) < r$ .

On a  $x_n \in A$  donc  $x_n \in B(x, r) \cap A \neq \emptyset \forall n \geq N$ . Donc  $x \in \overline{A}$ .  $\square$

( $\supset$ ) Soit  $x \in \overline{A} \Rightarrow$  pour tout  $r > 0, B(x, r) \cap A \neq \emptyset$ .

Prenons,  $n \in \mathbb{N}, r = \frac{1}{n+1} > 0$ .

Alors  $B(x, \frac{1}{n+1}) \cap A \neq \emptyset$ .

Pour chaque  $n \in \mathbb{N}$ , choisissons  $x_n \in B(x, \frac{1}{n+1}) \cap A$ .

On a alors construit une suite  $(x_n)$  qui vérifie  $d(x_n, x) < \frac{1}{n+1}$ .

Ainsi,  $x$  est bien la limite d'une suite d'éléments de  $A$ .  $\square$

#### Proposition : Caractérisation des fermés par des suites

Une partie  $F$  de  $(X, d)$  est fermée si et seulement si pour toute suite  $(x_n)$  d'éléments de  $F$  qui converge vers  $x \in X$ , on a  $x \in F$ .

#### Preuve :

On a  $\overline{F} = \{x \in X \mid \exists (x_n) \text{ suite de } F, x_n \rightarrow x\}$ .

Or  $\overline{F} = F$ . On a donc le résultat.

## D Continuité



## 1 Définitions

**Définition :** Soit  $f: (X, d_X) \rightarrow (Y, d_Y)$  une application entre deux espaces métriques.

- $f$  est continue en  $a \in X$  si  $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta_\varepsilon > 0: x \in B(a, \delta_\varepsilon)$ , alors  $f(x) \in B(f(a), \varepsilon)$ .  
Autrement dit, pour tout  $\varepsilon \exists \delta_\varepsilon$  tel que  $d_X(x, a) < \delta_\varepsilon \Rightarrow d_Y(f(x), f(a)) < \varepsilon$ .
- $f$  est continue sur  $X$  si  $f$  est continue en tout point de  $X$ .

**Remarque :** Si  $f: (\mathbb{R}, |\cdot|) \rightarrow (\mathbb{R}, |\cdot|)$ , on retrouve la définition usuelle de la continuité des fonctions réelles.

**Définition :** Soit  $k \geq 0$  un réel.

On dit que  $f: (X, d_X) \rightarrow (Y, d_Y)$  est  $k$ -lipschitzienne si  $\forall x, y \in X, d_Y(f(x), f(y)) \leq k d_X(x, y)$ .

**Définition :** Si  $f: (X, d_X) \rightarrow (Y, d_Y)$  est une application  $k$ -lipschitzienne, alors  $f$  est continue sur  $X$ .

**Preuve :**

Montrons que  $f$  est continue.

Soit  $a \in X$  et soit  $\varepsilon > 0$ . Posons  $\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{2k} > 0$ .

$\forall x \in B(a, \delta_\varepsilon)$ , on a  $d_Y(f(a), f(x)) \leq k d_X(a, x) \leq k \delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon$ .

Ainsi,  $f$  est continue.

Remarquons de plus que  $\delta_\varepsilon$  ne dépend pas de  $a$ , donc  $f$  est uniformément continue sur  $X$ . (HP)

**Exemple :** Exemple d'une fonction 1-lipschitzienne :  $f: (\mathbb{R}^n, \|\cdot\|) \rightarrow (\mathbb{R}, |\cdot|)$   $x \mapsto \|x\|$ .

En effet,  $|f(x) - f(y)| = ||x| - |y|| \leq \|x - y\| = d(x, y)$  (inégalité triangulaire renversée).

## 2 Caractérisation de la continuité

**Proposition : Caractérisation de la continuité par des suites**

Soit  $f: (X, d_X) \rightarrow (Y, d_Y)$  une application entre deux espaces métriques.

Alors  $f$  est continue en  $a \in X$  si et seulement si pour toute suite  $(x_n)$  de  $X$  qui converge vers  $a$ , la suite  $(f(x_n))$  converge vers  $f(a)$ .

**Preuve :**

( $\Rightarrow$ ) Soit  $(x_n)$  une suite de  $X$  qui converge vers  $a$ .

Soit  $\varepsilon > 0$ . Comme  $f$  est continue en  $a$ , il existe  $\delta_\varepsilon > 0$  tel que  $d_X(x, a) < \delta_\varepsilon \Rightarrow d_Y(f(x), f(a)) < \varepsilon$ .

Comme  $x_n \rightarrow a$ , il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que  $\forall n \geq N, d_X(x_n, a) < \delta_\varepsilon$ .

Donc  $\forall n \geq N, d_Y(f(x_n), f(a)) < \varepsilon$  pour tout  $n \geq N$ .

Ainsi  $\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \geq N, d_Y(f(x_n), f(a)) < \varepsilon$ . Donc  $f(x_n) \rightarrow f(a)$ .

( $\Leftarrow$ ) Par l'absurde, supposons que  $f$  n'est pas continue en  $a$ .

C'est-à-dire qu'il existe  $\varepsilon_0 > 0, \forall \delta > 0, \exists x \in X$  tel que  $d_X(x, a) < \delta$  mais  $d_Y(f(x), f(a)) > \varepsilon_0$ .

$\forall n \in \mathbb{N}$ , posons  $\delta = \frac{1}{n+1} > 0$ .

On construit une suite  $(x_n)$  de  $X$  telle que  $d_X(x_n, a) < \frac{1}{n+1}, d_Y(f(x_n), f(a)) > \varepsilon_0$ .

On a  $x_n \rightarrow a$  mais  $f(x_n) \not\rightarrow f(a)$  (car  $d_Y(f(x_n), f(a)) > \varepsilon_0$  pour tout  $n$ ).

Absurde. Donc  $f$  est continue en  $a$ .

**Proposition :**

$f: (X, d_X) \rightarrow (Y, d_Y)$  est continue sur  $X$  si et seulement si pour tout ouvert  $U$  de  $(Y, d_Y)$ ,  $f^{-1}(U)$  est un ouvert de  $(X, d_X)$ .

**Rappel :**  $f^{-1}(U) = \{x \in X \mid f(x) \in U\}$ .

**Preuve :**

( $\Rightarrow$ ) Soit  $U$  un ouvert de  $(Y, d_Y)$ .

Montrons que  $f^{-1}(U)$  est un ouvert de  $(X, d_X)$ .

Soit  $a \in f^{-1}(U)$ . Alors  $f(a) \in U$ .

Comme  $U$  est un ouvert de  $(Y, d_Y)$ , il existe  $\varepsilon > 0$  tel que  $B_Y(f(a), \varepsilon) \subset U$ .

Or  $\exists \delta_\varepsilon > 0$  tel que  $x \in B_X(a, \delta_\varepsilon) \Rightarrow f(x) \in B_Y(f(a), \varepsilon)$ .

Vérifions que  $B_X(a, \delta_\varepsilon) \subset f^{-1}(U)$ .

Soit  $x \in B_X(a, \delta_\varepsilon)$ . Alors  $d_X(x, a) < \delta_\varepsilon \Rightarrow d_Y(f(x), f(a)) < \varepsilon \Rightarrow f(x) \in B_Y(f(a), \varepsilon) \subset U \Rightarrow x \in f^{-1}(U)$ .

Donc  $B_X(a, \delta_\varepsilon) \subset f^{-1}(U)$ . Ainsi,  $f^{-1}(U)$  est un ouvert de  $(X, d_X)$ .

( $\Leftarrow$ ) Soit  $U$  un ouvert de  $(Y, d_Y)$ .

Alors  $f^{-1}(U)$  est un ouvert de  $(X, d_X)$ .

Soit  $a \in f^{-1}(U)$ . Alors  $f(a) \in U$ .

Soit  $\varepsilon > 0$  tq  $B_Y(f(a), \varepsilon) \subset U$ .

Montrons que  $\exists \delta_\varepsilon > 0$  tel que  $d_X(x, a) < \delta_\varepsilon$  et  $d_Y(f(x), f(a)) < \varepsilon$ .

Comme  $f^{-1}(U)$  est un ouvert de  $(X, d_X)$ , il existe  $\delta_\varepsilon > 0$  tel que  $B_X(a, \delta_\varepsilon) \subset f^{-1}(U)$  qui est ouvert.

Alors si  $x \in B_X(a, \delta_\varepsilon)$ , donc  $f(x) \in B_Y(f(a), \varepsilon)$ .

Donc on a  $d_Y(f(x), f(a)) < \varepsilon$  car  $f(x) \in U$ .

Ainsi,  $f$  est continue en  $a$ .

### Interlude : Inégalité de Cauchy-Schwarz

Considérons  $\langle \cdot, \cdot \rangle : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  définie par  $\langle x, y \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i$ . Cette application est bilinéaire, symétrique, positive et définie ( $\langle x, x \rangle = 0 \Leftrightarrow x = 0$ ).

On observe que la norme euclidienne s'écrit  $\|x\|_2 = \sqrt{\langle x, x \rangle}$ .

On dit que  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  est un produit scalaire (forme bilinéaire symétrique définie positive), et ce produit scalaire est relié à la norme 2 (il s'agit du produit scalaire euclidien).

### Théorème : Inégalité de Cauchy-Schwarz

$$\forall X, Y \in \mathbb{R}^n, |\langle X, Y \rangle| \leq \|X\|_2 \|Y\|_2.$$

#### Démonstration :

- Fixons  $X, Y \in \mathbb{R}^n$  ( $\neq 0_{\mathbb{R}^n}$ )

$$P(t) = \|X + tY\|_2^2 = \langle X + tY, X + tY \rangle = \|X\|_2^2 + t^2 \|Y\|_2^2 + 2t \langle X, Y \rangle \geq 0 = t^2 \|Y\|_2^2 + 2t \langle X, Y \rangle + \|X\|_2^2.$$

$P$  est un polynôme de degré 2 en  $t$ .  $P(t) \geq 0, \forall t \in \mathbb{R}$ , son discriminant est  $\leq 0$ .

$$\Delta = 4\langle X, Y \rangle^2 - 4\|X\|_2^2 \|Y\|_2^2 = 4(\langle X, Y \rangle^2 - \|X\|_2^2 \|Y\|_2^2).$$

$$\text{Or, } \Delta \leq 0 \iff \langle X, Y \rangle^2 - \|X\|_2^2 \|Y\|_2^2 \leq 0 \iff \langle X, Y \rangle^2 \leq \|X\|_2^2 \|Y\|_2^2 \iff |\langle X, Y \rangle| \leq \|X\|_2 \|Y\|_2.$$

- De plus, si  $\Delta = 0$ ,  $\exists t_0 \in \mathbb{R}$  racine double,  $P(t_0) = 0 = \|X + t_0 Y\|_2^2$

$$\implies X + t_0 Y = 0 \implies X \text{ et } Y \text{ sont colinéaires.}$$

Et si  $X$  et  $Y$  sont colinéaires, alors

$$|\langle X, Y \rangle| = |\langle X, \lambda X \rangle| = |\lambda| \langle X, X \rangle = |\lambda| \|X\|_2^2 = |\lambda| \|X\|_2 \|X\|_2 = \|X\|_2 \|\lambda X\|_2 = \|X\|_2 \|Y\|_2.$$

### Corollaire : Égalité de Cauchy-Schwarz

L'égalité  $|\langle X, Y \rangle| = \|X\|_2 \|Y\|_2$  est vérifiée si et seulement si  $X$  et  $Y$  sont colinéaires.

💬 **Note de rédaction :** Démo à reprendre, cf screen Laurent 2

## 3 Continuité des applications linéaires dans les evn

*A priori*, les espaces vectoriels ne sont pas forcément de dimension finie.

Soit  $f : (E, \|\cdot\|_E) \rightarrow (F, \|\cdot\|_F)$  une application linéaire entre deux  $K$ -espaces vectoriels normés (evn).

**Proposition : Caractérisation de la continuité des applications linéaires**

Les propriétés suivantes sont équivalentes :

1.  $f$  est continue de  $(E, \|\cdot\|_E)$  dans  $(F, \|\cdot\|_F)$ .
2.  $f$  est continue en 0.
3.  $\exists k > 0$  tel que  $\forall x \in E, \|f(x)\|_F \leq k\|x\|_E$ .

**Démonstration :**

- $i) \Rightarrow ii)$  :  $f$  continue sur  $E \Rightarrow f$  continue en 0,  $f(0_E) = 0_F$
- $ii) \Rightarrow iii)$  :  $f$  continue en 0 : Soit  $\varepsilon > 0$ ,  $\exists \delta > 0$  tel que si  $\|x\|_E < \delta \Rightarrow \|f(x)\|_F < \varepsilon$ .  
Soit  $x \in E$ . Posons  $y = \frac{\delta x}{2\|x\|_E}$ . Alors

$$\begin{aligned} \|f(y)\|_F < \varepsilon &\Rightarrow f\left(\frac{\delta x}{2\|x\|_E}\right) < \varepsilon \\ &\Rightarrow \frac{\delta}{2\|x\|_E} \|f(x)\|_F < \varepsilon \\ &\Rightarrow \|f(x)\|_F < \frac{2\varepsilon}{\delta} \|x\|_E \end{aligned}$$

On trouve  $K = \frac{2\varepsilon}{\delta}$ , indépendant de  $x \in E$ , tel que  $\forall x \in E, \|f(x)\|_F \leq K\|x\|_E$ .

- $iii) \Rightarrow i)$  : On part de  $\exists K > 0$  tel que  $\forall x \in E, \|f(x)\|_F \leq K\|x\|_E$ , on obtient  $\forall x, y \in E, \|f(x-y)\|_F \leq K\|x-y\|_E$   
 $\Rightarrow \exists K > 0, \forall x, y \in E, \|f(x) - f(y)\|_F \leq K\|x - y\|_E$   
 $\Rightarrow f$  est  $K$ -Lipschitz  $\Rightarrow f$  continue.

**E Equivalence de normes**

**Problème :** Soit  $E$  un evn avec une normée notée  $N_1 : E \in \mathbb{R}^+$ .

On peut *a priori* mettre d'autres normes sur  $E$ , disons  $N_2 : E \in \mathbb{R}^+$ .


Si  $(x_n)$  une suite de  $E$  converge pour la norme  $N_1$ , converge-t-elle aussi pour la norme  $N_2$  ?

**Définition :**  $N_1$  et  $N_2$  sont **équivalentes** si  $\exists C, c > 0$  tels que  $\forall x \in E, cN_2(x) \leq N_1(x) \leq CN_2(x)$ .  
On note  $N_1 \sim N_2$ .

**Proposition :**

1.  $N_1 \sim N_2 \Leftrightarrow N_2 \sim N_1$ .
2. Si  $N_1 \sim N_2$  et  $N_2 \sim N_3$ , alors  $N_1 \sim N_3$ .

 **Exemple :** Voir TD, normes  $\|\cdot\|_1, \|\cdot\|_2, \|\cdot\|_\infty$  sur  $\mathbb{R}^n$ .

 **Remarque :** Un des buts du cours est de montrer que sur  $\mathbb{R}^n$  (+ généralement pour tout evn), toutes les normes sont équivalentes.

**Proposition :**

Soit  $(x_n)$  une suite de  $E$ , où  $E$  est muni de  $N_1$  et  $N_2$  deux normes équivalentes.  
Alors  $(x_n)$  converge pour la norme  $N_1$  si et seulement si  $(x_n)$  converge pour la norme  $N_2$ .

**Démonstration :**

- $\Rightarrow$  : On suppose  $\exists a \in X$  tel que  $x_n \xrightarrow{N_1} a \Leftrightarrow N_1(x_n - a) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .  
Or,  $cN_2(z) \leq N_1(z) \leq CN_2(z)$   
Cette inégalité implique  $N_2(x_n - a) \leq \frac{1}{c} N_1(x_n - a) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$   
 $\Rightarrow N_2(x_n - a) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$   
 $\Rightarrow x_n \xrightarrow{N_2} a$ .

- $\Leftarrow$  : Si  $x_n \xrightarrow{N_2} a \Rightarrow N_2(x_n - a) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .  
On utilise  $N_1(\cdot) \leq CN_2(\cdot)$  ( $C > 0$ )  
 $\frac{N_1}{c}(x_n - a) \rightarrow 0 \Rightarrow N_1(x_n - a) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .

## F Norme subordonnée

Soient  $(E, \|\cdot\|_E)$  et  $(F, \|\cdot\|_F)$ .

Soit  $f: E \rightarrow F$  une application linéaire continue. On a vu que la continuité d'une application linéaire entre evn se caractérisaient de la façon suivante :

$\exists K > 0: \forall x \in E \|f(x)\|_F \leq K \|x\|_E$ .

Si  $x \neq 0$ , on peut considérer  $\frac{\|f(x)\|_F}{\|x\|_E} \in \mathbb{R}_+$

Par continuité de  $f$ ,  $\forall x \in E \setminus \{0\} \frac{\|f(x)\|_F}{\|x\|_E} \leq K$ .

**Définition :** La norme subordonnée de  $f$  par rapport à  $\|\cdot\|_E$  et  $\|\cdot\|_F$  est définie par  $|||f||| := \sup_{x \in E \setminus \{0\}} \frac{\|f(x)\|_F}{\|x\|_E}$ .

**Remarque :** Cette triple barre est bien définie et correspond à la meilleure constante de continuité de  $f$ .

### Proposition : Espace des applications linéaires continues

Notons  $\mathcal{L}_c(E, F) = \{f: E \rightarrow F \mid f \text{ est continue}\}$ . Alors  $|||\cdot|||$  est une norme sur  $\mathcal{L}_c(E, F)$  et  $(\mathcal{L}_c(E, F), |||\cdot|||)$  est un evn.

**Vocabulaire :** On dit que  $|||\cdot|||$  est la "norme triple".

### Démonstration :

- Séparation : Si  $|||f||| = 0 \Rightarrow \sup_{x \neq 0} \frac{\|f(x)\|_F}{\|x\|_E} = 0 \Rightarrow \forall x \neq 0 \frac{\|f(x)\|_F}{\|x\|_E} = 0 \Rightarrow \forall x \neq 0, \|f(x)\|_F = 0 \Rightarrow f(x) = 0_F$ .
- Homogénéité : Soit  $\lambda \in K, f \in \mathcal{L}_c(E, F)$ .

$$|||\lambda f||| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|\lambda f(x)\|_F}{\|x\|_E} = \sup_{x \neq 0} \frac{|\lambda| \|f(x)\|_F}{\|x\|_E} = |\lambda| \sup_{x \neq 0} \frac{\|f(x)\|_F}{\|x\|_E} = |\lambda| |||f|||$$

- Inégalité triangulaire : Soient  $f, g \in \mathcal{L}_c(E, F)$ .

$$|||f + g||| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|(f + g)(x)\|_F}{\|x\|_E} \leq \sup_{x \neq 0} \frac{\|f(x)\|_F + \|g(x)\|_F}{\|x\|_E} \leq \sup_{x \neq 0} \frac{\|f(x)\|_F}{\|x\|_E} + \sup_{x \neq 0} \frac{\|g(x)\|_F}{\|x\|_E} = |||f||| + |||g|||$$

### Proposition : (admis)

Soit  $f \in \mathcal{L}_c(E, F)$ . On a  $|||f||| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|f(x)\|_F}{\|x\|_E} = \sup_{\|x\|_E \leq 1} \|f(x)\|_F = \sup_{\|x\|_E = 1} \|f(x)\|_F$ .

**Remarque :** On montrera qu'en dimension finie, toute application linéaire est continue.

## G Introduction à la complétude dans les espaces métriques

### 1 Définitions et premières propriétés

**Définition :** Soit  $(X, d)$  un espace métrique.  
Une suite  $(x_n)$  de  $(X, d)$  est dite de Cauchy si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, \forall m, n \geq N, d(x_n, x_m) < \varepsilon$$

**Remarque :** Si on travaille dans  $(X, d) = (E, \|\cdot\|)$  un evn, avec  $d_E(x, y) = \|x - y\|$ , et si on se donne une autre norme  $\|\cdot\|'$  sur  $E$  équivalente à  $\|\cdot\|$ , alors une suite est de Cauchy pour  $\|\cdot\|$  si et seulement si elle est de Cauchy pour  $\|\cdot\|'$ .

**Note de rédaction :** cf. Laurent pour la démonstration de la remarque

#### Proposition :

- Soit  $(x_n)$  une suite d'éléments de  $(X, d)$  qui converge vers  $x \in X$ .  
Alors  $(x_n)$  est une suite de Cauchy.
- Une suite de Cauchy a au plus une valeur d'adhérence.
- Une suite de Cauchy qui a une valeur d'adhérence converge vers cette valeur d'adhérence.