

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 θ_1 et θ_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} .

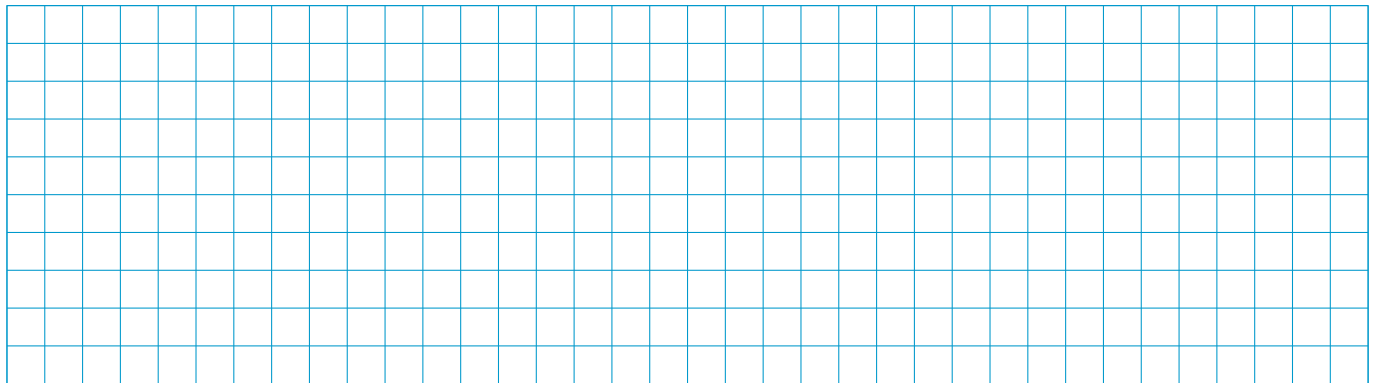
Construction d'espaces métriques : Bijection (*admis*)

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.