

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 $X = \text{ cercle unité}$ 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 .

i 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} .

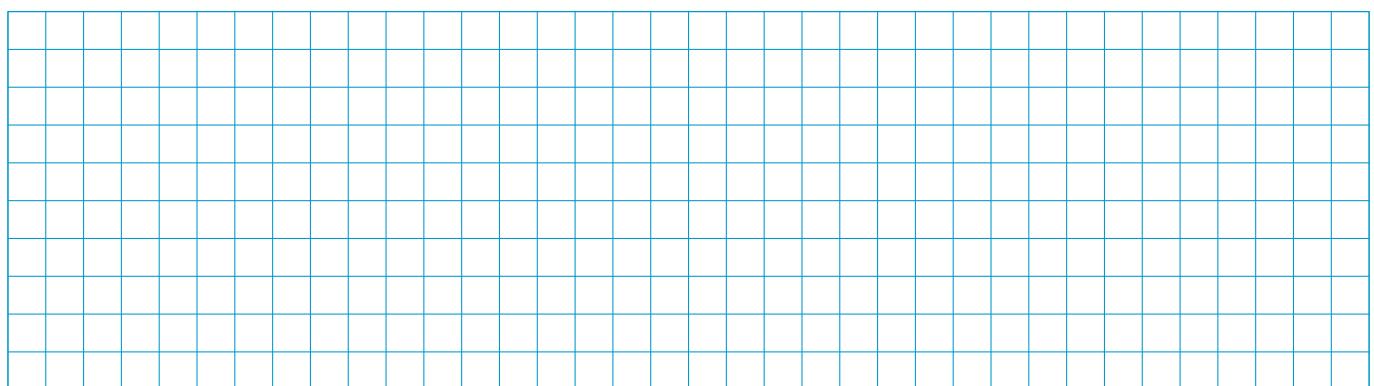
Construction d'espaces métriques : Bijections (admis)

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, $d_Y : (y_1, y_2) \mapsto d_Y(f(y_1), f(y_2))$.

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 :

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

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

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 $\|\cdot\|_1 : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$ est une norme sur \mathbb{R}^n .

2. **Plus difficile.** Plus généralement, montrer que pour $p \in \mathbb{R}_+$, $\|\cdot\|_p : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$ est une norme sur \mathbb{R}^n .

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

- Considérons $E = C([0, 1], \mathbb{R})$ 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_∞ : $\|x\|_\infty = \max(|x_1|, |x_2|) < 1$. 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, $\tau = \{U \subset X \mid U$ est un ouvert de $(X, d)\}$.

Proposition :

- Toute boule ouverte de (X, d) est un ouvert de (X, d) .
- 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)
- 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 :

- 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) .
- 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) .
- 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.

i 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.

i 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 induis 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. $\overset{\circ}{A} \Leftrightarrow X \setminus \overset{\circ}{A} = \overline{(X \setminus A)}$.
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 $r > 0$, $B(x, r) \not\subset X \setminus \overset{\circ}{A} \Leftrightarrow$ pour tout $r > 0$, $B(x, r) \cap A \neq \emptyset$.
 $\Leftrightarrow B(x, r) \cap A \neq \emptyset$.

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 $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta_\varepsilon > 0 : x \in B(a, \delta_\varepsilon), \text{ alors } f(x) \in B(f(a), \varepsilon)$.
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 δ_ε ne dépend pas de a , donc f est uniformément continue sur X . (HP)

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

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 $B(f(a), \varepsilon) \subset U$.

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 $x \in X$ tq $d_X(x, a) < \delta_\varepsilon$, donc $f(x) \in B(f(a), \varepsilon)$.

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 ≤ 0 .

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

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

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

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 $\underline{N_1(\cdot)} \leq CN_2(\cdot)$ ($C > 0$)
 $\frac{N_1}{c}(x_n - a) \rightarrow 0 \Rightarrow N_1(x_n - a) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$.

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 :

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

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