

Table des matières

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Nombres réels et complexes | 1 |
| 2 | Suites et sommes de référence | 2 |
| 3 | Théorèmes de première année sur les suites | 3 |
| 4 | Théorèmes d'analyse de première année | 4 |
| 5 | Équations différentielles | 5 |
| 6 | Séries numériques | 6 |
| 7 | Intégrales généralisées | 7 |
| 8 | Suites de fonctions | 8 |
| 9 | Séries de fonctions | 9 |
| 10 | Séries entières | 10 |
| 11 | Intégrales à paramètre | 12 |
| 12 | Le point sur les théorèmes de régularité et de permutations | 12 |
| 13 | Espaces vectoriels normés | 15 |
| 14 | Fonctions vectorielles de la variable réelle | 18 |
| 15 | Calcul différentiel et extremums | 19 |
| 16 | Rappels et compléments d'algèbre linéaire | 21 |
| 17 | Polynômes | 22 |
| 18 | Déterminants | 24 |
| 19 | Réduction des endomorphismes, diagonalisation des matrices carrées | 25 |
| 20 | Espaces préhilbertiens réels, espaces euclidiens | 27 |
| 21 | Isométries vectorielles, automorphisme orthogonaux et matrices orthogonales | 29 |
| 22 | Endomorphismes autoadjoints, matrices symétriques | 30 |

| | | |
|----|---|----|
| 23 | Matrices et endomorphismes symétriques positifs, définis positifs | 30 |
| 24 | Probabilités discrètes | 31 |
| 25 | Variables aléatoires discrètes | 32 |

1 Nombres réels et complexes

1.1 Majorant et minorant d'une partie de \mathbb{R}

Soit $P \subset \mathbb{R}$.

$M \in \mathbb{R}$ est un majorant de P si $\forall x \in P, x \leq M$.

$m \in \mathbb{R}$ est un minorant de P si $\forall x \in P, m \leq x$.

1.2 Maximum et minimum d'une partie de \mathbb{R}

Soit $P \subset \mathbb{R}$.

(i) $M \in \mathbb{R}$ est le maximum de P si $M \in P$ et $\forall x \in P, x \leq M$. On note alors $M = \max(P)$.

(ii) $m \in \mathbb{R}$ est le minimum de P si $m \in P$ et $\forall x \in P, m \leq x$. On note alors $m = \min(P)$.

☞ Toute partie même non vide de P n'admet pas nécessairement un maximum et/ou un minimum.

1.3 Borne supérieure et borne inférieure d'une partie non vide de \mathbb{R}

(i) Toute partie P *non vide et majorée* de \mathbb{R} admet une borne supérieure notée $\sup(P)$: c'est le plus petit de ses majorants.

Caractérisation : $M = \sup(P) \iff \forall x < M, \exists y \in P, x < y \leq M$.

(ii) Toute partie P *non vide et minorée* de \mathbb{R} admet une borne inférieure notée $\inf(P)$: c'est le plus grand de ses minorants.

Caractérisation : $m = \inf(P) \iff \forall x > m, \exists y \in P, m \leq y < x$.

1.4 Partie entière d'un réel

Soit $x \in \mathbb{R}$. La partie entière de x , notée $\lfloor x \rfloor$, est définie par :

$$\lfloor x \rfloor \in \mathbb{Z} \quad \text{et} \quad \lfloor x \rfloor \leq x < \lfloor x \rfloor + 1.$$

1.5 Segments et intervalles de \mathbb{R}

(i) Soit $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ avec $a \leq b$. Le *segment* $[a; b]$ est défini par

$$[a; b] \stackrel{\text{déf.}}{=} \{x \in \mathbb{R}, a \leq x \leq b\}.$$

(ii) Une partie P de \mathbb{R} est un intervalle si, et seulement si,
 $\forall (a, b) \in P^2$ avec $a \leq b, [a; b] \subset P$.

1.6 Inégalité triangulaire

$$\forall (x, y) \in \mathbb{K}^2, \quad ||x| - |y|| \leq |x - y| \leq |x| + |y|.$$

1.7 Formulaire dans \mathbb{C}

$$\textcircled{1} \quad \forall t \in \mathbb{R}, \quad e^{it} = \cos(t) + i \sin(t)$$

$$\textcircled{2} \quad \forall z \in \mathbb{C}, \quad e^z = e^{\operatorname{Re}(z)} e^{i\operatorname{Im}(z)}$$

$$\textcircled{3} \forall z \in \mathbb{C}, \quad |z|^2 = z\bar{z} \text{ et } |e^z| = e^{\Re(z)}$$

$$\textcircled{4} \text{ Euler : } \forall t \in \mathbb{R}, \quad \cos(t) = \frac{e^{it} + e^{-it}}{2} \text{ et } \sin(t) = \frac{e^{it} - e^{-it}}{2i}$$

$$\textcircled{5} \text{ De Moivre : } \forall t \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N}, \quad (\cos(t) + i \sin(t))^n = \cos(nt) + i \sin(nt)$$

$$\textcircled{6} \forall n \in \mathbb{N}^*, \quad z^n = 1 \iff \exists! k \in \llbracket 0; n-1 \rrbracket, z = \omega_k \stackrel{\text{déf.}}{=} \exp\left(\frac{2ik\pi}{n}\right)$$

$$\textcircled{7} \mathbb{U}_n = \{\omega_k | k \in \llbracket 0; n-1 \rrbracket\} \text{ et } \forall n \geq 1, \quad \sum_{k=0}^{n-1} \omega_k = 0$$

1.8 Formulaire trigonométrique

$$\textcircled{1} \cos(a+b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b), \quad \sin(a+b) = \sin(a)\cos(b) + \cos(a)\sin(b)$$

$$\textcircled{2} \cos(2a) = \cos^2(a) - \sin^2(a) = 1 - 2\sin^2(a) = 2\cos^2(a) - 1, \\ \sin(2a) = 2\sin(a)\cos(a)$$

$$\textcircled{3} \cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2}(\cos(a+b) + \cos(a-b))$$

$$\sin(a)\sin(b) = \frac{1}{2}(\cos(a-b) - \cos(a+b))$$

$$\sin(a)\cos(b) = \frac{1}{2}(\sin(a+b) + \sin(a-b))$$

$$\textcircled{4} \tan(a+b) = \frac{\tan(a) + \tan(b)}{1 - \tan(a)\tan(b)}, \quad \tan(2a) = \frac{2\tan(a)}{1 - \tan^2(a)}$$

$$\textcircled{5} a\cos(t) + b\sin(t) = \sqrt{a^2 + b^2} \cos(t - \varphi) \text{ où } \begin{cases} \cos(\varphi) = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ \sin(\varphi) = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \end{cases}$$

1.9 Équation du second degré à coefficients réels

Soit $(a, b, c) \in \mathbb{R}^* \times \mathbb{R}^2$ et (E) : $ax^2 + bx + c = 0$.

Soit $\Delta \stackrel{\text{déf.}}{=} b^2 - 4ac$.

$$\textcircled{1} \text{ Si } \Delta > 0, \text{ alors } x = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}, \text{ racines réelles distinctes.}$$

$$\textcircled{2} \text{ Si } \Delta = 0, \text{ alors } x = \frac{-b}{2a}, \text{ racine réelle double.}$$

$$\textcircled{3} \text{ Si } \Delta < 0, \text{ alors } x = \frac{-b \pm i\sqrt{-\Delta}}{2a}, \text{ racines complexes conjuguées.}$$

1.10 Équation du second degré à coefficients complexes

Soit $(a, b, c) \in \mathbb{R}^* \times \mathbb{R}^2$ et (E) : $az^2 + bz + c = 0$.

Soit $\Delta \stackrel{\text{déf.}}{=} b^2 - 4ac$ et δ tel que $\delta^2 = \Delta$

$$\textcircled{1} \text{ Si } \Delta \neq 0 \text{ alors } z = \frac{-b \pm \delta}{2a}, \text{ racines distinctes.}$$

$$\textcircled{2} \text{ Si } \Delta = 0, \text{ alors } z = \frac{-b}{2a}, \text{ racine double.}$$

1.11 Trouver deux nombres connaissant leur somme et leur produit

$$\begin{cases} a + b = S \\ ab = P \end{cases} \iff \begin{cases} a \text{ et } b \text{ sont les solutions de} \\ z^2 - Sz + P = 0. \end{cases}$$

1.12 Coefficients binomiaux, formule du binôme

① $\binom{n}{p}$ est le nombre de façons de choisir p éléments distincts parmi n sans tenir compte de l'ordre. C'est aussi le nombre de parties à p éléments d'un ensemble à n éléments.

$$\textcircled{2} \binom{n}{p} = \begin{cases} \frac{n!}{p!(n-p)!} & \text{si } 0 \leq p \leq n, \\ 0 & \text{si } p > n. \end{cases}$$

$$\textcircled{3} \binom{n}{p} = \binom{n}{n-p}, \text{ relation de Pascal : } \binom{n+1}{p+1} = \binom{n}{p} + \binom{n}{p+1}$$

$$\textcircled{4} \text{ Formule du binôme de Newton : } \forall (a, b) \in \mathbb{K}^2, \quad (a+b)^n = \sum_{p=0}^n \binom{n}{p} a^p b^{n-p}$$

2 Suites et sommes de référence

2.1 Suites arithmétiques

① La suite $(u_n)_{n \geq n_0}$ est *arithmétique de raison* $r \in \mathbb{R}$ si, et seulement si,

$$\forall n \geq n_0, \quad u_{n+1} - u_n = r.$$

On notera que la raison r est indépendante de l'indice n .

② Soit $(u_n)_{n \geq n_0}$ une suite arithmétique de raison $r \in \mathbb{R}$.

$$\bullet \forall n \geq n_0, \quad u_n = u_{n_0} + (n - n_0)r;$$

$$\bullet \forall n \geq n_0, \quad \sum_{k=n_0}^n u_k = \frac{(n - n_0 + 1)(u_{n_0} + u_n)}{2},$$

$$\text{alias : } \frac{(\text{nombre de termes}) \times (\text{premier terme} + \text{dernier terme})}{2}$$

2.2 Suites géométriques

① La suite $(u_n)_{n \geq n_0}$ est *géométrique de raison* $q \in \mathbb{R}$ si, et seulement si,

$$\forall n \geq n_0, \quad u_{n+1} = qu_n.$$

On notera que la raison q est indépendante de l'indice n .

② Soit $(u_n)_{n \geq n_0}$ une suite géométrique de raison $q \in \mathbb{R}$.

$$\bullet \forall n \geq n_0, \quad u_n = q^{n-n_0} u_{n_0};$$

$$\bullet \forall n \geq n_0, \quad \sum_{k=n_0}^n u_k = \begin{cases} u_{n_0} \frac{1 - q^{n-n_0+1}}{1 - q} & \text{si } q \neq 1 \\ (n - n_0 + 1)u_{n_0} & \text{si } q = 1 \end{cases}$$

alias : $(\text{premier terme}) \times \frac{1 - \text{raison}^{\text{nombre de termes}}}{1 - \text{raison}}$

- Si $u_{n_0} \neq 0$, alors

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \begin{cases} \text{sign}(u_{n_0}) \times (\infty) & \text{si } q > 1 \\ u_{n_0} & \text{si } q = 1 \\ 0 & \text{si } -1 < q < 1 \\ \text{n'existe pas} & \text{sinon} \end{cases}$$

2.3 Suites arithmético-géométriques

- ① La suite $(u_n)_{n \geq n_0}$ est *arithmético-géométrique* si, et seulement si,
 $\exists a \neq 1, \exists b \neq 0, \forall n \geq n_0, \quad u_{n+1} = au_n + b \quad (\mathcal{R})$

On notera que les paramètres a et b sont indépendants de l'indice n .

- ② Comme $a \neq 1$, il existe un unique réel ℓ tel que $(\mathcal{E}) : \quad \ell = a\ell + b$.
 $(\mathcal{R}) - (\mathcal{E})$ donne : $\forall n \geq n_0, \quad u_{n+1} - \ell = a(u_n - \ell)$.

La suite $(u_n - \ell)$ est géométrique de raison a , de premier terme $u_{n_0} - \ell$, et on a :
 $\forall n \geq n_0, \quad u_n = a^{n-n_0}(u_{n_0} - \ell) + \ell$.

- ③ Deux interprétations pour ℓ . D'une part, la suite $(\ell)_{n \geq n_0}$ est l'unique suite constante vérifiant la relation de récurrence (\mathcal{R}) . D'autre part (lorsque $u_{n_0} \neq \ell$), la suite u converge si, et seulement si, $a \in]-1; 1[$. Et alors $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \ell$.

2.4 Suites récurrentes linéaires d'ordre 2

- ① La suite $(u_n)_{n \geq n_0}$ vérifie une *relation de récurrence linéaire d'ordre 2* si, et seulement si,

$$\exists a \in \mathbb{K}, \exists b \in \mathbb{K}^*, \forall n \geq n_0, \quad u_{n+2} = au_{n+1} + bu_n \quad (\mathcal{R}).$$

On notera que les paramètres a et b sont indépendants de l'indice n .

- ② **Théorème dans \mathbb{R}** , i.e. quand $(a, b, u_{n_0}, u_{n_0+1}) \in \mathbb{R}^4$.

Soit (\mathcal{E}) l'équation caractéristique associée à la relation (\mathcal{R}) :

$$(\mathcal{E}) \quad x^2 - ax - b = 0.$$

- *Premier cas* : (\mathcal{E}) possède deux racines réelles distinctes r_1 et r_2 .

Alors : $\exists!(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2, \quad \forall n \geq n_0, \quad u_n = \alpha r_1^n + \beta r_2^n$.

- *Deuxième cas* : (\mathcal{E}) possède une unique racine réelle r .

Alors : $\exists!(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2, \quad \forall n \geq n_0, \quad u_n = (\alpha + \beta n)r^n$.

- *Troisième cas* : (\mathcal{E}) ne possède pas de racine réelle mais deux racines complexes conjuguées $re^{i\theta}$ et $re^{-i\theta}$.

Alors : $\exists!(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2, \quad \forall n \geq n_0, \quad u_n = (\alpha \cos(n\theta) + \beta \sin(n\theta))r^n$.

- ③ **Théorème dans \mathbb{C}** , i.e. quand $(a, b, u_{n_0}, u_{n_0+1}) \in \mathbb{C}^4$.

Soit (\mathcal{E}) l'équation caractéristique associée à la relation (\mathcal{R}) :

$$(\mathcal{E}) \quad z^2 - az - b = 0.$$

- *Premier cas* : (\mathcal{E}) possède deux racines complexes distinctes r_1 et r_2 .

Alors : $\exists!(\alpha, \beta) \in \mathbb{C}^2, \quad \forall n \geq n_0, \quad u_n = \alpha r_1^n + \beta r_2^n$.

- *Deuxième cas* : (\mathcal{E}) possède une unique racine complexe r .

Alors : $\exists!(\alpha, \beta) \in \mathbb{C}^2, \quad \forall n \geq n_0, \quad u_n = (\alpha + \beta n)r^n$.

2.5 Sommes finies de référence

$$\textcircled{1} \sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}; \quad \textcircled{2} \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}; \quad \textcircled{3} \sum_{k=1}^n k^3 = \left(\frac{n(n+1)}{2}\right)^2;$$

$$\textcircled{4} \left(\sum_{i=1}^n a_i\right)^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 + \sum_{1 \leq i, j \leq n, i \neq j} a_i a_j = \sum_{i=1}^n a_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} a_i a_j$$

2.6 Gestion des sommes doubles

Cas d'indices indépendants

$$\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n u_{i,j}\right) = \sum_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n} u_{i,j} = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m u_{i,j}\right)$$

Cas d'indices dépendants

$$\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^i u_{i,j}\right) = \sum_{1 \leq j \leq i \leq m} u_{i,j} = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=j}^m u_{i,j}\right)$$

3 Théorèmes de première année sur les suites

3.1 Suite bornée, minorée, majorée

Notez que dans les définitions suivantes, les réels B , m et M sont indépendants de l'indice (muet) n et ne dépendent que de la suite u considérée.

- ① La suite $u \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$ est *bornée* si, et seulement si,

$$\exists B \in \mathbb{R}, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad |u_n| \leq B.$$

- ② La suite $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ est *minorée* si, et seulement si,

$$\exists m \in \mathbb{R}, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad m \leq u_n.$$

- ③ La suite $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ est *majorée* si, et seulement si,

$$\exists M \in \mathbb{R}, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n \leq M.$$

- ④ La suite $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ est bornée si, et seulement si, elle est à la fois minorée et majorée.

3.2 Définition de la convergence d'une suite

La suite $(u_n) \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$ converge vers le scalaire ℓ si, et seulement si,

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, \quad \forall n \geq N, \quad |u_n - \ell| < \varepsilon.$$

On écrit alors : $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$.

3.3 Corollaire immédiat pour $\mathbb{K} = \mathbb{R}$

À savoir justifier.

$u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$ si, et seulement si,

$$\forall (a, b) \in \mathbb{R}^2 \text{ tq } a < \ell < b, \quad \exists N \in \mathbb{N}, \quad \forall n \geq N, \quad a < u_n < b.$$

3.4 Unicité de la limite

Si $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$ et $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell'$ alors $\ell = \ell'$.

3.5 Limites infinies

La suite $(u_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ diverge vers $+\infty$ si, et seulement si,
 $\forall M \in \mathbb{R}, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \geq N, u_n \geq M$.

On écrit alors : $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$.

La suite $(u_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ diverge vers $-\infty$ si, et seulement si,
 $\forall M \in \mathbb{R}, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \geq N, u_n \leq M$.

On écrit alors : $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} -\infty$.

3.6 Théorème de convergence monotone

Soit $(u_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ une suite **croissante**.

u est convergente si, et seulement si, u est majorée.

u diverge vers $+\infty$ si, et seulement si, u n'est pas majorée.

On notera que, pour une suite u croissante, « $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n$ » a toujours un sens.

3.7 Suites extraites

Soit $(u_n) \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$ une suite.

① Soit $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ une application **strictement croissante**.

La suite $(u_{\varphi(n)})$ est appelée *suite extraite* de la suite u . La fonction φ est appelée *fonction extractrice*.

② Les exemples les plus fréquents de suites extraites de u sont les suites (u_{n+1}) , (u_{2n}) et (u_{2n+1}) .

③ La suite u converge vers le nombre ℓ si, et seulement si, toute suite extraite de u converge vers ℓ .

④ La suite u converge vers le nombre ℓ si, et seulement si, les deux suites extraites de (u_{2n}) et (u_{2n+1}) convergent vers ℓ .

On utilise fréquemment ④ ou ③ pour **justifier qu'une suite diverge**.

3.8 Théorème des suites adjacentes

• Deux suites u et v de $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ sont dites *adjacentes* si

① l'une croît,

② l'autre décroît,

③ la suite $v - u$ converge vers 0.

• Si les suites u et v sont adjacentes, alors elles sont convergentes, vers une même limite.

De plus, si u croît, v décroît et $\ell = \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} v_n$, alors

$$\forall (m, n) \in \mathbb{N}^2, u_m \leq \ell \leq v_n.$$

3.9 Caractérisation séquentielle de la limite d'une fonction

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{K}$ et $a \in \bar{I}$, i.e. a est un point de I ou une borne de I , éventuellement égale à $-\infty$ ou $+\infty$.

Alors f tend vers ℓ en a si, et seulement si, pour toute suite $u \in I^{\mathbb{N}}$ de limite a , la suite $(f(u_n))$ tend vers ℓ .

4 Théorèmes d'analyse de première année

4.1 Théorème de Rolle

Soit $a < b$ et $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$, continue sur $[a; b]$ et dérivable sur $]a; b[$.

Si $f(a) = f(b)$, alors : $\exists c \in]a; b[, f'(c) = 0$.

4.2 Théorème des accroissements finis

Soit $a < b$ et $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$, continue sur $[a; b]$ et dérivable sur $]a; b[$.

Alors : $\exists c \in]a; b[, f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$.

4.3 Inégalité des accroissements finis dans \mathbb{R}

Soit $a < b$ et $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$, continue sur $[a; b]$ et dérivable sur $]a; b[$.

① On suppose qu'il existe $(m, M) \in \mathbb{R}^2$ tels que :

$$\forall x \in]a; b[, m \leq f'(x) \leq M.$$

Alors : $m(b - a) \leq f(b) - f(a) \leq M(b - a)$.

② On suppose qu'il existe $M \in \mathbb{R}$ tels que :

$$\forall x \in]a; b[, |f'(x)| \leq M.$$

Alors : $|f(b) - f(a)| \leq M|b - a|$.

4.4 Inégalité des accroissements finis dans \mathbb{C}

Soit $a < b$ et $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{C}$, continue sur $[a; b]$ et dérivable sur $]a; b[$.

On suppose qu'il existe $M \in \mathbb{R}$ tels que : $\forall x \in]a; b[, |f'(x)| \leq M$.

Alors : $|f(b) - f(a)| \leq M|b - a|$.

4.5 Théorème de la limite de la dérivée

Soit I un intervalle de \mathbb{R} et $a \in I$.

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ continue sur I et dérivable sur $I \setminus \{a\}$.

Si $f'(x)$ admet une limite ℓ (finie ou infinie) en a , alors $\frac{f(x) - f(a)}{x - a}$ tend vers ℓ quand x tend vers a .

En particulier, si ℓ est finie, alors f est dérivable en a et $f'(a) = \ell$.

4.6 Théorème fondamental de l'analyse

Soit I un intervalle de \mathbb{R} , $a \in I$. Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue.

Alors f possède des primitives et $F : I \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \int_a^x f(t)dt$ est la primitive de f s'annulant en a .

4.7 Formule de Taylor avec reste intégral

Soit I un intervalle de \mathbb{R} et $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^{n+1} .

$$\forall (a, b) \in I^2, \quad f(b) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (b-a)^k + \int_a^b \frac{(b-t)^n}{n!} f^{(n+1)}(t) dt$$

4.8 Inégalité de Taylor-Lagrange

Soit I un intervalle de \mathbb{R} , $a \in I$.

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^{n+1} . On suppose qu'il existe une constante M telle que $\forall x \in I, |f^{(n+1)}| \leq M$. Alors

$$\forall x \in I, \left| f(x) - f(a) - f'(a)(x-a) - \dots - \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n \right| \leq \frac{M \cdot |x-a|^{n+1}}{(n+1)!}$$

4.9 Formule de Taylor-Young

Soit I un intervalle de \mathbb{R} , $a \in I$.

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^{n+1} . Alors :

$$\forall x \in I, f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n + o((x-a)^n)$$

$$\forall h \text{ tq } a+h \in I, f(a+h) = f(a) + f'(a)h + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!} h^n + o(h^n)$$

4.10 Sommes de Riemann

Soit $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$. Soit $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$.

$$\text{Soit : } \forall n \in \mathbb{N}^*, \quad s_n = \frac{b-a}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f\left(a + k \frac{b-a}{n}\right) \text{ et } S_n = \frac{b-a}{n} \sum_{k=1}^n f\left(a + k \frac{b-a}{n}\right)$$

Si f est continue sur $[a; b]$, alors :

$$s_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_a^b f(t) dt \quad \text{et} \quad S_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_a^b f(t) dt.$$

4.11 Convexité

① f est convexe sur I si

$$\forall (x, y) \in I^2, \forall \lambda \in [0; 1], f(\lambda x + (1-\lambda)y) \leq \lambda f(x) + (1-\lambda)f(y).$$

② Si f est convexe, alors \mathcal{C}_f est située au-dessus de ses tangentes et en dessous de ses cordes.

③ Si f est deux fois dérivable, alors f est convexe si, et seulement si, $f'' \geq 0$.

5 Équations différentielles

I désigne un intervalle de \mathbb{R} .

1. Équation différentielle linéaire scalaire d'ordre 1

Soit $a, b : I \rightarrow \mathbb{K}$ continues.

$$(\mathcal{E}) \quad y' + a(t)y = b(t),$$

$$(\mathcal{E}_0) \quad y' + a(t)y = 0.$$

Résolution de l'équation homogène

L'ensemble des solutions de (\mathcal{E}_0) est

$$E_0 = \{t \mapsto ke^{-A(t)}, k \in \mathbb{K}\} = \text{Vect}(t \mapsto e^{-A(t)})$$

où A désigne une primitive de a sur I.

☞ Si on ne sait pas expliciter A (i.e primitiver a), on peut écrire en vertu du théorème fondamental de l'analyse

$$E_0 = \left\{ t \mapsto k \exp\left(-\int_{t_0}^t a(u) du\right), k \in \mathbb{K} \right\}$$

2. Solutions de l'équation avec second membre - Principe de superposition

Soit $z : I \rightarrow \mathbb{K}$ une solution particulière de l'équation (\mathcal{E}) . Alors l'ensemble des solutions de (\mathcal{E}) est

$$E = \{y + z, y \text{ solution de } (\mathcal{E}_0)\}.$$

3. Recherche d'une solution particulière par « variation de la constante »

On cherche une solution $z : I \rightarrow \mathbb{K}$ de la forme

$$z(t) = k(t)e^{-A(t)}.$$

☞ Si on ne se trompe, les « $k(t)$ » se simplifient et on doit obtenir

$$k'(t) = b(t) \exp\left(\int_{t_0}^t a(u) du\right)$$

Il reste à primitiver pour obtenir une solution.

4. Théorème de Cauchy linéaire

Soit $a, b : I \rightarrow \mathbb{K}$ continues, $t_0 \in I, y_0 \in \mathbb{K}$. Le problème de Cauchy

$$(\mathcal{P}) \quad \begin{cases} y' + a(t)y = b(t) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

admet une unique solution sur I.

5. Équation différentielle linéaire scalaire d'ordre 2 à coefficients constants

Soit $a, b \in \mathbb{K}$ et $c : I \rightarrow \mathbb{K}$ continue.

$$(\mathcal{E}) \quad y'' + ay' + by = c(t),$$

$$(\mathcal{E}_0) \quad y'' + ay' + by = 0.$$

L'équation caractéristique associée à (\mathcal{E}_0) est

$$(\mathcal{EC}) \quad z^2 + az + b = 0.$$

Soit $\Delta = a^2 - 4b$ son discriminant.

Résolution dans \mathbb{C}

• Si $\Delta \neq 0$, soit $\lambda_1 \neq \lambda_2$ les solutions de (\mathcal{EC}) .

$$E_0 = \{t \mapsto c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t}, (c_1, c_2) \in \mathbb{C}^2\} \\ = \text{Vect}(t \mapsto e^{\lambda_1 t}, t \mapsto e^{\lambda_2 t}).$$

• Si $\Delta = 0$, soit λ la solution de (\mathcal{EC}) .

$$E_0 = \{t \mapsto (c_1 + c_2 t)e^{\lambda t}, (c_1, c_2) \in \mathbb{C}^2\}$$

$$= \text{Vect}(t \mapsto e^{\lambda t}, t \mapsto te^{\lambda t}).$$

Résolution dans \mathbb{R}

- Si $\Delta > 0$, soit $\lambda_1 \neq \lambda_2$ les solutions de (\mathcal{E}) .

$$E_0 = \{t \mapsto c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t}, (c_1, c_2) \in \mathbb{R}^2\}$$

$$= \text{Vect}(t \mapsto e^{\lambda_1 t}, t \mapsto e^{\lambda_2 t}).$$

- Si $\Delta = 0$, soit λ la solution de (\mathcal{E}) .

$$E_0 = \{t \mapsto (c_1 + c_2 t)e^{\lambda t}, (c_1, c_2) \in \mathbb{R}^2\}$$

$$= \text{Vect}(t \mapsto e^{\lambda t}, t \mapsto te^{\lambda t}).$$

- Si $\Delta < 0$, soit $\lambda = a \pm ib$ une solution de (\mathcal{E}) .

$$E_0 = \{t \mapsto (c_1 \cos(bt) + c_2 \sin(bt))e^{at}, (c_1, c_2) \in \mathbb{R}^2\}$$

$$= \text{Vect}(t \mapsto \cos(bt)e^{at}, t \mapsto \sin(bt)e^{at}).$$

6. Solutions de l'équation avec second membre - Principe de superposition

Soit $z : I \rightarrow \mathbb{K}$ une solution particulière de l'équation (\mathcal{E}) . Alors l'ensemble des solutions de (\mathcal{E}) est

$$E = \{y + z, y \text{ solution de } (\mathcal{E})\}.$$

7. Seconds membres particuliers

☞ **Second membre** $c : t \mapsto Ae^{\lambda t}$ avec $A \in \mathbb{K}$.

- Si λ non racine de (\mathcal{E}) , on cherche une solution du type $t \mapsto Be^{\lambda t}$.
- Si λ racine simple de (\mathcal{E}) , on cherche une solution du type $t \mapsto Bte^{\lambda t}$.
- Si λ racine double de (\mathcal{E}) , on cherche une solution du type $t \mapsto t^2 e^{\lambda t}$.

☞ **Second membre** $c : t \mapsto A \cos(\omega t)$ ou $c : t \mapsto A \sin(\omega t)$

On suppose ni $i\omega$ ni $-i\omega$ solutions de (\mathcal{E}) .

Alors il existe (λ, μ) tel que $t \mapsto \lambda \cos(\omega t) + \mu \sin(\omega t)$ soit solution de (\mathcal{E}) .

8. Théorème de Cauchy linéaire

Soit $a, b, c : I \rightarrow \mathbb{K}$ continues, $t_0 \in I$, $(y_0, y'_0) \in \mathbb{K}^2$. Le problème de Cauchy

$$(P) \quad \begin{cases} y'' + a(t)y' + b(t)y = c(t) \\ y(t_0) = y_0 \\ y'(t_0) = y'_0 \end{cases}$$

admet une unique solution sur I .

6 Séries numériques

- 6.1 • *Série Géométrique* - $\sum_{n \geq 0} q^n$ converge si, et seulement si, $|q| < 1$.

Dans ce cas, $\sum_{n=0}^{+\infty} q^n = \frac{1}{1-q}$.

- *Série de Riemann* - $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^\alpha}$ converge si, et seulement si, $\alpha > 1$.

- *Série exponentielle* - $\sum_{n \geq 0} \frac{x^n}{n!}$ converge pour tout x de \mathbb{R} . Sa somme est $\exp(x)$.

6.2 Divergence grossière

Si $\sum_{n \geq n_0} u_n$ converge alors $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$.

Si u_n ne tend pas vers 0 lorsque n tend vers $+\infty$, la série $\sum_{n \geq n_0} u_n$ diverge grossièrement.

6.3 Série des différences

La série $\sum_{n \geq n_0} (u_{n+1} - u_n)$ converge si, et seulement si, la suite $(u_n)_{n \geq n_0}$ converge.

6.4 Critère de D'Alembert

Soit $(u_n)_{n \geq n_0}$ une suite ne s'annulant pas.

- Si $\left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right| \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$ avec $\ell \in [0; 1[$, alors la série $\sum_{n \geq n_0} u_n$ converge absolument.
- Si $\left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right| \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$ avec $\ell \in]1; +\infty]$, alors la série $\sum_{n \geq n_0} u_n$ diverge grossièrement.

6.5 Absolue convergence

Si la série $\sum_{n \geq n_0} |u_n|$ converge, alors la série $\sum_{n \geq n_0} u_n$ converge.

Dans ce cas, on dit que la série $\sum_{n \geq n_0} u_n$ est **absolument convergente**.

Remarque : lorsqu'elles convergent, les séries de référence du premier point sont absolument convergente.

6.6 Critères de convergence

- *Comparaison* - Si $\forall n \geq n_0, |u_n| \leq v_n$ et $\sum_{n \geq n_0} v_n$ converge alors $\sum_{n \geq n_0} u_n$ converge (absolument).

- *Domination, négligeabilité* - Si $u_n = \mathcal{O}(v_n)$ (en particulier si $u_n = o(v_n)$) et $\sum_{n \geq n_0} v_n$

est **absolument** convergente alors $\sum_{n \geq n_0} u_n$ converge (absolument).

- *Équivalence* - Si $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} v_n$ avec v_n de signe constant au voisinage de $+\infty$ alors $\sum_{n \geq n_0} u_n$ et $\sum_{n \geq n_0} v_n$ sont de même nature.

6.7 Théorème spécial des séries alternées (Leibniz)

Soit $(u_n)_{n \geq n_0}$ une suite réelle décroissante de limite nulle. Alors :

- $\sum_{n \geq n_0} (-1)^n u_n$ converge, ainsi que $\sum_{n \geq n_0} (-1)^{n+1} u_n$,
- $R_N = \sum_{n=N+1}^{+\infty} (-1)^n u_n$ est du signe de $(-1)^{N+1} u_{N+1}$ (i.e. de son premier terme),
- on a la majoration : $|R_N| \leq u_{N+1}$.

6.8 Formule de Stirling

$$n! \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt{2\pi n} n^n e^{-n}$$

6.9 Constante γ d'Euler - Hors programme mais utile

$\exists \gamma \in \mathbb{R}$ telle que $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln(n) + \gamma + o(1)$. En conséquence, $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln(n)$.

6.10 Produit de Cauchy

① Soit $\sum_{n \geq 0} u_n$ et $\sum_{n \geq 0} v_n$ deux séries numériques. Le produit de Cauchy de ces séries est

la série $\sum_{n \geq 0} w_n$ où : $\forall n \geq 0, w_n = \sum_{k=0}^n u_k v_{n-k} = \sum_{p+q=n} u_p v_q$.

② Si les séries $\sum_{n \geq 0} u_n$ et $\sum_{n \geq 0} v_n$ convergent absolument, alors leur produit de Cauchy

$$\sum_{n \geq 0} w_n \text{ converge absolument et } \sum_{n=0}^{+\infty} w_n = \left(\sum_{n=0}^{+\infty} u_n \right) \left(\sum_{n=0}^{+\infty} v_n \right).$$

7 Intégrales généralisées

7.1 Intégrales de Riemann

- Pour $a > 0$, $\int_a^{+\infty} \frac{dt}{t^\alpha}$ converge si, et seulement si, $\alpha > 1$.
- $\int_0^1 \frac{dt}{t^\alpha}$ convergent si, et seulement si, $\alpha < 1$.

7.2 Intégrales de référence en exp et ln

- $\int_0^{+\infty} e^{-\alpha t} dt$ existe si, et seulement si, $\alpha \in]0; +\infty[$, et vaut $\frac{1}{\alpha}$ dans ce cas.
- $\int_0^1 \ln t dt$ existe et vaut -1 .

7.3 Translation de la variable

- $f :]a; b[\rightarrow \mathbb{R}$ est intégrable en a^+ si, et seulement si, $t \mapsto f(a+t)$ est intégrable en 0^+ .
- De même sur $[a; b[$: f intégrable en b^- ssi $t \mapsto f(b-t)$ intégrable en 0^+ .

7.4 Intégrales faussement impropres

Pour $f : [a; b[(b \neq +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ continue telle que $\lim_{t \rightarrow b} f(t)$ existe et est finie, $\int_a^b f(t) dt$ existe. f est prolongeable par continuité en b et on dit que $\int_a^b f(t) dt$ est *faussement impropre*.

Idem pour $f :]a; b] (a \neq -\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ continue de limite finie en a .

Une intégrale n'est jamais faussement impropre en $-\infty$ ou $+\infty$

7.5 Absolue convergence, inégalité triangulaire et intégrabilité

Si $\int_a^b |f(t)| dt$ existe, alors $\int_a^b f(t) dt$ existe, et on a l'*inégalité triangulaire* :

$$\left| \int_a^b f(t) dt \right| \leq \int_a^b |f(t)| dt.$$

On dit dans ce cas que $\int_a^b f(t) dt$ est *absolument convergente* ou que f est *intégrable* sur $]a; b[$. Dans les exemples de référence des points 1 et 2, lorsque que les intégrales convergent, elles convergent absolument et les intégrandes sont intégrables.

7.6 Critères de convergence

On considère $f, g : [a; b[\rightarrow \mathbb{R}$ continues par morceaux, éventuellement $b = +\infty$.

Les critères ci-dessous sont valables aussi pour $f, g :]a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ en permutant les rôles de a et de b , avec éventuellement $a = -\infty$.

• *Comparaison - Version signée*

On suppose $\boxed{0 \leq} f \leq g$. Alors

- (i) si $\int_a^b g(t) dt$ converge alors $\int_a^b f(t) dt$ converge.
- (ii) si $\int_a^b f(t) dt$ diverge alors $\int_a^b g(t) dt$ diverge.

• *Comparaison - Version intégrabilité*

Si $|f| \leq g$ et g est intégrable sur $[a; b[$ alors f est intégrable sur $[a; b[$.

• *Domination, négligeabilité -*

Si $f = \mathcal{O}(g)$ en b (en particulier si $f = o(g)$) et g est intégrable sur $[a; b[$ alors f est intégrable sur $[a; b[$.

• *Équivalence - Version signée*

Mise en garde : « f et g sont de signe constant » n'est pas équivalent à « f et g sont de même signe ».

Si $f \sim g$ en b et **si f et g sont de signe constant** alors les intégrales $\int_a^b f(t) dt$ et

$\int_a^b g(t) dt$ sont de même nature.

•Équivalence - Version intégrabilité

Si $f \sim g$ en b alors f est intégrable sur $]a; b[$ si, et seulement si, g l'est.

7.7 Changement de variable

Soit $\varphi :]a; b[\rightarrow \mathbb{R}$ (où éventuellement $a = -\infty$ et/ou $b = +\infty$) une bijection \mathcal{C}^1 et strictement monotone. Soit $f : \varphi(]a; b[) \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux.

Alors $\int_{\varphi(a^+)}^{\varphi(b^-)} f(u)du$ et $\int_a^b f(\varphi(t))\varphi'(t)dt$ sont de même nature, et égales en cas d'existence.

En général, on baptise $u :]a; b[\rightarrow \mathbb{R}, t \mapsto \varphi(t)$ et on écrit $\frac{du}{dt} = \varphi'(t)$. Autrement dit, on assimile la nouvelle variable à la fonction φ .

7.8 Intégration par parties

Soit $u, v :]a; b[\rightarrow \mathbb{R}$ (où éventuellement $a = -\infty$ et/ou $b = +\infty$) de classe \mathcal{C}^1 .

Si $\lim_{t \rightarrow a^+} u(t)v(t)$ et $\lim_{t \rightarrow b^-} u(t)v(t)$ existent et sont finies, alors $\int_a^b u'v$ et $\int_a^b uv'$ sont de même nature.

En cas d'existence, on a : $\int_a^b u'v = [uv]_{a^+}^{b^-} - \int_a^b uv'$.

7.9 Fonction continue positive d'intégrale nulle

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ continue et intégrable sur l'intervalle I . Si $\int_I |f| = 0$ alors $f = 0$ sur I .

8 Suites de fonctions

I désigne un intervalle quelconque de \mathbb{R}, \mathbb{K} désigne \mathbb{R} ou \mathbb{C} .

8.1 Convergence simple.

La suite de fonctions $(f_n)_{n \geq n_0}$ où, pour tout $n \geq n_0, f_n : I \rightarrow \mathbb{K}$, converge simplement vers $f : I \rightarrow \mathbb{K}$ si : $\forall x \in I, f_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} f(x)$

(ce qui sous-entend l'existence de ces limites).

On écrit alors $f_n \xrightarrow{CVS} f$.

8.2 Norme uniforme ou infinie.

Sur l'espace vectoriel $\mathcal{B}(I, \mathbb{K})$ des fonctions bornées sur l'intervalle I , la fonction

$$\|\cdot\|_\infty : \mathcal{B}(I, \mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{R}, f \mapsto \sup_{x \in I} |f(x)|$$

est une norme, appelée norme infinie ou norme de la convergence uniforme.

8.3 Propriété de $\|\cdot\|_\infty$

① $\forall f \in \mathcal{B}(I, \mathbb{K}), \|f\|_\infty \geq 0$.

② $\forall f \in \mathcal{B}(I, \mathbb{K}), (\|f\|_\infty = 0) \iff f = 0$ (fonction nulle sur I).

③ $\forall \lambda \in \mathbb{K}, \forall f \in \mathcal{B}(I, \mathbb{K}), \|\lambda f\|_\infty = |\lambda| \cdot \|f\|_\infty$.

④ $\forall (f, g) \in \mathcal{B}(I, \mathbb{K})^2, \|f + g\|_\infty \leq \|f\|_\infty + \|g\|_\infty$.

8.4 Convergence uniforme.

La suite de fonctions $(f_n)_{n \geq n_0}$ converge uniformément vers la fonction f sur I si :

① pour tout $n \geq n_0, f_n - f : I \rightarrow \mathbb{K}$ est bornée,

② $\|f_n - f\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$.

On écrit alors $f_n \xrightarrow{CVU} f$.

8.5 Stabilité de la continuité par convergence uniforme.

Si, pour tout $n \geq n_0, f_n$ est continue et si $f_n \xrightarrow{CVU} f$ alors f est continue.

8.6 Interversion limite-intégrale sur un segment

Soit $(f_n)_{n \geq n_0}$ suite de **fonctions continues** sur un **segment** $]a; b[$ de \mathbb{R} à valeurs dans \mathbb{K} . Si la suite de fonctions $(f_n)_{n \geq n_0}$ **converge uniformément** vers une fonction f , alors

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^b f_n(t)dt = \int_a^b f(t)dt.$$

MISE EN GARDE

Le théorème précédent ne s'applique pas si

★ l'intervalle n'est pas un segment, en particulier pour des intégrales généralisées ;

★ les fonctions ne sont pas continues : « continues par morceaux » est une hypothèse insuffisante.

8.7 Théorème de dérivabilité, classe \mathcal{C}^1

Soit $(f_n)_{n \geq n_0}$ suite de fonctions définies sur I à valeurs dans \mathbb{K} . On suppose :

① pour tout $n \geq n_0, f_n$ est de classe \mathcal{C}^1 sur I ,

② la suite $(f_n)_{n \geq n_0}$ **converge simplement** sur I vers une fonction $f : I \rightarrow \mathbb{K}$,

③ la suite $(f'_n)_{n \geq n_0}$ **converge uniformément** sur I vers une fonction $g : I \rightarrow \mathbb{K}$.

Alors f est de classe \mathcal{C}^1 sur I , avec $f' = g$, autrement dit :

$$\left(\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n \right)' = \lim_{n \rightarrow +\infty} (f'_n).$$

8.8 Théorème de dérivabilité, classe \mathcal{C}^k

Soit $(f_n)_{n \geq n_0}$ suite de fonctions définies sur I à valeurs dans \mathbb{K} . On suppose :

① pour tout $n \geq n_0, f_n$ est de classe \mathcal{C}^k sur I ,

② pour tout $i \in \llbracket 0; k-1 \rrbracket$, la suite $(f_n^{(i)})_{n \geq n_0}$ **converge simplement** sur I vers une fonction $g_i : I \rightarrow \mathbb{K}$,

③ la suite $(f_n^{(k)})_{n \geq n_0}$ **converge uniformément** sur I vers une fonction $g_k : I \rightarrow \mathbb{K}$.

Alors la limite g_0 simple de la suite (f_n) est de classe \mathcal{C}^k sur I , avec pour tout $i \in \llbracket 1; k \rrbracket, f^{(i)} = g_i$, autrement dit :

$$\forall i \in \llbracket 1; k \rrbracket, \left(\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n \right)^{(i)} = \lim_{n \rightarrow +\infty} (f_n^{(i)}).$$

8.9 Théorème de convergence dominée

Soit $(f_n)_{n \geq n_0}$ une suite de fonctions définies sur un intervalle I. Si :

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est continue par morceaux,
- ② la suite $(f_n)_{n \geq n_0}$ converge simplement sur I vers une fonction f ,
- ③ la fonction f est continue par morceaux,
- ④ **hypothèse de domination uniforme** – il existe une fonction $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable sur I** telle que :

$$\forall n \geq n_0, \forall x \in I, |f_n(x)| \leq \varphi(x).$$

Alors :

- les fonctions f_n ($\forall n \geq n_0$) et f sont intégrables sur I,
- $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\int_I f_n \right)$ existe et vaut $\int_I f$.

MISE EN GARDE

Pour que le théorème s'applique, il faut que la fonction dominante φ **soit indépendante de n**, de là l'adjectif « uniforme » : la même fonction φ domine toutes les fonctions f_n .

REMARQUE

Il n'est pas nécessaire de vérifier au préalable l'intégrabilité des fonctions f_n et de f : c'est une conclusion du théorème.

9 Séries de fonctions

9.1 Convergence simple (CVS)

$\sum_{n \geq n_0} f_n$ converge simplement sur I si pour tout $x \in I$, la série numérique $\sum_{n \geq n_0} f_n(x)$ converge.

Dans ce cas, le **fonction** $S : I \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(x)$ s'appelle la **somme** de $\sum_{n \geq n_0} f_n$.

9.2 Convergence uniforme (CVU)

$\sum_{n \geq n_0} f_n$ converge uniformément si la suite (S_N) des sommes partielles converge uniformément, i.e. si la suite (R_N) de ses restes converge uniformément vers la fonction nulle :

$$\|R_N\|_\infty \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0.$$

En effet,

$$S_N \xrightarrow{CVU} S \iff \|S_N - S\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \iff \|R_N\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

9.3 Convergence normale (CVN)

$\sum_{n \geq n_0} f_n$ converge normalement si :

- pour tout $n \geq n_0$, f_n est bornée,
- la série numérique $\sum_{n \geq n_0} \|f_n\|_\infty$ converge.

9.4 Relations entre modes de convergence

- La convergence normale entraîne la convergence uniforme.
- La convergence uniforme entraîne la convergence simple.
- La convergence uniforme de la série de fonctions $\sum_{n \geq n_0} f_n$ entraîne la convergence uniforme de la suite de fonctions $(f_n)_{n \geq n_0}$ vers la fonction nulle ($\|f_n\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$).

9.5 Continuité de la somme

Soit I un intervalle.

Si

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est continue sur I,
- ② $\sum_{n \geq n_0} f_n \xrightarrow{CVU} S$

alors S est continue sur I.

9.6 Classe \mathcal{C}^1 et dérivation terme à terme

Soit I un intervalle.

Si

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est de classe \mathcal{C}^1 sur I,
- ② $\sum_{n \geq n_0} f_n \xrightarrow{CVS} S$,
- ③ $\sum_{n \geq n_0} f'_n \xrightarrow{CVU} T$

alors S est de classe \mathcal{C}^1 et $S' = T$, i.e.

$$\left(\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n \right)'(x) = \sum_{n=n_0}^{+\infty} f'_n(x).$$

9.7 Classe \mathcal{C}^k

Soit I un intervalle.

Si

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est de classe \mathcal{C}^k sur I,
- ② pour tout $i \in \llbracket 0; k-1 \rrbracket$, $\sum_{n \geq n_0} f_n^{(i)} \xrightarrow{CVS} S_i$,

$$\textcircled{3} \sum_{n \geq n_0} f_n^{(k)} \xrightarrow{\text{CVU}} S_k,$$

alors S_0 est de classe \mathcal{C}^k et pour tout $i \in \llbracket 1; k \rrbracket$,

$$\left(\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n \right)^{(i)}(x) = \sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n^{(i)}(x).$$

9.8 Du local au global

Soit I un intervalle quelconque de \mathbb{R} et $k \in \mathbb{N}$.

- Si $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ est de classe \mathcal{C}^k sur tout segment $[a; b] \subset I$, alors f est de classe \mathcal{C}^k sur I .
- Si $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ est de classe \mathcal{C}^k sur une famille d'intervalles $(I_a)_{a \in A}$ inclus dans I telle que $\bigcup_{a \in A} I_a = I$, alors f est de classe \mathcal{C}^k sur I .

Avertissement ! Pour autant, la convergence normale ou uniforme sur tout $[a; b] \subset I$ n'entraîne pas la CVN ou CVU sur I tout entier.

Par exemple pour les $f_n : I =]-1; 1[\rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^n$,

- $\|f_n\|_{\infty, I} = \sup_{-1 < x < 1} |x^n| = 1$ donc pas de CVN sur I
- pour tout $[-a; a] \subset I, \|f_n\|_{\infty, [-a; a]} = \sup_{-a \leq x \leq a} |x^n| = a^n$ donc CVN sur $[-a; a]$

9.9 Théorème de la double limite

Soit une série $\sum_{n \geq n_0} f_n$ de fonctions définies sur un intervalle I .

Si

- ① $\sum_{n \geq n_0} f_n$ converge uniformément sur I ,
- ② pour tout $n \geq n_0, f_n$ admet une limite ℓ_n en a borne de I (éventuellement infinie),

alors

- la série $\sum \ell_n$ converge,
- la somme de la série admet une limite en a et :

$$\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \sum_{n=n_0}^{+\infty} \ell_n, \quad \text{i.e.} \quad \sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \sum_{n=n_0}^{+\infty} \lim_{x \rightarrow a} f_n(x)$$

9.10 Intégration terme à terme sur un segment en cas de CV uniforme

Si

- ① pour tout $n \geq n_0, f_n$ est continue sur le segment $[a; b]$,
- ② $\sum_{n \geq n_0} f_n$ converge uniformément sur le segment $[a; b]$,

alors
$$\int_a^b \left(\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(t) \right) dt = \sum_{n=n_0}^{+\infty} \left(\int_a^b f_n(t) dt \right).$$

9.11 Théorème d'intégration terme à terme sur un intervalle

Soit I un intervalle *quelconque*. On suppose :

Si

- ① pour tout $n \geq n_0, f_n$ est c.p.m. et intégrable sur I ,
- ② $\sum_{n \geq n_0} f_n \xrightarrow{\text{CVS}} S$ sur I ,
- ③ S est c.p.m. sur I ,
- ④ la série numérique $\sum_n \left(\int_I |f_n(t)| dt \right)$ converge,

alors S est intégrable sur I et

$$\int_I \left(\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(t) \right) dt = \sum_{n=n_0}^{+\infty} \left(\int_I f_n(t) dt \right).$$

10 Séries entières

10.1 Lemme d'Abel

Soit (a_n) suite de nombres complexes. S'il existe $z_0 \in \mathbb{C}^*$ tel que la suite $(a_n z_0^n)$ soit bornée, alors pour tout z tel que $|z| < |z_0|$, la série $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$ converge absolument.

10.2 Rayon de convergence

Le rayon de convergence R de la série entière $\sum a_n z^n$ est :

$$R = \sup \{ \rho \in \mathbb{R}^+ / (a_n \rho^n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ est bornée} \} \in \mathbb{R}^+ \cup \{+\infty\} = [0; +\infty].$$

10.3 Disque ouvert et intervalle ouvert de convergence

Version complexe -

Soit $\sum a_n z^n$ une série entière de rayon de convergence R . Alors :

- si $|z| < R$, alors $\sum a_n z^n$ converge absolument,
- si $|z| > R$, alors $\sum a_n z^n$ diverge grossièrement.

Version réelle -

Soit $\sum a_n x^n$ une série entière de rayon de convergence R . Alors :

- si $x \in]-R; R[$, alors $\sum a_n x^n$ converge absolument,
- si $x < -R$ ou $x > R$, alors $\sum a_n x^n$ diverge grossièrement.

10.4 Comparaison asymptotique et rayon de convergence

$\sum_{n \geq 0} a_n z^n$ et $\sum_{n \geq 0} b_n z^n$ sont deux séries de rayon de convergence respectif R_a et R_b .

- Si $a_n = O(b_n)$, alors $R_a \geq R_b$.
- Si $|a_n| \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} |b_n|$, alors $R_a = R_b$.

10.5 Deux propriétés bien pratiques

- Pour tout $\alpha \in \mathbb{R}$, $\mathcal{RC} \left(\sum n^\alpha z^n \right) = 1$;
- $\sum_{n \geq 0} n a_n z^n$ a le même rayon de convergence que $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$.

10.6 Critère de Jean le Rond D'Alembert pour les séries entières

On suppose qu'il existe n_0 tel que : $\forall n \geq n_0, a_n \neq 0$.

Si $\left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell \in [0; +\infty]$, alors $\mathcal{RC} \left(\sum a_n z^n \right) = \frac{1}{\ell} \in [0; +\infty]$.

10.7 Opérations sur les séries entières

- Pour tout $\lambda \neq 0$, $\sum \lambda a_n z^n$ et $\sum a_n z^n$ ont le même rayon de convergence.

- En notant $R_a = \mathcal{RC} \left(\sum_n a_n z^n \right)$ et $R_b = \mathcal{RC} \left(\sum_n b_n z^n \right)$,

① si $R_a \neq R_b$ alors $\mathcal{RC} \left(\sum_{n=0}^{+\infty} (a_n + b_n) z^n \right) = \min(R_a, R_b)$,

② si $R_a = R_b$ alors $\mathcal{RC} \left(\sum_{n=0}^{+\infty} (a_n + b_n) z^n \right) \geq \min(R_a, R_b)$.

•Produit de Cauchy –

Soit $\forall n \geq 0, c_n \stackrel{\text{déf.}}{=} \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}$.

Alors pour tout z tel que $|z| < \min(R_a, R_b)$,

$$\sum_{n=0}^{+\infty} c_n z^n = \left(\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n \right) \left(\sum_{n=0}^{+\infty} b_n z^n \right).$$

10.8 Régularité de la somme d'une série entière

- $\sum_{n \geq 0} a_n x^n$ converge normalement sur tout segment $[a; b] \subset]-R; R[$ de son intervalle ouvert de convergence.
- La somme d'une série entière de rayon de convergence $R > 0$ est continue sur $] -R; R[$, resp. $\overset{\circ}{D}(0, R)$ lorsqu'on travaille dans \mathbb{C} .
- La somme d'une série entière de rayon $R > 0$ est \mathcal{C}^∞ et on peut dériver terme à terme :

$$\forall x \in]-R; R[, \left(\sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n \right)' = \sum_{n=1}^{+\infty} n a_n x^{n-1} = \sum_{n=0}^{+\infty} (n+1) a_{n+1} x^n.$$

$$\forall x \in]-R; R[, \left(\sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n \right)^{(k)} = \sum_{n=k}^{+\infty} \frac{n!}{(n-k)!} a_n x^{n-k} = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(n+k)!}{n!} a_{n+k} x^n.$$

10.9 Intégration et primitive

Soit f somme de la série entière $\sum_n a_n x^n$ de rayon de convergence $R > 0$.

- Pour tout $[a; b] \subset]-R; R[$, $\int_a^b \sum_{n=0}^{+\infty} a_n t^n dt = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n \left(\int_a^b t^n dt \right)$.

- En particulier, la primitive F de f s'annulant en 0 est définie par :

$$\forall x \in]-R; R[, F(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{a_n}{n+1} x^{n+1} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n-1}}{n} x^n.$$

10.10 Lien avec le développement de Taylor

Si $f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n$ a un rayon de convergence non nul, alors : $\forall n \in \mathbb{N}, a_n = \frac{f^{(n)}(0)}{n!}$.

10.11 Unicité du développement en série entière

- Si $f : x \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n$ et $g : x \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} b_n x^n$ coïncident sur $] -r; r[$ avec $r > 0$ (c'est-à-dire $\forall x \in] -r; r[, f(x) = g(x)$) alors : $\forall n \in \mathbb{N}, a_n = b_n$.

•Corollaire pour les fonctions paires, impaires

f paire sur $] -R; R[\Rightarrow \forall n \in \mathbb{N}, a_{2n+1} = 0$,

f impaire sur $] -R; R[\Rightarrow \forall n \in \mathbb{N}, a_{2n} = 0$.

10.12 Développements en série entière de référence

☞ Variable réelle

- $\forall x \in \mathbb{R}, \exp(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} x^n$

- $\forall x \in \mathbb{R}, \operatorname{ch}(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(2n)!} x^{2n}$ et $\operatorname{sh}(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(2n+1)!} x^{2n+1}$

- $\forall x \in \mathbb{R}, \cos(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{2n}$ et $\sin(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1}$

- $\forall x \in]-1; 1[, \frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{+\infty} x^n$ et $\frac{1}{1+x} = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n x^n$

- $\forall x \in]-1; 1[, \ln(1-x) = -\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n} x^n$ et $\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} x^n$.

- $\forall x \in]-1; 1[, \operatorname{Arctan}(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{2n+1}$.

- $\forall \alpha \in \mathbb{R}, \forall x \in]-1; 1[, (1+x)^\alpha = 1 + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-n+1)}{n!} x^n$.

☞ Variable complexe

• $\forall z \in \mathcal{D}(0, 1) = \{z \in \mathbb{C} / |z| < 1\}, \quad \frac{1}{1-z} = \sum_{n=0}^{+\infty} z^n.$

• $\forall z \in \mathbb{C}, \quad \exp(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z^n}{n!}.$

10.13 Propriétés de l'exponentielle complexe

- $\forall (z_1, z_2) \in \mathbb{C}^2, \quad \exp(z_1 + z_2) = \exp(z_1) \exp(z_2).$
- $\forall z = x + iy$ avec $(x, y) \in \mathbb{R}^2,$
 $\exp(z) = e^z = e^{x+iy} = e^x (\cos y + i \sin y)$

11 Intégrales à paramètre

11.1 Théorème de convergence dominée à paramètre continu

Soit I et J deux intervalles de $\mathbb{R}, g : I \times J \rightarrow \mathbb{K}.$ Soit a une borne de I (éventuellement $a = \pm\infty$). Soit $g : I \times J,$ On suppose que :

- ① pour tout x de I, $t \mapsto g(x, t)$ est c.p.m. sur J,
- ② pour tout t de J, $g(x, t) \xrightarrow{x \rightarrow a} \ell(t),$
- ③ $t \mapsto \ell(t)$ est c.p.m. sur J,
- ④ **hypothèse de domination** : il existe une fonction $\varphi : J \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable** telle que :

$$\forall (x, t) \in I \times J, \quad |g(x, t)| \leq \varphi(t).$$

Alors la fonction ℓ intégrable sur J, et : $\lim_{x \rightarrow a} \left(\int_J g(x, t) dt \right)$ existe et vaut $\int_J \ell(t) dt.$

11.2 Théorème de continuité

Soit I et J deux intervalles de $\mathbb{R}, g : I \times J \rightarrow \mathbb{K}.$ On suppose :

- ① pour tout $t \in J, x \mapsto g(x, t)$ est continue sur I (la propriété à transmettre),
- ② pour tout $x \in I, t \mapsto g(x, t)$ est continue par morceaux sur J,
- ③ **hypothèse de domination** : il existe une fonction $\varphi : J \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable** sur J telle que

$$\forall (x, t) \in I \times J, \quad |g(x, t)| \leq \varphi(t).$$

Alors $f : x \mapsto \int_J g(x, t) dt$ est définie et continue sur I.

11.3 Théorème de dérivation sous l'intégrale \mathcal{C}^1

Soit I et J deux intervalles de $\mathbb{R}, g : I \times J \rightarrow \mathbb{K}.$ On suppose :

- ① pour tout $t \in J, x \mapsto g(x, t)$ est de classe \mathcal{C}^1 sur I (la propriété à transmettre),
- ② pour tout $x \in I, t \mapsto g(x, t)$ est continue par morceaux et intégrable sur J,
- ③ pour tout $x \in I, t \mapsto \frac{\partial g}{\partial x}(x, t)$ est continue par morceaux sur J,
- ④ **hypothèse de domination** : il existe une fonction $\varphi : J \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable** sur J telle que

$$\forall (x, t) \in I \times J, \quad \left| \frac{\partial g}{\partial x}(x, t) \right| \leq \varphi(t).$$

Alors $f : x \mapsto \int_J g(x, t) dt$ est définie et de classe \mathcal{C}^1 sur I, et

$$\forall x \in I, \quad f'(x) = \int_J \frac{\partial g}{\partial x}(x, t) dt.$$

11.4 Théorème de dérivation sous l'intégrale classe \mathcal{C}^n

Soit I et J deux intervalles de $\mathbb{R}, g : I \times J \rightarrow \mathbb{K}.$ On suppose :

- ① pour tout $t \in J, x \mapsto g(x, t)$ est de classe \mathcal{C}^n sur I (la propriété à transmettre),
- ② pour tout $k \in \llbracket 0; n-1 \rrbracket$ et pour tout $x \in I, t \mapsto \frac{\partial^k}{\partial x^k} g(x, t)$ est continue par morceaux et intégrable sur J,
- ③ pour tout $x \in I, t \mapsto \frac{\partial^n}{\partial x^n} g(x, t)$ est continue par morceaux sur J,
- ④ **hypothèse de domination** : il existe une fonction $\varphi : J \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable** sur J telle que

$$\forall (x, t) \in I \times J, \quad \left| \frac{\partial^n}{\partial x^n} g(x, t) \right| \leq \varphi(t).$$

Alors $f : x \mapsto \int_J g(x, t) dt$ est définie et de classe \mathcal{C}^n sur I, et

$$\forall k \in \llbracket 0; n \rrbracket, \forall x \in I, \quad f^{(k)}(x) = \int_J \frac{\partial^k}{\partial x^k} g(x, t) dt.$$

12 Le point sur les théorèmes de régularité et de permutations

I désigne un intervalle quelconque de \mathbb{R}, \mathbb{K} désigne \mathbb{R} ou $\mathbb{C}.$

12.1 Stabilité de la continuité par convergence uniforme.

Si, pour tout $n \geq n_0, f_n$ est continue et si $f_n \xrightarrow{cvu} f$ alors f est continue.

12.2 Interversion limite-intégrale sur un segment

Soit $(f_n)_{n \geq n_0}$ suite de fonctions continues sur un segment $[a; b]$ de \mathbb{R} à valeurs dans $\mathbb{K}.$ Si la suite de fonctions $(f_n)_{n \geq n_0}$ converge uniformément vers une fonction f, alors

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^b f_n(t) dt = \int_a^b f(t) dt.$$

MISE EN GARDE

Le théorème précédent ne s'applique pas si

- ★ l'intervalle n'est pas un segment, en particulier pour des intégrales généralisées ;
- ★ les fonctions ne sont pas continues : « continues par morceaux » est une hypothèse insuffisante.

12.3 Théorème de dérivabilité, classe \mathcal{C}^1

Soit $(f_n)_{n \geq n_0}$ suite de fonctions définies sur I à valeurs dans \mathbb{K} . On suppose :

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est de classe \mathcal{C}^1 sur I,
- ② la suite $(f_n)_{n \geq n_0}$ **converge simplement** sur I vers une fonction $f : I \rightarrow \mathbb{K}$,
- ③ la suite $(f'_n)_{n \geq n_0}$ **converge uniformément** sur I vers une fonction $g : I \rightarrow \mathbb{K}$.

Alors f est de classe \mathcal{C}^1 sur I, avec $f' = g$, autrement dit :

$$\left(\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n \right)' = \lim_{n \rightarrow +\infty} (f'_n).$$

12.4 Théorème de dérivabilité, classe \mathcal{C}^k

Soit $(f_n)_{n \geq n_0}$ suite de fonctions définies sur I à valeurs dans \mathbb{K} . On suppose :

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est de classe \mathcal{C}^k sur I,
- ② pour tout $i \in \llbracket 0; k-1 \rrbracket$, la suite $(f_n^{(i)})_{n \geq n_0}$ **converge simplement** sur I vers une fonction $g_i : I \rightarrow \mathbb{K}$,
- ③ la suite $(f_n^{(k)})_{n \geq n_0}$ **converge uniformément** sur I vers une fonction $g_k : I \rightarrow \mathbb{K}$.

Alors la limite g_0 simple de la suite (f_n) est de classe \mathcal{C}^k sur I, avec pour tout $i \in \llbracket 1; k \rrbracket$, $f^{(i)} = g_i$, autrement dit :

$$\forall i \in \llbracket 1; k \rrbracket, \quad \left(\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n \right)^{(i)} = \lim_{n \rightarrow +\infty} (f_n^{(i)}).$$

12.5 Théorème de convergence dominée

Soit $(f_n)_{n \geq n_0}$ une suite de fonctions définies sur un intervalle I. Si :

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est continue par morceaux,
- ② la suite $(f_n)_{n \geq n_0}$ converge simplement sur I vers une fonction f ,
- ③ la fonction f est continue par morceaux,
- ④ **hypothèse de domination uniforme** – il existe une fonction $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable sur I** telle que :

$$\forall n \geq n_0, \forall x \in I, \quad |f_n(x)| \leq \varphi(x).$$

Alors :

- les fonctions f_n ($\forall n \geq n_0$) et f sont intégrables sur I,

- $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\int_I f_n \right)$ existe et vaut $\int_I f$.

MISE EN GARDE

Pour que le théorème s'applique, il faut que la fonction dominante φ **soit indépendante de n** , de là l'adjectif « uniforme » : la même fonction φ domine toutes les fonctions f_n .

REMARQUE

Il n'est pas nécessaire de vérifier au préalable l'intégrabilité des fonctions f_n et de f : c'est une conclusion du théorème.

12.6 Continuité de la somme d'une série de fonctions

Soit I un intervalle.

Si

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est continue sur I,
- ② $\sum_{n \geq n_0} f_n \xrightarrow{\text{CVU}} S$

alors S est continue sur I.

12.7 Classe \mathcal{C}^1 de la somme d'une série de fonctions

Soit I un intervalle.

Si

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est de classe \mathcal{C}^1 sur I,
- ② $\sum_{n \geq n_0} f_n \xrightarrow{\text{CVS}} S$,
- ③ $\sum_{n \geq n_0} f'_n \xrightarrow{\text{CVU}} T$

alors S est de classe \mathcal{C}^1 et $S' = T$, i.e.

$$\left(\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n \right)'(x) = \sum_{n=n_0}^{+\infty} f'_n(x).$$

12.8 Classe \mathcal{C}^k de la somme d'une série de fonctions

Soit I un intervalle.

Si

- ① pour tout $n \geq n_0$, f_n est de classe \mathcal{C}^k sur I,
- ② pour tout $i \in \llbracket 0; k-1 \rrbracket$, $\sum_{n \geq n_0} f_n^{(i)} \xrightarrow{\text{CVS}} S_i$,
- ③ $\sum_{n \geq n_0} f_n^{(k)} \xrightarrow{\text{CVU}} S_k$,

alors S_0 est de classe \mathcal{C}^k et pour tout $i \in \llbracket 1; k \rrbracket$,

$$\left(\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n \right)^{(i)}(x) = \sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n^{(i)}(x).$$

12.9 Du local au global

Soit I un intervalle quelconque de \mathbb{R} et $k \in \mathbb{N}$.

- Si $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ est de classe \mathcal{C}^k sur tout segment $[a; b] \subset I$, alors f est de classe \mathcal{C}^k sur I.
- Si $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ est de classe \mathcal{C}^k sur une famille d'intervalles $(I_a)_{a \in A}$ inclus dans I telle que $\bigcup_{a \in A} I_a = I$, alors f est de classe \mathcal{C}^k sur I.

Avertissement Pour autant, la convergence normale ou uniforme sur tout $[a; b] \subset I$ n'entraîne pas la CVN ou CVU sur I tout entier. Par exemple pour les $f_n : I =]-1; 1[\rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^n$,

- $\|f_n\|_{\infty, I} = \sup_{-1 < x < 1} |x^n| = 1$ donc pas de CVN sur I
- pour tout $[-a; a] \subset I, \|f_n\|_{\infty, [-a; a]} = \sup_{-a \leq x \leq a} |x^n| = a^n$ donc CVN sur $[-a; a]$

12.10 Théorème de la double limite

Soit une série $\sum_{n \geq n_0} f_n$ de fonctions définies sur un intervalle I.

Si

- ① $\sum_{n \geq n_0} f_n$ converge uniformément sur I,
- ② pour tout $n \geq n_0, f_n$ admet une limite ℓ_n en a borne de I (éventuellement infinie),

alors

- la série $\sum \ell_n$ converge,
- la somme de la série admet une limite en a et :

$$\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \sum_{n=n_0}^{+\infty} \ell_n, \quad \text{i.e.} \quad \sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \sum_{n=n_0}^{+\infty} \lim_{x \rightarrow a} f_n(x)$$

12.11 Intégration terme à terme sur un segment en cas de CV uniforme

Si

- ① pour tout $n \geq n_0, f_n$ est continue sur le segment $[a; b]$,
- ② $\sum_{n \geq n_0} f_n$ converge uniformément sur le segment $[a; b]$,

alors
$$\int_a^b \left(\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(t) \right) dt = \sum_{n=n_0}^{+\infty} \left(\int_a^b f_n(t) dt \right).$$

12.12 Théorème d'intégration terme à terme sur un intervalle

Soit I un intervalle quelconque. On suppose :

Si

- ① pour tout n, f_n c.p.m. et intégrable sur I,

- ② $\sum_{n \geq n_0} f_n \xrightarrow{CVS} S$ sur I,
- ③ S est c.p.m. sur I,
- ④ la série numérique $\sum_n \left(\int_I |f_n(t)| dt \right)$ converge,

alors S est intégrable sur I et

$$\int_I \left(\sum_{n=n_0}^{+\infty} f_n(t) \right) dt = \sum_{n=n_0}^{+\infty} \left(\int_I f_n(t) dt \right).$$

12.13 Théorème de convergence dominée à paramètre continu

Soit I et J deux intervalles de $\mathbb{R}, g : I \times J \rightarrow \mathbb{K}$. Soit a une borne de I (éventuellement $a = \pm\infty$). Soit $g : I \times J$, On suppose que :

- ① pour tout x de I, $t \mapsto g(x, t)$ est c.p.m. sur J,
- ② pour tout t de J, $g(x, t) \xrightarrow{x \rightarrow a} \ell(t)$,
- ③ $t \mapsto \ell(t)$ est c.p.m. sur J,
- ④ **hypothèse de domination** : il existe une fonction $\varphi : J \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable** telle que :
 $\forall (x, t) \in I \times J, |g(x, t)| \leq \varphi(t).$

Alors la fonction ℓ intégrable sur J, et : $\lim_{x \rightarrow a} \left(\int_J g(x, t) dt \right)$ existe et vaut $\int_J \ell(t) dt$.

12.14 Théorème de continuité d'une intégrale à paramètre

Soit I et J deux intervalles de $\mathbb{R}, g : I \times J \rightarrow \mathbb{K}$. On suppose :

- ① pour tout $t \in J, x \mapsto g(x, t)$ est continue sur I (la propriété à transmettre),
- ② pour tout $x \in I, t \mapsto g(x, t)$ est continue par morceaux sur J,
- ③ **hypothèse de domination** : il existe une fonction $\varphi : J \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable** sur J telle que

$$\forall (x, t) \in I \times J, |g(x, t)| \leq \varphi(t).$$

Alors $f : x \mapsto \int_J g(x, t) dt$ est définie et continue sur I.

12.15 Théorème de dérivation sous l'intégrale \mathcal{C}^1

Soit I et J deux intervalles de $\mathbb{R}, g : I \times J \rightarrow \mathbb{K}$. On suppose :

- ① pour tout $t \in J, x \mapsto g(x, t)$ est de classe \mathcal{C}^1 sur I (la propriété à transmettre),
- ② pour tout $x \in I, t \mapsto g(x, t)$ est continue par morceaux et intégrable sur J,
- ③ pour tout $x \in I, t \mapsto \frac{\partial g}{\partial x}(x, t)$ est continue par morceaux sur J,

④ **hypothèse de domination** : il existe une fonction $\varphi : J \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable** sur J telle que

$$\forall (x, t) \in I \times J, \quad \left| \frac{\partial g}{\partial x}(x, t) \right| \leq \varphi(t).$$

Alors $f : x \mapsto \int_J g(x, t)dt$ est définie et de classe \mathcal{C}^1 sur I, et

$$\forall x \in I, \quad f'(x) = \int_J \frac{\partial g}{\partial x}(x, t)dt.$$

12.16 **Théorème de dérivation sous l'intégrale classe \mathcal{C}^n**

Soit I et J deux intervalles de \mathbb{R} , $g : I \times J \rightarrow \mathbb{K}$. On suppose :

- ① pour tout $t \in J$, $x \mapsto g(x, t)$ est de classe \mathcal{C}^n sur I (la propriété à transmettre),
- ② pour tout $k \in \llbracket 0; n-1 \rrbracket$ et pour tout $x \in I$, $t \mapsto \frac{\partial^k}{\partial x^k} g(x, t)$ est continue par morceaux et intégrable sur J,
- ③ pour tout $x \in I$, $t \mapsto \frac{\partial^n}{\partial x^n} g(x, t)$ est continue par morceaux sur J,
- ④ **hypothèse de domination** : il existe une fonction $\varphi : J \rightarrow \mathbb{R}$ continue par morceaux et **intégrable** sur J telle que

$$\forall (x, t) \in I \times J, \quad \left| \frac{\partial^n}{\partial x^n} g(x, t) \right| \leq \varphi(t).$$

Alors $f : x \mapsto \int_J g(x, t)dt$ est définie et de classe \mathcal{C}^n sur I, et

$$\forall k \in \llbracket 0; n \rrbracket, \forall x \in I, \quad f^{(k)}(x) = \int_J \frac{\partial^k}{\partial x^k} g(x, t)dt.$$

12.17 **Version assouplie des 3 théorèmes de régularité**

Si on peine à trouver une domination uniforme en x (voire si une telle domination n'existe pas), on peut se contenter de prouver que f est définie et continue resp. \mathcal{C}^1 , \mathcal{C}^n sur une famille d'intervalles I_i telle que $\cup_i I_i = I$.

Par exemple, $I = \mathbb{R} = \bigcup_{a>0} [-a; a]$, $I = [0; +\infty[= \bigcup_{0<a} [0; a]$, $I =]0; +\infty[= \bigcup_{0<a<b} [a; b]$, etc...

13 Espaces vectoriels normés

13.1 Une **norme** $N : E \rightarrow \mathbb{R}$ sur le \mathbb{K} -espace vectoriel E vérifie les axiomes :

- (i) $\forall x \in E, \quad N(x) \geq 0$ (positivité);
- (ii) $\forall x \in E, \quad N(x) = 0 \Rightarrow x = 0_E$ (séparation);
- (iii) $\forall x \in E, \forall \lambda \in \mathbb{K}, \quad N(\lambda x) = |\lambda| N(x)$ (homogénéité);
- (iv) $\forall (x, y) \in E^2, \quad N(x + y) \leq N(x) + N(y)$.

Le couple (E, N) est un *espace vectoriel normé* (evn). On dit aussi que E est muni de la norme N. On note souvent $\|\cdot\|$ pour N.

13.2 La **distance associée à la norme** $\|\cdot\|$ est définie par :

$$\forall (x, y) \in E^2, \quad d(x, y) = \|x - y\|.$$

La **distance d'un vecteur à une partie** $P \subset E$ est, si elle existe,

$$d(x, P) = \inf_{y \in P} d(x, y) = \inf_{y \in P} \|x - y\|.$$

13.3 *Propriétés de la norme.* Soit $(E, \|\cdot\|)$ un evn. Soit $(x, y, z) \in E^3$.

- (i) $\|0_E\| = 0$,
- (ii) $|\|x\| - \|y\|| \leq \|x - y\|$ et $|\|x\| - \|y\|| \leq \|x + y\|$,
- (iii) $|\|x - y\| - \|y - z\|| \leq \|x - z\|$ i.e $|d(x, y) - d(y, z)| \leq d(x, z)$.

13.4 **Norme induite sur un sous-espace**

Soit (E, N) un evn et F un sous-espace vectoriel de E. Alors $N|_F : F \rightarrow \mathbb{R}$ est une norme, dite *norme induite* par N sur F, et $(F, N|_F)$ est un evn.

13.5 **Normes usuelles sur \mathbb{K}^n et $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$**

Pour $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{K}^n$,

- (i) $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$ (*norme de Manhattan*)
- (ii) $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$ (*norme de la géométrie euclidienne canonique*)
- (iii) $\|x\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i|$ (*loi du plus fort*)

Soit $M = (m_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

- (i) $\|M\|_1 = \sum_{1 \leq i, j \leq n} |m_{i,j}|$
- (ii) $\|M\|_2 = \text{Tr}(M^T M) = \sqrt{\sum_{1 \leq i, j \leq n} m_{i,j}^2}$
- (iii) $\|M\|_\infty = \max_{1 \leq i, j \leq n} |m_{i,j}|$

13.6 **Normes sur un espace produit, sur un espace somme**

(i) Soit $(E_1, \|\cdot\|_{E_1}), \dots, (E_p, \|\cdot\|_{E_p})$ p \mathbb{K} -evn. Alors

$$N : E_1 \times \dots \times E_p \rightarrow \mathbb{R}, (u_1, \dots, u_p) \mapsto \sup_{1 \leq i \leq p} \|u_k\|_{E_k}$$

est une norme sur l'espace produit $\prod_{k=1}^p E_k$.

(ii) Soit $(E_1, \|\cdot\|_{E_1}), \dots, (E_p, \|\cdot\|_{E_p})$ p sous-espaces supplémentaires de E. Alors

$$N : E \rightarrow \mathbb{R}, u = u_1 + \dots + u_p \mapsto \sup_{1 \leq i \leq p} \|u_k\|_{E_k}$$

est une norme sur l'espace E.

(iii) En particulier, si $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ est une base de E , alors en posant, pour tout x de E , $N(x) = \sup_{1 \leq i \leq n} |x_i|$ avec $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i$ on définit une norme sur E . On peut aussi

$$\text{poser } N_1(x) = \sum_{i=1}^n |x_i| \text{ ou } N_2(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}.$$

13.7 Boules et sphères

Soit $(E, \|\cdot\|)$ evn, d distance associée à $\|\cdot\|$. Soit $a \in E$ et $r \in [0; +\infty[$.

(i) *Boule ouverte de centre a de rayon r* :

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

(ii) *Boule fermée de centre a de rayon r* :

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

(iii) *Sphère de centre a de rayon r* :

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

Pour $r = 1$, on parle de **boule unité** et de **sphère unité**.

13.8 Parties convexes

(i) Dans E , le segment $[x; y]$ d'extrémité $x \in E$ et $y \in E$ est :

$$[x; y] = \{\lambda x + (1 - \lambda)y / \lambda \in [0; 1]\}.$$

(ii) $C \subset E$ est un convexe ou une partie convexe de E si :

$$\forall (x, y) \in C^2, [x; y] \subset C.$$

(iii) Les boules sont des convexes, toute intersection de convexes est convexe.

13.9 Parties bornées

$P \subset E$ est une partie bornée de E si : $\exists M \in \mathbb{R}, \forall x \in P, \|x\| \leq M$.

Caractérisation : il y a équivalence entre

(i) P est bornée, (ii) P est incluse dans une boule,

(iii) $\exists N \in \mathbb{R}, \forall (x, y) \in P, d(x, y) \leq N$.

Réfutation : P n'est pas bornée si, et seulement si, il existe une suite (u_n) d'éléments de P telle que : $\forall n \in \mathbb{N}, \|u_n\| \geq n$.

13.10 Suites bornées

$(u_n) \in E^{\mathbb{N}}$ est bornée si $\{u_n/n \in \mathbb{N}\}$ est une partie bornée de E , autrement si $\exists M \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N}, \|u_n\| \leq M$.

L'ensemble $\mathcal{B}(\mathbb{N}, E)$ des suites bornées E est un sous-espace vectoriel de $E^{\mathbb{N}}$.

13.11 Applications bornées

Soit X un ensemble. $f : X \rightarrow E$ est une application bornée si $\{f(x)/x \in X\}$ est une partie bornée de E , autrement si

$$\exists M \in \mathbb{R}, \forall x \in X, \|f(x)\| \leq M.$$

L'ensemble $\mathcal{B}(X, E)$ des applications bornées de X dans E est un sous-espace vectoriel de E^X .

13.12 Suites convergentes

$(u_n) \in E^{\mathbb{N}}$ est convergente si

$$\exists \ell \in E, \forall \varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N}, \forall n \geq n_0, \|u_n - \ell\| \leq \varepsilon.$$

Dans ce cas, ℓ est unique et s'appelle la limite de la suite u .

Caractérisation : (u_n) converge vers ℓ si, et seulement si, $\|u_n - \ell\| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$.

13.13 Propriétés :

(i) Toute suite convergente est bornée.

(ii) Si $u = (u_n)$ et $v = (v_n)$ sont deux suites convergentes d'éléments de E de limite respective ℓ et m , alors pour tout $(\lambda, \mu) \in \mathbb{K}^2$, $\lambda u + \mu v = (\lambda u_n + \mu v_n)$ converge, vers $\lambda \ell + \mu m$.

(iii) Si $u = (u_n)$ est une suite convergente d'éléments de E de limite ℓ et (k_n) une suite de scalaires convergente de limite λ , alors $(k_n u_n)$ converge, vers $\lambda \ell$.

13.14 Normes équivalentes

Deux normes N_1 et N_2 sont dites équivalentes s'il existe deux réels strictement positifs a et b tels que

$$\forall x \in E, aN_1(x) \leq N_2(x) \leq bN_1(x).$$

13.15 Équivalence des normes en dimension finie

Si E est de dimension finie, alors toutes normes sur E sont équivalentes.

La convergence et la limite d'une suite ne dépendent pas de la norme choisie lorsque E est de dimension finie. Autrement dit, si N et $\|\cdot\|$ sont deux normes sur E , alors :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} N(u_n - \ell) = 0 \iff \lim_{n \rightarrow +\infty} \|u_n - \ell\| = 0.$$

13.16 Suites coordonnées

Soit $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_p)$ une base de E . Soit $(u_n) \in E^{\mathbb{N}}$. Tout u_n se décompose de manière

$$\text{unique sous la forme : } u_n = u_n^{(1)} e_1 + \dots + u_n^{(p)} e_p = \sum_{i=1}^p u_n^{(i)} e_i.$$

Pour $i \in \llbracket 1; p \rrbracket$, $(u_n^{(i)})_{n \in \mathbb{N}} \in K^{\mathbb{N}}$ est la i -ème suite coordonnée de (u_n) dans la base \mathcal{B} .

13.17 Convergence par coordonnées

Soit $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_p)$ une base de E . La suite $(u_n) \in K^{\mathbb{N}}$ converge si, et seulement si, chacune de ses suites coordonnées dans \mathcal{B} converge.

$$\text{Dans ce cas : } \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \sum_{i=1}^p \left(\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n^{(i)} \right) e_i.$$

13.18 Suites extraites, fonctions extractrices

Soit $(u_n) \in K^{\mathbb{N}}$. On appelle suite extraite de u toute suite de la forme $(u_{\varphi(n)})$ où la fonction extractrice $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ est strictement croissante.

Suite extraite d'une suite convergente : Toute suite extraite d'une suite convergente converge, vers la même limite.

Critère de divergence : Si deux suites extraites d'une suite ont des limites distinctes... c'est que cette suite diverge !

13.19 Parties ouvertes, voisinages d'un point

- (i) $x \in \Omega$ est un point *intérieur* à Ω si $\exists r > 0, \mathcal{B}(x, r) \subset \Omega$.
- (ii) Une partie \mathcal{V} est un *voisinage* de x si x est intérieur à \mathcal{V} .
- (iii) Ω est une partie ouverte ou un *ouvert* si : $\forall x \in \Omega, \exists r > 0, \mathcal{B}(x, r) \subset \Omega$.

13.20 Parties fermées

La partie F de E est un *fermé* ou une partie fermée si son complémentaire $\complement_E F$ dans E est une partie ouverte de E .

13.21 (i) \emptyset et E sont à la fois ouverts et fermés.

- (ii) Toute réunion d'ouverts et toute intersection d'un nombre fini d'ouverts est une partie ouverte.
- (iii) Toute réunion d'un nombre fini de fermés et toute intersection de fermés est une partie fermée.

13.22 Caractérisation séquentielle des fermés

F est un fermé si, et seulement si, pour **toute** suite convergente $(f_n)_n$ d'éléments de F , $\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n \in F$... on ne s'échappe pas de F facilement, il est fermé!

13.23 Équivalence des topologies en dimension finie

Si E est de dimension finie, toutes les normes de E définissent les mêmes ouverts et les mêmes fermés.

13.24 Point adhérent, adhérence, notation

a est *adhérent* à A si toute boule ouverte centrée en a rencontre A et on note \bar{A} l'ensemble des points adhérents, appelé *l'adhérence* de A :

$$a \in \bar{A} \iff \forall r > 0, \mathcal{B}(a, r) \cap A \neq \emptyset \iff \forall \varepsilon > 0, \exists x \in A, \|x - a\| < \varepsilon.$$

Caractérisation séquentielle des points adhérents : a est adhérent à A s'il existe une suite d'éléments de A convergeant vers a .

Corollaire : \bar{A} est fermée, $\bar{A} = \bigcap_{F \text{ fermé } \supset A} F$, A fermé ssi $\bar{A} = A$.

13.25 Point intérieur, intérieur, notation

$x \in \Omega$ est un point *intérieur* à Ω si $\exists r > 0, \mathcal{B}(x, r) \subset \Omega$ et on note $\overset{\circ}{A}$ l'ensemble des points intérieurs, appelé *l'intérieur* de A .

Propriété : $\overset{\circ}{A}$ est ouvert, $\overset{\circ}{A} = \bigcup_{\Omega \text{ ouvert } \subset A} \Omega$, A ouvert ssi $\overset{\circ}{A} = A$.

13.26 Frontière ou bord, notation

La *frontière* ou la *bord* de A est $Fr(A) = \bar{A} \setminus \overset{\circ}{A}$.

13.27 Continuité, inégalités et nature topologique

Soit $f : E \rightarrow \mathbb{R}$ continue et k un réel.

- $\{x \in E \text{ tq } f(x) \geq k\}$, $\{x \in E \text{ tq } f(x) \leq k\}$ et $\{x \in E \text{ tq } f(x) = k\}$ sont des fermés ;
- $\{x \in E \text{ tq } f(x) > k\}$, $\{x \in E \text{ tq } f(x) < k\}$ et $\{x \in E \text{ tq } f(x) \neq k\}$ sont des ouverts.

13.28 Limites de fonctions, notations

$(E, \|\cdot\|_E)$ et $(F, \|\cdot\|_F)$ deux evn, $A \subset E$, $f : A \rightarrow F$. Soit a un point adhérent à A . f admet une limite en a si

$$\exists \ell \in F, \forall \varepsilon > 0, \exists \alpha > 0, \forall x \in E, \|x - a\|_E \leq \alpha \Rightarrow \|f(x) - \ell\|_F \leq \varepsilon.$$

Dans ce cas, ℓ est unique et s'appelle la limite de f en a .

Caractérisation séquentielle de la limite : $f(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \ell$ si, et seulement si, pour **toute** suite (u_n) d'éléments de A convergeant vers a , la suite $(f(u_n))$ converge vers ℓ .

13.29 Équivalence des normes en dimension finie

La convergence et la limite d'une fonction ne dépendent pas de la norme choisie lorsque E est de dimension finie. Autrement dit, si N et $\|\cdot\|$ sont deux normes sur E , alors :

$$\lim_{x \rightarrow a} N(f(x) - \ell) = 0 \iff \lim_{x \rightarrow a} \|f(x) - \ell\| = 0.$$

13.30 Fonctions coordonnées

Soit $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_p)$ base de F . $f : A \subset E \rightarrow F$. Pour tout x de A , $f(x)$ se décompose

$$\text{de façon unique sous la forme : } f(x) = \sum_{i=1}^p f_i(x)e_i.$$

Les $f_i : A \rightarrow \mathbb{K}$ sont les fonctions coordonnées dans \mathcal{B}' .

13.31 Convergence par coordonnées

f admet une limite ℓ en a si, et seulement si, chacune des fonctions coordonnées admet

$$\text{une limite en } a, \text{ et dans ce cas : } f(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \sum_{i=1}^p \lim_{x \rightarrow a} f_i(x)e_i.$$

13.32 Opérations algébriques

$$(i) \forall (\lambda, \mu) \in \mathbb{K}^2, (f(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \ell \text{ et } g(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} m) \Rightarrow (\lambda f + \mu g)(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \lambda \ell + \mu m.$$

$$(ii) \text{ Si } \lambda : E \rightarrow \mathbb{K}, (\lambda(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} k \text{ et } f(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \ell) \Rightarrow (\lambda(x)f(x)) \xrightarrow{x \rightarrow a} k\ell.$$

$$(iii) f : X \subset E \rightarrow F, g : Y \subset F \rightarrow G \text{ telles que } f(X) \subset Y \text{ et soit } a \in \bar{X}.$$

$$\text{Si } f(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} \ell \in \bar{Y} \text{ et } g \xrightarrow{y \rightarrow \ell} m \text{ alors } g \circ f(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} m.$$

13.33 Continuité ponctuelle, continuité globale

$f : A \subset E \rightarrow F$ est continue en $a \in A$ si $f(x) \xrightarrow{x \rightarrow a} f(a)$.

f est continue sur A si f est continue en tout point de A .

Propriétés usuelles :

(i) L'ensemble des fonctions continues sur A $\mathcal{C}(A, F)$ est un sous-espace vectoriel de F^A .

(ii) La composée de fonctions continues est continue.

(iii) $(f : A \rightarrow F \text{ continue en } a)$ entraîne $(f \text{ bornée au voisinage de } a)$ (i.e. sur $B(a, r) \cap A$ avec $r > 0$)

13.34 Continuité par coordonnées en dimension finie

(i) $f : A \subset E \rightarrow F$ (avec E de dimension finie muni d'une base \mathcal{B}) est continue en $a \in A$ si, et seulement si, toutes ses applications coordonnées dans \mathcal{B} sont continues en a .

(ii) $f : A \subset E \rightarrow F$ (avec E de dimension finie muni d'une base \mathcal{B}) est continue sur A si, et seulement si, toutes ses applications coordonnées dans \mathcal{B} sont continues sur A .

13.35 Fonctions à valeurs réelles continues sur un fermé borné

Soit K une partie fermée et bornée (= "compact") de E .

Alors toute fonction continue $f : K \rightarrow \mathbb{R}$ est bornée et atteint ses bornes. Autrement dit, $\exists(m, M) \in \mathbb{R}^2$ et $\exists(a, b) \in \mathbb{R}^2$ tels que $\forall x \in A, m \leq f(x) \leq M$ avec $f(a) = m$ et $f(b) = M$.

13.36 Application k-lipschitzienne

$f : A \subset E \rightarrow F$ est lipschitzienne de rapport $k \in [0; +\infty[$ si $\forall(x, y) \in A^2, \|f(x) - f(y)\| \leq k \|x - y\|$.

13.37 Propriétés

(i) $\|\cdot\|$ est 1-lipschitzienne

(ii) La composition conserve la lipschitzian attitude : f (resp. g) k_1 -lipschitzienne (resp. k_2 -lipschitzienne) telles que $g \circ f$ existe entraîne $g \circ f$ $k_1 k_2$ -lipschitzienne.

(iii) Toute application lipschitzienne est continue

13.38 Applications linéaires continues en dimension quelconque

Soit $u \in \mathcal{L}(E, F)$. S'il existe $k \in \mathbb{R}$ tel que $\forall x \in E, \|u(x)\|_F \leq k \|x\|_E$ alors u est continue.

13.39 Applications linéaires continues en dimension finie

En dimension finie :

(i) Toute application linéaire, bilinéaire, voire multilinéaire est continue.

(ii) $\text{Tr}(\cdot) : \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}$ et $\det(\cdot) : \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}$ sont continues.

(iii) Pour E euclidien : $\langle \cdot, \cdot \rangle : E^2 \rightarrow \mathbb{R}$ est continue.

(iv) Le produit matriciel $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K}) \times \mathcal{M}_{p,q}(\mathbb{K}) \rightarrow \mathcal{M}_{n,q}(\mathbb{K}), (A, B) \mapsto AB$ est continu.

(v) La composition des endomorphismes \circ est continue.

(vi) \det est n -linéaire par rapport aux colonnes donc $\det : (\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K}))^n \rightarrow \mathbb{K}$ est continue.

(vii) Les fonctions polynomiales $\mathbb{K}^p \rightarrow \mathbb{K}, (x_1, \dots, x_p) \mapsto \sum_{0 \leq i_1, \dots, i_p \leq d} a_{i_1, \dots, i_p} x_1^{i_1} \dots x_p^{i_p}$

sont continues.

(viii) $\chi : \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}[X], M \mapsto \chi_M$ est continue.

14 Fonctions vectorielles de la variable réelle

Soit I un intervalle de \mathbb{R} , non vide, non réduit à un point.

14.1 Dérivée en un point

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ et $a \in I$. f est dérivable en a si la fonction τ_a « *taux de variation en a* »

$$\tau_a : I \setminus \{a\} \rightarrow \mathbb{R}^n, t \mapsto \frac{1}{t-a} (f(t) - f(a))$$

admet une limite $\ell \in \mathbb{R}^n$ en a .

Dans ce cas, ℓ est la dérivée de f en a , et se note $f'(a)$ ou $\frac{df}{dt}(a)$.

14.2 Caractérisation par l'existence d'un développement limité à l'ordre 1

f est dérivable en a si, et seulement si, il existe $\ell \in \mathbb{R}^n$ et $\varepsilon : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ telle que $\lim_{t \rightarrow a} \varepsilon(t) = 0_{\mathbb{R}^n}$ tels que :

$$\forall t \in I, f(t) = f(a) + (t-a)\ell + (t-a)\varepsilon(t).$$

14.3 Dérivabilité sur un intervalle

$f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est dérivable sur I si f est dérivable en tout point de I .

Dans ce cas, on note $f' : I \rightarrow \mathbb{R}^n, a \mapsto f'(a)$ la fonction dérivée de f sur I .

14.4 La dérivabilité entraîne la continuité

14.5 Fonctions coordonnées

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n, (e_1, \dots, e_n)$ la base canonique de \mathbb{R}^n . On appelle fonctions coordonnées de f les n fonctions $f_i : I \rightarrow \mathbb{R}$ telles que :

$$\forall t \in I, f(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t)e_i.$$

14.6 Dérivation par coordonnées

$f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est dérivable en $a \in I$ si, et seulement si, les n fonctions coordonnées f_i ($1 \leq i \leq n$) sont dérivables en a . Dans ce cas :

$$f'(a) = \sum_{i=1}^n f'_i(a)e_i = (f'_1(a), \dots, f'_n(a)).$$

14.7 Extension à tout \mathbb{R} -espace de dimension finie

Les définitions et propriétés précédentes s'étendent à toute fonction $f : I \rightarrow E$ où E est un \mathbb{R} -espace vectoriel de dimension finie n , notamment et assez fréquemment $E = \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

14.8 Combinaisons linéaires

Si $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ dérivables alors $\lambda f + \mu g$ dérivable avec

$$\forall a \in I, (\lambda f + \mu g)'(a) = \lambda f'(a) + \mu g'(a).$$

14.9 Composition par une application linéaire

Si $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ dérivable et $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ linéaire alors $L(f) : I \rightarrow \mathbb{R}^p, t \mapsto L(f)(t)$ dérivable avec

$$\forall a \in I, (L(f))'(a) = L(f'(a)).$$

14.10 Composition par une application bilinéaire

Si $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ et $g : I \rightarrow \mathbb{R}^p$ dérivables et $B : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^q$ bilinéaire alors $B(f, g) : I \rightarrow \mathbb{R}^q, t \mapsto B(f(t), g(t))$ dérivable avec

$$\forall a \in I, \quad (B(f, g))'(a) = B(f'(a), g(a)) + B(f(a), g'(a)).$$

Notamment, B peut être le produit des fonctions à valeurs réelles, le produit matriciel, un produit scalaire, le déterminant vis à vis de ses n colonnes. On se souviendra que dans le contexte opératoire, « bilinéaire » est synonyme de « distributif ».

14.11 Composition par une application multilinéaire

Si $f_1 : I \rightarrow E, f_2 : I \rightarrow E, \dots, f_n : I \rightarrow E$ sont n applications dérivables et $B : E^n \rightarrow \mathbb{R}^q$ est une application n -linéaire alors

$B(f_1, f_2, \dots, f_n) : I \rightarrow \mathbb{R}^q, t \mapsto B(f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t))$ est dérivable avec

$$\forall a \in I, \quad (B(f_1, f_2, \dots, f_n))'(a) = B(f_1'(a), f_2(a), \dots, f_n(a)) + B(f_1(a), f_2'(a), \dots, f_n(a)) + \dots + B(f_1(a), f_2(a), \dots, f_n'(a)).$$

14.12 Composition d'applications dérivables

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ et $\varphi : J \subset \mathbb{R} \rightarrow I$ dérivables, alors $f \circ \varphi$ est dérivable sur J avec

$$\forall b \in J, \quad (f \circ \varphi)'(b) = \varphi'(b)f'(f(b)).$$

14.13 Dérivée k-ème

La dérivée k -ème de $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est définie, sous réserve d'existence, par récurrence en posant :

$$f^{(k)} = \frac{d^k f}{dt^k} = D^k f = \begin{cases} f & \text{si } k = 0 \\ (f^{(k-1)})' & \text{si } k \geq 1 \end{cases}$$

On note $\mathcal{C}^k(I, \mathbb{R}^n)$ respectivement $\mathcal{C}(I, \mathbb{R}^n)$ l'ensemble des fonctions de classe \mathcal{C}^k resp. \mathcal{C} de I à valeurs dans \mathbb{R}^n .

14.14 Classe \mathcal{C}^k et \mathcal{C}

$f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ est de classe \mathcal{C}^k si f est k fois dérivable et si $f^{(k)}$ est continue.

f est de classe \mathcal{C} si f est de classe \mathcal{C}^k pour tout k de \mathbb{N} , ou, ce qui revient au même, f est indéfiniment dérivable.

14.15 Combinaison linéaire

Si f et g sont \mathcal{C}^k sur I alors $\lambda f + \mu g$ est \mathcal{C}^k sur I avec

$$(\lambda f + \mu g)^{(k)} = \lambda f^{(k)} + \mu g^{(k)}.$$

En particulier $\mathcal{C}^k(I, \mathbb{R}^n)$ et $\mathcal{C}(I, \mathbb{R}^n)$ sont des sous-espaces vectoriels de $(\mathbb{R}^n)^I$.

14.16 Formule de Leibniz

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n, g : I \rightarrow \mathbb{R}^p$ de classe \mathcal{C}^k et $B : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^q$ une application bilinéaire. Alors $B(f, g)$ est de classe \mathcal{C}^k sur I avec

$$\forall a \in I, \quad (B(f, g))^{(k)}(a) = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} B(f^{(i)}, g^{(k-i)})(a)$$

14.17 Composition d'applications de classe \mathcal{C}^k

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ et $\varphi : J \subset \mathbb{R} \rightarrow I$ de classe \mathcal{C}^k , alors $f \circ \varphi$ est de classe \mathcal{C}^k sur J .

15 Calcul différentiel et extremums

U désigne un ouvert de $\mathbb{R}^p, (e_1, \dots, e_p)$ la base canonique \mathbb{R}^p .

15.1 Dérivée directionnelle

Soit $f : U \subset \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$. Soit $a \in U$ et $v \in \mathbb{R}^p$. On dit que f admet en a une dérivée dans la direction de v si la limite suivante existe :

$$D_v f(a) \stackrel{\text{déf.}}{=} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (f(a + tv) - f(a))$$

Remarque -

• si on pose $g :]-r; r[\rightarrow \mathbb{R}, t \mapsto f(a + tv)$, cela équivaut à la dérivabilité de g en 0 , et alors $D_v f(a) = g'(0)$.

15.2 Dérivée partielle d'ordre 1

Soit $f : U \subset \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$. Soit (e_1, \dots, e_p) la base canonique de \mathbb{R}^p . $a \in U$. On dit que f admet en a une dérivée partielle première par rapport à la i -ème variable si la limite suivante existe :

$$\partial_i f(a) \stackrel{\text{déf.}}{=} \frac{\partial f}{\partial x_i}(a) \stackrel{\text{déf.}}{=} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (f(a + te_i) - f(a))$$

Calcul pratique

En posant $a = (a_1, \dots, a_p)$, $\partial_i f(a) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(a)$ est la dérivée en a_i de $t \mapsto f(a_1, \dots, a_{i-1}, t, a_{i+1}, \dots, a_p)$. D'un point de pratique, on l'obtient en considérant que seule la i -ème coordonnée varie.

Remarque - $\partial_i f(a) = D_{e_i} f(a)$.

15.3 Fonction de classe \mathcal{C}^1

$f : U \rightarrow \mathbb{R}$ est de classe \mathcal{C}^1 sur U si :

- ① f admet des dérivées partielles d'ordre 1 par rapport à chacune des variables en tout point de U ;
- ② pour tout $i \in \llbracket 1; p \rrbracket$, la fonction $\partial_i f : U \rightarrow \mathbb{R}$ est continue sur U .

15.4 Stabilités algébriques

- ① Soit $f, g : U \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 . Pour tout $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$, $\lambda f + \mu g$ est de classe \mathcal{C}^1 , $f g : U \rightarrow \mathbb{R}$ est \mathcal{C}^1 , et si g ne s'annule pas sur U , $\frac{f}{g}$ est de classe \mathcal{C}^1 .
- ② Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R} \mathcal{C}^1$ et $g : V \rightarrow \mathbb{R} \mathcal{C}^1$ avec $f(U) \subset V$, alors $g \circ f : U \rightarrow \mathbb{R}$ est \mathcal{C}^1 .

15.5 Différentielle

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 . La différentielle de f en a , notée $df(a) : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$, est l'application linéaire :

$$df(a) : h = (h_1, \dots, h_p) \mapsto \sum_{i=1}^p \partial_i f(a) h_i = \sum_{i=1}^p \frac{\partial f}{\partial x_i}(a) h_i$$

Notation

« $df(a)(h)$ » se note aussi « $df(a).h$ » en raison du lien avec le produit scalaire.

15.6 Développement limité d'ordre 1

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 . Alors, en tout a de U , f admet le développement limité à l'ordre 1 suivant :

$$\forall h = (h_1, \dots, h_p) \in \mathbb{R}^p \text{ tq } a + h \in U,$$

$$f(a + h) = f(a) + \sum_{i=1}^p \partial_i f(a) h_i + \|h\| \varepsilon(h)$$

avec $\lim_{h \rightarrow 0} \varepsilon(h) = 0$, soit encore

$$f(a + h) = f(a) + df(a)(h) + \|h\| \varepsilon(h).$$

15.7 Gradient

Soit $f \in \mathcal{C}^1(U, \mathbb{R})$. Le gradient de f en $a \in U$ est le vecteur de \mathbb{R}^p :

$$\nabla f(a) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(a), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_p}(a) \right).$$

15.8 Différentielle et gradient

$$df(a)(h) = df(a).h = (\nabla f(a) | h) = D_h f(a).$$

15.9 Dérivation d'une fonction composée

Soit f une fonction de classe \mathcal{C}^1 sur un ouvert U de \mathbb{R}^p . Soit γ une fonction de classe \mathcal{C}^1 sur un intervalle I , à valeurs dans U .

La fonction $f \circ \gamma : I \rightarrow \mathbb{R}$ est alors de classe \mathcal{C}^1 sur I , de dérivée

$$t \mapsto df(\gamma(t)).\gamma'(t) = \sum_{i=1}^p \partial_i f(\gamma(t)).\gamma'_i(t)$$

15.10 Règle de la chaîne avec $(u, v) \mapsto f(x(u, v), y(u, v))$

Soit $f : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $(x, y) \mapsto f(x, y)$ de classe \mathcal{C}^1 . Soit $x, y : V \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 telles que $(x, y)(V) \subset U$.

Soit enfin $g : V \rightarrow \mathbb{R}$, $(u, v) \mapsto f(x(u, v), y(u, v))$.

Alors :

$$\frac{\partial g}{\partial u}(u, v) = \frac{\partial f}{\partial x}(x(u, v), y(u, v)) \frac{\partial x}{\partial u}(u, v) + \frac{\partial f}{\partial y}(x(u, v), y(u, v)) \frac{\partial y}{\partial u}(u, v)$$

$$\frac{\partial g}{\partial v}(u, v) = \frac{\partial f}{\partial x}(x(u, v), y(u, v)) \frac{\partial x}{\partial v}(u, v) + \frac{\partial f}{\partial y}(x(u, v), y(u, v)) \frac{\partial y}{\partial v}(u, v)$$

15.11 Cas des coordonnées polaires

$f : U \rightarrow \mathbb{R}$ et $g : V \rightarrow \mathbb{R}$, $(\rho, \theta) \mapsto f(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)$, telles que : $\forall (\rho, \theta) \in V, (\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) \in U$.

Alors :

$$\frac{\partial g}{\partial \rho}(\rho, \theta) = \cos \theta \frac{\partial f}{\partial x}(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) + \sin \theta \frac{\partial f}{\partial y}(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \theta}(\rho, \theta) = -\rho \sin \theta \frac{\partial f}{\partial x}(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) + \rho \cos \theta \frac{\partial f}{\partial y}(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)$$

15.12 Fonctions constantes sur un ouvert convexe

Soit U un ouvert convexe de \mathbb{R}^p et $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 .

f est constante sur U si et seulement si pour tout a de U , $df(a) = 0_{\mathcal{L}(\mathbb{R}^p, \mathbb{R})}$.

15.13 Dérivée partielle d'ordre 2

Soit $f \in \mathcal{C}^1(U, \mathbb{R})$. On appelle, sous réserve d'existence, dérivées partielles d'ordre 2 de f les dérivées partielles des dérivées premières de f . On les note :

$$\partial_{i,j} f \stackrel{\text{déf.}}{=} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \stackrel{\text{déf.}}{=} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \text{ et } \partial_{i,i} f \stackrel{\text{déf.}}{=} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \stackrel{\text{déf.}}{=} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

15.14 Fonctions de classe \mathcal{C}^2

f est de classe \mathcal{C}^2 si elles admet des dérivées partielles d'ordre 2 continues.

15.15 Théorème de Schwarz

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^2 .

Alors en tout point a de U ,

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(a) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(a).$$

Autrement dit, si f est de classe \mathcal{C}^2 , alors

$$\partial_{i,j}^2 f = \partial_{j,i}^2 f$$

15.16 Matrice hessienne

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^2 et $a \in U$. La matrice hessienne de f en a est

$$H_f(a) = \begin{pmatrix} \partial_{1,1}^2 f(a) & \partial_{1,2}^2 f(a) & \dots & \partial_{1,p}^2 f(a) \\ \partial_{2,1}^2 f(a) & \partial_{2,2}^2 f(a) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \partial_{p,1}^2 f(a) & \dots & \dots & \partial_{p,p}^2 f(a) \end{pmatrix} = (\partial_{i,j}^2 f(a))$$

• Par le théorème de Schwarz, $H_f(a) \in \mathcal{S}_p(\mathbb{R})$

15.17 Développement limité d'ordre 2

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^2 et $a \in U$. Alors pour tout $h \in \mathbb{R}^p$

$$f(a+h) = f(a) + \sum_{i=1}^p \partial_i f(a) h_i + \frac{1}{2} \sum_{1 \leq i, j \leq p} \partial_{i,j}^2 f(a) h_i h_j + \|h\|^2 \varepsilon(h) \text{ avec } \varepsilon(h) \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0.$$

$$f(a+h) = f(a) + df(a).h + \frac{1}{2} h^T H_f(a) h + o(\|h\|^2)$$

15.18 Extremum global, extremum local

• Soit D un domaine de \mathbb{R}^n . Soit $f : D \rightarrow \mathbb{R}$.

On dit que f atteint un maximum (resp. minimum) local en $a \in U$ s'il existe un voisinage ouvert V de a (i.e. un ouvert contenant a) tel que :

$$\forall x \in V \cap D, \quad f(x) \geq f(a) \quad (\text{resp. } \forall x \in V \cap D, \quad f(x) \leq f(a))$$

- Si l'inégalité est stricte sauf en a , l'extremum est qualifié de « *strict* ».
- Si l'inégalité est vérifiée pour tout x de D (et pas seulement sur $V \cap D$), l'extremum est qualifié de « *global* ».

15.19 Condition nécessaire d'extremum

Soit U un ouvert de \mathbb{R}^n . Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 .

Si f atteint un extremum en $a \in U$, alors $\nabla f(a) = 0$.

15.20 Point critique

Un point $a \in U$ où le gradient s'annule s'appelle un point critique.

15.21 Point col ou point selle

On appelle « point col » ou « point selle » un point critique sans extremum.

15.22 Condition suffisante d'ordre 2

Soit f de classe \mathcal{C}^2 sur un ouvert U de \mathbb{R}^p et a un point critique de f .

- ① Si $H_f(a) \in \mathcal{S}_p^{++}(\mathbb{R})$ (i.e. $\text{Sp}(H_f(a)) \subset]0; +\infty[$), f atteint un minimum local en a .
- ② Si $-H_f(a) \in \mathcal{S}_p^{++}(\mathbb{R})$ (i.e. $\text{Sp}(H_f(a)) \subset]-\infty; 0[$), f atteint un maximum local en a .
- ③ Si $H_f(a)$ possède une valeur propre strictement positive et une valeur propre strictement négative, alors f n'atteint pas d'extremum en a .
- ④ **Attention** - Si 0 est valeur propre et si les autres valeurs propres sont toutes de même signe, on ne peut pas conclure sur la nature du point critique.

15.23 Existence d'extremum sur un fermé borné

Toute fonction continue $f : K \rightarrow \mathbb{R}$ avec K fermé borné de \mathbb{R}^n est bornée et atteint ses bornes.

15.24 Dans la pratique

- Sur un ouvert : on cherche les points critiques puis on analyse ce qu'il s'y passe.
- Sur un fermé borné : on cherche les éventuels points critiques à l'intérieur puis on étudie les variations de la fonction sur la frontière. On compare ensuite les extremums sur la frontière avec les valeurs de la fonction aux éventuels points critiques intérieurs.

16 Rappels et compléments d'algèbre linéaire

\mathbb{K} désigne \mathbb{R} ou \mathbb{C} .

16.1 Espaces vectoriels de référence

• \mathbb{K}^n est un espace de dimension n admettant (e_1, e_2, \dots, e_n) pour base canonique avec

$$\begin{aligned} e_1 &\stackrel{\text{déf.}}{=} (1, 0, 0, \dots, 0), \\ e_2 &\stackrel{\text{déf.}}{=} (0, 1, 0, \dots, 0), \\ &\vdots \\ e_n &\stackrel{\text{déf.}}{=} (0, 0, 0, \dots, 1). \end{aligned}$$

Pour tout $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{K}^n$, $x = x_1 e_1 + x_2 e_2 + \dots + x_n e_n = \sum_{i=1}^n x_i e_i$.

• $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ est un espace de dimension n admettant (E_1, E_2, \dots, E_n) pour base canonique avec

$$E_1 \stackrel{\text{déf.}}{=} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad E_2 \stackrel{\text{déf.}}{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad E_n \stackrel{\text{déf.}}{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Pour tout $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$, $X = x_1 E_1 + x_2 E_2 + \dots + x_n E_n = \sum_{i=1}^n x_i E_i$.

• $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K})$ est un espace de dimension np admettant $(E_{i,j})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq p}$ pour base canonique où, pour tout (i, j) , $E_{i,j}$ est la matrice dont tous les coefficients sont nuls, sauf celui situé i -ème ligne et j -ème colonne qui vaut 1.

Pour tout $M = (m_{i,j}) \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{K})$, $M = \sum_{i,j} m_{i,j} E_{i,j}$.

• $\mathbb{K}_n[\mathbf{X}]$ est un espace de dimension $n + 1$ admettant $(1, X, X^2, \dots, X^n)$ pour base canonique.

16.2 $f : E \rightarrow F$ est une application linéaire ssi :

$$\forall (u, v) \in E^2, \forall \lambda \in \mathbb{K}, f(\lambda u + v) = \lambda f(u) + f(v).$$

16.3 Soit $f : E \rightarrow F$ est une application linéaire. Le noyau de f est :

$$\text{Ker}(f) \stackrel{\text{déf.}}{=} \{u \in E / f(u) = 0_F\}.$$

16.4 Soit $f : E \rightarrow F$ est une application linéaire. L'image de f est :

$$\text{Im}(f) \stackrel{\text{déf.}}{=} \{f(u) / u \in E\} = \{v \in F / \exists u \in E \text{ tq } f(u) = v\}.$$

16.5 Détermination pratique de l'image

$f : E \rightarrow F$ est une application linéaire avec E de dimension finie n .

Soit $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base de E .

Alors $\text{Im}(f) = \text{Vect}(f(\mathcal{B})) = \text{Vect}(f(e_1), \dots, f(e_n))$.

!La famille $(f(e_1), \dots, f(e_n))$ n'est pas nécessairement libre!

16.6 Caractérisation de l'inversibilité d'une matrice

Soit $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. Il y a équivalence entre :

- | | | |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> i. M est inversible. ii. $\text{rg}(M) = n$. iii. $\det(M) \neq 0$. | | <ul style="list-style-type: none"> iv. Le système $MU = 0$ admet une unique solution ($U = 0!$). v. $\text{Ker}(M) = \{0_{\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})}\}$ |
|--|--|--|

16.7 Caractérisation des isomorphismes en dimension finie

Soit E et F de dimension finie, $f : E \rightarrow F$ est une application linéaire.

- Si $\dim E \neq \dim F$ alors f n'est pas un isomorphisme.
- Si $\dim E = \dim F$ alors il y a équivalence entre :

- | | | |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> i. f est un isomorphisme. ii. f est injective. iii. f est surjective. | | <ul style="list-style-type: none"> iv. $\text{rg}(f) = \dim F (= \dim E)$. v. $\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f)$ est inversible. vi. $\det(f) \stackrel{\text{déf.}}{=} \det(\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f)) \neq 0$. |
|--|--|---|

16.8 Soit $\mathcal{B} = (u_1, \dots, u_n)$ et $\mathcal{C} = (v_1, \dots, v_n)$ deux bases d'un espace vectoriel de dimension n . La matrice de passage de \mathcal{B} vers \mathcal{C} , notée $\mathcal{P}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}$, est

$$\mathcal{P}_{\mathcal{B},\mathcal{C}} \stackrel{\text{déf.}}{=} \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(\mathcal{C}),$$

autrement dit : les colonnes de $\mathcal{P}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}$ sont formés des coordonnées des vecteurs de \mathcal{C} dans la bases \mathcal{B} .

16.9 Passage réciproque

Soit \mathcal{B} et \mathcal{C} deux bases d'un espace vectoriel de dimension n . La matrice de passage de $\mathcal{P}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}$ est inversible, et

$$\mathcal{P}_{\mathcal{C},\mathcal{B}} = \mathcal{P}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}^{-1}$$

16.10 Formules de changement de bases

Soit \mathcal{B} et \mathcal{C} deux bases d'un espace vectoriel E de dimension finie n .

- Soit x un vecteur de E . Alors :

$$\mathcal{M}_{\mathcal{C}}(x) = \mathcal{P}_{\mathcal{C},\mathcal{B}} \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(x)$$

- Soit f un endomorphisme de E . Alors :

$$\mathcal{M}_{\mathcal{C}}(f) = \mathcal{P}_{\mathcal{C},\mathcal{B}} \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f) \mathcal{P}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}$$

16.11 Similitude

Deux matrices carrées A et B sont dites semblables s'il existe une matrice inversible P telle que

$$B = P^{-1}AP.$$

On a alors $A = (P^{-1})^{-1}BP^{-1}$, et $\forall n \in \mathbb{N}, B^n = P^{-1}A^nP$.

16.12 Trace

- La trace de $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est la somme de ses coefficients diagonaux : $\text{Tr}(A) = \sum_{i=1}^n a_{i,i}$.
- $\text{Tr} : \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{R}, A \mapsto \text{Tr}(A)$ est une forme linéaire.
- $\forall (A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})^2, \text{Tr}(AB) = \text{Tr}(BA)$
- $B = P^{-1}AP \Rightarrow \text{Tr}(B) = \text{Tr}(A)$

16.13 Somme directe de deux sous-espaces.

Soit F et G deux sous-espaces de E . Il y a équivalence entre :

i. la somme $F + G$ est directe (notée $F \oplus G$), ii. $F \cap G = \{0\}$,

iii. $\forall u \in F + G, \exists!(f, g) \in F \times G, u = f + g$,

et en dimension finie :

iv. $\dim(F + G) = \dim F + \dim G$,

v. en concaténant une base de F et une base de G on obtient une base de $F + G$.

17 Polynômes

17.1 Degré

- ① $\deg(0) = -\infty$
- ② $\deg(P + Q) \leq \max(\deg(P), \deg(Q))$ avec égalité si (mais pas seulement) $\deg(P) \neq \deg(Q)$.
- ③ $\deg(PQ) \leq \deg(P) + \deg(Q)$
- ④ $\deg(P \circ Q) = \deg(P) \deg(Q)$ si Q non nul

17.2 Formule de Leibniz

$$(PQ)^{(n)} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} P^{(k)} Q^{(n-k)}$$

17.3 Division euclidienne

Soit A un polynôme quelconque de $\mathbb{K}[X]$ et B un polynôme non nul de $\mathbb{K}[X]$.

Alors il existe deux polynômes Q et R tels que

$$A = BQ + R \quad \text{avec } \deg(R) < \deg(B).$$

17.4 Formule de Taylor et translation

$$\textcircled{1} P(X) = \sum_{k=0}^{\deg(P)} \frac{P^{(k)}(a)}{k!} (X - a)^k$$

$$\textcircled{2} P(X + a) = \sum_{k=0}^{\deg(P)} \frac{P^{(k)}(a)}{k!} X^k$$

17.5 Racines et multiplicité

Il y a équivalence entre

$\textcircled{1}$ a est une racine d'ordre de multiplicité $\mu \in \mathbb{N}^*$ de P

$\textcircled{2}$ $(X - a)^\mu$ divise P et $(X - a)^{\mu+1}$ ne divise pas P

$$\textcircled{3} \begin{cases} P(a) = 0 \\ P'(a) = 0 \\ \vdots \\ P^{(\mu-1)}(a) = 0 \end{cases} \quad \text{et } P^{(\mu)}(a) \neq 0$$

17.6 Théorème de D'Alembert-Gauß et conséquence

$\textcircled{1}$ Tout polynôme non constant de $\mathbb{C}[X]$ possède (au moins) une racine complexe.

$\textcircled{2}$ Tout polynôme de degré au plus n admettant strictement plus de n racines comptées avec leur multiplicité est nul.

17.7 Polynômes réels et racines complexes

$\textcircled{1}$ Si P est un polynôme à coefficients réels admettant une racine complexe α de multiplicité μ , alors $\bar{\alpha}$ est aussi racine de P, de même multiplicité μ .

$\textcircled{2}$ Les racines complexes d'un polynôme réel sont deux à deux conjuguées.

17.8 Polynômes irréductibles

$\textcircled{1}$ Le polynôme P de $\mathbb{K}[X]$ est dit irréductible s'il est non constant et si ses seuls diviseurs sont les polynômes constants et les polynômes de la forme λP avec $\lambda \in \mathbb{K}^*$.

$\textcircled{2}$ Autrement dit, P non constant est irréductible si, et seulement si, $P = AB$ entraîne A ou B est constant.

17.9 Caractérisation des irréductibles de $\mathbb{C}[X]$ et de $\mathbb{R}[X]$

$\textcircled{1}$ Les polynômes irréductibles de $\mathbb{C}[X]$ sont les polynômes du premier degré

$$P = aX + b = a\left(X - \frac{-b}{a}\right) \quad \text{avec } a \neq 0.$$

$\textcircled{2}$ Les polynômes irréductibles de $\mathbb{R}[X]$ sont les polynômes du premier degré

$$P = aX + b = a\left(X - \frac{-b}{a}\right) \quad \text{avec } a \neq 0$$

et les polynômes du second degré sans racines réelles

$$P = aX^2 + bX + c \quad \text{avec } b^2 - 4ac < 0.$$

17.10 Liens coefficients-racines

$\textcircled{1}$ Soit $P = \sum_{k=0}^d a_k X^k$ où $d = \deg(P) \in \mathbb{N}^*$ un polynôme **scindé** de $\mathbb{K}[X]$ c'est-à-dire

$$\text{pouvant se décomposer en } P = a_d \prod_{i=1}^r (X - \alpha_i)^{\mu_i}.$$

$$\text{Alors } \sum_{i=1}^r \alpha_i \mu_i = -\frac{a_{d-1}}{a_d} \text{ et } \prod_{i=1}^r \alpha_i^{\mu_i} = (-1)^d \frac{a_0}{a_d}.$$

$\textcircled{2}$ En particulier, les racines α et β du trinôme $X^2 - sX + p$ vérifient $\alpha + \beta = s$ et $\alpha\beta = p$.

17.11 Décomposition des polynômes dans $\mathbb{K}[X]$

$\textcircled{1}$ Tout polynôme de $\mathbb{C}[X]$ peut se factoriser

$$P(X) = \lambda \prod_{k=1}^r (X - \alpha_k)^{\mu_k}$$

où les α_k sont les racines de P, de multiplicité respective μ_k ,

λ est le coefficient dominant de P et $\sum_{k=1}^r \mu_k = \deg(P)$.

$\textcircled{2}$ Tout polynôme de $\mathbb{R}[X]$ peut se factoriser

$$P(X) = \lambda \prod_{k=1}^r (X - \alpha_k)^{\mu_k} \times \prod_{j=1}^s (X^2 + \beta_j X + \gamma_j)^{\nu_j}$$

où les α_k sont les racines de P, de multiplicité respective μ_k ,

$\beta_j^2 - 4\gamma_j < 0$ pour tout j de $\llbracket 1; s \rrbracket$, λ est le coefficient dominant de P et $\sum_{k=1}^r \mu_k +$

$$2 \sum_{j=1}^s \nu_j = \deg(P).$$

17.12 Cas de $X^n - 1$

$$X^n - 1 = \prod_{k=0}^{n-1} (X - e^{2ik\pi/n}) = \prod_{\omega \in \mathbb{U}_n} (X - \omega)$$

où $\mathbb{U}_n = \{e^{2ik\pi/n}, 0 \leq k \leq n-1\}$ est l'ensemble des racines n -ièmes de 1.

17.13 Décomposition en éléments simples

- ① On appelle fraction rationnelle $F = \frac{P}{Q}$ le quotient de P par Q , défini en tout point où Q ne s'annule pas.
- ② Les pôles de F sont les racines du polynôme Q .
- ③ On dit que le pôle a de F est simple lorsque a est une racine simple de Q .
- ④ Si Q est scindé à racines simples (donc les pôles de F sont tous simples) s'écrit $Q = \lambda \prod_{k=1}^n (X - a_k)$, alors il existe un polynôme E et n scalaires $(b_k)_{1 \leq k \leq n}$ tels que

$$F = E + \frac{b_1}{X - a_1} + \dots + \frac{b_n}{X - a_n}$$

où E s'obtient par division euclidienne de P par Q et chaque b_k s'appelle le résidu de a_k .

- ⑤ Dans le cas précédent, on peut montrer que $b_k = \frac{P(a_k)}{Q'(a_k)}$.
- ⑥ On rencontre fréquemment

$$\frac{1}{X(X+a)} = \frac{1/a}{X} - \frac{1/a}{X+a}, \quad \text{et} \quad \frac{1}{X^2 - a^2} = \frac{1/(2a)}{X-a} - \frac{1/(2a)}{X+a}$$

et notamment les cas $a = \pm 1$.

17.14 Base de Lagrange, définition

Soit $(a_i)_{0 \leq i \leq n} \in \mathbb{K}^{n+1}$ $n+1$ points deux à deux distincts de \mathbb{K} .

On appelle *base de Lagrange* associée aux points $(a_i)_{0 \leq i \leq n}$ la famille $(L_i)_{0 \leq i \leq n}$ de polynômes définie par

$$\forall i \in \llbracket 0; n \rrbracket, \quad L_i = \frac{\prod_{0 \leq k \leq n, k \neq i} (X - a_k)}{\prod_{0 \leq k \leq n, k \neq i} (a_i - a_k)} = \prod_{0 \leq k \leq n, k \neq i} \frac{X - a_k}{a_i - a_k}$$

17.15 Base de Lagrange, propriétés

- ① $\forall i \in \llbracket 0; n \rrbracket, \quad \deg(L_i) = n.$
- ② $\forall (i, j) \in \llbracket 0; n \rrbracket^2, \quad L_i(a_j) = \delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j, \\ 0 & \text{si } i \neq j. \end{cases}$

③ $(L_i)_{0 \leq i \leq n}$ est une base de $\mathbb{K}_n[X]$.

④ Soit $P \in \mathbb{K}_n[X]$. Alors $P = \sum_{i=0}^n P(a_i)L_i$

⑤ $\sum_{i=0}^n L_i = 1$, polynôme constant.

17.16 Interpolation de Lagrange

Soit $(a_i)_{0 \leq i \leq n}$ $n+1$ points deux à deux distincts de \mathbb{K} et $(b_i)_{0 \leq i \leq n}$ $n+1$ points de \mathbb{K} .

Il existe un unique polynôme L de $\mathbb{K}_n[X]$ tel que

$$\forall i \in \llbracket 0; n \rrbracket, \quad L(a_i) = b_i,$$

c'est

$$L = \sum_{i=0}^n b_i L_i.$$

18 Déterminants

18.1 Définition

$\det : \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}$ est l'unique application φ vérifiant :

- φ linéaire par rapport à chaque colonne (donc n -linéaire)
- φ antisymétrique par rapport aux colonnes
- $\varphi(I_n) = 1$.

Pour $A = (a_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, $\det(A)$ appelé déterminant de A se note

$$\det(A) = \begin{vmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,j} & \dots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i,1} & \dots & a_{i,j} & \dots & a_{i,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \dots & a_{n,j} & \dots & a_{n,n} \end{vmatrix}$$

18.2 Règles de calcul

Soit $A = (C_1 | \dots | C_n) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ et $\lambda \in \mathbb{K}$.

- ① Si une colonne de A est nulle, alors $\det(A) = 0$.
- ② La permutation de deux colonnes de A change $\det(A)$ en $-\det(A)$.
- ③ Si deux colonnes de A sont colinéaires, alors $\det(A) = 0$.
- ④ Si les colonnes de A forment une famille liée, alors $\det(A) = 0$.
- ⑤ La substitution $C_j + \lambda C_k \rightarrow C_j$ (où $j \neq k$) ne modifie pas $\det(A)$.
- ⑥ L'ajout à C_j d'une combinaison linéaire des autres colonnes de A ne modifie pas $\det(A)$.

- ⑦ La substitution $\lambda C_j \rightarrow C_j$ multiplie $\det(A)$ par λ .
- ⑧ $\det(A^T) = \det(A)$, donc les **règles** précédentes sont **valables** en travaillant **sur les lignes comme sur les colonnes**.
- ⑨ La multiplication de A par λ multiplie $\det(A)$ par λ^n .

18.3 Mineurs, cofacteurs et comatrice

- Mineur d'indice (i, j) , $M_{i,j}$ déterminant obtenu en supprimant i -ème et j -ème colonne;
- Cofacteur de $a_{i,j}$: $A_{i,j} \stackrel{\text{déf.}}{=} (-1)^{i+j} M_{i,j}$.
- Comatrice de A : $\text{com}(A) \stackrel{\text{déf.}}{=} (A_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n}$.

Développement suivant la j -ème colonne, la i -ème ligne

$$\det(A) = \sum_{k=1}^n a_{k,j} A_{k,j} = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+j} a_{k,j} M_{k,j},$$

$$\det(A) = \sum_{k=1}^n a_{i,k} A_{i,k} = \sum_{k=1}^n (-1)^{i+k} a_{i,k} M_{i,k}.$$

18.4 Matrices triangulaires, diagonales

Leur déterminant est le produit de leurs coefficients diagonaux.

18.5 Déterminant d'une matrice triangulaire par blocs

$$\text{Si } A = \begin{pmatrix} A_1 & * & \dots & * \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & * \\ 0 & \dots & 0 & A_n \end{pmatrix}, \text{ alors } \det(A) = \det(A_1) \dots \det(A_n)$$

(où A_1, \dots, A_n sont n matrices carrées).

18.6 Propriétés théoriques

- ① $\det(A^T) = \det(A)$,
- ② $\det(AB) = \det(A) \det(B)$,
- ③ $A \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{K}) \iff \det(A) \neq 0$, et dans ce cas : $\det(A^{-1}) = \frac{1}{\det(A)}$.
- ④ Invariance par similitude :
 $\forall A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}), \forall P \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{K}), \det(P^{-1}AP) = \det(A)$.
- ⑤ Conséquence : pour $f \in \mathcal{L}(E)$ (avec $\dim E < +\infty$), $\det(f) = \det(\mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f))$ pour n'importe quelle base \mathcal{B} de E .
- ⑥ $f \in \mathcal{GL}(E) \iff \det(f) \neq 0$.

18.7 Déterminant tridiagonal - (À savoir refaire)

$$D_n(a, b, c) = \begin{vmatrix} a & b & 0 & \dots & 0 \\ c & a & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & a & b \\ 0 & \dots & 0 & c & a \end{vmatrix}_n \quad (\text{où } n \geq 3),$$

$$\text{avec } D_1(a, b, c) = |a|_1, \quad D_2(a, b, c) = \begin{vmatrix} a & b \\ c & a \end{vmatrix}_2$$

se calcule en développant par rapport à première colonne, puis la première ligne : on obtient la relation de récurrence linéaire d'ordre deux :

$$D_n(a, b, c) = aD_{n-1}(a, b, c) - bcD_{n-2}(a, b, c).$$

18.8 Déterminant de Vandermonde -

Soit $(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{K}^n$.

$$V(a_1, \dots, a_n) \stackrel{\text{déf.}}{=} \det \left((a_i^{j-1}) \right) = \begin{vmatrix} 1 & a_1 & a_1^2 & \dots & a_1^{n-1} \\ 1 & a_2 & a_2^2 & \dots & a_2^{n-1} \\ 1 & a_3 & a_3^2 & \dots & a_3^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & a_n & a_n^2 & \dots & a_n^{n-1} \end{vmatrix}.$$

$V(a_1) = 1$, et,

$$\forall n \geq 2, V(a_1, \dots, a_n) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (a_j - a_i) = \prod_{j=2}^n \prod_{i=1}^{j-1} (a_j - a_i).$$

19 Réduction des endomorphismes, diagonalisation des matrices carrées

- 19.1 • $\lambda \in \mathbb{K}$ est une **valeur propre de l'endomorphisme** $f \in \mathcal{L}(E)$ ssi $\exists u \in E, u \neq 0$ tel que $f(u) = \lambda u$.
- $u \in E$ est un **vecteur propre de l'endomorphisme** $f \in \mathcal{L}(E)$ ssi $u \neq 0$ et $\exists \lambda \in \mathbb{K}$ tel que $f(u) = \lambda u$.
- Le **spectre** de f noté $\text{Sp}(f)$ est l'ensemble des ses valeurs propres.
- Le sous-espace propre de f associé à la valeur propre λ de f est $E_\lambda = \text{SEP}(f, \lambda) = \{u \in E / f(u) = \lambda u\} = \text{Ker}(f - \lambda \text{id}_E)$.
- 19.2 • $\lambda \in \mathbb{K}$ est une **valeur propre de la matrice** $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ ssi

$\exists U \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K}), U \neq 0$ tel que $MU = \lambda U$.

- $U \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ est un **vecteur propre de la matrice** (parfois appelée colonne propre) $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ ssi

$U \neq 0$ et $\exists \lambda \in \mathbb{K}$ tel que $MU = \lambda U$.

- Le **spectre** de M noté $\text{Sp}(M)$ est l'ensemble des ses valeurs propres.

- Le sous-espace propre de M associé à la valeur propre λ de M est

$$E_\lambda = \text{SEP}(M, \lambda) = \{U \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K}) / MU = \lambda U\} = \text{Ker}(M - \lambda I_n).$$

19.3 Le **polynôme caractéristique de l'endomorphisme** $f \in \mathcal{L}(E)$ est le polynôme $\chi_f(X) = \det(Xid_E - f)$.

- On a, pour E de dimension n , $\chi_f(X) = X^n - \text{Tr}(f)X^{n-1} + \dots + (-1)^n \det(f)$.

19.4 Le **polynôme caractéristique de la matrice** $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est le polynôme $\chi_M(X) = \det(XI_n - M)$.

- On a, pour $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, $\chi_M(X) = X^n - \text{Tr}(M)X^{n-1} + \dots + (-1)^n \det(M)$.

19.5 **Cas particulier des matrices triangulaires**

- Les valeurs propres d'une matrice triangulaire (inférieure ou supérieure) $T = (t_{i,j}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ sont ses coefficients diagonaux :

$$\text{Sp}(T) = \{t_{i,i} / i \in \llbracket 1; n \rrbracket\}.$$

- Son polynôme caractéristique est alors $\chi_T(X) = \prod_{i=1}^n (X - t_{i,i})$.

19.6 **Caractérisation des valeurs propres** d'un endomorphisme

Il y a équivalence entre :

- $\lambda \in \text{Sp}(f)$
- $\text{Ker}(f - \lambda id_E) \neq \{0\}$
- $\text{rg}(f - \lambda id_E) < \dim(E)$
- $\chi_f(\lambda) = 0$ (λ est une racine du polynôme caractéristique de f).

19.7 **Caractérisation des valeurs propres** d'une matrice d'ordre n

Il y a équivalence entre :

- $\lambda \in \text{Sp}(M)$
- $M - \lambda I_n$ n'est pas inversible
- $\text{rg}(M - \lambda I_n) < n$
- $\chi_M(\lambda) = 0$ (λ est une racine du polynôme caractéristique de M).

19.8 **Multiplicité d'une valeur propre**

On appelle multiplicité de la valeur propre λ notée $\mu(\lambda)$ l'ordre de multiplicité de λ en tant que racine du polynôme caractéristique.

19.9 **Polynômes et éléments propres**

① Soit $\varphi \in \mathcal{L}(E)$ et $(\lambda, u) \in \mathbb{K} \times E$ tels que $\varphi(u) = \lambda u$. Alors :

- (i) $\forall k \in \mathbb{N}, \varphi^k(u) = \lambda^k u$,

(ii) $\forall P \in \mathbb{K}[X], P(\varphi)(u) = P(\lambda)u$. [Remarque : $P(\varphi) \in \mathcal{L}(E), P(\lambda) \in \mathbb{K}$]

② Soit $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ et $(\lambda, U) \in \mathbb{K} \times \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ tels que $MU = \lambda U$. Alors :

(i) $\forall k \in \mathbb{N}, M^k U = \lambda^k U$,

(ii) $\forall P \in \mathbb{K}[X], P(M)U = P(\lambda)U$. [Remarque : $P(M) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K}), P(\lambda) \in \mathbb{K}$]

19.10 **Polynômes annulateurs et valeurs propres**

① Soit $P \in \mathbb{K}[X]$ un polynôme annulateur de $\varphi \in \mathcal{L}(E)$. Alors les valeurs propres de φ sont parmi les racines de P .

② Soit $P \in \mathbb{K}[X]$ un polynôme annulateur de $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. Alors les valeurs propres de M sont parmi les racines de P .

19.11 **Théorème de Cayley-Hamilton**

① Soit $\varphi \in \mathcal{L}(E)$. Alors $\chi_\varphi(\varphi) = 0_{\mathcal{L}(E)}$.

② Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. Alors $\chi_A(A) = 0_n$.

19.12 **À propos des sous-espace propre** version endomorphisme

- Des SEP associés à des valeurs propres distinctes sont en somme directe.
- Si $\lambda \in \text{Sp}(f)$, alors $\dim \text{SEP}(f, \lambda) = \dim E - \text{rg}(f - \lambda id_E)$.
- Si $\lambda \in \text{Sp}(f)$, alors $1 \leq \dim \text{SEP}(f, \lambda) \leq \mu(\lambda)$.

19.13 **À propos des sous-espace propre** version matrice

- Des SEP associés à des valeurs propres distinctes sont en somme directe.
- Si $\lambda \in \text{Sp}(M)$, alors $\dim \text{SEP}(M, \lambda) = \dim E - \text{rg}(M - \lambda I_n)$.
- Si $\lambda \in \text{Sp}(M)$, alors $1 \leq \dim \text{SEP}(M, \lambda) \leq \mu(\lambda)$.

19.14 **Condition suffisante de diagonalisabilité**

- Soit E un espace vectoriel de dimension finie n .

Soit f un endomorphisme de E . Si $\text{Card}(\text{Sp}(f)) = \dim(E)$, alors f est diagonalisable et ses n sous-espaces propres sont de dimension 1.

• Soit $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. Si $\text{Card}(\text{Sp}(M)) = n$, alors M est diagonalisable et ses n sous-espaces propres sont de dimension 1.

- Si χ_f (resp. χ_M) est scindé à racines simples, alors f (resp. M) est diagonalisable.

19.15 **Théorème général de diagonalisabilité** version endomorphisme

Soit E un espace vectoriel de dimension finie.

Soit f un endomorphisme de E . Il y a équivalence entre :

- f est diagonalisable ;
- il existe une base de E formée de vecteurs propres de f ;
- les sous-espaces propres de f sont supplémentaires dans E ;
- $\sum_{\lambda \in \text{Sp}(f)} \dim(E_\lambda) = \dim(E)$;
- χ_f est scindé sur \mathbb{K} et : $\forall \lambda \in \text{Sp}(f), \dim E_\lambda = \mu(\lambda)$;
- il existe un polynôme scindé à racines simple annulateur de f .

19.16 **Théorème général de diagonalisabilité** version matrice

Soit M une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. Il y a équivalence entre :

- M est diagonalisable ;
- il existe une base de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$ formée de colonnes propres de M ;
- les sous-espaces propres de M sont supplémentaires dans $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{K})$;
- $\sum_{\lambda \in \text{Sp}(M)} \dim(E_\lambda) = n$;
- χ_M est scindé sur \mathbb{K} et : $\forall \lambda \in \text{Sp}(M), \dim E_\lambda = \mu(\lambda)$;
- il existe un polynôme scindé à racines simple annulateur de M .

19.17 La matrice $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ est dite **trigonalisable** si elle est semblable à une matrice triangulaire.

- M est trigonalisable si, et seulement si, son polynôme caractéristique est scindé.
- Toute matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ est trigonalisable.

19.18 Un endomorphisme φ de E est dit **trigonalisable** s'il existe une base de E dans laquelle la matrice représentant φ est triangulaire.

- φ est trigonalisable si, et seulement si, son polynôme caractéristique est scindé.
- Dans un \mathbb{C} -espace vectoriel (de dimension finie) tout endomorphisme est trigonalisable.

20 Espaces préhilbertiens réels, espaces euclidiens

E désigne un \mathbb{R} -espace vectoriel, muni d'un produit scalaire à partir de 3.

20.1 **Produit scalaire & norme euclidienne associée**

Un *produit scalaire* $\langle \cdot, \cdot \rangle : E \times E \rightarrow \mathbb{R}, (u, v) \mapsto \langle u, v \rangle$ est une forme bilinéaire symétrique définie positive, c'est-à-dire vérifiant :

- φ est *linéaire à gauche* :
 $\forall (u, v, w) \in E^3, \forall \lambda \in \mathbb{R}, \varphi(\lambda u + v, w) = \lambda \varphi(u, w) + \varphi(v, w)$;
- φ est *symétrique* :
 $\forall (u, v) \in E^2, \varphi(u, v) = \varphi(v, u)$;
 1. et 2. prouvent que φ est *bilinéaire symétrique* (opéatoirement parlant $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est *distributif et commutatif*).
- φ est *positive* :
 $\forall u \in E, \varphi(u, u) \geq 0$;
- φ est *définie* :
 $\forall u \in E, (\varphi(u, u) = 0 \implies u = 0)$;
 3. et 4. prouvent que φ est *définie positive*.

La *norme euclidienne* associée est

$$\| \cdot \| : E \rightarrow \mathbb{R}, u \mapsto \sqrt{\langle u, u \rangle}.$$

20.2 **Produits scalaires usuels**

☞ Canonique sur \mathbb{R}^n : $\langle (x_1, \dots, x_n), (y_1, \dots, y_n) \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i$,

de norme associée : $\| (x_1, \dots, x_n) \| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$.

Pour ce produit scalaire, la base canonique de \mathbb{R}^n est orthonormale.

☞ Canonique sur $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$: $\langle X, Y \rangle = X^T \cdot Y = \sum_{i=1}^n x_i y_i$

(noter que $X^T Y \in \mathcal{M}_1(\mathbb{R})$ et on identifie $\mathcal{M}_1(\mathbb{R})$ à \mathbb{R})

de norme associée : $\| X \| = \sqrt{X^T \cdot X} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$.

Pour ce produit scalaire, la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ est orthonormale.

☞ Canonique sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$: $\langle A, B \rangle = \text{Tr}(A^T \cdot B) = \sum_{1 \leq i, j \leq n} a_{i,j} b_{i,j}$

de norme associée : $\| A \| = \sqrt{\text{Tr}(A^T \cdot B)} = \sqrt{\sum_{1 \leq i, j \leq n} a_{i,j}^2}$.

Pour ce produit scalaire, la base canonique de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est orthonormale.

☞ Sur $\mathcal{C}([a; b], \mathbb{R})$: $\langle f, g \rangle = \int_a^b f(t)g(t)dt$ définit un produit scalaire.

20.3 **Identités remarquables...** *le p.s. est commutatif et distributif*

$$\forall (u, v) \in E^2, \|u + v\|^2 = \|u\|^2 + 2 \langle u, v \rangle + \|v\|^2 ;$$

$$\forall (u, v) \in E^2, \langle u, v \rangle = \frac{1}{2} (\|u + v\|^2 - \|u\|^2 - \|v\|^2).$$

$$\forall (u, v) \in E^2, \langle u, v \rangle = \frac{1}{4} (\|u + v\|^2 - \|u - v\|^2).$$

20.4 **Théorème de Pythagore**

• $u \perp v \iff \|u + v\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2$.

• Si la famille $(u_i)_{1 \leq i \leq n}$ est orthogonale, alors $\left\| \sum_{i=1}^n u_i \right\|^2 = \sum_{i=1}^n \|u_i\|^2$.

20.5 **Inégalité de Cauchy-Schwarz**

$$\forall (u, v) \in E^2, |\langle u, v \rangle| \leq \|u\| \|v\|,$$

avec égalité si, et seulement si, u et v sont colinéaires.

On utilise souvent cette inégalité en l'élevant au carré (évitant les $|\cdot|$ et $\sqrt{\cdot}$) :

$$\forall (u, v) \in E^2, \langle u, v \rangle^2 \leq \|u\|^2 \|v\|^2.$$

20.6 Inégalité triangulaire

$$\forall (u, v) \in E^2, \|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|,$$

avec égalité si, et seulement si, u et v sont colinéaires *de même sens*, c'est-à-dire :

$$\exists k \in [0; +\infty[, v = ku \text{ ou } u = kv.$$

20.7 Vecteurs, familles, sous-espaces orthogonaux

① Par définition : $u \perp v \iff \langle u, v \rangle = 0$.

② La famille (u_1, \dots, u_p) est orthogonale si ses vecteurs sont deux à deux orthogonaux.

③ La famille (u_1, \dots, u_p) est orthonormale si ses vecteurs sont unitaires et deux à deux orthogonaux.

Autrement dit :

$$(u_1, \dots, u_p) \text{ est orthonormale ssi } \forall (i, j) \in \llbracket 1; p \rrbracket^2, \langle u_i, u_j \rangle = \delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

④ Les sous-espaces F et G de E sont orthogonaux si

$$\forall (u, v) \in F \times G, u \perp v = 0.$$

20.8 Orthogonal d'un sous-espace

Soit F un sous-espace de E . On appelle *orthogonal de F* , noté F^\perp , l'ensemble

$$F^\perp \stackrel{\text{déf.}}{=} \{u \in E \mid \forall v \in F, u \perp v\}.$$

F^\perp est toujours un sous-espace vectoriel de E .

20.9 Liberté des familles orthogonales et orthonormales

① Toute famille orthogonale de vecteurs *tous non nuls* est libre.

② Toute famille orthonormale de vecteurs est libre.

20.10 Caractérisation de l'orthogonalité de sous-espaces

Soit $F = \text{Vect}(u_1, \dots, u_p)$ et $G = \text{Vect}(v_1, \dots, v_q)$. Alors

$$F \perp G \text{ si, et seulement si, } \forall (i, j) \in \llbracket 1; p \rrbracket \times \llbracket 1; q \rrbracket, u_i \perp v_j.$$

20.11 Procédé d'orthonormalisation de Gram-Schmidt

Soit (u_1, \dots, u_p) une famille libre de vecteurs. On pose :

$$\textcircled{1} e_1 = \frac{u_1}{\|u_1\|};$$

$$u_k - \sum_{i=1}^{k-1} \langle u_k, e_i \rangle e_i$$

$$\textcircled{2} \text{ successivement pour tout } k \in \llbracket 2; p \rrbracket, e_k = \frac{u_k - \sum_{i=1}^{k-1} \langle u_k, e_i \rangle e_i}{\left\| u_k - \sum_{i=1}^{k-1} \langle u_k, e_i \rangle e_i \right\|}.$$

Alors

① la famille (e_1, \dots, e_p) est orthonormale,

② $\forall k \in \llbracket 1; p \rrbracket, \text{Vect}(u_1, \dots, u_k) = \text{Vect}(e_1, \dots, e_k)$.

20.12 Espace euclidien

On appelle *espace euclidien* tout \mathbb{R} -espace vectoriel de *dimension finie* muni d'un produit scalaire.

20.13 Existence et intérêt des bases orthonormales

① Dans tout espace euclidien, il existe des bases orthonormales.

② Soit $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base orthonormale d'un espace euclidien E . Alors :

• *coordonnées et norme d'un vecteur* :

$$\forall x \in E, x = \sum_{i=1}^n \langle x, e_i \rangle e_i \text{ et } \|x\|^2 = \sum_{i=1}^n \langle x, e_i \rangle^2.$$

• *produit scalaire de deux vecteurs*

$$\langle x, y \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i = \sum_{i=1}^n \langle x, e_i \rangle \langle y, e_i \rangle,$$

$$\langle x, y \rangle = X^T Y \text{ et } \|x\| = \sqrt{X^T X} \text{ si } X = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(x) \text{ et } Y = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(y).$$

• *matrice d'un endomorphisme*

Soit $f \in \mathcal{L}(E)$ et $M = (m_{i,j}) = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f)$. Alors :

$$\forall (i, j) \in \llbracket 1; n \rrbracket, m_{i,j} = \langle f(e_j), e_i \rangle.$$

20.14 LE supplémentaire orthogonal d'un sous-espace

Pour tout sous-espace vectoriel F d'un espace euclidien, F^\perp , appelé *supplémentaire orthogonal de F* , est caractérisé par les propriétés *équivalentes* suivantes :

① $F \oplus F^\perp = E$ et $F \perp F^\perp$;

② $F \perp F^\perp$ et $\dim(F^\perp) = \dim(E) - \dim(F)$;

③ pour tout sous-espace G de E , on a : $G \perp F \iff G \subset F^\perp$;

④ en concaténant une base orthogonale de F et une base orthogonale de F^\perp , j'obtiens une base orthogonale de E .

20.15 Les supplémentaires orthogonaux vont par paire

$$(F^\perp)^\perp = F, \text{ ou encore : } (G = F^\perp) \iff (F = G^\perp).$$

20.16 Projection orthogonale

Soit F sous-espace vectoriel de l'espace euclidien E . La projection orthogonale sur F notée p_F est la projection sur F dans la direction de (ou parallèlement à) F^\perp .

En conséquence des propriétés générales des projecteurs :

$$\text{Im}(p_F) = \text{SEP}(p_F, 1) = F \text{ et } \text{Ker}(p_F) = \text{SEP}(p_F, 0) = F^\perp.$$

20.17 Calcul du projeté orthogonal d'un vecteur

Soit p_F la projection orthogonale sur $F \subset E$. On a :

$$\textcircled{1} v = p_F(u) \iff \begin{cases} v \in F \\ v - u \in F^\perp \end{cases}$$

② pour toute base orthonormale (e_1, \dots, e_m) de F , $p_F(u) = \sum_{i=1}^m \langle u, e_i \rangle e_i$.

20.18 Inégalité de Bessel

$$\forall u \in E, \quad \|p_F(u)\| \leq \|u\|.$$

20.19 Meilleure approximation en norme

Soit F un sous-espace vectoriel d'un espace euclidien E . Soit u un vecteur de E . Alors $\min_{v \in F} \|u - v\|$ existe et est atteint uniquement pour $v = p_F(u)$:

$$\forall v \in F, \quad (v = p_F(u) \iff \|u - v\| = \min_{w \in F} \|u - w\|)$$

20.20 Distance d'un vecteur à un sous-espace

Soit F un sous-espace vectoriel d'un espace euclidien E . Soit u un vecteur de E . Alors la distance de u à F , notée $d(u, F)$ est définie par

$$d(u, F) = \min_{v \in F} \|u - v\| = \|u - p_F(u)\|.$$

21 Isométries vectorielles, automorphisme orthogonal et matrices orthogonales

E désigne un espace euclidien.

21.1 Isométries vectorielles et automorphismes orthogonaux

$f \in \mathcal{L}(E)$ est une isométrie vectorielle ou un automorphisme orthogonal si : $\forall u \in E, \|f(u)\| = \|u\|$. On note $O(E)$ l'ensemble des endomorphismes orthogonaux, appelé groupe orthogonal de E .

21.2 Caractérisation

Soit $f \in \mathcal{L}(E)$. Les propriétés suivantes sont équivalentes :

- $f \in O(E)$ i.e. f conserve la norme ;
- $\forall (u, v) \in E^2, \langle f(u), f(v) \rangle = \langle u, v \rangle$, i.e. f conserve le produit scalaire ;
- f transforme une base orthonormale en une base orthonormale ;
- f transforme toute base orthonormale en toute base orthonormale.

21.3 Propriété du groupe orthogonal

- Si $f \in O(E)$, alors f est bijective et $f^{-1} \in O(E)$ (donc $O(E) \subset \mathcal{GL}(E)$).
- Si $f, g \in O(E)$ alors $f \circ g \in O(E)$.

21.4 Valeurs propres et sous-espaces stables d'une isométrie vectorielle

- $(f \in O(E) \text{ et } \lambda \in \text{Sp}(f)) \Rightarrow |\lambda| = 1$.
- Si $f \in O(E)$ et F est un sous-espace stable par f alors F^\perp est stable par f . De plus, dans une base adaptée à $E = F \oplus F^\perp$, la matrice représentant f est diagonale par blocs.

21.5 Matrice orthogonale

Une matrice $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est dite orthogonale si $M^T M = I_n$, autrement si M est inversible et $M^{-1} = M^T$.

21.6 Groupe orthogonal $O_n(\mathbb{R})$

L'ensemble des matrices orthogonales forment le *groupe orthogonal* de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, noté $O_n(\mathbb{R})$.

- $M \in O_n(\mathbb{R}) \Rightarrow M^{-1} \in O_n(\mathbb{R})$.
- $M \in O_n(\mathbb{R}) \Rightarrow \det(M) = \pm 1$.

21.7 Changements de bases orthonormales

Soit \mathcal{B} et \mathcal{C} deux bases orthonormales d'un espace euclidien E . Alors la matrice de passage de \mathcal{B} à \mathcal{C} est orthogonale.

21.8 Caractérisation des matrices orthogonales, lien avec les isométries vectorielles

Soit \mathcal{B} une base orthonormale de l'espace euclidien E de dimension n . Soit $f \in \mathcal{L}(E)$ et $M = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f)$.

Il y a équivalence entre :

- ① $M \in O_n(\mathbb{R})$ (i.e. $M^T M = I_n$) ;
- ② $f \in O(E)$;
- ③ les colonnes de M forment une base orthonormale de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ pour le produit scalaire canonique ;
- ④ M est une matrice de passage entre deux bases orthonormales.

21.9 Déterminant d'une isométrie vectorielle

Si $f \in O(E)$ alors $\det(f) = \pm 1$.

21.10 Groupe spécial orthogonal $SO_n(\mathbb{R})$, groupe des isométries directes $SO(E)$

Le groupe spécial orthogonal est $SO_n(\mathbb{R}) = \{M \in O_n(\mathbb{R}), \det(M) = 1\}$.

Le groupe des isométries directes est $SO(E) = \{f \in O(E), \det(f) = 1\}$.

21.11 Orientation et bases orthonormées

- Deux B.O.N. \mathcal{B} et \mathcal{B}' définissent la même orientation

si, et seulement si, $P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} \in \mathcal{SO}_n(\mathbb{R})$

si, et seulement si $\det(P_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}) = 1$.

- Deux B.O.N. \mathcal{B} et \mathcal{B}' définissent la même orientation si, et seulement si, les applications $\det_{\mathcal{B}} : \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ et $\det_{\mathcal{B}'} : \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ coïncident.

21.12 Orientation d'un espace euclidien

Pour orienter E ,

– on choisit une B.O.N. de référence \mathcal{B} ;

– alors toute B.O.N. \mathcal{B}' est dite *directe* si elle définit la même orientation que \mathcal{B} , *indirecte* sinon.

21.13 Base orthonormale directe/indirecte

Soit E orienté par une B.O.N. \mathcal{B} . Soit \mathcal{B}' une B.O.N. et P la matrice de passage de \mathcal{B} à \mathcal{B}' . On a déjà $P \in O_n(\mathbb{R})$.

- \mathcal{B}' est une B.O.N. directe ssi $P \in \mathcal{SO}_n(\mathbb{R})$ ssi $\det(P) = 1$;
- \mathcal{B}' est une B.O.N. indirecte ssi $P \notin \mathcal{SO}_n(\mathbb{R})$ ssi $\det(P) = -1$.

21.14 **Orientation canonique de \mathbb{R}^n**

L'orientation canonique de \mathbb{R}^n est celle définie par la base canonique.

22 Endomorphismes autoadjoints, matrices symétriques

E désigne un espace euclidien.

22.1 **Endomorphismes autoadjoints**

Un endomorphisme φ d'un espace euclidien est un *endomorphisme autoadjoint* (ou *symétrique*) si :

$$\forall (x, y) \in E^2, \quad (\varphi(x) | y) = (x | \varphi(y)).$$

On note $\mathcal{S}(E)$ l'ensemble des endomorphismes symétriques de E.

22.2 **Structure de $\mathcal{S}(E)$**

L'ensemble $\mathcal{S}(E)$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{L}(E)$.

22.3 **Projections orthogonales, symétries orthogonales**

Les projections orthogonales et les symétries orthogonales sont des endomorphismes autoadjoints.

22.4 **Caractérisation matricielle**

- Soit \mathcal{B} une BASE ORTHONOMALE de E. $\varphi \in \mathcal{L}(E)$ est un endomorphisme autoadjoint si, et seulement si, $mat_{\mathcal{B}}(\varphi)$ est symétrique.

- Soit \mathcal{B} une base orthonormale de E.

Alors $\varphi : \mathcal{S}(E) \rightarrow \mathcal{S}_n(\mathbb{R}), f \mapsto \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f)$ est un isomorphisme.

- Soit $n = \dim(E)$. Alors $\dim(\mathcal{S}(E)) = \dim(\mathcal{S}_n(\mathbb{R})) = \frac{n(n+1)}{2}$.

22.5 **Éléments propres des endomorphismes autoadjoint et des matrices symétriques réelles**

Soit f un endomorphisme autoadjoint de E, respectivement M une matrice symétrique réelle.

- ① Les vecteurs propres associés à des valeurs propres distinctes sont orthogonaux.
- ② Les sous-espaces propres associés à des valeurs propres distinctes sont orthogonaux.
- ③ Toutes les valeurs propres sont réelles, donc le polynôme caractéristique est scindé sur \mathbb{R} .

22.6 **Théorème spectral pour les endomorphismes autoadjoints**

Tout endomorphisme autoadjoint f de l'espace euclidien E est diagonalisable.

De plus, ses sous-espaces propres sont supplémentaires et orthogonaux, et il existe une base orthonormale de E formée de vecteurs propres de f (obtenue par exemple en concaténant des bases orthonormales des sous-espaces propres).

22.7 **Théorème spectral pour les matrices symétriques réelles**

Toute matrice symétrique réelle de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est diagonalisable. De plus, ses sous-espaces propres sont supplémentaires et orthogonaux, et :

$$\exists P \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R}), \quad P^T M P \text{ est diagonale.}$$

N.B. : $P^T = P^{-1}$:-)

22.8 **Caractérisation des projecteurs orthogonaux ou symétries orthogonales**

Soit f un endomorphisme d'un espace euclidien E, muni d'une BASE ORTHONOMALE \mathcal{B} . Soit $M = \mathcal{M}_{\mathcal{B}}(f)$.

- Il y a équivalence entre :

- ① f est un projecteur orthogonal de E,
- ② $f^2 = f$ et $f \in \mathcal{S}(E)$,
- ③ $M^2 = M$ et $M^T = M$.

- Il y a équivalence entre :

- ① f est une symétrie orthogonale de E,
- ② $f^2 = id_E$ et $f \in \mathcal{S}(E)$,
- ③ $M^2 = I_n$ et $M^T = M$.

23 Matrices et endomorphismes symétriques positifs, définis positifs

E désigne un espace euclidien.

23.1 **Développement à maîtriser**

Avec $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$ et $M = (m_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n}$, on a

$$X^T M Y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{i,j} x_i y_j$$

23.2 **Matrices symétriques positives, définies positives** Soit $M \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.

- ① M est positive si, et seulement si, $\forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}), \quad X^T M X \geq 0$;
- ② M est définie positive si, et seulement si, $\forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}) \setminus \{0\}, \quad X^T M X > 0$.

23.3 Notation

L'ensemble des matrices symétriques positives (respectivement définies positives) de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ se note $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ (respectivement $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$).

23.4 Caractérisation spectrale

Soit $M \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.

① $M \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R}) \iff \text{Sp}(M) \subset [0; +\infty[;$ ② $M \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R}) \iff \text{Sp}(M) \subset]0; +\infty[.$

23.5 Endomorphismes autoadjoints positifs, définis positifs

Soit $\varphi \in \mathcal{S}(E)$. On dit que :

- ① φ est positif si, et seulement si, $\forall x \in E, (\varphi(x) | x) \geq 0;$
- ② φ est défini positif si, et seulement si, $\forall x \in E \setminus \{0\}, (\varphi(x) | x) > 0.$

23.6 Notation

L'ensemble des endomorphismes autoadjoints positifs (respectivement définis positifs) de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ se note $\mathcal{S}^+(E)$ (respectivement $\mathcal{S}^{++}(E)$).

23.7 Caractérisation spectrale Soit $\varphi \in \mathcal{S}(E)$.

- ① $\varphi \in \mathcal{S}^+(E) \iff \text{Sp}(\varphi) \subset [0; +\infty[;$
- ② $\varphi \in \mathcal{S}^{++}(E) \iff \text{Sp}(\varphi) \subset]0; +\infty[.$

24 Probabilités discrètes

24.1 Dénombrabilité

Un ensemble E est *dénombrable* s'il existe une bijection entre E et \mathbb{N} . Un ensemble est *au plus dénombrable* s'il est fini ou dénombrable.

24.2 Exemples

- (i) \mathbb{N} et \mathbb{Z} sont dénombrables, Toute partie de \mathbb{N} ou \mathbb{Z} est au plus dénombrable.
- (ii) Tout ensemble pouvant s'écrire $\{x_i/i \in I\}$ avec $I \subset \mathbb{N}$ est au plus dénombrable.

24.3 Produit cartésien et réunion d'ensembles dénombrables

Le produit cartésien et la réunion de deux ensembles dénombrables est dénombrable.

24.4 Tribu, espace probabilisable

On appelle *tribu* \mathcal{T} sur Ω tout sous-ensemble de $\mathcal{P}(\Omega)$ vérifiant :

- ① $\emptyset \in \mathcal{T};$
- ② Si $A \in \mathcal{T}$ alors $\bar{A} = \Omega \setminus A \in \mathcal{T};$
- ③ pour toute suite dénombrable $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ d'éléments de \mathcal{T} , la réunion $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$ appartient à $\mathcal{T}.$

Tout couple (Ω, \mathcal{T}) où \mathcal{T} est une tribu de Ω est un *espace probabilisable*, tout élément de \mathcal{T} est un événement.

24.5 Propriétés d'une tribu

Soit \mathcal{T} une tribu sur Ω .

- (i) $\Omega \in \mathcal{T};$
- (ii) pour toute suite dénombrable $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ d'éléments de \mathcal{T} , l'intersection $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n$ appartient à $\mathcal{T}.$
- (iii) $(A, B) \in \mathcal{T}^2 \Rightarrow A \cap \bar{B} = A \setminus B \in \mathcal{T}.$

24.6 Vocabulaire de la modélisation

Soit (Ω, \mathcal{T}) un espace probabilisable.

- (a) Ω : univers des possibles, ensemble des résultats possibles de l'expérience ;
- (b) $A \in \mathcal{T}$: événement ;
- (c) Réalisation d'un événement A : l'événement A est *réalisé* si le résultat ω de l'expérience appartient à A ;
- (d) $\bar{A} = \Omega \setminus A$: contraire de A ;
- (e) Ω : événement certain ;
- (f) \emptyset : événement impossible ;
- (g) $A \cap B$: et, « A et B se réalisent simultanément » ;
- (h) $A \cup B$: ou inclusif, « A ou/et B se réalise » ;
- (i) $\bigcup_{n \geq n_0} A_n$: « l'un (au moins) des événements A_n se réalise », ou encore « il existe $n \geq n_0$ tel que A_n se réalise » ;
- (j) $\bigcap_{n \geq n_0} A_n$: « tous les événements A_n se réalisent », ou encore « pour tout $n \geq n_0$, A_n se réalise » ;
- (k) $A \setminus B = A \cap \bar{B}$: « A se réalise mais pas B » ;
- (l) $A \cap B = \emptyset$: A et B sont incompatibles ;
- (m) $A \subset B$: « A entraîne B », i.e. la réalisation de A entraîne celle de B ;
- (n) si $\mathbb{P}(A) = 1$ alors A est **presque-sûr** (ou presque-certain) ;
- (o) si $\mathbb{P}(A) = 0$ alors A est **négligeable** (ou presque-impossible).

24.7 Probabilité, espace probabilisé

Soit (Ω, \mathcal{T}) un espace probabilisable. Une probabilité \mathbb{P} est une application $\mathbb{P} : \mathcal{T} \mapsto [0; 1]$ telle que :

- (i) $\mathbb{P}(\Omega) = 1$ (*axiome de certitude*);
- (ii) Pour toute suite $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ d'événements *deux à deux* incompatibles, la série $\sum_{n \geq 0} \mathbb{P}(A_n)$ converge et :

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n=0}^{+\infty} \mathbb{P}(A_n) \quad (\sigma\text{-additivité})$$

Le triplet $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ est un *espace probabilisé*.

24.8 Propriété d'une probabilité

Soit $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ un espace probabilisé. A et B désignent des événements $((A, B) \in \mathcal{T}^2)$.

(i) Si $A = \{\omega_i \in \Omega / i \in I \subset \mathbb{N}\}$, alors $\mathbb{P}(A) = \sum_{i \in I} \mathbb{P}(\{\omega_i\})$.

(ii) $\mathbb{P}(\bar{A}) = 1 - \mathbb{P}(A)$.

(iii) $A \cap B = \emptyset \Rightarrow \mathbb{P}(A \cup B) = \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B)$.

(iv) $\mathbb{P}(A \cup B) = \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B) - \mathbb{P}(A \cap B)$.

(v) $A \subset B \Rightarrow \mathbb{P}(A) \leq \mathbb{P}(B)$ (*croissance de la probabilité*).

(vi) $A \subset B \Rightarrow \mathbb{P}(B \setminus A) = \mathbb{P}(B) - \mathbb{P}(A)$.

24.9 Continuité monotone

Soit $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ un espace probabilisé.

(i) Soit $(A_n)_{n \geq n_0}$ une suite croissante d'événements, i.e. telle que :

$$\forall n \geq n_0, \quad A_n \subset A_{n+1}.$$

Alors :

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{n \geq n_0} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbb{P}(A_n).$$

(i) Soit $(A_n)_{n \geq n_0}$ une suite décroissante d'événements, i.e. telle que :

$$\forall n \geq n_0, \quad A_{n+1} \subset A_n.$$

Alors :

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{n \geq n_0} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbb{P}(A_n).$$

24.10 Sous-additivité

Soit $(A_n)_{n \geq n_0}$ une suite d'événements telle que $\sum_{n \geq n_0} \mathbb{P}(A_n)$ converge.

Alors : $\mathbb{P}\left(\bigcup_{n \geq n_0} A_n\right) \leq \sum_{n=0}^{+\infty} \mathbb{P}(A_n)$.

24.11 Probabilité conditionnelle

Soit $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ un espace probabilisé. Soit B un événement de probabilité *non nulle*.

Alors : $\mathbb{P}_B : \mathcal{T} \rightarrow [0; 1], A \mapsto \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(B)}$ est une probabilité, appelée *probabilité conditionnelle sachant B*.

$\mathbb{P}_B(A)$ se note aussi $\mathbb{P}(A|B)$.

24.12 Formule de probabilités composées

Pour toute famille d'événements $(A_k)_{1 \leq k \leq n}$ telle que $\mathbb{P}\left(\bigcap_{1 \leq k \leq n-1} A_k\right) > 0$,

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{1 \leq k \leq n} A_k\right) = \mathbb{P}(A_1)\mathbb{P}_{A_1}(A_2)\mathbb{P}_{A_1 \cap A_2}(A_3) \dots \mathbb{P}_{A_1 \cap \dots \cap A_{n-1}}(A_n).$$

24.13 Système complet d'événements

Soit (Ω, \mathcal{T}) un espace probabilisable. Un système complet d'événements est une famille $(A_i)_{i \in I}$ où $I \subset \mathbb{N}$ telle que :

(i) $\forall i \neq j, \quad A_i \cap A_j = \emptyset, \quad$ (ii) $\bigcup_{i \in I} A_i = \Omega$.

Autrement dit, à chaque réalisation de l'expérience, on est sûr que un et un seul des A_i se réalise.

24.14 Système quasi-complet d'événements

Soit $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ un espace probabilisé. Un système complet d'événements est une famille $(A_i)_{i \in I}$ où $I \subset \mathbb{N}$ telle que :

(i) $\forall i \neq j, \quad A_i \cap A_j = \emptyset, \quad$ (ii) $\sum_{i \in I} \mathbb{P}(A_i) = 1$.

Autrement dit, à chaque réalisation de l'expérience, on est presque-sûr que un et un seul des A_i se réalise.

24.15 Formule des probabilités totales

Soit $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ un espace probabilisé.

Soit un système complet (ou quasi-complet) d'événements $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Alors, pour tout événement $B \in \mathcal{T}, \sum_{n \geq 0} \mathbb{P}(B \cap A_n)$ converge et

$$\mathbb{P}(B) = \sum_{n=0}^{+\infty} \mathbb{P}(B \cap A_n) = \sum_{n=0}^{+\infty} \mathbb{P}(A_n)\mathbb{P}_{A_n}(B)$$

en convenant que $\mathbb{P}(A_n)\mathbb{P}_{A_n}(B) = 0$ lorsque $\mathbb{P}(A_n) = 0$.

24.16 Indépendance d'événements

Soit $(\Omega, \mathcal{T}, \mathbb{P})$ un espace probabilisé.

(i) Les événements A et B de \mathcal{T} sont *indépendants* si $\mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(A)\mathbb{P}(B)$.

(ii) Les n événements $(A_k)_{k \in \llbracket 1; n \rrbracket}$ de \mathcal{T} sont *deux à deux indépendants* si pour tous $i \neq j$ de $\llbracket 1; n \rrbracket, A_i$ et A_j sont indépendants.

(ii) Les n événements $(A_k)_{k \in \llbracket 1; n \rrbracket}$ de \mathcal{T} sont *mutuellement indépendants* si, pour toute

partie $I \subset \llbracket 1; n \rrbracket, \quad \mathbb{P}\left(\bigcap_{i \in I} A_i\right) = \prod_{i \in I} \mathbb{P}(A_i)$.

À défaut de précision dans l'énoncé, l'indépendance d'une famille est l'indépendance mutuelle.

25 Variables aléatoires discrètes

25.1 Variable aléatoire réelle

Une variable aléatoire discrète X sur l'espace probabilisable (Ω, \mathcal{T}) est une fonction définie sur Ω telle que l'univers image $X(\Omega)$ soit fini ou dénombrable et telle que pour

tout x de $X(\Omega)$, l'image réciproque $X^{-1}(\{x\}) \stackrel{\text{déf.}}{=} \{\omega \in \Omega, X(\omega) = x\}$ soit un élément de \mathcal{T} (c'est-à-dire un événement).

Pour toute partie $U \subset X(\Omega)$, l'ensemble $X^{-1}(U) \stackrel{\text{déf.}}{=} \{\omega \in \Omega, X(\omega) \in U\}$ est un événement.

L'événement $X^{-1}(U)$ est noté $[X \in U]$ ou $(X \in U)$ ou $\{X \in U\}$.

Si par exemple $U =]-\infty; a]$, $X^{-1}(U)$ se notera plus simplement $[X \leq a]$.

25.2 Système complet engendré par une VARD

En notant $X(\Omega) = \{x_n/n \in I\}$ où $I \subset \mathbb{N}$, la famille $([X = x_n])_{n \in I}$ est un système complet d'événements. En particulier, $\sum_{x \in X(\Omega)} \mathbb{P}([X = x]) = \sum_{n \in I} \mathbb{P}([X = x_n]) = 1$.

25.3 Loi conjointe, lois marginales, lois conditionnelles

Loi conjointe de X et Y ou du couple (X, Y) :

donnée des $\mathbb{P}(X = x, Y = y) = \mathbb{P}([X = x] \cap [Y = y]) = \mathbb{P}((X, Y) = (x, y))$ pour tout $(x, y) \in X(\Omega) \times Y(\Omega)$.

Lois marginales :

ce sont simplement les lois de X et de Y.

Loi conditionnelle de Y sachant $[X = x]$:

donnée des $\mathbb{P}_{[X=x]}(Y = y)$ pour tout $y \in Y(\Omega)$.

Relations entre ces lois : par la formule des probabilités totales,

$$\mathbb{P}(X = x) = \sum_{y \in Y(\Omega)} \mathbb{P}(X = x, Y = y), \quad \mathbb{P}(Y = y) = \sum_{x \in X(\Omega)} \mathbb{P}(X = x, Y = y),$$

et, par la formule des probabilités composées,

$$\mathbb{P}(X = x, Y = y) = \mathbb{P}(X = x)\mathbb{P}_{[X=x]}(Y = y) = \mathbb{P}(Y = y)\mathbb{P}_{[Y=y]}(X = x)$$

25.4 VAD indépendantes

Dire que les variables aléatoires X et Y sont indépendantes signifie

$$\forall (x, y) \in X(\Omega) \times Y(\Omega), \mathbb{P}(X = x, Y = y) = \mathbb{P}([X = x] \cap [Y = y]) = \mathbb{P}(X = x) \times \mathbb{P}(Y = y).$$

25.5 Propriétés d'indépendance

Si X et Y sont indépendantes, alors, pour toutes parties A de $X(\Omega)$ et B de $Y(\Omega)$,

$$\mathbb{P}([X \in A] \cap [Y \in B]) = \mathbb{P}(X \in A) \times \mathbb{P}(Y \in B).$$

Si X et Y sont indépendantes, alors, pour toutes fonctions f et g telles que $f(X)$ et $g(Y)$ soient bien définies, les variables aléatoires $f(X)$ et $g(Y)$ sont indépendantes.

25.6 Variables aléatoires mutuellement indépendantes

Les VAD $(X_n)_{n \in I}$ sont (mutuellement) indépendantes si pour tout $J \subset I$ fini et toute famille de parties $(A_j)_{j \in J}$ telles que $A_j \subset X_j(\Omega)$ pour tout j ,

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{j \in J} [X_j \in A_j]\right) = \prod_{j \in J} \mathbb{P}(X_j \in A_j)$$

25.7 Suite de VA i.i.d

Lorsqu'on a une suite de variables aléatoires toutes de même loi et mutuellement indépendantes, on parle de suite de V.A. « i.i.d. », acronyme de « indépendantes identiquement distribuées ».

25.8 Espérance

On note $\{x_n; n \in \mathbb{N}\}$ l'univers image de la variable aléatoire X. Dire que la variable aléatoire X est d'espérance finie signifie que la série de terme général $x_n \mathbb{P}(X = x_n)$ est **absolument convergente**. Si tel est le cas, l'espérance de la variable aléatoire X est la somme de cette série, notée $\mathbb{E}(X)$.

Dans la pratique, en probabilités et uniquement en probabilités (donc pas en analyse), on est autorisé à écrire

$$\mathbb{E}(|X|) = \sum_{i \in I} |x_i| \mathbb{P}(X = x_i) = \dots$$

sans avoir au préalable justifier la convergence de la série, sachant qu'en cas de divergence, il s'agira d'une divergence vers $+\infty$. Il faudra penser à l'issue du calcul à observer que la somme est finie, ou pas.

25.9 Espérance par anti-répartition

Dans le cas où X est à valeurs dans \mathbb{N} , $\mathbb{E}(X)$ est finie si, et seulement si, $\sum_{n \geq 1} \mathbb{P}(X \geq n)$

converge, et dans ce cas $\mathbb{E}(X) = \sum_{n=1}^{+\infty} \mathbb{P}(X \geq n)$.

25.10 Transfert

Soit f une fonction définie sur l'univers image $X(\Omega) = \{x_n; n \in \mathbb{N}\}$. La variable aléatoire $f(X)$ est d'espérance finie si, et seulement si, la série de terme général $f(x_n) \mathbb{P}(X = x_n)$ converge **absolument**. Si c'est le cas, on obtient alors

$$\mathbb{E}(f(X)) = \sum_{n=0}^{+\infty} f(x_n) \mathbb{P}(X = x_n).$$

En particulier,

$$\mathbb{E}(X^2) = \sum_{n=0}^{+\infty} x_n^2 \mathbb{P}(X = x_n).$$

25.11 Transfert pour un couple

De même, en cas de convergence absolue, alias de sommabilité de la famille double $(f(x, y) \mathbb{P}(X = x, Y = y))_{x \in X(\Omega), y \in Y(\Omega)}$

$$\mathbb{E}(f(X, Y)) = \sum_{x \in X(\Omega), y \in Y(\Omega)} f(x, y) \mathbb{P}(X = x, Y = y)$$

où la somme est la somme d'une série double.

En particulier,

$$\mathbb{E}(XY) = \sum_{x \in X(\Omega), y \in Y(\Omega)} xy \mathbb{P}(X = x, Y = y)$$

25.12 Linéarité de l'espérance, positivité, croissance

Si $\mathbb{E}(X)$ existe, alors $\mathbb{E}(aX + b)$ existe et vaut $a\mathbb{E}(X) + b$.

Si $\forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket$, $\mathbb{E}(X_i)$ existent, alors $\mathbb{E}\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i X_i\right)$ existe et vaut $\sum_{i=1}^n \lambda_i \mathbb{E}(X_i)$.

Si $\forall \omega \in \Omega$, $0 \leq X(\omega)$ et $\mathbb{E}(X)$ existe, alors $0 \leq \mathbb{E}(X)$.

Si $\forall \omega \in \Omega$, $X(\omega) \leq Y(\omega)$ et $\mathbb{E}(X)$ et $\mathbb{E}(Y)$ existent, alors $\mathbb{E}(X) \leq \mathbb{E}(Y)$.

25.13 Espérance du produit de VARD indépendantes

Si X et Y sont indépendantes et possèdent une espérance, alors XY possède une espérance et $\mathbb{E}(XY) = \mathbb{E}(X)\mathbb{E}(Y)$.

25.14 Moments d'ordre 2

Si X^2 est d'espérance finie, alors X l'est aussi.

Si X^2 et Y^2 sont d'espérance finie, alors XY l'est aussi.

25.15 Inégalité de Cauchy-Schwarz

Si X^2 et Y^2 sont d'espérance finie, alors XY l'est aussi, et

$$\mathbb{E}(XY)^2 \leq \mathbb{E}(X^2)\mathbb{E}(Y^2)$$

avec égalité si, et seulement si, $\exists \lambda \in \mathbb{R}$, $\mathbb{P}(Y = \lambda X) = 1$.

25.16 Variance, écart-type

Si X^2 est d'espérance finie, alors $(X - \mathbb{E}(X))^2$ aussi et

$$\mathbb{V}(X) = \mathbb{E}((X - \mathbb{E}(X))^2) \text{ et } \sigma(X) = \sqrt{\mathbb{V}(X)}$$

En particulier, comme $\mathbb{V}(X) = \mathbb{E}((X - \mathbb{E}(X))^2)$, $\mathbb{V}(X) \geq 0$.

25.17 Transformation affine, formule de König-Huygens

$\forall (a, b) \in \mathbb{R}$, $\mathbb{V}(aX + b) = a^2\mathbb{V}(X)$ dès que $\mathbb{V}(X)$ existe.

$\mathbb{V}(X) = \mathbb{E}(X^2) - (\mathbb{E}(X))^2$ dès que $\mathbb{E}(X^2)$ existe.

25.18 Interprétation de la nullité de la variance

$\mathbb{V}(X) = 0 \Rightarrow \mathbb{P}(X = \mathbb{E}(X)) = 1$: X presque-sûrement égale à $\mathbb{E}(X)$, donc constante.

25.19 Covariance

Sous réserve d'existence (en particulier dès que X^2 et Y^2 possèdent une espérance) :

$$\text{Cov}(X, Y) \stackrel{\text{déf.}}{=} \mathbb{E}((X - \mathbb{E}(X))(Y - \mathbb{E}(Y))).$$

25.20 Formule de König-Huygens

Sous réserve d'existence (en particulier dès que X^2 et Y^2 possèdent une espérance) :

$$\text{Cov}(X, Y) = \mathbb{E}(XY) - \mathbb{E}(X)\mathbb{E}(Y).$$

25.21 Bilinéarité et symétrie de la covariance

Sous réserve d'existence :

$$\text{Cov}(X, Y) = \text{Cov}(Y, X), \quad \text{Cov}(X, X) = \mathbb{V}(X),$$

$$\text{Cov}(aX + b, cY + d) = ac\text{Cov}(X, Y).$$

$$\text{Cov}\left(\sum_{i=1}^m \lambda_i X_i, \sum_{j=1}^n \mu_j Y_j\right) = \sum_{(i,j) \in \llbracket 1, m \rrbracket \times \llbracket 1, n \rrbracket} \lambda_i \mu_j \text{Cov}(X_i, Y_j)$$

25.22 Variance d'une somme

Sous réserve d'existence : $\mathbb{V}(X + Y) = \mathbb{V}(X) + \mathbb{V}(Y) + 2\text{Cov}(X, Y)$,

et formule polaire : $\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{2}(\mathbb{V}(X + Y) - \mathbb{V}(X) - \mathbb{V}(Y))$.

25.23 Cas où les variables aléatoires sont deux à deux indépendantes

Si X_1, \dots, X_n sont n VARD deux à deux indépendantes,

$\forall i \neq j$, $\text{Cov}(X_i, X_j) = 0$,

$$\mathbb{V}\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = \sum_{i=1}^n \mathbb{V}(X_i).$$

25.24 Série génératrice

La série génératrice d'une variable aléatoire X à valeurs dans \mathbb{N} est la série entière

$\sum_{n \geq 0} \mathbb{P}(X = n)t^n$. Son rayon de convergence vaut au moins 1.

25.25 Fonction génératrice

La fonction génératrice de X est alors la fonction

$$G_X : t \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} \mathbb{P}(X = n)t^n = \mathbb{E}(t^X).$$

25.26 Caractérisation de la loi

Si $G_X = G_Y$ sur $[0; 1]$, alors X et Y suivent la même loi.

25.27 Lien avec les moments

L'existence de $\mathbb{E}(X)$ équivaut à la dérivabilité de G_X en 1. Dans ce cas,

$$\mathbb{E}(X) = G'_X(1).$$

☞ On pourra remarquer qu'en itérant le procédé, on peut montrer que l'existence de $\mathbb{V}(X)$ équivaut à l'existence de $G''_X(1)$, et dans ce cas, $G''_X(1) = \mathbb{E}(X(X - 1))$ donc

$$\mathbb{V}(X) = (G''_X(1) + G'_X(1)) - (G'_X(1))^2.$$

25.28 Fonction génératrice d'une somme de VARD indépendantes

Pour X et Y sont indépendantes, la fonction génératrice G_{X+Y} vaut $G_X G_Y$.

Cette propriété permet de justifier rapidement les stabilités suivantes.

25.29 Décompositions en somme et stabilités remarquables (hors programme)

- Si $X \sim \mathcal{B}(n, p)$, X peut être vue comme la somme de n variables $(X_i)_{1 \leq i \leq n}$ indépendantes, indicatrices de l'événement « la i -ème épreuve est un succès », toutes de loi de Bernoulli $\mathcal{B}(p)$.

- Si X_1, X_2, \dots, X_k sont k variables indépendantes de loi binomiale respectivement $\mathcal{B}(n_1, p)$, $\mathcal{B}(n_2, p)$, \dots , $\mathcal{B}(n_k, p)$ (le même paramètre p pour toutes), alors $X_1 + X_2 + \dots + X_k$ suit $\mathcal{B}(n_1 + n_2 + \dots + n_k, p)$.

- Si X_1, X_2, \dots, X_k sont k variables indépendantes de loi de Poisson respectivement $\mathcal{P}(\lambda_1)$, $\mathcal{P}(\lambda_2)$, \dots , $\mathcal{P}(\lambda_k)$, alors $X_1 + X_2 + \dots + X_k$ suit $\mathcal{P}(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k, p)$.

25.30 **Inégalités de Markov et de Bienaymé-Tchebychev**

Inégalité de Andreï Andreïevitch MARKOV : soit X positive possédant une espérance, alors

$$\forall \alpha > 0, \mathbb{P}(X \geq \alpha) \leq \frac{\mathbb{E}(X)}{\alpha}$$

Inégalité de Jules Irénée BIENAYMÉ-Pafnouti TCHEBYCHEV : soit X possédant un moment d'ordre 2 (i.e. $\mathbb{E}(X^2)$ existe), alors

$$\forall \varepsilon > 0, \mathbb{P}(|X - \mathbb{E}(X)| \geq \varepsilon) \leq \frac{\mathbb{V}(X)}{\varepsilon^2}$$

25.31 **Loi faible des grands nombres**

Soit $(X_n)_{n \geq 1}$ une suite de variables aléatoires indépendantes de même loi. On suppose que $(X_1)^2$ est d'espérance finie. On note $m = \mathbb{E}(X_1)$ et $S_n = X_1 + \dots + X_n$. Alors,

pour tout $\varepsilon > 0$, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbb{P}\left(\left|\frac{S_n}{n} - m\right| \geq \varepsilon\right) = 0$.

Interprétation : la moyenne expérimentale est probablement proche de la moyenne théorique.

25.32 **Minimum de deux géométrique indépendantes (hors programme)**

Si $X \sim \mathcal{G}(p)$ et $Y \sim \mathcal{G}(q)$ sont indépendantes, alors $\min(X, Y) \sim \mathcal{G}(p + q - pq)$. En effet, on dispose de deux pièces, l'une amenant pile avec la probabilité p , l'autre avec la probabilité q . On répète des lancers simultanés des deux pièces, et on note Z le rang du premier succès S : « obtenir un pile sur l'une (au moins) des deux pièces ». On a clairement $Z = \min(X, Y)$ mais aussi $Z \sim \mathcal{G}(\mathbb{P}(S))$... et $\mathbb{P}(S) = p + q - pq$.

Lois discrètes usuelles

| Nom | Paramètre(s) | Logo | Support $X(\Omega) =$ | Loi : $\forall k \in X(\Omega)$ $\mathbb{P}(X = k) =$ | Espérance $\mathbb{E}(X) =$ | Variance $\mathbb{V}(X) =$ | Fonction génératrice $G_X : t \mapsto$ | Particularité |
|-------------|------------------------------------|---|------------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------|---|--|
| Uniforme | $\{x_1, \dots, x_n\}$ | $\mathcal{U}(\{x_1, \dots, x_n\})$ | $\{x_1, \dots, x_n\}$ | $\frac{1}{n}$ | Pas de | formule | générale (voir définitions) | Situation d'équiprobabilité |
| Uniforme | $\{1, \dots, n\}$ | $\mathcal{U}(\llbracket 1; n \rrbracket)$ | $\llbracket 1; n \rrbracket$ | $\frac{1}{n}$ | $\frac{n+1}{2}$ | $\frac{n^2-1}{12}$ | $t \times \frac{1-t^n}{1-t}$ si $t \neq 1$ 1 si $t = 1$ | Situation d'équiprobabilité |
| Bernoulli | $p \in]0; 1[$ | $\mathcal{B}(p)$ | $\{0, 1\}$ | $\begin{cases} p & \text{si } k = 1 \\ 1-p & \text{si } k = 0 \end{cases}$ | p | $p(1-p)$ | $(1-p) + pt$ | X indicatrice de l'événement $[X = 1]$, appelé succès |
| Binomiale | $n \in \mathbb{N}^*, p \in]0; 1[$ | $\mathcal{B}(n, p)$ | $\llbracket 0; n \rrbracket$ | $\binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$ | np | $np(1-p)$ | $((1-p) + pt)^n$ | Nombre de succès en n épreuves de Bernoulli indépendantes |
| Géométrique | $p \in]0; 1[$ | $\mathcal{G}(p)$ | \mathbb{N}^* | $(1-p)^{k-1} p$ | $\frac{1}{p}$ | $\frac{1-p}{p^2}$ | $\frac{pt}{1-(1-p)t}$ | Rang du 1er succès dans un schéma de Bernoulli |
| Poisson | $\lambda \in]0; +\infty[$ | $\mathcal{P}(\lambda)$ | \mathbb{N} | $e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}$ | λ | λ | $e^{\lambda(t-1)}$ | Approximation de $\mathcal{B}(n, \lambda/n)$ quand n devient grand |