

Agrégation 2024

Développements

Document intégralement écrit par Hugo Delaunay.
Visitez agreg.skyost.eu pour plus de ressources et d'informations.

Une coquille? Une correction à apporter? Rendez-vous sur le dépôt Github “Skyost/Agregation” ou contactez-moi
via mon site web personnel skyost.eu.

Table des matières

1	Caractérisation réelle de la fonction Γ	1
2	Connexité des valeurs d'adhérence d'une suite dans un compact	4
3	Contre-exemple au théorème de Dirichlet	7
4	Critère d'Eisenstein	10
5	Décomposition de Dunford	13
6	Décomposition polaire	15
7	Densité des polynômes orthogonaux	18
8	Dimension du commutant	21
9	Dual de L_p	24
10	Équation de Sylvester	27
11	Extrema liés	29
12	Formes de Hankel	32
13	Formule de Stirling	34
14	Formule sommatoire de Poisson	37
15	$\exp : \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ est un homéomorphisme	39
16	Intégrale de Dirichlet	42
17	Invariants de similitude	45
18	Lemme de Morse	48
19	Lemme des noyaux	51
20	Loi d'inertie de Sylvester	53
21	Méthode de Newton	55
22	Nombres de Bell	58
23	Projection sur un convexe fermé	60
24	Simplicité de A_n pour $n \geq 5$	64
25	Sous-groupes distingués et table des caractères	67
26	Suite de polygones	69
27	$\exp : \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \text{GL}_n(\mathbb{R})$ est surjective	72
28	Théorème central limite	75
29	Théorème d'Abel angulaire	78
30	Théorème de Cauchy-Lipschitz linéaire	81
31	Théorème de Cauchy-Lipschitz local	84
32	Théorème de Dirichlet faible	86
33	Théorème de Fejér	88
34	Théorème de Frobenius-Zolotarev	94
35	Théorème de Kronecker	97
36	Théorème de Maschke	100

37	Théorème de Wedderburn	102
38	Théorème de Weierstrass (par la convolution)	105
39	Théorème de Weierstrass (par les probabilités)	108
40	Théorème des deux carrés de Fermat	110
41	Transformée de Fourier d'une gaussienne	113

1 Caractérisation réelle de la fonction Γ

On montre que la fonction Γ d'Euler est la seule fonction log-convexe sur \mathbb{R}^+ prenant la valeur 1 en 1 et vérifiant $\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$ pour tout $x > 0$.

Lemme 1. La fonction Γ définie pour tout $x > 0$ par $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$ vérifie :

- (i) $\forall x \in \mathbb{R}_*^+, \Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$.
- (ii) $\Gamma(1) = 1$.
- (iii) Γ est log-convexe sur \mathbb{R}_*^+ .

[ROM19]
p. 364

Démonstration. (i) Soit $x \in \mathbb{R}_*^+$. Alors :

$$\begin{aligned}\Gamma(x+1) &= \int_0^{+\infty} t^x e^{-t} dt \\ &= [e^{-t} t^x]_0^{+\infty} + x \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \\ &= x\Gamma(x)\end{aligned}$$

- (ii) Comme $t \mapsto e^{-t} \mathbb{1}_{\mathbb{R}^+}(t)$ est la densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre 1, on a

$$\underbrace{\int_0^{+\infty} e^{-t} dt}_{=\Gamma(1)} = 1$$

- (iii) Soient $x, y \in \mathbb{R}_*^+$ et $\lambda \in]0, 1[$. On applique l'inégalité de Hölder en posant $\lambda = \frac{1}{p}$ et $1 - \lambda = \frac{1}{q}$:

$$\begin{aligned}\Gamma(\lambda x + (1-\lambda)y) &= \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{\lambda x} t^{(1-\lambda)y} dt \\ &= \int_0^{+\infty} (e^{-t} t^{x-1})^{\frac{1}{p}} (e^{-t} t^{y-1})^{\frac{1}{q}} dt \\ &\leq \left(\int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_0^{+\infty} e^{-t} t^{y-1} dt \right)^{\frac{1}{q}} \\ &= \Gamma(x)^\lambda \Gamma(y)^{1-\lambda}\end{aligned}$$

Donc $\ln \circ \Gamma$ vérifie bien l'inégalité de convexité sur \mathbb{R}_*^+ et ainsi, Γ est log-convexe. □

Théorème 2 (Bohr-Mollerup). Soit $f : \mathbb{R}_*^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ vérifiant le Point (i), le Point (ii) et le Point (iii) du Lemme 1. Alors $f = \Gamma$.

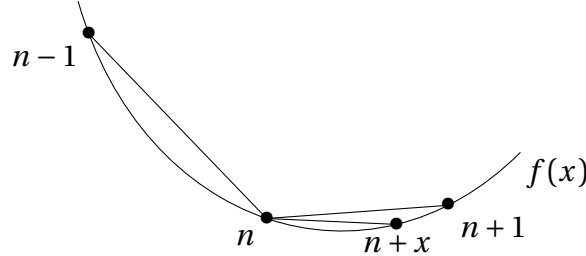
[RUD]
p. 94

Démonstration. Par récurrence, on a d'après le Point (i) :

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \forall x \in]0, 1], f(x+n) = (x+n-1) \dots (x+1) x f(x) \quad (*)$$

Donc les valeurs prises par f sur \mathbb{R}_*^+ sont entièrement déterminées par ses valeurs prises sur $]0, 1]$. Ainsi, pour démontrer le théorème, il suffit de vérifier $\forall x \in]0, 1], f(x) = \Gamma(x)$.

Soient donc $x \in]0, 1]$ et $n \in \mathbb{N}^*$; on applique le lemme des trois pentes à la fonction convexe $\ln \circ f$ (d'après le Point (iii)) appliqué aux points $n-1, n, n+x$ et $n+1$:



$$\frac{(\ln \circ f)(n) - (\ln \circ f)(n-1)}{n - (n-1)} \leq \frac{(\ln \circ f)(n+x) - (\ln \circ f)(n)}{n+x - n} \leq \frac{(\ln \circ f)(n+1) - (\ln \circ f)(n)}{n+1 - n}$$

Mais, d'après (*) et le Point (ii), on a $f(n) = (n-1)!$. D'où :

$$\begin{aligned} \ln(n-1) &\leq \frac{(\ln \circ f)(n+x) - \ln((n-1)!)}{x} \leq \ln(n) \\ \Rightarrow \ln((n-1)^x) &\leq (\ln \circ f)(n+x) - \ln((n-1)!) \leq \ln(n^x) \\ \Rightarrow \ln((n-1)^x (n-1)!) &\leq (\ln \circ f)(n+x) \leq \ln(n^x (n-1)!) \end{aligned}$$

Par croissance de la fonction \ln , cela donne :

$$(n-1)^x (n-1)! \leq f(n+x) \leq n^x (n-1)!$$

Et en appliquant (*), on obtient :

$$\frac{(n-1)^x (n-1)!}{(x+n-1) \dots (x+1)x} \leq f(x) \leq \frac{n^x (n-1)!}{(x+n-1) \dots (x+1)}$$

En ne considérant que la première inégalité, on peut remplacer n par $n+1$ (car les deux inégalités sont vraies pour tout $n \in \mathbb{N}^*$) :

$$\frac{n^x n!}{(x+n) \dots (x+1)x} \leq f(x)$$

Or, $\frac{n^x (n-1)!}{(x+n-1) \dots (x+1)} = \frac{n^x n!}{(x+n) \dots (x+1)x} \frac{x+n}{n}$, donc :

$$\begin{aligned} \frac{n^x n!}{(x+n) \dots (x+1)x} &\leq f(x) \leq \frac{n^x n!}{(x+n) \dots (x+1)x} \frac{x+n}{n} \\ \Rightarrow f(x) \frac{n}{x+n} &\leq \frac{n^x n!}{(x+n) \dots (x+1)x} \leq f(x) \\ \Rightarrow f(x) &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^x n!}{(x+n) \dots (x+1)x} \end{aligned}$$

en faisant $n \rightarrow +\infty$ dans la deuxième inégalité. Comme Γ vérifie le Point (i), le Point (ii), et le

Point (iii); le raisonnement précédent est a fortiori vrai aussi pour Γ . Donc

$$\Gamma(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^x n!}{(x+n) \dots (x+1)x} = f(x)$$

ie. f et Γ coïncident bien sur $]0, 1]$. □

Remarque 3. À la fin de la preuve, on obtient une formule due à Gauss :

$$\forall x \in]0, 1], \Gamma(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^x n!}{(x+n) \dots (x+1)x}$$

que l'on peut aisément étendre à \mathbb{R}_*^+ entier.

2 Connexité des valeurs d'adhérence d'une suite dans un compact

On montre que l'ensemble des valeurs d'adhérence d'une suite d'un espace métrique compact est connexe en raisonnant par l'absurde, puis on utilise ce résultat pour démontrer le lemme des grenouilles.

Soit (E, d) un espace métrique.

[I-P]

p. 116

Théorème 1. On suppose E compact. Soit (u_n) une suite de E telle que $d(u_n, u_{n-1}) \rightarrow 0$. Alors l'ensemble Γ des valeurs d'adhérence de (u_n) est connexe.

Démonstration. Pour tout $p \in \mathbb{N}$, on note $A_p = \{u_n \mid n \geq p\}$. On a $\Gamma = \bigcap_{p \in \mathbb{N}} \overline{A_p}$. Γ est fermé (en tant qu'intersection de fermés) dans E qui est compact, donc Γ est compact. Supposons que Γ soit non connexe; on peut alors écrire $\Gamma = A \sqcup B$, où A et B sont deux fermés disjoints de Γ . Comme Γ est compact, A et B le sont aussi. Notons $\alpha = d(A, B) > 0$ (car $A \cap B = \emptyset$). Posons :

$$A' = \left\{ x \in E \mid d(x, A) < \frac{\alpha}{3} \right\} \text{ et } B' = \left\{ x \in E \mid d(x, B) < \frac{\alpha}{3} \right\}$$

A' et B' sont ouverts (en tant qu'images réciproques d'ouverts par des application continues), donc $K = E \setminus (A' \cup B')$ est fermé dans E , donc compact.

Montrons que (u_n) admet une valeur d'adhérence dans K , ce qui serait absurde car $\Gamma \cap K = \emptyset$. Comme $\lim_{n \rightarrow +\infty} d(u_n, u_{n-1}) = 0$,

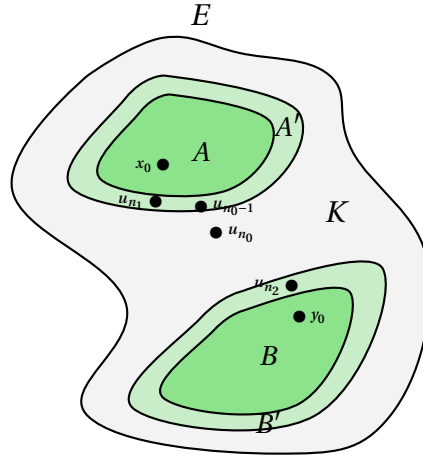
$$\exists N_0 \in \mathbb{N} \text{ tel que } \forall n \geq N_0, d(u_n, u_{n-1}) < \frac{\alpha}{3} \quad (*)$$

Soit $N \geq N_0$.

— Soit $x_0 \in A$. Comme x_0 est valeur d'adhérence de (u_n) , $\exists n_1 > N$ tel que $d(x_0, u_{n_1}) < \frac{\alpha}{3}$. Donc $u_{n_1} \in A'$.

— Soit $y_0 \in B$. De même, $\exists n_2 > n_1$ tel que $d(y_0, u_{n_2}) < \frac{\alpha}{3}$. Donc $u_{n_2} \in B'$.

Soit maintenant n_0 le premier entier supérieur à n_1 tel que $u_{n_0} \notin A'$ (un tel entier existe car $u_{n_2} \in A'$). On a alors $u_{n_0-1} \in A'$.



D'après (*), en appliquant l'inégalité triangulaire,

$$\begin{aligned}
 d(u_{n_0}, B) &\geq d(u_{n_0-1}, B) - d(u_{n_0-1}, u_{n_0}) \\
 &\geq d(A, B) - d(u_{n_0-1}, A) - d(u_{n_0-1}, u_{n_0}) \\
 &> \frac{\alpha}{3}
 \end{aligned}$$

ce qui prouve que $u_{n_0} \notin B'$. Comme $u_{n_0} \notin A'$, on a $u_{n_0} \in K$. On vient de montrer que,

$$\forall N \geq N_0, \exists n_0 \geq N \text{ tel que } u_{n_0} \in K$$

On peut créer comme cela une sous-suite de (u_n) dans K . Or K est compact, donc (u_n) admet une valeur d'adhérence dans K . \square

Application 2 (Lemme de la grenouille). Soient $f : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ continue et (x_n) une suite de $[0, 1]$ telle que

$$\begin{cases} x_0 \in [0, 1] \\ x_{n+1} = f(x_n) \end{cases}$$

Alors (x_n) converge si et seulement si $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_{n+1} - x_n = 0$.

Démonstration. Le sens direct est évident. Montrons la réciproque. On suppose donc que $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_{n+1} - x_n = 0$ et on note Γ l'ensemble des valeurs d'adhérence de (x_n) . Γ est non vide (car (x_n) est bornée, donc admet une valeur d'adhérence par le théorème de Bolzano-Weierstrass) et est un connexe de \mathbb{R} (par le Théorème 1), donc Γ est un intervalle non vide.

Soit $a \in \Gamma$. Il existe $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ strictement croissante (on dit que φ est une extractrice) telle que $x_{\varphi(n)} \rightarrow a$. Mais alors,

$$x_{\varphi(n)+1} - x_{\varphi(n)} = f(x_{\varphi(n)}) - x_{\varphi(n)} \rightarrow f(a) - a$$

et par hypothèse, le membre de gauche converge vers 0. Donc $f(a) - a = 0$ ie. a est un point fixe de f .

Supposons par l'absurde que (x_n) diverge. Alors Γ n'est pas un singleton, donc est un intervalle

d'intérieur non vide : on peut trouver $c \in \Gamma$ et $h > 0$ tel que $[c - h, c + h] \subseteq \Gamma$.

Or, $c \in \Gamma$, donc

$$\exists N \geq 0 \text{ tel que } |x_N - c| \leq \frac{h}{2} \implies x_N \in \Gamma$$

et en particulier, x_N est un point fixe de f . Ainsi, $x_{n+1} = f(x_n) = x_n$ pour tout $n \geq N$: absurde. \square

3 Contre-exemple au théorème de Dirichlet

On construit un contre-exemple au théorème de Dirichlet qui montre l'importance de l'hypothèse \mathcal{C}^1 par morceaux.

Contre-exemple 1. Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ paire, 2π -périodique telle que :

$$\forall x \in [0, \pi], f(x) = \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2} \sin\left((2^{p^3} + 1) \frac{x}{2}\right)$$

Alors f est bien définie et continue sur \mathbb{R} . Cependant, sa série de Fourier diverge en 0.

[GOU20]
p. 275

Démonstration.

$$\forall x \in [0, \pi], \left| \frac{1}{p^2} \sin\left((2^{p^3} + 1) \frac{x}{2}\right) \right| \leq \frac{1}{p^2}$$

donc la série converge normalement sur $[0, \pi]$. Comme la fonction $x \mapsto \frac{1}{p^2} \sin\left((2^{p^3} + 1) \frac{x}{2}\right)$ est continue (en tant que composée de fonctions continues), la fonction f est continue sur $[0, \pi]$. On prolonge f par parité en posant

$$\forall x \in [-\pi, 0[, f(x) = f(-x)$$

Ainsi prolongée, f est continue sur l'intervalle $[-\pi, \pi]$. Comme $f(\pi) = f(-\pi)$, on en déduit que f est 2π -périodique, et est donc continue sur \mathbb{R} tout entier.

Posons $\forall k \in \mathbb{N}$:

$$\forall n \in \mathbb{N}, a_{n,k} = \int_0^\pi \cos(nt) \sin\left(\frac{(2k+1)t}{2}\right) dt \text{ et } \forall q \in \mathbb{N}, s_{q,k} = \sum_{n=0}^q a_{n,k}$$

Soient $k, n \in \mathbb{N}$. On va chercher à minorer $s_{n,k}$. Pour cela, calculons explicitement $a_{n,k}$:

$$\begin{aligned} a_{n,k} &= \frac{1}{2} \int_0^\pi \sin\left(\left(\frac{2k+1}{2} + n\right)t\right) + \sin\left(\left(\frac{2k+1}{2} - n\right)t\right) dt \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k+n+\frac{1}{2}} + \frac{1}{k-n+\frac{1}{2}} \right) \\ &= \frac{k+\frac{1}{2}}{\left(k+\frac{1}{2}\right)^2 - n^2} \end{aligned}$$

Par conséquent, à k fixé, $a_{n,k} \geq 0$ pour tout $n \leq k$. Donc $s_{q,k} \geq 0$ pour tout $q \leq k$. Pour le cas $q > k$, on remarque que les $a_{q,k}$ sont, à un facteur $\frac{2}{\pi}$ près, les coefficients de Fourier $a_n(g_k)$ de la fonction paire

$$g_k : t \mapsto \left| \sin\left(\left(k + \frac{1}{2}\right)t\right) \right|$$

qui est continue et \mathcal{C}^1 par morceaux. D'après le théorème de Dirichlet, sa série de Fourier converge simplement vers g_k sur \mathbb{R} . En particulier, en 0, cela donne :

$$\frac{a_{0,k}}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_{n,k} = \frac{\pi}{2} g_k(0) = 0$$

En faisant tendre q vers $+\infty$, on a ainsi :

$$s_{q,k} \longrightarrow \frac{a_{0,k}}{2}$$

Or, $a_{n,k}$ est positif pour $n \leq k$ et négatif pour $n > k$. Donc la suite $(s_{q,k})$ est décroissante à partir de l'indice $q = k$. Comme elle converge vers $\frac{a_{0,k}}{2}$, on en déduit que

$$\forall q > k, s_{q,k} \geq \frac{a_{0,k}}{2} \geq 0$$

Il nous reste à obtenir une minoration de $s_{k,k}$. Or, pour tout $k \in \mathbb{N}^*$,

$$s_{k,k} \geq \sum_{n=1}^k \frac{k + \frac{1}{2}}{(k + \frac{1}{2})^2 - n^2}$$

Mais, la fonction $t \mapsto \frac{k + \frac{1}{2}}{(k + \frac{1}{2})^2 - t^2}$ est croissante. Donc par comparaison série-intégrale,

$$\begin{aligned} s_{k,k} &\geq \sum_{n=1}^k \int_{n-1}^n \frac{k + \frac{1}{2}}{(k + \frac{1}{2})^2 - t^2} dt \\ &= \int_0^k \frac{k + \frac{1}{2}}{(k + \frac{1}{2})^2 - t^2} dt \\ &= \frac{\ln(4k+3)}{2} \\ &\geq \frac{\ln(k)}{2} \end{aligned}$$

Comme f est paire, les coefficients de Fourier $b_n(f)$ sont nuls. Par ailleurs, $\forall n \in \mathbb{N}$,

$$\begin{aligned} a_n(f) &= \frac{2}{\pi} \int_0^\pi f(t) \cos(nt) dt \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \cos(nt) \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2} \sin\left((2^{p^3} + 1) \frac{t}{2}\right) dt \\ &= \frac{2}{\pi} \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2} \int_0^\pi \sin\left((2^{p^3} + 1) \frac{t}{2}\right) dt \end{aligned}$$

l'interversion somme-intégrale étant licite par convergence normale sur un segment. Donc,

$$\forall n \in \mathbb{N}, a_n(f) = \frac{2}{\pi} \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2} a_{n,2^{p^3-1}} \implies \forall n \in \mathbb{N}, S_n = \frac{\pi}{2} \sum_{k=0}^n a_k(f) = \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p^2} s_{n,2^{p^3-1}}$$

Comme les $s_{q,k}$ sont positifs et que $s_{k,k} \geq \frac{\ln(k)}{2}$, on en déduit

$$\forall p \in \mathbb{N}, S_{2^{p^3-1}} \geq \frac{1}{p^2} s_{2^{p^3-1}, 2^{p^3-1}} \geq \frac{1}{2p^2} \ln(2^{p^3-1}) = \frac{p^3-1}{2p^2} \ln(2) \longrightarrow +\infty$$

□

4 Critère d'Eisenstein

Ici, nous démontrons le célèbre critère d'Eisenstein que l'on utilise énormément en pratique pour montrer qu'un polynôme est irréductible.

Soit A un anneau commutatif et unitaire.

Notation 1. Soit $P \in A[X]$. On note $\gamma(P)$ le contenu du polynôme P .

Lemme 2. Soit $p \in A$ tel que (p) est premier. Alors $A/(p)$ est intègre.

[ULM18]
p. 32

Démonstration. Soient $\bar{a}, \bar{b} \in A/(p)$. On suppose $\bar{a}\bar{b} = 0$. Comme $\bar{a}\bar{b} = \overline{ab}$, on a $ab \in (p)$. Donc par hypothèse,

$$\begin{aligned} a \in (p) \text{ ou } b \in (p) \\ \implies \bar{a} = 0 \text{ ou } \bar{b} = 0 \end{aligned}$$

et ainsi $A/(p)$ est bien intègre. \square

Lemme 3. Si A est intègre, alors $A[X]$ l'est aussi.

p. 22

Démonstration. Soient $P, Q \in A[X]$ non nuls, de degrés respectifs $n \geq 1$ et $m \geq 1$ que l'on écrit $P = \sum_{i=0}^n a_i X^i$ et $Q = \sum_{j=0}^m b_j X^j$. Alors, le coefficient de X^{n+m} dans le produit PQ est $a_n b_m$. Comme $a_n \neq 0$, $b_m \neq 0$ et A est intègre, ce coefficient est non nul. Donc en particulier, le produit PQ est non nul. \square

Lemme 4. On suppose A factoriel. Soit $a \in A$ irréductible. Alors (a) est premier.

p. 64

Démonstration. On suppose que $a \mid bc$ avec $b, c \in A$. Alors, il existe $d \in A$ tel que

$$ad = bc \tag{*}$$

Si b est inversible, alors $a \mid c$. De même, si c est inversible, alors $a \mid b$. Supposons donc que b et c ne sont pas inversibles. Comme a est irréductible, on en déduit que d est un élément non nul et non inversible de A . Il existe donc des décompositions en irréductibles

$$b = \beta_1 \dots \beta_n, c = \gamma_1 \dots \gamma_m \text{ et } d = \delta_1 \dots \delta_k$$

avec $n, m, k \in \mathbb{N}^*$. Par conséquent, en injectant dans $(*)$:

$$a\delta_1 \dots \delta_k = \beta_1 \dots \beta_n \gamma_1 \dots \gamma_m$$

Comme la factorisation en irréductibles est unique à l'ordre près, il existe β_i ou γ_j qui est associé à a . Si bien que a divise b ou c ; c'est ce que l'on voulait démontrer. \square

Lemme 5 (Gauss). On suppose A factoriel. Alors :

- (i) Le produit de deux polynômes primitifs est primitif.
- (ii) $\forall P, Q \in A[X] \setminus \{0\}, \gamma(PQ) = \gamma(P)\gamma(Q)$.

Démonstration. (i) Soient $P, Q \in A[X]$ tels que $\gamma(P) = \gamma(Q) = 1$. Supposons $\gamma(PQ) \neq 1$. Alors, il existe $p \in A$ irréductible tel que p divise tous les coefficients de PQ . Donc, dans $A/(p)$, $\overline{PQ} = \overline{P}\overline{Q} = 0$.

Mais, par le Lemme 4, (p) est premier. Donc par le Lemme 2 $A/(p)$ est intègre, et en particulier, $A/(p)[X]$ l'est aussi par le Lemme 3. Ainsi, $\overline{P} = 0$ ou $\overline{Q} = 0$: absurde.

- (ii) En factorisant, on écrit $P = \gamma(P)R$ et $Q = \gamma(Q)S$ où $R, S \in A[X]$ avec $\gamma(R) = \gamma(S) = 1$. D'où $PQ = \gamma(P)\gamma(Q)RS$ avec $\gamma(RS) = 1$ par le Point (i). Ainsi, $\gamma(PQ) = \gamma(P)\gamma(Q)$.

□

Théorème 6 (Critère d'Eisenstein). Soient \mathbb{K} le corps des fractions de A et $P = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in A[X]$ de degré $n \geq 1$. On suppose que A est factoriel et qu'il existe $p \in A$ irréductible tel que :

- (i) $p \mid a_i, \forall i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$.
- (ii) $p \nmid a_n$.
- (iii) $p^2 \nmid a_0$.

Alors P est irréductible dans $\mathbb{K}[X]$.

Démonstration. Par l'absurde, on suppose $P = UV$ avec $U, V \in \mathbb{K}[X]$ de degré supérieur ou égal à 1. Soit a un multiple commun à tous les dénominateurs des coefficients non nuls de U et V . On a

$$a^2 P = \underbrace{aU}_{=U_1 \in A[X]} \underbrace{aV}_{=V_1 \in A[X]}$$

On applique le Lemme 5 pour obtenir :

$$a^2 \gamma(P) = \gamma(U_1) \gamma(V_1) \quad (*)$$

En factorisant, on écrit $U_1 = \gamma(U_1)U_2$ et $V_1 = \gamma(V_1)V_2$ avec $U_2, V_2 \in A[X]$. Il vient :

$$a^2 P = \gamma(U_1) \gamma(V_1) U_2 V_2 \stackrel{(*)}{=} a^2 \gamma(P) U_2 V_2$$

Et comme $a \in A \setminus \{0\}$ et que A est intègre, on a $P = \gamma(P) U_2 V_2$ avec $U_2, V_2 \in A[X]$ de degré supérieur ou égal à 1.

On pose $U_2 = \sum_{i=0}^r b_i X^i$ et $V_2 = \sum_{j=0}^s c_j X^j$ avec $b_r c_s = a_n \neq 0$ par définition de P . Dans $A/(p)$, on a

$$\overline{\underbrace{P}_{=a_n X^n}} = \overline{U_2 V_2} = \overline{U_2} \overline{V_2}$$

et en particulier, le terme de degré 0, $\overline{b_0 c_0} = \overline{b_0} \overline{c_0}$ est nul. Mais, p est irréductible et A est factoriel, donc au vu du Lemme 4, (p) est premier et $A/(p)$ est intègre par le Lemme 2. Donc par le Lemme 3, $A/(p)[X]$ est aussi intègre. D'où $\overline{b_0} = 0$ ou $\overline{c_0} = 0$ (mais pas les deux car sinon $p^2 \mid b_0 c_0 = a_0$, ce qui serait en contradiction avec le Point (iii)).

On suppose donc $\overline{b_0} = 0$ et $\overline{c_0} \neq 0$. Si on avait $\forall i \in \llbracket 0, r \rrbracket, \overline{b_i} = 0$, on aurait en particulier $\overline{b_r} = 0$, et donc $\overline{b_r c_s} = \overline{a_n} = 0$ (exclu par le Point (ii)). Donc,

$$\exists i \in \llbracket 0, r-1 \rrbracket \text{ tel que } \overline{b_0} = \cdots = \overline{b_i} = 0 \text{ et } b_{i+1} \neq 0$$

Ainsi,

$$\overline{a_{i+1}} = \sum_{k=0}^{i+1} \overline{b_k c_{i+1-k}} = \underbrace{\overline{b_{i+1}}}_{\neq 0} \underbrace{\overline{c_0}}_{\neq 0} \neq 0$$

ce qui est absurde au vu du Point (i) car $i \in \llbracket 0, r-1 \rrbracket$ avec $r-1 \leq n-1$. □

Application 7. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Il existe des polynômes irréductibles de degré n sur \mathbb{Z} .

[PER]
p. 67

Démonstration. On applique le Théorème 6 au polynôme $P = X^n - 2$ avec le premier $p = 2$ qui nous donne l'irréductibilité du polynôme sur \mathbb{Q} . Reste à montrer qu'il est irréductible sur \mathbb{Z} .

Or, en supposant P réductible sur \mathbb{Z} , on peut écrire $P = QR$ avec $Q, R \in \mathbb{Z}[X]$ de degré supérieur ou égal à 1 car P est primitif. Mais à fortiori, $Q, R \in \mathbb{Q}[X]$ et ne sont pas inversibles donc P est réductible sur \mathbb{Q} : absurde. □

5 Décomposition de Dunford

On démontre l'existence et l'unicité de la décomposition de Dunford pour tout endomorphisme d'un espace vectoriel de dimension finie.

Soit E un espace vectoriel de dimension finie sur un corps commutatif \mathbb{K} .

[GOU21]
p. 203

Théorème 1 (Décomposition de Dunford). Soit $f \in \mathcal{E}$ un endomorphisme tel que son polynôme minimal π_f soit scindé sur \mathbb{K} . Alors il existe un unique couple d'endomorphismes (d, n) tel que :

- $f = d + n$.
- d est diagonalisable et n est nilpotent.
- $d \circ n = n \circ d$.

Démonstration. On écrit $\pi_f = (-1)^n \prod_{i=1}^s (X - \lambda_i)^{\alpha_i}$ et pour tout i , on note $N_i = \text{Ker}((f - \lambda_i \text{id}_E)^{\alpha_i})$ le i -ième sous-espace caractéristique de f .

Construction : Comme $E = N_1 \oplus \cdots \oplus N_s$, il suffit de définir d et n sur chaque N_i . On les définit pour tout i et pour tout $x \in N_i$ comme tels :

- $d(x) = \lambda_i x \implies d|_{N_i} = \lambda_i \text{id}_{N_i}$
- $n(x) = f(x) - \lambda_i x = f(x) - d(x) \implies n = f - d$.

Vérification :

- Les restrictions de d et n à N_i sont bien des endomorphismes car les espaces N_i sont stables par f et par d (cf. définition de d), donc aussi par $n = f - d$.
- d est diagonalisable et pour tout i , $n|_{N_i}^{\alpha_i} = 0$ (car $\forall x \in N_i$, $(f - \lambda_i \text{id}_E)^{\alpha_i}(x) = 0$ par définition de N_i). On pose donc $\alpha = \max_i \{\alpha_i\}$ et on a $n|_{N_i}^{\alpha} = 0$ pour tout i , donc $n^{\alpha} = 0$ par somme directe. Ainsi, n est nilpotent.
- Pour tout i , on a $d|_{N_i} = \lambda_i \text{id}_E$, donc $n|_{N_i} \circ d|_{N_i} = d|_{N_i} \circ n|_{N_i}$ i.e. d et n commutent sur chaque N_i donc sur E tout entier.

Unicité : Soit (d', n') un autre couple d'endomorphismes de E vérifiant les hypothèses. On remarque d'abord que d' et f commutent (car d' commute avec d' et n' , donc avec $f = d' + n'$ aussi). Pour tout i , N_i est stable par d' (car $\forall x \in N_i$, $(f - \lambda_i \text{id}_E)^{\alpha_i}(d'(x)) = d' \circ (f - \lambda_i \text{id}_E)^{\alpha_i}(x) = 0$). Comme $d|_{N_i} = \lambda_i \text{id}_{N_i}$, on en déduit que $d \circ d' = d' \circ d$ sur N_i . Donc c'est également vrai sur E tout entier. Ainsi, d et d' sont diagonalisables dans une même base, donc $d - d'$ est diagonalisable.

D'autre part, comme $n = f - d$, $n' = f - d'$ et que d et d' commutent, n et n' commutent. Si on choisit p et q tels que $n^p = n'^q = 0$, alors :

$$(n - n')^{p+q} = \sum_{i=0}^{p+q} \binom{p+q}{i} n^i (-1)^{p+q-i} n'^{p+q-i} = 0$$

(dans chaque terme de la somme, soit $i \geq p$, soit $p+q-i \geq q$). Donc $n - n' = d' - d$ est nilpotent. Or nous avons montré que $d' - d$ est diagonalisable, donc $d' - d = 0$. Finalement, on a $d = d'$ et $n = n'$. \square

Remarque 2. On peut démontrer que les endomorphismes d et n sont des polynômes en f .

6 Décomposition polaire

On montre que toute matrice $M \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ peut s'écrire de manière unique $M = OS$ avec $O \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ et $S \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$, et que l'application $(O, S) \mapsto M$ est un homéomorphisme.

Lemme 1. Soit $S \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. Alors $S \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ si et seulement si toutes ses valeurs propres sont strictement positives.

Démonstration. Par le théorème spectral, on peut écrire $S = {}^t P \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) P$ avec $P \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$. Si on suppose $\lambda_1, \dots, \lambda_n > 0$, on a $\forall x \neq 0$,

$${}^t x S x = {}^t (P x) \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) (P x) > 0 \text{ car } \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$$

d'où le résultat.

Réciproquement, on suppose $\forall x \neq 0, {}^t x S x > 0$. Avec $x = {}^t P e_1$ (où e_1 désigne le vecteur dont la première coordonnée vaut 1 et les autres sont nulles),

$${}^t x S x = {}^t (P x) D (P x) = {}^t e_1 D e_1 = \lambda_1 > 0$$

Et on peut faire de même pour montrer que $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \lambda_i > 0$. □

Lemme 2. $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ est un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et $\text{GL}_n(\mathbb{R}) \cap \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R}) \subseteq \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

Démonstration. Pour la première assertion, il suffit de constater que

$$\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R}) = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid {}^t M = M\} \cap \left(\bigcap_{x \in \mathbb{R}^n} \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid {}^t x M x \geq 0\} \right)$$

qui est une intersection de fermés (par image réciproque). Maintenant, si $M \in \text{GL}_n(\mathbb{R}) \cap \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$, alors M est diagonalisable avec des valeurs propres positives ou nulles (par le théorème spectral). Mais comme $\det(M) \neq 0$, toutes les valeurs propres de M sont strictement positives. Donc par le Lemme 1, $M \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$. □

Théorème 3 (Décomposition polaire). L'application

$$\mu : \begin{array}{ccc} \mathcal{O}_n(\mathbb{R}) \times \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R}) & \rightarrow & \text{GL}_n(\mathbb{R}) \\ (O, S) & \mapsto & OS \end{array}$$

est un homéomorphisme.

[C-G]
p. 376

Démonstration. Montrer qu'une application est un homéomorphisme se fait en 4 étapes : on montre qu'elle est continue, injective, surjective, et que la réciproque est elle aussi continue.

- L'application est bien définie et continue : Si $O \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ et $S \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$, alors $OS \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$. De plus, μ est continue en tant que restriction de la multiplication matricielle.

— L'application est surjective : Soit $M \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$. Si $x \neq 0$, on a

$${}^t x({}^t M M)x = {}^t (Mx)(Mx) = \|Mx\|_2^2 > 0$$

En particulier, ${}^t M M \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$. Par le théorème spectral, il existe $P \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ et $\lambda_1, \dots, \lambda_n > 0$ tels que ${}^t M M = P \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) P^{-1}$. On pose alors

$$D = \text{Diag}(\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_n}) \text{ et } S = P D P^{-1}$$

de sorte que $S^2 = {}^t M M$. Mais de plus,

$${}^t S = {}^t P^{-1} {}^t D {}^t P = S \implies S \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$$

et par le Lemme 1,

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \sqrt{\lambda_i} > 0 \implies S \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$$

On pose donc $O = M S^{-1}$ (ie. $M = OS$), et on a

$${}^t O O = {}^t (M S^{-1}) M S^{-1} = {}^t S^{-1} {}^t M M S^{-1} = S^{-1} S^2 S^{-1} = I_n \implies O \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$$

Donc $\mu(O, S) = M$ et μ est surjective.

— L'application est injective : Soit $M = OS \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ (avec O et S comme précédemment). Soit $M = O' S'$ une autre décomposition polaire de M . Alors il vient,

$$S^2 = {}^t M M = {}^t (O' S') O' S' = {}^t S'^t O' O' S' = S'^2$$

Soit Q un polynôme tel que $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, Q(\lambda_i) = \sqrt{\lambda_i}$ (les polynômes d'interpolation de Lagrange conviennent parfaitement). Alors,

$$S = P D^t P = P Q(D^2) {}^t P = Q(P D^2 {}^t P) = Q({}^t M M) = Q(S^2) = Q(S'^2)$$

Mais S' commute avec S'^2 , donc avec $S = Q(S'^2)$. En particulier, S et S' sont codiagonalisables, il existe $P_0 \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ et $\mu_1, \dots, \mu_n, \mu'_1, \dots, \mu'_n \in \mathbb{R}$ tels que

$$S = P_0 \text{Diag}(\mu_1, \dots, \mu_n) P_0^{-1} \text{ et } S' = P_0 \text{Diag}(\mu'_1, \dots, \mu'_n) P_0^{-1}$$

d'où :

$$\begin{aligned} S^2 = S'^2 &\implies P_0 \text{Diag}(\mu_1^2, \dots, \mu_n^2) P_0^{-1} = P_0 \text{Diag}(\mu_1'^2, \dots, \mu_n'^2) P_0^{-1} \\ &\implies \mu_i^2 = \mu_i'^2 \quad \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket \\ &\implies \mu_i = \mu_i' \quad \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket \text{ car } \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \mu_i > 0 \\ &\implies S = S' \end{aligned}$$

Ainsi, $O = M S^{-1} = M S'^{-1} = O'$. Donc μ est injective.

— L'application inverse est continue : Soit $(M_p) \in \text{GL}_n(\mathbb{R})^{\mathbb{N}}$ qui converge vers $M \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$. Il

s'agit de montrer que la suite $(\mu^{-1}(M_p)) = (O_p, S_p)$ converge vers $\mu^{-1}(M) = (O, S)$. Comme $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ est compact, il existe $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ strictement croissante telle que la suite extraite $(O_{\varphi(p)})$ converge vers une valeur d'adhérence $\bar{O} \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$. Ainsi, la suite $(S_{\varphi(p)})$ converge vers $\bar{S} = \bar{O}^{-1}M$.

Mais, $\bar{S} = \bar{O}^{-1}M \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{R}) \cap \overline{\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})}$. Donc par le Lemme 1,

$$\bar{S} \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{R}) \cap \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$$

et par le Lemme 2,

$$\bar{S} \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$$

Par unicité de la décomposition polaire, on a $M = \bar{O}\bar{S}$, d'où $\bar{O} = O$ et $\bar{S} = S$.

□

Remarque 4. La preuve vaut encore dans le cas complexe (pour le groupe unitaire et les matrices hermitiennes).

7 Densité des polynômes orthogonaux

On montre que la famille des polynômes orthogonaux associée à une fonction poids ρ vérifiant certaines hypothèses forme une base hilbertienne de $L_2(I, \rho)$ (où I est un intervalle de \mathbb{R}).

Soient I un intervalle de \mathbb{R} et ρ une fonction poids. On considère (P_n) la famille des polynômes orthogonaux associée à ρ sur I . [BMP]
p. 140

Lemme 1. On suppose que $\forall n \in \mathbb{N}, g_n : x \mapsto x^n \in L_1(I, \rho)$. Alors $\forall n \in \mathbb{N}, g_n \in L_2(I, \rho)$. En particulier, l'algorithme de Gram-Schmidt a bien du sens et (P_n) est bien définie.

Démonstration. On a $\forall n \in \mathbb{N}$,

$$\int_I |x^n|^2 \rho(x) dx = \int_I |x^{2n}| \rho(x) dx = \|g_{2n}\|_1 < +\infty$$

□

Théorème 2. On suppose qu'il existe $a > 0$ tel que

$$\int_I e^{a|x|} \rho(x) dx < +\infty$$

alors (P_n) est une base hilbertienne de $L_2(I, \rho)$ pour la norme $\|\cdot\|_2$.

Démonstration. Soit $f \in \text{Vect}(g_n)^\perp = \text{Vect}(P_n)^\perp$. On définit

$$\forall x \in \mathbb{R}, \quad \varphi(x) = \begin{cases} f(x)\rho(x) & \text{si } x \in I \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Montrons que $\varphi \in L_1(\mathbb{R})$. Remarquons tout d'abord que $\forall t \geq 0, t \leq \frac{1+t^2}{2}$. Ainsi, on a

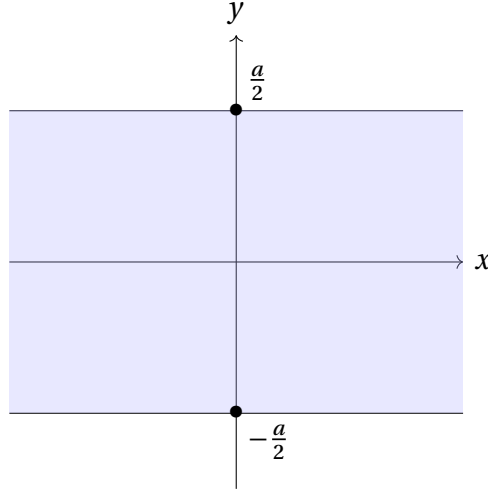
$$\forall x \in I, \quad |f(x)|\rho(x) \leq \frac{(1+|f(x)|)^2}{2} \rho(x)$$

Comme ρ et ρf^2 sont intégrables sur I , on en déduit que $\varphi \in L_1(\mathbb{R})$. On peut donc considérer sa transformée de Fourier

$$\hat{\varphi} : \xi \mapsto \int_I f(x) e^{-i\xi x} \rho(x) dx$$

Montrons que $\hat{\varphi}$ se prolonge en une fonction F holomorphe sur

$$B_a = \left\{ z \in \mathbb{C} \mid |\text{Im}(z)| < \frac{a}{2} \right\}$$



Définissons à présent $g : (z, x) \mapsto e^{-izx} f(x) \rho(x)$. Pour $z \in B_a$, on a

$$\int_I |g(z, x)| dx \leq \int_I e^{\frac{a|x|}{2}} |f(x)| \rho(x) dx$$

En utilisant l'inégalité de Cauchy-Schwarz pour $\|\cdot\|_2$, on obtient de plus

$$\int_I e^{\frac{a|x|}{2}} |f(x)| \rho(x) dx \leq \left(\int_I e^{a|x|} \rho(x) dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_I |f(x)|^2 \rho(x) dx \right)^{\frac{1}{2}} < +\infty \quad (*)$$

On définit la fonction F par

$$\forall z \in B_a, \quad F(z) = \int_I e^{-izx} f(x) \rho(x) dx = \int_I g(z, x) dx$$

L'inégalité (*) montre que cette fonction est bien définie. De plus :

- $\forall z \in B_a, x \mapsto g(z, x)$ est mesurable.
- pp. en $x \in I, z \mapsto g(z, x)$ est holomorphe.
- $\forall z \in B_a, \forall x \in I,$

$$|g(z, x)| \leq h(x) = e^{\frac{a|x|}{2}} |f(x)| \rho(x)$$

et l'inégalité (*) montre que $h \in L_1(I)$.

Donc par le théorème d'holomorphie sous l'intégrale, la fonction F est holomorphe sur B_a , et coïncide sur \mathbb{R} avec $\hat{\varphi}$. Ce théorème nous dit de plus que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \forall z \in B_a, F^{(n)}(z) = (-i)^n \int_I x^n e^{-izx} f(x) \rho(x) dx$$

Ce qui donne, une fois évalué en 0 :

$$\forall n \in \mathbb{N}, F^{(n)}(0) = (-i)^n \int_I x^n f(x) \rho(x) dx = (-i)^n \langle g_n, f \rangle = 0$$

L'unicité du développement en série entière d'une fonction holomorphe montre que $F = 0$ sur un voisinage de 0. Le théorème du prolongement analytique implique alors que $F = 0$ sur le connexe B_a tout entier, et donc en particulier, sur \mathbb{R} . Ainsi, $\hat{\varphi} = 0$. Comme φ est une fonction

intégrable, l'injectivité de la transformée de Fourier implique que $\varphi = 0$. Comme $\rho(x) > 0$, on en déduit que $f(x) = 0$ pp. en $x \in I$. On vient donc de montrer qu'une fonction orthogonale à tous les polynômes est nulle i.e. $\text{Vect}(g_n)^\perp = \{0\}$. En ajoutant le Lemme 1 à ceci, on a bien que les polynômes orthogonaux forment une base hilbertienne de $L_2(I, \rho)$. \square

Contre-exemple 3. On considère, sur $I = \mathbb{R}_*^+$, la fonction poids $\rho : x \mapsto x^{-\ln(x)}$. On pose $\forall x \in I, f(x) = \sin(2\pi \ln(x))$. On calcule

$$\begin{aligned} \langle f, g_n \rangle &= \int_I x^n \sin(2\pi \ln(x)) x^{-\ln(x)} dx \\ &\stackrel{y=\ln(x)}{=} \int_{\mathbb{R}} e^{(n+1)y} \sin(2\pi y) e^{-y^2} dy \\ &= e^{\frac{(n+1)^2}{4}} \int_{\mathbb{R}} e^{-\left(y - \frac{n+1}{2}\right)^2} \sin(2\pi y) dy \\ &= (-1)^{n+1} e^{\frac{(n+1)^2}{4}} \int_{\mathbb{R}} \sin(2\pi t) e^{-t^2} dt, \text{ avec } t = y - \frac{n+1}{2} \\ &\stackrel{f \text{ impaire}}{=} 0 \end{aligned}$$

Ainsi, la famille des g_n n'est pas totale. La famille des polynômes orthogonaux associée à ce poids particulier n'est donc pas totale non plus : ce n'est pas une base hilbertienne.

8 Dimension du commutant

Dans ce développement, on montre en se ramenant à la résolution d'un système d'équations linéaires homogène que la dimension du commutant d'une matrice est plus grande que celle de l'espace de départ. On applique ensuite ce résultat pour donner une condition nécessaire et suffisante qui permettant de calculer le commutant de cette matrice.

Soient \mathbb{K} un corps, $n \geq 1$ et $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

Notation 1. — On note $\mathcal{T}_n(\mathbb{K})$ l'ensemble des matrices carrées triangulaires supérieures d'ordre n à coefficients dans le corps \mathbb{K} .

— On note $\mathcal{C}(A)$ le commutant de A .

Remarque 2. On considère acquis le fait que si $\pi_A = \chi_A$, alors A est cyclique :

$$\exists x \in \mathbb{K}^n \setminus \{0\} \text{ tel que } (x, Ax, \dots, A^{n-1}x) \text{ est une base de } \mathbb{K}^n$$

[GOU21]
p. 289

Lemme 3.

$$\dim_{\mathbb{K}}(\mathcal{C}(A)) \geq n$$

[FGN2]
p. 160

Démonstration. Commençons par poser le système d'équations linéaires homogène

$$AX - XA = 0$$

d'inconnue $X = (x_{i,j})_{i,j \in \llbracket 1, n \rrbracket} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$. On note \mathcal{S} l'espace des solutions de ce système.

Plaçons-nous d'abord dans le cas où $A = (a_{i,j})_{i,j \in \llbracket 1, n \rrbracket} \in \mathcal{T}_n(\mathbb{K})$. Considérons ce système d'équations pour $X \in \mathcal{T}_n(\mathbb{K})$; on a alors $\frac{n(n+1)}{2}$ inconnues dans \mathbb{K} . Comme $AX - XA$ est triangulaire supérieure, dire que X est solution revient à écrire $\frac{n(n+1)}{2}$ équations correspondant à la nullité des coefficients de $AX - XA$ dans la partie supérieure. Mais, de ces équations, on peut en retirer n qui sont triviales (celles situées sur la diagonale, de la forme $a_{i,i}x_{i,i} - x_{i,i}a_{i,i}$). Ce système a donc $\frac{n(n+1)}{2} - n$ équations pour seulement $\frac{n(n+1)}{2}$ inconnues. Ainsi,

$$\dim_{\mathbb{K}}(\mathcal{C}(A)) = \dim_{\mathbb{K}}(\mathcal{S}) \geq \dim_{\mathbb{K}}(\mathcal{S} \cap \mathcal{T}_n(\mathbb{K})) \geq \frac{n(n+1)}{2} - \left(\frac{n(n+1)}{2} - n \right) = n$$

Si A n'est pas triangulaire mais est tout de même trigonalisable, il existe $P \in \text{GL}_n(\mathbb{K})$ et $T \in \mathcal{T}_n(\mathbb{K})$ telles que $A = PTP^{-1}$. Ainsi,

$$\begin{aligned} X \in \mathcal{C}(A) &\iff AX = XA \\ &\iff (PTP^{-1})X = X(PTP^{-1}) \\ &\iff T(P^{-1}XP) = (P^{-1}XP)T \\ &\iff P^{-1}XP \in \mathcal{C}(T) \end{aligned}$$

et puisque $X \mapsto P^{-1}XP$ est un isomorphisme de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$, on a

$$\dim_{\mathbb{K}}(A) = \dim_{\mathbb{K}}(T)$$

donc on peut tout à fait se ramener au cas où A est triangulaire supérieure.

Enfin, si A n'est pas trigonalisable, on considère \mathbb{L} une extension de \mathbb{K} sur laquelle χ_A est scindé. L'application

$$\varphi : \begin{array}{ccc} \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) & \rightarrow & \mathcal{M}_n(\mathbb{K}) \\ X & \mapsto & AX - XA \end{array}$$

est linéaire, donc on peut considérer sa matrice $B \in \mathcal{M}_{n^2}(\mathbb{K})$ dans la base canonique de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ (il s'agit de la matrice associée au système d'équations linéaires). Alors $\mathcal{S} = \text{Ker}(B)$. Le rang est invariant par extension de corps, donc

$$\text{rang}_{\mathbb{K}}(B) = \text{rang}_{\mathbb{L}}(B)$$

d'où

$$\begin{aligned} \dim_{\mathbb{K}}(\mathcal{S}) &= \dim_{\mathbb{K}}(\text{Ker}(B)) \\ &= n^2 - \text{rang}_{\mathbb{K}}(B) \\ &= n^2 - \text{rang}_{\mathbb{L}}(B) \\ &= \dim_{\mathbb{L}}(\text{Ker}(B)) \\ &\geq n \end{aligned}$$

car A est trigonalisable dans \mathbb{L} . D'où le résultat. □

Théorème 4.

$$\mathbb{K}[A] = \mathcal{C}(A) \iff \pi_A = \chi_A$$

Démonstration. Sens direct : Supposons $\mathbb{K}[A] = \mathcal{C}(A)$. Le Lemme 3 entraîne que

$$\deg(\pi_A) = \dim(\mathbb{K}[A]) \geq n$$

Mais comme $\deg(\pi_A) \leq n$, on a $\deg(\pi_A) = n$. Par le théorème de Cayley-Hamilton, on conclut

$$\pi_A = \chi_A$$

Réciproque : On suppose $\pi_A = \chi_A$. Par la Remarque 2, on peut trouver $x \in \mathbb{K}^n \setminus \{0\}$ tel que $(x, Ax, \dots, A^{n-1}x)$ est une base de \mathbb{K}^n . Ainsi, l'application

$$\varphi : \begin{array}{ccc} \mathcal{C}(A) & \rightarrow & \mathbb{K}^n \\ B & \mapsto & Bx \end{array}$$

est linéaire injective. En effet, si $B \in \text{Ker}(\varphi)$, alors

$$\forall k \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket, BA^k x = A^k Bx = 0 \implies B = 0$$

car B s'annule sur une base de \mathbb{K}^n . D'où $\dim(\mathcal{C}(A)) \leq \dim(\mathbb{K}^n) = n$. On déduit à l'aide du Lemme 3 que

$$\dim(\mathcal{C}(A)) = n$$

Notons de plus que

$$\dim(\mathbb{K}[A]) = \deg(\pi_A) = \deg(\chi_A) = n$$

et comme $\mathbb{K}[A] \subseteq \mathcal{C}(A)$ (car tout polynôme en A commute avec A), on a bien le résultat. \square

9 Dual de L_p

Avec les propriétés hilbertiennes de L_2 couplées à certaines propriétés des espaces L_p , on montre que le dual d'un espace L_p est L_q pour $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, dans le cas où $p \in]1, 2[$ et où l'espace est de mesure finie.

Soit (X, \mathcal{A}, μ) un espace mesuré de mesure finie.

Notation 1. On note $\forall p \in [1, 2]$, $L_p = L_p(X, \mathcal{A}, \mu)$.

Lemme 2. Soient $p \in]1, 2[$ et $f \in L_2$. Alors $f \in L_p$ telle que $\|f\|_p \leq M \|f\|_2$ où $M \geq 0$.

Démonstration. Comme $p \in]1, 2[$, on a $\frac{2}{p} > 1$. Soit r tel que $\frac{2}{p} + \frac{1}{r} = 1$. On applique l'inégalité de Hölder à $g = |f|^p \mathbb{1}_X$ de sorte que

$$\int_X |f|^p d\mu = \| |f|^p \mathbb{1}_X \|_1 \leq \| |f|^p \|_{\frac{2}{p}} \| \mathbb{1}_X \|_r \leq \mu(X)^{\frac{1}{r}} \|f\|_2^p$$

d'où le résultat. □

Lemme 3. Soit $p \in]1, 2[$. Alors L_2 est dense dans L_p pour la norme $\|\cdot\|_p$.

Démonstration. Soit $f \in L_p$. On considère la suite de fonction (f_n) définie par

$$\forall n \in \mathbb{N}, f_n = f \mathbb{1}_{|f| \leq n}$$

Clairement, (f_n) est une suite de L_2 . On va chercher à appliquer le théorème de convergence dominée à la suite de fonctions (g_n) définie pour tout $n \in \mathbb{N}$ par $g_n = |f_n - f|^p$:

- $\forall n \in \mathbb{N}$, g_n est mesurable.
- (g_n) converge presque partout vers la fonction nulle.
- Par convexité de la fonction $x \mapsto x^p$, on a

$$|f_n - f|^p = 2^p \left| \frac{f_n}{2} - \frac{f}{2} \right|^p \leq 2^{p-1} (|f|^p + |f_n|^p) \leq 2^p |f|^p \in L_1$$

On peut donc conclure

$$\|f - f_n\|_p^p = \int_X |f - f_n|^p d\mu \rightarrow 0$$

ce qu'il fallait démontrer. □

Théorème 4. L'application

$$\varphi : \begin{array}{ll} L_q & \rightarrow (L_p)' \\ g & \mapsto \left(\varphi_g : f \mapsto \int_X f g d\mu \right) \end{array} \quad \text{où } \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$$

[Z-Q]
p. 222

est une isométrie linéaire surjective. C'est donc un isomorphisme isométrique.

Démonstration. Soit $g \in L_q$ et $f \in L_p$. L'inégalité de Hölder donne

$$|\varphi_g(f)| \leq \|g\|_q \|f\|_p$$

donc $\varphi_g \in (L_p)'$ et $\|\varphi_g\| \leq \|g\|_q$. De plus, si $g = 0$, alors $\|\varphi_g\| = \|g\|_q = 0$. On peut donc supposer $g \neq 0$.

Soit u une fonction mesurable de module 1, telle que $g = u|g|$. On pose $h = \overline{u}|g|^{q-1}$. Comme $q = p(q-1)$, on a

$$\int_X |h|^p d\mu = \int_X |g|^{(q-1)p} d\mu = \int_X |g|^q d\mu < +\infty$$

d'où $h \in L_p$ et $\|h\|_p^p = \int_X |h|^p d\mu = \int_X |g|^q d\mu = \|\varphi_g(h)\|$. Comme, $\frac{|\varphi_g(h)|}{\|h\|_p} \leq \|\varphi_g\|$, on a en particulier,

$$\underbrace{\int_X |g|^q d\mu}_{=|\varphi_g(h)|} \leq \|\varphi_g\| \underbrace{\left(\int_X |g|^q d\mu \right)^{\frac{1}{p}}}_{=\|h\|_p}$$

et ainsi,

$$\|\varphi_g\| \geq \left(\int_X |g|^q d\mu \right)^{1-\frac{1}{p}} = \left(\int_X |g|^q d\mu \right)^{\frac{1}{q}} = \|g\|_q$$

donc $\|\varphi_g\| = \|g\|_q$ et φ est une isométrie.

Montrons qu'elle est surjective. Soit $\ell \in (L_p)'$. D'après le Lemme 2, on a $L_2 \subseteq L_p$, donc on peut considérer la restriction $\tilde{\ell} = \ell|_{L_2}$.

$$\forall f \in L_2, \quad |\tilde{\ell}(f)| \leq \|\ell\| \|f\|_p \leq M \|\ell\| \|f\|_2 \implies \tilde{\ell} \in (L_2)'$$

Comme L_2 est un espace de Hilbert, on peut appliquer le théorème de représentation de Riesz à $\tilde{\ell}$. Il existe $g \in L_2$ telle que

$$\forall f \in L_2, \quad \tilde{\ell}(f) = \int_X f \overline{g} d\mu$$

Pour conclure, il reste à montrer que $g \in L_q$ et que l'égalité précédente est vérifiée sur L_p . Comme dans précédemment, on considère u de module 1 telle que $g = u|g|$ et on pose $f_n = \overline{u}|g|^{q-1} \mathbb{1}_{|g| \leq n} \in L_\infty \subseteq L_2$. On a

$$\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} d\mu = \ell(f_n) \leq \|\ell\| \|f_n\|_p = \|\ell\| \left(\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} d\mu \right)^{\frac{1}{p}}$$

D'où

$$\left(\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} d\mu \right)^{\frac{1}{q}} = \left(\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} d\mu \right)^{1-\frac{1}{p}} \leq \|\ell\|$$

D'après le théorème de convergence monotone, on a

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} d\mu \right)^{\frac{1}{q}} = \left(\int_X |g|^q d\mu \right)^{\frac{1}{q}} = \|g\|_q \leq \|\ell\|$$

Et en particulier, $g \in L_q$. Ainsi, on a $\forall f \in L_2, \ell(f) = \varphi_g(f)$. Les applications ℓ et φ_g sont continues sur L_p et L_2 est dense dans L_p (par le Lemme 3), donc on a bien $\ell = \varphi_g = \varphi(g)$. \square

Remarque 5. Plus généralement, si l'on identifie g et φ_g :

- L_q est le dual topologique de L_p pour $p \in]1, +\infty[$.
- L_∞ est le dual topologique de L_1 si μ est σ -finie.

[LI]
p. 140

10 Équation de Sylvester

On montre que l'équation $AX + XB = C$ d'inconnue X admet une unique solution pour tout $C \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ et pour tout $A, B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ dont les valeurs propres sont de partie réelle strictement négative.

Lemme 1. Soit $\|\cdot\|$ une norme d'algèbre sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, et soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ une matrice dont les valeurs propres sont de partie réelle strictement négative. Alors il existe une fonction polynômiale $P : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et $\lambda > 0$ tels que $\|e^{tA}\| \leq e^{-\lambda t} P(t)$.

[GOU21]
p. 200

Démonstration. On fait la décomposition de Dunford de $A : A = D + N$. Comme D et N commutent, on a $e^{tA} = e^{tD} e^{tN}$. Soient P la matrice de passage donnée par la base de diagonalisation de D et $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ses valeurs propres. En notant $\|\cdot\|$ la norme subordonnée à $\|\cdot\|_\infty$ sur \mathbb{C}^n , on a $\forall t \geq 0$,

$$\begin{aligned} \|e^{tD}\| &= \|e^{tP \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) P^{-1}}\| \\ &= \|P e^{t \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)} P^{-1}\| \\ &\leq \underbrace{\|P\| \|P^{-1}\|}_{=\alpha} \sup_{\|x\|_\infty=1} \|\text{Diag}(e^{t\lambda_1}, \dots, e^{t\lambda_n})x\|_\infty \\ &\leq \alpha \sup_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket} e^{t\lambda_i} \\ &\leq \alpha e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

où $\lambda > 0$ par hypothèse. En dimension finie, toutes les normes sont équivalentes, donc il existe $\beta > 0$ tel que $\|e^{tD}\| \leq \beta e^{-\lambda t}$.

Pour conclure, en notant r l'indice de nilpotence de N ,

$$\begin{aligned} \|e^{tA}\| &\leq \|e^{tD}\| \|e^{tN}\| \\ &\leq e^{-\lambda t} \underbrace{\sum_{k=0}^{r-1} \beta \frac{\|N\|^k t^k}{k}}_{=P(t)} \end{aligned}$$

□

Théorème 2 (Équation de Sylvester). Soient A et $B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ deux matrices dont les valeurs propres sont de partie réelle strictement négative. Alors pour tout $C \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, l'équation $AX + XB = C$ admet une unique solution X dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$.

[I-P]
p. 177

Démonstration. Comme l'application $\varphi : X \mapsto AX + XB$ est un endomorphisme de $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, qui est un espace vectoriel de dimension finie, il suffit de montrer qu'elle est surjective pour obtenir l'injectivité (et donc l'unicité de la solution). Soit $C \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. On considère le problème de Cauchy

suivant d'inconnue $Y : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$:

$$\begin{cases} Y' = AY + YB \\ Y(0) = C \end{cases} \quad (E)$$

Il s'agit d'une équation différentielle linéaire à coefficients constants (on peut voir cela notamment en calculant les produits AY et YB et en effectuant la somme ; l'égalité matricielle avec C donnant le système d'équations voulu). D'après le théorème de Cauchy-Lipschitz linéaire, (E) admet une unique solution définie sur \mathbb{R} tout entier, que l'on note Y .

On vérifie que la solution est définie $\forall t \in \mathbb{R}$ par $Y(t) = \exp(tA)C\exp(tB)$. En effet pour tout $t \in \mathbb{R}$, on a :

$$Y'(t) = A\exp(tA)C\exp(tB) + \exp(tA)CB\exp(tB) = AY + YB$$

car toute matrice M commute avec son exponentielle (puisque $\exp(M)$ est limite d'un polynôme en M) et donc M commute aussi avec $\exp(tM)$ pour tout $t \in \mathbb{R}$.

On va maintenant montrer que $X = -\int_0^{+\infty} Y(s) ds$ est la solution de l'équation de Sylvester. Pour tout $t \geq 0$, on intègre Y' entre 0 et t pour obtenir :

$$Y(t) - C = \int_0^t Y'(s) ds = A \times \int_0^t Y(s) ds + \int_0^t Y(s) ds \times B$$

Il ne reste donc plus qu'à montrer que $Y(t) \rightarrow 0$ et que Y est intégrable pour conclure. Par le Lemme 1, il existe $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ et $P_1, P_2 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ polynômiales tels que $\|e^{tA}\| \leq e^{-\lambda_1 t} P_1(t)$ et $\|e^{tB}\| \leq e^{-\lambda_2 t} P_2(t)$ pour tout $t \geq 0$. Ainsi, en posant $\lambda = \max(\lambda_1, \lambda_2)$ et $P = P_1 P_2$, comme $\|\cdot\|$ est une norme d'algèbre :

$$\|Y(t)\| = \|e^{tA} C e^{tB}\| \leq \|C\| P(t) e^{-2\lambda t}$$

En particulier, on a bien $Y(t) \rightarrow 0$. De plus, comme $CP(t)e^{-2\lambda t}$ est intégrable sur $[0, +\infty[$ et domine $\|Y(t)\|$, alors Y est aussi intégrable $[0, +\infty[$. Finalement, en faisant $t \rightarrow +\infty$, on obtient :

$$-C = A \times \int_0^{+\infty} Y(s) ds + \int_0^{+\infty} Y(s) ds \times B$$

Donc $\varphi(X) = X$: φ est surjective et X est bien la solution de l'équation de Sylvester. \square

Remarque 3. Pour dire que toute matrice M commute avec $\exp(M)$, on aurait simplement pu dire que $\exp(M)$ est un polynôme en M ie. $\forall M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}), \exists P \in \mathbb{C}[X]$ tel que $\exp(M) = P(M)$.

[GOU21]
p. 189

Démonstration. Soit $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. L'ensemble $\mathbb{C}[M] = \{P(M) \mid P \in \mathbb{C}[X]\}$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ qui est de dimension finie, donc $\mathbb{C}[M]$ l'est aussi et est en particulier fermé.

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on pose $P_n = \sum_{k=0}^n \frac{M^k}{k!} \in \mathbb{C}[M]$ de sorte que $P_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \exp(M)$. Comme $\mathbb{C}[M]$ est fermé, on en déduit que $\exp(M) \in \mathbb{C}[M]$. Donc $\exists P \in \mathbb{C}[X]$ tel que $\exp(M) = P(M)$. \square

11 Extrema liés

Dans ce développement, on montre l'existence et l'unicité des multiplicateurs de Lagrange liant les différentielles de plusieurs fonctions sous certaines hypothèses.

Théorème 1 (Extrema liés). Soit U un ouvert de \mathbb{R}^n et soient $f, g_1, \dots, g_r : U \rightarrow \mathbb{R}$ des fonctions de classe \mathcal{C}^1 . On note $\Gamma = \{x \in U \mid g_1(x) = \dots = g_r(x) = 0\}$. Si $f|_\Gamma$ admet un extremum relatif en $a \in \Gamma$ et si les formes linéaires $d(g_1)_a, \dots, d(g_r)_a$ sont linéairement indépendantes, alors il existe des uniques $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ appelés **multiplicateurs de Lagrange** tels que

$$df_a = \lambda_1 d(g_1)_a + \dots + \lambda_r d(g_r)_a$$

[GOU20]
p. 337

Démonstration. Soit $s = n - r$. Identifions \mathbb{R}^n à $\mathbb{R}^s \times \mathbb{R}^r$ et écrivons les éléments (x, y) de \mathbb{R}^n sous la forme $(x, y) = (x_1, \dots, x_s, y_1, \dots, y_r)$. On notera également par la suite $a = (\alpha, \beta)$ avec $\alpha \in \mathbb{R}^s$ et $\beta \in \mathbb{R}^r$. On a déjà plusieurs informations :

p. 347

- Déjà, $r \leq n$, car les formes linéaires $d(g_i)_a$ forment une famille libre de $(\mathbb{R}^n)^*$, qui est de dimension n .
- De plus, si $r = n$, la démonstration est triviale car $(d(g_i)_a)_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ est alors une base de $(\mathbb{R}^n)^*$.

Pour ces raisons, nous supposons dans la suite $r \leq n - 1$ (ie. $s \geq 1$).

Comme $(d(g_i)_a)_{i \in \llbracket 1, r \rrbracket}$ est une famille libre, la matrice

$$\begin{pmatrix} \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j}(a) \right)_{\substack{i \in \llbracket 1, r \rrbracket \\ j \in \llbracket 1, s \rrbracket}} & \left(\frac{\partial g_i}{\partial y_j}(a) \right)_{\substack{i \in \llbracket 1, r \rrbracket \\ j \in \llbracket 1, r \rrbracket}} \end{pmatrix}$$

est de rang r . On peut donc extraire une sous-matrice de taille $r \times r$ inversible. Quitte à changer le nom des variables, on peut supposer que c'est la sous-matrice de droite, ie.

$$\det \left(\left(\frac{\partial g_i}{\partial y_j}(a) \right)_{i, j \in \llbracket 1, r \rrbracket} \right) \neq 0 \quad (*)$$

On va appliquer le théorème des fonctions implicites à la fonction $g = (g_1, \dots, g_r)$. Pour cela, on vérifie les hypothèses :

- g est de classe \mathcal{C}^1 .
- $g(\alpha, \beta) = 0$ car $(\alpha, \beta) = a \in \Gamma$.
- La différentielle partielle $d_y g_a$ est inversible par $(*)$.

Ainsi, il existe :

- U' voisinage de α dans \mathbb{R}^s .
- V' voisinage de β dans \mathbb{R}^r .
- $\varphi : U' \rightarrow V'$ de classe \mathcal{C}^1 telle que $\varphi(\alpha) = \beta$ et $\forall (x, y) \in U' \times V', (x, y) \in \Gamma \iff g(x, y) = 0 \iff y = \varphi(x)$.

En d'autres termes, sur un voisinage de a , les éléments de Γ s'écrivent $(x, \varphi(x))$. On pose maintenant $u : x \mapsto (x, \varphi(x))$ et $h = f \circ u$. Par composition, h est différentiable en α et

$$0 \stackrel{\alpha \text{ extremum de } h}{=} dh_\alpha = d(f \circ u)_\alpha = df_{u(\alpha)} \circ du_\alpha = df_a \circ du_\alpha$$

En termes de matrices, cela donne :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x_j}(a) \right)_{j \in \llbracket 1, s \rrbracket} \quad \left(\frac{\partial f}{\partial y_j}(a) \right)_{j \in \llbracket 1, r \rrbracket} \right) \begin{pmatrix} I_s \\ \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j}(\alpha) \right)_{\substack{i \in \llbracket 1, r \rrbracket \\ j \in \llbracket 1, s \rrbracket}} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1}(a) + \sum_{k=1}^r \frac{\partial f}{\partial y_k}(a) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_1}(\alpha) \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_s}(a) + \sum_{k=1}^r \frac{\partial f}{\partial y_k}(a) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_s}(\alpha) \end{pmatrix}$$

On aboutit à la relation suivante :

$$\forall i \in \llbracket 1, s \rrbracket, \frac{\partial f}{\partial x_i}(a) + \sum_{k=1}^r \frac{\partial f}{\partial y_k}(a) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_i}(\alpha) = 0 \quad (**)$$

Comme $\forall j \in \llbracket 1, r \rrbracket, g_j(\alpha, \varphi(\alpha)) = g_j(a) = 0$, on peut aboutir de la même manière à la relation suivante :

$$\forall i \in \llbracket 1, s \rrbracket, \forall j \in \llbracket 1, r \rrbracket, \frac{\partial g_j}{\partial x_i}(a) + \sum_{k=1}^r \frac{\partial g_j}{\partial y_k}(a) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_i}(\alpha) = 0 \quad (***)$$

On considère maintenant la matrice M suivante :

$$M = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}(a) \right)_{j \in \llbracket 1, s \rrbracket} & \left(\frac{\partial f}{\partial y_j}(a) \right)_{j \in \llbracket 1, r \rrbracket} \\ \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j}(a) \right)_{\substack{i \in \llbracket 1, r \rrbracket \\ j \in \llbracket 1, s \rrbracket}} & \left(\frac{\partial g_i}{\partial y_j}(a) \right)_{\substack{i \in \llbracket 1, r \rrbracket \\ j \in \llbracket 1, r \rrbracket}} \end{pmatrix}$$

Par $(**)$ et $(***)$, les s premiers vecteurs colonnes de cette matrice s'expriment linéairement en fonction de ses r derniers. Donc $\text{rang}(M) \leq r$. Mais, le rang des vecteurs lignes d'une matrice est égal au rang de ses vecteurs colonnes. Donc les $r + 1$ vecteurs lignes de M forment une famille liée. Mais par hypothèse, les r dernières lignes sont libres. Donc la première ligne est combinaison linéaire des r dernières, ce qui se réécrit :

$$\exists \lambda_1, \dots, \lambda_r \in \mathbb{R} \text{ tels que } df_a = \lambda_1 d(g_1)_a + \dots + \lambda_r d(g_r)_a$$

L'unicité est claire car $(d(g_i)_a)_{i \in \llbracket 1, r \rrbracket}$ est une famille libre. □

Remarque 2. Attention à la rigueur et à la propreté dans cette démonstration. On peut très vite se perdre si l'on va trop vite ou si l'on ne prend pas le temps de bien écrire chaque donnée.

Remarque 3. Il paraît que le jury n'aime pas beaucoup cette démonstration. Si vous la proposez, soyez sûr de pouvoir en donner une interprétation géométrique : grâce à la condition d'indépendance des $d(g_i)_a$, Γ est une sous-variété de \mathbb{R}^n autour du point a . D'autre part,

$$df_a = \lambda_1 d(g_1)_a + \cdots + \lambda_r d(g_r)_a \iff \bigcap_{i=1}^r \text{Ker}(d(g_i)_a) \subseteq \text{Ker}(df_a) \quad (*)$$

En particulier, df_a est nulle sur $\bigcap_{i=1}^r \text{Ker}(d(g_i)_a)$. Or, l'espace tangent en a à la sous-variété $\{x \text{ proche de } a \mid g_1(x) = \cdots = g_r(x) = 0\}$ est justement $\{h \in \mathbb{R}^n \mid d(g_1)_a(h) = \cdots = d(g_r)_a(h) = 0\}$.

Bref, la condition $(*)$ exprime que df_a est nulle sur le plan tangent à Γ en a . Ceci équivaut aussi à ce que ∇f_a soit orthogonal à l'espace tangent à Γ en a . Ainsi, la seule manière de rendre f plus petit serait de "sortir de Γ ".

12 Formes de Hankel

Le but de ce développement est de construire une forme quadratique permettant de dénombrer les racines réelles distinctes d'un polynôme en fonction de ses racines complexes.

Soit $P \in \mathbb{R}[X]$ un polynôme de degré n .

[C-G]
p. 356

Théorème 1 (Formes de Hankel). On note x_1, \dots, x_t les racines complexes de P de multiplis-
cités respectives m_1, \dots, m_t . On pose

$$s_0 = n \text{ et } \forall k \geq 1, s_k = \sum_{i=1}^t m_i x_i^k$$

Alors :

- (i) $\sigma = \sum_{i,j \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket} s_{i+j} X_i X_j$ définit une forme quadratique sur \mathbb{C}^n ainsi qu'une forme quadratique $\sigma_{\mathbb{R}}$ sur \mathbb{R}^n .
- (ii) Si on note (p, q) la signature de $\sigma_{\mathbb{R}}$, on a :
 - $t = p + q$.
 - Le nombre de racines réelles distinctes de P est $p - q$.

Démonstration. σ est un polynôme homogène de degré 2 sur \mathbb{C} (car la somme des exposants est 2 pour chacun des monômes), qui définit donc une forme quadratique sur \mathbb{C}^n . De plus, on peut écrire :

$$\forall k \geq 1, s_k = \sum_{\substack{x \text{ racine de } P \\ x \in \mathbb{R}}} m_k x^k + \sum_{\substack{x \text{ racine de } P \\ x \in \mathbb{C}}} m_k (x^k + \bar{x}^k)$$

donc $s_k = \overline{s_k}$ ie. $s_k \in \mathbb{R}$. Donc σ définit une forme quadratique $\sigma_{\mathbb{R}}$ sur \mathbb{R}^n . D'où le premier point.

Soit φ_k la forme linéaire sur \mathbb{C}^n définie par le polynôme homogène de degré 1

$$P_k(X_0, \dots, X_{n-1}) = X_0 + x_k X_1 + \dots + x_k^{n-1} X_{n-1}$$

pour $k \in \llbracket 0, t \rrbracket$. Dans la base duale $(e_i^*)_{i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket}$ de la base canonique $(e_i)_{i \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket}$ de \mathbb{C}^n , on a

$$\varphi_k = e_0^* + x_k e_1^* + \dots + x_k^{n-1} e_{n-1}^*$$

Et comme

$$\det((\varphi_k)_{k \in \llbracket 0, t \rrbracket}) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_0 & x_1 & \dots & x_t \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_0^{n-1} & x_1^{n-1} & \dots & x_t^{n-1} \end{vmatrix} \begin{matrix} \text{Vandermonde} \\ \neq 0 \end{matrix}$$

la famille $(\varphi_k)_{k \in \llbracket 0, t \rrbracket}$ est de rang t sur \mathbb{C} . Or, le coefficient de $X_i X_j$ dans $\sum_{k=1}^t m_k \varphi_k^2$ vaut

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^t m_k x_k^{2i} = s_{i+j} & \text{si } i = j \\ \sum_{k=1}^t 2m_k x_k^i x_k^j = \sum_{k=1}^t 2m_k x_k^{i+j} = 2s_{i+j} & \text{sinon} \end{cases}$$

donc, $\sigma = \sum_{k=1}^t m_k \varphi_k^2$. En particulier, $\text{rang}(\sigma) = t$ par indépendance des φ_k . On en déduit,

$$p + q = \text{rang}(\sigma) = \text{rang}(\sigma_{\mathbb{R}}) = t$$

(le rang est invariant par extension de corps).

Soit $k \in \llbracket 0, t \rrbracket$. Calculons la signature de la forme quadratique $\varphi_k^2 + \overline{\varphi_k}^2$:

- Si $x_k \in \mathbb{R}$, on a $\varphi_k^2 + \overline{\varphi_k}^2 = 2\varphi_k^2$, qui est de signature $(1, 0)$ car $\varphi_k \neq 0$.
- Si $x_k \notin \mathbb{R}$, on a $\varphi_k^2 + \overline{\varphi_k}^2 = 2\text{Re}(\varphi_k)^2 - 2\text{Im}(\varphi_k)^2$ qui est bien une forme quadratique réelle. Et $x_k = \overline{x_k}$, donc la matrice

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ x_k & \overline{x_k} \\ \vdots & \vdots \\ x_k^{n-1} & \overline{x_k}^{n-1} \end{pmatrix}$$

est de rang 2 (cf. le mineur correspondant aux deux premières lignes). Donc φ_k et $\overline{\varphi_k}$ sont indépendantes. Ainsi, $\text{rang}(\varphi_k^2 + \overline{\varphi_k}^2) = 2$ sur \mathbb{C} , donc sur \mathbb{R} aussi (toujours par invariance du rang par extension de corps). Donc la signature de $\varphi_k^2 + \overline{\varphi_k}^2$ est $(1, 1)$.

Maintenant, regroupons les φ_k conjuguées entre elles lorsqu'elles ne sont pas réelles :

$$\sigma = \sum_{\substack{k=1 \\ x_k \in \mathbb{R}}}^t m_k \varphi_k^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ x_k \notin \mathbb{R}}}^t m_k (\varphi_k^2 + \overline{\varphi_k}^2)$$

En passant à la signature, on obtient :

$$(p, q) = (r, 0) + \left(\frac{t-r}{2}, \frac{t-r}{2} \right) = \left(\frac{t+r}{2}, \frac{t-r}{2} \right)$$

où r désigne le nombre de racines réelles distinctes de P . Par unicité de la signature d'une forme quadratique réelle, on a bien $p - q = r$. D'où le point (ii). \square

Remarque 2. Tout l'intérêt de ces formes quadratiques est qu'on peut calculer les s_k par récurrence en utilisant les polynômes symétriques élémentaires, sans avoir besoin des racines.

Proposition 3 (Sommes de Newton). On pose $P = \sum_{k=0}^n a_k X^k$. Les sommes de Newton vérifient les relations suivantes :

- (i) $s_0 = n$.
- (ii) $\forall k \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket, s_k = -k a_{n-k} \sum_{i=1}^{k-1} s_i a_{n-k+i}$.
- (iii) $\forall p \in \mathbb{N}, s_{p+n} = \sum_{i=1}^n s_i a_{p+n-i}$.

[GOU21]
p. 86

13 Formule de Stirling

Dans ce développement un peu technique, nous démontrons la formule de Stirling $n! \sim \sqrt{2n\pi} \left(\frac{n}{e}\right)^n$ à l'aide du théorème central limite et de la fonction Γ d'Euler.

Lemme 1. Soit Y une variable aléatoire réelle à densité. Alors $\forall n \geq 1$, $\frac{Y-n}{\sqrt{n}}$ est à densité et,

$$f_{\frac{Y-n}{\sqrt{n}}}(x) = \sqrt{n}f_Y(n + x\sqrt{n}) \text{ pp. en } x \in \mathbb{R}$$

Démonstration. $\forall x \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} F_{\frac{Y-n}{\sqrt{n}}}(x) &= \mathbb{P}\left(\frac{Y-n}{\sqrt{n}} \leq x\right) \\ &= \mathbb{P}(Y \leq x\sqrt{n} + n) \\ &= F_Y(x\sqrt{n} + n) \end{aligned}$$

Or, la fonction de répartition d'une variable aléatoire réelle à densité est dérivable presque partout, et sa dérivée est presque partout égale à sa densité. Donc :

$$f_{\frac{Y-n}{\sqrt{n}}}(x) = \sqrt{n}f_Y(x\sqrt{n} + n) \text{ pp. en } x \in \mathbb{R}$$

□

Remarque 2. Il ne s'agit ni plus ni moins qu'une version affaiblie du théorème de changement de variable.

Lemme 3. Soient X et Y deux variables aléatoires indépendantes telles que $X \sim \Gamma(a, \gamma)$ et $Y \sim \Gamma(b, \gamma)$. Alors $Z = X + Y \sim \Gamma(a + b, \gamma)$.

[G-K]
p. 180

Démonstration. Soit $f_{a,\gamma} : x \mapsto \frac{\gamma^a}{\Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\gamma x} \mathbb{1}_{\mathbb{R}^+}(x)$ la densité de la loi $\Gamma(a, \gamma)$. $\forall x \geq 0$, on a :

$$\begin{aligned} f_Z(x) &= \int_0^x f_{a,\gamma}(x-t) f_{b,\gamma}(t) dt \\ &= \int_0^x \frac{\gamma^a}{\Gamma(a)} t^{a-1} e^{-\gamma t} \frac{\gamma^b}{\Gamma(b)} (x-t)^{b-1} e^{-\gamma(x-t)} dt \\ &= \frac{\gamma^{a+b} e^{-\gamma x}}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^x t^{a-1} (x-t)^{b-1} dt \\ &\stackrel{t=ux}{=} \frac{\gamma^{a+b} e^{-\gamma x}}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a+b-1} \int_0^1 u^{a-1} (x-t)^{b-1} dt \\ &= K_{a,b} f_{a+b,\gamma}(x) \end{aligned}$$

où $K_{a,b} = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^1 u^{a-1} (1-u)^{b-1} du$. Notons par ailleurs que f_Z est nulle sur \mathbb{R}^- et coïncide donc avec $K_{a,b} f_{a+b,\gamma}$ sur \mathbb{R}^+ .

Pour conclure, on utilise la condition de normalisation :

$$1 = \int_{\mathbb{R}} f_Z(x) dx = K_{a,b} \int_{\mathbb{R}} f_{a+b,\gamma}(x) dx = K_{a,b}$$

On obtient ainsi $f_Z = f_{a+b,\gamma}$, ce que l'on voulait. \square

Théorème 4 (Formule de Stirling).

p. 556

$$n! \sim \sqrt{2n\pi} \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

Démonstration. Soit (X_n) une suite de variable aléatoires indépendantes de même loi $\mathcal{E}(1)$. On pose $S_n = \sum_{k=0}^n X_k$. Montrons par récurrence que $S_n \sim \Gamma(n+1, 1)$.

- Pour $n = 0$: c'est clair car $\mathcal{E}(1) = \Gamma(1, 1)$.
- On suppose le résultat vrai à un rang $n \geq 0$. Pour montrer qu'il reste vrai au rang $n+1$, il suffit d'appliquer le Lemme 3 à $S_n \sim \Gamma(n, 1)$ et $X_{n+1} \sim \Gamma(1, 1)$ (qui sont bien indépendantes).

Par le Lemme 1 appliqué à S_n , pp. en $x \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} \overbrace{f_{\frac{S_n-n}{\sqrt{n}}}(x)}^{=g_n(x)} &= \sqrt{n} f_{S_n}(n + x\sqrt{n}) \\ &= \frac{\sqrt{n}}{\Gamma(n+1)} n^n \left(1 + \frac{x}{\sqrt{n}}\right)^n e^{-(n+x\sqrt{n})} \mathbb{1}_{[-\sqrt{n}, +\infty[}(x) \\ &= a_n h_n(x) \end{aligned}$$

avec :

- $a_n = \frac{n^{n+\frac{1}{2}} e^{-n} \sqrt{2\pi}}{\Gamma(n+1)}$ (ce qui nous intéresse).
- $h_n : x \mapsto \frac{e^{-\sqrt{n}x}}{\sqrt{2\pi}} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{n}}\right)^n \mathbb{1}_{[-\sqrt{n}, +\infty[}(x)$ (ce qui nous intéresse moins).

Montrons maintenant que $\frac{S_n-n}{\sqrt{n}}$ converge en loi vers $\mathcal{N}(0, 1)$. D'après le théorème central limite,

$$\frac{S_n - \mathbb{E}(S_n)}{\text{Var}(S_n)} \xrightarrow{(d)} \mathcal{N}(0, 1)$$

où :

- $\mathbb{E}(S_n) = (n+1)\mathbb{E}(X_0) = n+1$.
- $\text{Var}(S_n) = (n+1)\text{Var}(X_0) = n+1$ par indépendance.

On applique maintenant le théorème de Slutsky :

$$\frac{S_n - n}{\sqrt{n}} = \underbrace{\frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n}}}_{\rightarrow 1} \left(\underbrace{\frac{S_n - (n+1)}{\sqrt{n+1}}}_{\xrightarrow{(d)} \mathcal{N}(0,1)} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{n+1}}}_{\rightarrow 0} \right) \xrightarrow{(d)} \mathcal{N}(0,1)$$

Tout cela pour dire que,

$$\int_0^1 g_n(x) dx = \mathbb{P} \left(\frac{S_n - n}{\sqrt{n}} \in [0, 1] \right) \rightarrow \int_0^1 \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} dx$$

De plus :

- $\forall n \in \mathbb{N}$, h_n est mesurable.
- $\forall x \in \mathbb{R}$, $h_n(x) = \frac{e^{-x^2 \varphi\left(\frac{x}{\sqrt{n}}\right)}}{\sqrt{2\pi}} \mathbb{1}_{]-1, +\infty[}\left(\frac{x}{\sqrt{n}}\right)$ où $\forall x > -1$, $\varphi(x) = \frac{x - \ln(1+x)}{x^2}$. Par développement limité, on a $\lim_{x \rightarrow 0} \varphi(x) = \frac{1}{2}$. Donc $\forall x \in \mathbb{R}$, $h_n(x) \rightarrow \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}$.
- Comme $\forall x > -1$, $\varphi(x) \geq 0$, alors h_n est dominée par $x \mapsto \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$.

Donc par le théorème de convergence dominée,

$$\int_0^1 h_n(x) dx \rightarrow \int_0^1 \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} dx$$

Pour conclure, on écrit :

$$\int_0^1 g_n(x) dx = a_n \int_0^1 h_n(x) dx \Rightarrow \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \frac{\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^1 g_n(x) dx}{\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^1 h_n(x) dx} = 1$$

et comme $\Gamma(n+1) = n!$, par définition de a_n :

$$1 = \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^{n+\frac{1}{2}} e^{-n} \sqrt{2\pi}}{n!}$$

□

14 Formule sommatoire de Poisson

On démontre la formule sommatoire de Poisson en utilisant principalement la théorie des séries de Fourier.

Théorème 1 (Formule sommatoire de Poisson). Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction de classe \mathcal{C}^1 telle que $f(x) = O\left(\frac{1}{x^2}\right)$ et $f'(x) = O\left(\frac{1}{x^2}\right)$ quand $|x| \rightarrow +\infty$. Alors :

$$\forall x \in \mathbb{R}, \sum_{n \in \mathbb{Z}} f(x+n) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \hat{f}(2\pi n) e^{2i\pi n x}$$

où \hat{f} désigne la transformée de Fourier de f .

[GOU20]
p. 284

Démonstration. Comme $f(x) = O\left(\frac{1}{x^2}\right)$, il existe $M > 0$ et $A > 0$ tel que

$$\forall |x| > A, |f(x)| \leq \frac{M}{x^2} \quad (*)$$

Soit $K > 0$. On a $\forall x \in [-K, K], \forall n \in \mathbb{Z}$ tel que $|n| > K + A$:

$$|f(x+n)| \stackrel{(*)}{\leq} \frac{M}{(x+n)^2} \leq \frac{M}{(|n|-K)^2}$$

Donc $\sum_{n \in \mathbb{Z}} f(x+n)$ converge normalement sur tout segment de \mathbb{R} donc converge simplement sur \mathbb{R} . On note F la limite simple en question. On montre de même que $\sum_{n \in \mathbb{Z}} f'(x+n)$ converge normalement sur tout segment de \mathbb{R} . Donc par le théorème de dérivation des suites de fonctions, F est de classe \mathcal{C}^1 sur tout segment de \mathbb{R} , donc sur \mathbb{R} tout entier (la continuité et la dérivabilité sont des propriétés locales). Soit $x \in \mathbb{R}$. On a :

$$\begin{aligned} \forall N \in \mathbb{N}, \sum_{n=-N}^N f(x+1+n) &= \sum_{n=-N-1}^{N+1} f(x+n) \\ &\xrightarrow[N \rightarrow +\infty]{} F(x+1) = F(x) \end{aligned}$$

ie. F est 1-périodique. On peut calculer ses coefficients de Fourier. $\forall n \in \mathbb{Z}$,

$$c_n(F) = \int_0^1 F(t) e^{-2i\pi n t} dt = \int_0^1 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(t+n) e^{-2i\pi n t} dt$$

Par convergence uniforme sur un segment, on peut échanger somme et intégrale :

$$c_n(F) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_n^{n+1} f(t) e^{-2i\pi n t} dt$$

Or, la transformée de Fourier d'une fonction L_1 est convergente. On peut donc écrire :

$$c_n(F) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2i\pi n t} dt = \hat{f}(2\pi n)$$

Comme F est de classe \mathcal{C}^1 , sa série de Fourier converge uniformément vers F . D'où le résultat. \square

Application 2 (Identité de Jacobi).

$$\forall s > 0, \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{-\pi n^2 s} = \frac{1}{\sqrt{s}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\pi n^2}{s}}$$

Démonstration. Soit $\alpha > 0$. On définit $G_\alpha : x \mapsto e^{-\alpha x^2}$ et on connaît sa transformée de Fourier :

$$\forall \xi \in \mathbb{R}, \widehat{G_\alpha}(\xi) = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{\xi^2}{4\alpha}}$$

Soit $s > 0$. Appliquons le Théorème 1 à la fonction $G_{\pi s}$:

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{-\pi s(x+n)^2} &= \frac{1}{\sqrt{s}} \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{-\frac{(2\pi n)^2}{4\pi s}} e^{2i\pi n x} \\ \xRightarrow{x=0} \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{-\pi s n^2} &= \frac{1}{\sqrt{s}} \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{-\frac{\pi n^2}{s}} \end{aligned}$$

\square

15 $\exp : \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ est un homéomorphisme

Dans ce développement, on démontre que l'exponentielle de matrices induit un homéomorphisme de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

Lemme 1. $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est un fermé de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

Démonstration. Il suffit d'écrire

$$\mathcal{S}_n(\mathbb{R}) = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid {}^t M = M\} = f^{-1}\{0\}$$

où $f : M \mapsto {}^t M - M$ est continue, donc $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est fermé en tant qu'image réciproque d'un fermé par une application continue. \square

Lemme 2. Une suite bornée d'un espace métrique qui admet une seule valeur d'adhérence converge vers cette valeur d'adhérence.

Démonstration. Soit (x_n) une suite bornée d'un espace métrique (E, d) qui n'admet qu'une seule valeur d'adhérence $\ell \in E$. On suppose par l'absurde que (x_n) ne converge pas vers ℓ :

$$\exists \epsilon > 0 \text{ tel que } \forall N \in \mathbb{N}, \exists n \geq N \text{ tel que } d(x_n, \ell) > \epsilon \quad (*)$$

On va construire une sous-suite qui converge vers une valeur d'adhérence différente de ℓ .

Par $(*)$ appliqué à $N = 0$, $\exists n_0 \geq 0$ tel que $d(x_{n_0}, \ell) > \epsilon$. On définit donc $\varphi(0) = n_0$.

Supposons construite $\varphi(i)$ jusqu'à un rang k telle que $\forall i \leq k$, $\varphi(i+1) > \varphi(i)$ (lorsque cela a un sens) et $d(x_{\varphi(i)}, \ell) > \epsilon$. Il suffit alors d'appliquer $(*)$ à $N = \varphi(k) + 1$ pour obtenir un $n_k \geq \varphi(k) + 1 > \varphi(k)$ tel que $d(x_{n_k}, \ell) > \epsilon$; on définit alors $\varphi(k+1) = n_k$.

Nous venons donc de construire par récurrence une application $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ strictement croissante et telle que $\forall n \in \mathbb{N}$, $d(x_{\varphi(n)}, \ell) > \epsilon$. La suite $(x_{\varphi(n)})$ est bornée (par hypothèse) : elle est contenue dans un compact et admet une valeur d'adhérence ℓ' (par le théorème de Bolzano-Weierstrass). Soit donc $\phi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ strictement croissante telle que $(x_{(\varphi \circ \psi)(n)})$ converge vers ℓ' .

On a $\forall n \in \mathbb{N}$, $d(x_{(\varphi \circ \psi)(n)}, \ell) > \epsilon$, qui donne $d(\ell', \ell) \geq \epsilon$ après un passage à la limite. Donc $\ell \neq \ell'$. Et ℓ' est clairement valeur d'adhérence de (x_n) : absurde. \square

Lemme 3. Soit $S \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. Alors,

$$\|S\|_2 = \rho(S)$$

où ρ est l'application qui à une matrice y associe son rayon spectral.

Démonstration. D'après le théorème spectral, il existe (e_1, \dots, e_n) une base orthonormée de \mathbb{R}^n formée de vecteurs propres de S associés aux valeurs propres $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ de S , qui sont réelles car S

est symétrique. Soit $x \in \mathbb{R}^n$ dont on note (x_1, \dots, x_n) ses coordonnées dans cette base. On a

$$\|Sx\|_2^2 = \left\| \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i e_i \right\|_2^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 x_i^2 \leq \rho(S)^2 \|x\|_2^2$$

D'où $\|S\|_2 \leq \rho(S)$. Pour obtenir l'inégalité inverse, il suffit de considérer $\lambda \in \mathbb{R}$ une valeur propre de S telle que $|\lambda| = \rho(S)$ et $x \in \mathbb{R}^n$ un vecteur propre associé à λ . On a alors

$$\|Sx\|_2 = |\lambda| \|x\|_2$$

et on a bien $\rho(S) \leq \|S\|_2$. □

Théorème 4. L'application $\exp : \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ est un homéomorphisme.

Démonstration. Montrer qu'une application est un homéomorphisme se fait en 4 étapes : on montre qu'elle est continue, injective, surjective, et que la réciproque est elle aussi continue.

— L'application est bien définie et continue : Soit $S \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. D'après le théorème spectral,

$$\exists P \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R}) \text{ telle que } S = P \underbrace{\text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)}_{=D} P^{-1}$$

où $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ désignent les valeurs propres de S . On a donc

$$\begin{aligned} \exp(S) &= P^{-1} \exp(D) P \\ &= P^{-1} \text{Diag}(e^{\lambda_1}, \dots, e^{\lambda_n}) P \end{aligned}$$

Or, $P^{-1} = {}^t P$, donc ${}^t \exp(S) = \exp(S)$ et $\exp(S) \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. De plus, $\forall x \in \mathbb{R}^n$,

$${}^t x S x = {}^t (P x) D (P x) > 0$$

car $D \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$. Donc $S \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

— L'application est surjective : Soit $S \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$. On peut écrire

$$S = P \text{Diag}(\mu_1, \dots, \mu_n) P^{-1}$$

Il suffit alors de poser $U = P^{-1} \text{Diag}(\ln(\mu_1), \dots, \ln(\mu_n)) P \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ pour avoir $\exp(U) = S$; d'où la surjectivité.

— L'application est injective : Soient $S, S' \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ telles que $\exp(S) = \exp(S')$. Montrons que $S = S'$. Comme avant, $\exists P, P' \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ telles que

$$S = P \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) P^{-1} \text{ et } S' = P' \text{Diag}(\lambda'_1, \dots, \lambda'_n) P'^{-1}$$

Soit $L \in \mathbb{R}[X]$ tel que $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $L(e^{\lambda_i}) = \lambda_i$ et $L(e^{\lambda'_i}) = \lambda'_i$ (les polynômes d'interpolation de Lagrange conviennent parfaitement et sont bien définis dans le cas présent car $e^{\lambda_i} =$

$e^{\lambda_j} \Rightarrow \lambda_i = \lambda_j$ par injectivité de l'exponentielle). D'où

$$\begin{aligned} L(\exp(S)) &= L(P \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) P^{-1}) \\ &= PL(\exp(\text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n))) P^{-1} \\ &= P \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) P^{-1} \\ &= S \end{aligned}$$

et de même, $L(\exp(S')) = S'$. D'où $S = S'$.

- L'application inverse est continue : Soit (A_k) une suite de $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ qui converge vers $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$. Il s'agit de montrer que la suite (B_k) de terme général $B_k = \exp^{-1}(A_k)$ converge vers $B = \exp^{-1}(A)$. Supposons tout d'abord (B_k) non bornée. Comme sur $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$, $\|\cdot\|_2 = \rho(\cdot)$ (par le Lemme 3), il existe $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ strictement croissante telle que $\rho(B_{\varphi(k)}) \rightarrow +\infty$. On peut donc extraire une suite de valeurs propres (λ_k) telle que $|\lambda_k| \rightarrow +\infty$. Encore une fois, quitte à extraire, on peut supposer $\lambda_k \rightarrow +\infty$ ou $\lambda_k \rightarrow -\infty$.
- Si $\lambda_k \rightarrow +\infty$, $e^{\lambda_k} \rightarrow +\infty$. Mais $\forall k \in \mathbb{N}$, e^{λ_k} est valeur propre de A_k , donc $\rho(A_k) \rightarrow +\infty$: absurde car (A_k) converge.
 - Si $\lambda_k \rightarrow -\infty$, $e^{-\lambda_k} \rightarrow +\infty$. Mais $\forall k \in \mathbb{N}$, $e^{-\lambda_k}$ est valeur propre de A_k^{-1} , donc $\rho(A_k^{-1}) \rightarrow +\infty$: absurde car (A_k^{-1}) converge par continuité de $M \mapsto M^{-1}$.

Donc la suite (B_k) est bornée. Par le théorème de Bolzano-Weierstrass, (B_k) admet une valeur d'adhérence \tilde{B} . Comme $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est fermé (c'est le Lemme 1), $\tilde{B} \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.

Soit $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ strictement croissante telle que $B_{\varphi(k)} \rightarrow \tilde{B}$. Alors,

$$\exp(B) = A \longleftarrow A_{\varphi(k)} = \exp(B_{\varphi(k)}) \longrightarrow \exp(\tilde{B})$$

ie. $\exp(B) = \exp(\tilde{B})$; donc $B = \tilde{B}$ par injectivité de \exp . Donc par le Lemme 2, $B_k \rightarrow B$.

□

16 Intégrale de Dirichlet

Il s'agit ici de calculer l'intégrale de Dirichlet en utilisant les théorèmes classiques d'intégration.

Lemme 1.

$$\forall y, t \in \mathbb{R}^+, |e^{-(y-i)t}| \leq 1$$

Démonstration. Soient $y, t \in \mathbb{R}^+$. On a :

$$|e^{-(y-i)t}| = |e^{-yt} e^{it}| = |e^{-yt}| |e^{it}|$$

Or, e^{it} est un complexe de module 1 et $yt \geq 0$, donc $e^{-yt} \leq 1$. D'où le résultat. \square

Théorème 2 (Intégrale de Dirichlet). On pose $\forall x \geq 0$,

$$F(x) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} e^{-xt} dt$$

alors :

- (i) F est bien définie et est continue sur \mathbb{R}^+ .
- (ii) F est dérivable sur \mathbb{R}_*^+ et $\forall x \in \mathbb{R}_*^+, F'(x) = -\frac{1}{1+x^2}$.
- (iii) $F(0) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} dt = \frac{\pi}{2}$.

[G-K]
p. 107

Démonstration. Posons $\forall x \in \mathbb{R}^+$ et $\forall t \in \mathbb{R}_*^+, f(x, t) = \frac{\sin(t)}{t} e^{-xt}$ ainsi que $\forall n \geq 1, F_n(x) = \int_0^n \frac{\sin(t)}{t} e^{-xt} dt$.
On a :

- $\forall x \geq 0, t \mapsto f(x, t)$ est mesurable.
- Presque partout en $t > 0, x \mapsto f(x, t)$ est continue.
- $\forall x \geq 0$ et presque partout en $t > 0, |f(x, t)| \leq 1$, et $t \mapsto 1$ est intégrable sur $[0, n]$.

On peut donc appliquer le théorème de continuité sous l'intégrale pour conclure que F_n est continue sur \mathbb{R}^+ .

Soient $x \geq 0$ et $q \geq p \geq N \geq 0$. On a :

$$\begin{aligned}
 |F_q(x) - F_p(x)| &= \left| \int_p^q f(x, t) dt \right| \\
 &= \left| \operatorname{Im} \left(\int_p^q e^{-xt} \frac{e^{it}}{t} dt \right) \right| \\
 &\leq \left| \int_p^q \frac{e^{-(x-i)t}}{t} dt \right| \\
 &= \frac{1}{|x-i|} \left| \int_p^q (x-i) \frac{e^{-(x-i)t}}{t} dt \right| \\
 &\leq \left| \int_p^q (x-i) \frac{e^{-(x-i)t}}{t} dt \right| \\
 &= \left| \int_p^q -(x-i) e^{-(x-i)t} \frac{1}{t} dt \right|
 \end{aligned}$$

Nous allons réaliser une intégration par parties. Pour cela, posons :

$$\begin{aligned}
 - u'(t) &= -(x-i) e^{-(x-i)t} \implies u(t) = e^{-(x-i)t} \\
 - v(t) &= \frac{1}{t} \implies v'(t) = -\frac{1}{t^2}
 \end{aligned}$$

Ce qui nous donne :

$$\begin{aligned}
 \left| \int_p^q (x-i) \frac{e^{-(x-i)t}}{t} dt \right| &= \left| [u(t)v(t)]_p^q - \int_p^q u(t)v'(t) dt \right| \\
 &= \left| \frac{e^{-(q-i)t}}{q} - \frac{e^{-(p-i)t}}{p} + \int_p^q \frac{e^{-(x-i)t}}{t^2} dt \right|
 \end{aligned}$$

On applique maintenant le Lemme 1 :

$$\begin{aligned}
 \left| \frac{e^{-(q-i)t}}{q} - \frac{e^{-(p-i)t}}{p} + \int_p^q \frac{e^{-(x-i)t}}{t^2} dt \right| &\leq \frac{1}{p} + \frac{1}{q} + \int_p^q \frac{1}{t^2} dt \\
 &= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} - \left[\frac{1}{t} \right]_p^q \\
 &\leq \frac{2}{N}
 \end{aligned}$$

D'où :

$$|F_q(x) - F_p(x)| \leq \frac{2}{N}$$

Donc la suite de fonctions continues (F_n) vérifie le critère de Cauchy uniforme, et converge ainsi vers F uniformément. En particulier, F est continue sur \mathbb{R}^+ .

Soit $a > 0$. f est dérivable par rapport à x et pour tout $x \in]a, +\infty[$ et $t \in \mathbb{R}^+$:

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x}(x, t) \right| = |-\sin(t) e^{-xt}| \leq e^{-at}$$

On applique le théorème de dérivation sous l'intégrale, qui donne :

$$\forall x \in]a, +\infty[, F'(x) = \int_0^{+\infty} -\sin(t) e^{-xt} dt$$

En particulier, c'est vrai sur \mathbb{R}_*^+ car la dérivabilité est une propriété locale. Or $\forall A > 0$, on a :

$$\begin{aligned} \int_0^A e^{-(i+x)t} dt &= \frac{1 - e^{-(i+x)A}}{i+x} \\ \Rightarrow \lim_{A \rightarrow +\infty} \int_0^A e^{-(i+x)t} dt &= \frac{1}{i+x} = \frac{-i+x}{1+x^2} \\ \Rightarrow \operatorname{Im} \left(\lim_{A \rightarrow +\infty} \int_0^A e^{-(i+x)t} dt \right) &= \operatorname{Im} \left(\frac{-i+x}{1+x^2} \right) = -\frac{1}{1+x^2} \end{aligned}$$

Or,

$$\operatorname{Im} \left(\lim_{A \rightarrow +\infty} \int_0^A e^{-(i+x)t} dt \right) = \lim_{A \rightarrow +\infty} \int_0^A \operatorname{Im} (e^{-(i+x)t}) dt = \int_0^{+\infty} -\sin(t) e^{-xt} dt = F'(x)$$

En recollant les deux morceaux :

$$F'(x) = -\frac{1}{1+x^2} \quad (*)$$

Soient $x, y \in \mathbb{R}_*^+$. En intégrant (*) entre x et y , on obtient :

$$F(x) - F(y) = \arctan(x) - \arctan(y)$$

Mais,

$$\begin{aligned} |F(y)| &= \left| \int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} e^{-yt} dt \right| \\ &\leq \int_0^{+\infty} \left| \frac{\sin(t)}{t} e^{-yt} \right| dt \\ &\leq \int_0^{+\infty} e^{-yt} dt \\ &= \frac{1}{y} \\ &\longrightarrow_{y \rightarrow +\infty} 0 \end{aligned}$$

Il suffit donc de faire tendre y vers $+\infty$ pour obtenir :

$$\forall x > 0, F(x) = \frac{\pi}{2} - \arctan(x)$$

Ce qui, en faisant tendre x vers 0, donne :

$$F(0) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} dt = \frac{\pi}{2}$$

□

17 Invariants de similitude

Nous montrons l'existence et l'unicité des invariants de similitude d'un endomorphisme d'un espace de dimension finie en utilisant la dualité.

Soit E un espace vectoriel de dimension finie $n \geq 1$ sur un corps commutatif \mathbb{K} . Soit $f \in \mathcal{L}(E)$.

[GOU21]
p. 398

Notation 1. Soit $x \in E$. On note P_x le polynôme unitaire engendrant l'idéal $\{P \in \mathbb{K}[X] \mid P(f)(x) = 0\}$ (un tel polynôme existe car $\mathbb{K}[X]$ est principal et cet idéal est non réduit à $\{0\}$) et $E_x = \{P(f)(x) \mid P \in \mathbb{K}[X]\}$.

Lemme 2. (i) Si $k = \deg(\pi_f)$, alors $\mathbb{K}[f]$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{L}(E)$ de dimension k , dont une base est $(f^i)_{i \in \llbracket 0, k-1 \rrbracket}$.

(ii) Soit $x \in E$. Si $l = \deg(P_x)$, alors E_x est un sous-espace vectoriel de E de dimension l , dont une base est $(f^i(x))_{i \in \llbracket 0, l-1 \rrbracket}$.

Démonstration. (i) Montrons que la famille $(f^i)_{i \in \llbracket 0, k-1 \rrbracket}$ est à la fois libre et génératrice.

p. 61

- Soit $P(f) \in \mathbb{K}[f]$. On fait la division euclidienne de P par π_f dans $\mathbb{K}[X]$ pour écrire $P = \pi_f Q + R$ avec $Q, R \in \mathbb{K}[X]$ et $\deg(R) < k = \deg(\pi_f)$. En évaluant en f , cela donne $P(f) = R(f) \in \text{Vect}(\text{id}_E, \dots, f^{k-1})$. Donc la famille est génératrice.
- Si $\sum_{i=0}^{k-1} \lambda_i f^i = 0$, alors le polynôme $P = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda_i X^i$ vérifie $P(f) = 0$. Donc $\pi_f \mid P$, et comme $\deg(P) < \deg(\pi_f)$, on a $P = 0$. Donc $\lambda_0 = \dots = \lambda_{k-1} = 0$. Donc la famille est libre.

(ii) La deuxième assertion se montre sensiblement de la même manière.

□

Lemme 3. Il existe $x \in E$ tel que $P_x = \pi_f$.

p. 290

Remarque 4. La démonstration est un peu trop longue pour être incluse ici : c'est un résultat qui demande du temps pour le démontrer (et pourrait constituer un vrai développement à part entière). Nous vous renvoyons vers [GOU21] p. 178 pour la démonstration.

Théorème 5 (Frobenius). Il existe des sous-espaces vectoriels F_1, \dots, F_r de E tous stables par f tels que :

- (i) $E = \bigoplus_{i=1}^r F_i$.
- (ii) $\forall i \in \llbracket 1, r \rrbracket$, la restriction $f_i = f|_{F_i}$ est un endomorphisme cyclique de F_i .
- (iii) Si $P_i = \pi_{f_i}$ est le polynôme minimal de f_i , on a $P_{i+1} \mid P_i \forall i \in \llbracket 1, r-1 \rrbracket$.

La suite $(P_i)_{i \in \llbracket 1, r \rrbracket}$ ne dépend que de f et non du choix de la décomposition (elle est donc unique). On l'appelle **suite des invariants de f** .

Démonstration. — Existence : Soit $k = \deg(\pi_f)$. Par le Lemme 3, il existe $x \in E$ tel que $P_x = \pi_f$. Par le Lemme 2, le sous-espace $F = E_x$ est de dimension k et est stable par f et comme $\deg(P_x) = k$, la famille de vecteurs

$$\left(\underbrace{x}_{=e_1}, \dots, \underbrace{f^{k-1}(x)}_{=e_k} \right)$$

forme une base de F . Complétons cette base en une base (e_1, \dots, e_n) de E . En désignant par (e_1^*, \dots, e_n^*) la base duale associée et en notant $\Gamma = \{e_k^* \circ f^i \mid i \in \mathbb{N}\}$, on pose

$$\begin{aligned} G &= \Gamma^\circ \\ &= \{x \in E \mid \forall i \in \mathbb{N}, (e_k^* \circ f^i)(x) = 0\} \end{aligned}$$

Ainsi, G est l'ensemble des $x \in E$ tel que la k -ième coordonnée de $f^i(x)$ (dans la base (e_1, \dots, e_n)) est nulle $\forall i \in \mathbb{N}$; G est donc un sous-espace de E stable par f . Montrons que $F \oplus G = E$.

Montrons que $F \cap G = \{0\}$. Soit $y \in F \cap G$. Si $y \neq 0$, on peut écrire $y = \lambda_1 e_1 + \dots + \lambda_p e_p$ avec $\lambda_p \neq 0$ et $p \leq k$. En composant par $e_k^* \circ f^{k-p}$, on obtient

$$\begin{aligned} 0 &= e_k^* \circ f^{k-p}(y) \\ &= e_k^*(\lambda_1 f^{k-p}(e_1) + \dots + \lambda_p f^{k-p}(e_p)) \\ &= e_k^*(\lambda_1 f^{k-p}(x) + \dots + \lambda_p f^{k-p}(x)) \\ &= \lambda_p \end{aligned}$$

Ce qui est absurde.

Montrons que $\dim(F) + \dim(G) = n$. Cela revient à montrer que $\dim(G) = n - k$. On sait que $G = \Gamma^\circ = (\text{Vect}(\Gamma))^\circ$ et $\dim(\text{Vect}(\Gamma)) + \dim(\text{Vect}(\Gamma)^\circ) = n$. Montrons donc que $\dim(\text{Vect}(\Gamma)) = k$. Posons

$$\begin{aligned} \varphi: \mathbb{K}[f] &\rightarrow \text{Vect}(\Gamma) \\ g &\mapsto e_k^* \circ g \end{aligned}$$

Par définition de Γ , φ est surjective. Soit $g \in \text{Ker}(\varphi)$. On a alors $e_k^* \circ g = 0$, et comme $g \in \mathbb{K}[f]$,

$$g = \lambda_1 \text{id} + \dots + \lambda_p f^{p-1} \text{ avec } \lambda_p \neq 0 \text{ et } p \leq k$$

On a donc $0 = e_k^* \circ g(f^{k-p}(x)) = \lambda_p \neq 0$. Ainsi, $g = 0$ et φ est un isomorphisme. Donc $\dim(\text{Vect}(\Gamma)) = \dim(\mathbb{K}[f]) = k$ par le Lemme 2, ce que l'on voulait.

Soit P_1 le polynôme minimal de $f|_F$ (qui est le polynôme minimal de f car $P_1 = \pi_{f|_F} = \pi_{f|_{P_x}} = \pi_f$). Soit P_2 le polynôme minimal de $f|_G$. Comme G est stable par f , on a $P_1(f|_G) = \pi_f(f|_G) = 0$, donc $P_2 \mid P_1$. Il suffit alors de réitérer en remplaçant f par $f|_G$ et E par G pour obtenir la décomposition voulu.

— Unicité : Soient F_1, \dots, F_r et G_1, \dots, G_s des sous-espaces vectoriels stables par f qui vérifient le Point (i), le Point (ii) et le Point (iii). On note pour tout i , $P_i = \pi_{f|_{F_i}}$ et $Q_i = \pi_{f|_{G_i}}$. On suppose par l'absurde $(P_1, \dots, P_r) \neq (Q_1, \dots, Q_s)$. Soit $j = \min\{i \mid P_i \neq Q_i\}$. Comme $E = \bigoplus_{i=1}^r F_i$ (où

$\forall i \in \llbracket 1, r \rrbracket, F_i$ est stable par f et $\forall k \geq j \geq 1, P_j(f)(F_k) = 0$:

$$P_j(f)(F_1) \oplus \cdots \oplus P_j(f)(F_{j-1}) = P_j(f)(E) \quad (*)$$

De même,

$$P_j(f)(G_1) \oplus \cdots \oplus P_j(f)(G_{j-1}) \oplus P_j(f)(G_j) \oplus \cdots \oplus P_j(f)(G_s) = P_j(f)(E) \quad (**)$$

Notons que l'on a $\forall i \in \llbracket 1, j-1 \rrbracket, \dim(P_j(f)(F_i)) = \dim(P_j(f)(G_i))$. En effet, on peut trouver une base \mathcal{B}_i de F_i et une base \mathcal{B}'_i de G_i telles que $\text{Mat}(f|_{F_i}, \mathcal{B}_i) = \text{Mat}(f|_{G_i}, \mathcal{B}'_i)$ par cyclicité de $f|_{F_i}$ et $f|_{G_i}$. En prenant les dimensions dans $(*)$ et $(**)$, on en déduit :

$$0 = \dim(P_j(f)(G_j)) = \cdots = \dim(P_j(f)(G_s)) \implies Q_j \mid P_j$$

Par symétrie, on a de même $P_j \mid Q_j$. D'où $P_j = Q_j$: absurde.

□

Remarque 6. Dans ce développement, il est courant de ne montrer que l'existence (à cause de la contrainte de temps, mais aussi de la contrainte d'espace).

18 Lemme de Morse

En usant (certains diront plutôt “en abusant”) du théorème d'inversion locale, on montre le lemme de Morse et on l'applique à l'étude de la position d'une surface par rapport à son plan tangent.

Notation 1. Si $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est une application dont toutes les dérivées secondes existent, on note $\text{Hess}(f)_a$ la hessienne de f au point a .

Lemme 2. Soit $A_0 \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ inversible. Alors il existe un voisinage V de A_0 dans $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ et une application $\psi : V \rightarrow \text{GL}_n(\mathbb{R})$ de classe \mathcal{C}^1 telle que

$$\forall A \in V, A = {}^t\psi(A)A_0\psi(A)$$

[ROU]
p. 209

Démonstration. On définit l'application

$$\varphi : \begin{array}{ccc} \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) & \rightarrow & \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \\ M & \mapsto & {}^tMA_0M \end{array}$$

qui est une application polynômiale en les coefficients de M , donc de classe \mathcal{C}^1 . Soit $H \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. On calcule :

$$\begin{aligned} \varphi(I_n + H) - \varphi(I_n) &= {}^tHA_0 + A_0H + {}^tHA_0 + H \\ &= {}^t(A_0H) + A_0H + o(\|H\|^2) \end{aligned}$$

où $(\|\cdot\|)$ désigne une quelconque norme d'algèbre sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Ainsi, on a $d\varphi_{I_n}(H) = {}^t(A_0H) + A_0H$. D'où

$$\text{Ker}(d\varphi_{I_n}) = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid A_0M \in \mathcal{A}_n(\mathbb{R})\} = A_0^{-1}\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$$

On définit donc

$$F = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid A_0M \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})\} = A_0^{-1}\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$$

et on a $\mathcal{M}_n(\mathbb{R}) = F \oplus \text{Ker}(d\varphi_{I_n})$. Ainsi, la différentielle $d(\varphi|_F)_{I_n}$ est bijective (car $\text{Ker}(d(\varphi|_F)_{I_n}) = \text{Ker}(d\varphi_{I_n}) \cap F = \{0\}$).

On peut donc appliquer le théorème d'inversion locale à $\varphi|_F$: il existe U un voisinage ouvert de I_n dans F tel que $(\varphi|_U)$ soit \mathcal{C}^1 -difféomorphisme de U sur $V = \varphi(U)$. De plus, on peut supposer $U \subseteq \text{GL}_n(\mathbb{R})$ (quitte à considérer $U \cap U'$ où U' est un voisinage ouvert de I_n dans $\text{GL}_n(\mathbb{R})$; qui existe par continuité de \det).

Ainsi, V est un voisinage ouvert de $A_0 = \varphi(I_n)$ dans $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ vérifiant :

$$\forall A \in V, A = {}^t(\varphi|_U)^{-1}(A)A_0(\varphi|_U)^{-1}(A)$$

Il suffit alors de poser $\psi = (\varphi|_U)^{-1}$ (qui est bien une application de classe \mathcal{C}^1) pour avoir le résultat demandé. \square

p. 354

Lemme 3 (Morse). Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction de classe \mathcal{C}^3 (où U désigne un ouvert de \mathbb{R}^n contenant l'origine). On suppose :

- $df_0 = 0$.
- La matrice symétrique $\text{Hess}(f)_0$ est inversible.
- La signature de $\text{Hess}(f)_0$ est $(p, n - p)$.

Alors il existe un difféomorphisme $\phi = (\phi_1, \dots, \phi_n)$ de classe \mathcal{C}^1 entre deux voisinage de l'origine de \mathbb{R}^n $V \subseteq U$ et W tel que $\phi(0) = 0$ et

$$\forall x \in U, f(x) - f(0) = \sum_{k=1}^p \phi_k^2(x) - \sum_{k=p+1}^n \phi_k^2(x)$$

Démonstration. On écrit la formule de Taylor à l'ordre 1 avec reste intégral au voisinage de 0, qui donne :

$$\begin{aligned} f(x) &= f(0) + df_0(x) + \int_0^1 (1-t) d^2(1-t) f_{tx}(x, x) dt \\ \Leftrightarrow f(x) - f(0) &= {}^t x Q(x) x \end{aligned} \quad (*)$$

où $Q(x)$ est la matrice symétrique définie par $Q(x) = \int_0^1 (1-t) \text{Hess} f_{tx} dt$ (qui est une application \mathcal{C}^1 sur U car f est \mathcal{C}^3 sur U).

Par hypothèse, $Q(0) = \frac{\text{Hess}(f)_0}{2}$ est une matrice symétrique inversible, donc en vertu du Lemme 2, il existe un voisinage V_1 de $Q(0)$ dans $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ et une application $\psi : V_1 \rightarrow \text{GL}_n(\mathbb{R})$ de classe \mathcal{C}^1 tels que :

$$\forall A \in V_1, Q(0) = \psi(A) Q(0) \psi(A)$$

Mais, l'application $x \mapsto Q(x)$ est continue sur U (puisque f est de classe \mathcal{C}^3 sur U), donc il existe V_2 voisinage de 0 dans U tel que $\forall x \in V_2, Q(x) \in V_1$. On peut donc définir l'application $M = \psi \circ Q|_{V_2}$, qui nous permet d'écrire

$$\forall x \in V_2, Q(x) = {}^t M(x) Q(0) M(x) \quad (*)$$

Or, $Q(0)$ est de signature $(p, n - p)$, donc d'après la loi d'inertie de Sylvester, il existe $P \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ telle que

$$Q(0) = {}^t P \underbrace{\begin{pmatrix} I_p & \\ & -I_{n-p} \end{pmatrix}}_{=D} P \quad (***)$$

Finalement en combinant (*) avec (**) et (***), cela donne

$$\begin{aligned} \forall x \in V_2, f(x) - f(0) &= {}^t (PM(x)x) D (PM(x)x) \\ \Leftrightarrow \varphi(x) = PM(x)x \quad \forall x \in V_2, f(x) - f(0) &= {}^t \varphi(x) D \varphi(x) \end{aligned}$$

ce qui est bien l'expression voulue.

Il reste à montrer que φ définit bien un difféomorphisme de classe \mathcal{C}^1 entre deux voisinages de l'origine. Notons déjà que φ est de classe \mathcal{C}^1 car M l'est. Calculons la différentielle en 0 de φ . Soit

$h \in V_2$;

$$\begin{aligned}\varphi(h) - \varphi(0) &= PM(h)h \\ &= P(M(0) + dM_0(h) + o(\|h\|))h \\ &= PM(0)h + o(\|h\|)\end{aligned}$$

d'où $d\varphi_0(h) = PM(0)h$. Or, $PM(0)$ est inversible, donc en particulier, $d\varphi_0(h)$ l'est aussi. On peut appliquer le théorème d'inversion locale à φ , qui donne l'existence de deux ouverts V et W contenant l'origine (car $\varphi(0) = 0$) tel que $\phi = \varphi|_V$ soit un \mathcal{C}^1 -difféomorphisme de V sur W . \square

p. 341

Application 4. Soit S la surface d'équation $z = f(x, y)$ où f est de classe \mathcal{C}^3 au voisinage de l'origine. On suppose la forme quadratique d^2f_0 non dégénérée. Alors, en notant P le plan tangent à S en 0 :

- (i) Si d^2f_0 est de signature $(2, 0)$, alors S est au-dessus de P au voisinage de 0.
- (ii) Si d^2f_0 est de signature $(0, 2)$, alors S est en-dessous de P au voisinage de 0.
- (iii) Si d^2f_0 est de signature $(1, 1)$, alors S traverse P selon une courbe admettant un point double en $(0, f(0))$.

Démonstration. Une équation cartésienne de P est donnée par

$$z - 0 = f(0) + df_0(x, y)$$

La différence d'altitude entre la surface S et le plan tangent P au point $h \in \mathbb{R}^2$ est donc donnée par

$$\delta(h) = f(h) - (f(0) + df_0(h))$$

et le Lemme 3 permet d'écrire

$$\delta(h) = \alpha\phi_1(h)^2 + \beta\phi_2(h)^2$$

où (α, β) désigne la signature de d^2f_0 et $\phi = (\phi_1, \phi_2)$ est un \mathcal{C}^1 -difféomorphisme entre deux voisinages de l'origine dans \mathbb{R}^2 . En particulier, ϕ_1 et ϕ_2 ne s'annulent simultanément qu'en 0.

- (i) Si d^2f_a est de signature $(2, 0)$, on a $\delta(h) > 0$ pour h voisin de 0 et $h \neq 0$.
- (ii) Si d^2f_a est de signature $(0, 2)$, on a $\delta(h) < 0$ pour h voisin de 0 et $h \neq 0$.
- (iii) Si d^2f_a est de signature $(1, 1)$, on a $\delta(h) = \phi_1(h)^2 - \phi_2(h)^2$ et S traverse P selon une courbe admettant un point double en $(0, f(0))$.

\square

19 Lemme des noyaux

On montre par récurrence le lemme des noyaux pour un endomorphisme d'un espace vectoriel de dimension finie, et on applique ce résultat pour obtenir un critère de diagonalisation.

Soit E un espace vectoriel de dimension finie $n \geq 1$ sur un corps commutatif \mathbb{K} .

[GOU21]
p. 185

Théorème 1 (Lemme des noyaux). Soient $f \in \mathcal{L}(E)$ et $P = P_1 \dots P_k \in \mathbb{K}[X]$ (les P_i étant supposés premiers entre eux deux-à-deux). Alors,

$$\text{Ker}(P(f)) = \bigoplus_{i=1}^k \text{Ker}(P_i(f))$$

Démonstration. On procède par récurrence sur $k \geq 2$.

— Pour $k = 2$: par le théorème de Bézout, il existe $U, V \in \mathbb{K}[X]$ tels que $UP_1 + VP_2 = 1$. Donc,

$$\forall x \in E, (UP_1 + VP_2)(f)(x) = (U(f) \circ P_1(f))(x) + (V(f) \circ P_2(f))(x) = x \quad (*)$$

Soit $x \in \text{Ker}(P_1(f)) \cap \text{Ker}(P_2(f))$. On a :

$$x \stackrel{(*)}{=} (U(f) \circ P_1(f))(x) + (V(f) \circ P_2(f))(x) \stackrel{x \in \text{Ker}(P_1(f)) \cap \text{Ker}(P_2(f))}{=} 0$$

Donc $\text{Ker}(P_1(f)) \cap \text{Ker}(P_2(f)) = \{0\}$: la somme est directe.

Soit maintenant $x \in \text{Ker}(P(f))$. Par calcul,

$$P_2(f)(UP_1(f)(x)) = (UP_1P_2)(f)(x) = (U(f) \circ P(f))(x) = 0$$

ie. $UP_1(f)(x) \in \text{Ker}(P_2(f))$. De même, $VP_2(f)(x) \in \text{Ker}(P_1(f))$. Par (*), $x \in \text{Ker}(P_1(f)) + \text{Ker}(P_2(f))$. Donc $\text{Ker}(P(f)) \subseteq \text{Ker}(P_1(f)) \oplus \text{Ker}(P_2(f))$.

Et si $x \in \text{Ker}(P_1(f))$,

$$P(f)(x) = (P_1(f) \circ P_2(f))(x) = (P_2(f) \circ P_1(f))(x) = 0$$

donc $x \in \text{Ker}(P(f))$ et $\text{Ker}(P_1(f)) \subseteq \text{Ker}(P(f))$. De même, on montre que $\text{Ker}(P_2(f)) \subseteq \text{Ker}(P(f))$. Comme $\text{Ker}(P(f))$ est un espace vectoriel, on a bien l'inclusion réciproque.

— On suppose le résultat vrai à un rang $k \geq 2$. Montrons qu'il reste vrai au rang $k + 1$. Écrivons

$$P = Q_1 Q_2 \text{ avec } Q_1 = P_1 \dots P_k, Q_2 = P_{k+1}$$

Les polynômes Q_1 et Q_2 sont premiers entre eux, donc le cas $k = 2$ permet d'obtenir :

$$\begin{aligned} \text{Ker}(P(f)) &= \text{Ker}(Q_1(f)) \oplus \text{Ker}(Q_2(f)) \\ &= \left(\bigoplus_{i=1}^k \text{Ker}(P_i(f)) \right) \oplus \text{Ker}(P_{k+1}(f)) \text{ par hypothèse de récurrence} \\ &= \bigoplus_{i=1}^{k+1} \text{Ker}(P_i(f)) \end{aligned}$$

ce que l'on voulait. □

Application 2. Soit $f \in \mathcal{L}(E)$. Alors f est diagonalisable si et seulement s'il existe $P \in \mathbb{K}[X]$ scindé sur \mathbb{K} à racines simples tel que $P(f) = 0$.

Démonstration. Sens direct : Soient $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ les valeurs propres distinctes de f et $E_{\lambda_1}, \dots, E_{\lambda_k}$ les sous-espaces propres correspondants. On pose

$$P = (X - \lambda_1) \dots (X - \lambda_k) \in \mathbb{K}[X]$$

On peut appliquer le Théorème 1 :

$$\begin{aligned} \text{Ker}(P(f)) &= \bigoplus_{i=1}^k \text{Ker}(f - \lambda_i \text{id}_E) \\ &= \bigoplus_{i=1}^k E_{\lambda_i} \\ &\stackrel{f \text{ diagonalisable}}{=} E \end{aligned}$$

donc $P(f) = 0$ (et P est bien scindé à racines simples).

Réciproque : On écrit

$$P = \alpha (X - \lambda_1) \dots (X - \lambda_k)$$

avec les $\lambda_i \in \mathbb{K}$ distincts et $\alpha \neq 0$. On peut encore appliquer Théorème 1 :

$$\begin{aligned} E &= \text{Ker}(P(f)) \\ &= \bigoplus_{i=1}^k \text{Ker}(f - \lambda_i \text{id}_E) \end{aligned} \tag{*}$$

Notons $I = \{i \in \llbracket 1, k \rrbracket \mid \text{Ker}(f - \lambda_i \text{id}_E) \neq \{0\}\}$. $\forall i \in I$, λ_i est valeur propre de f et $E_{\lambda_i} = \text{Ker}(f - \lambda_i \text{id}_E)$ n'est autre que le sous-espace propre correspondant. Par (*),

$$E = \bigoplus_{i \in I} E_{\lambda_i}$$

donc f est diagonalisable. □

20 Loi d'inertie de Sylvester

Le but de ce développement est de montrer la très connue loi d'inertie de Sylvester qui donne l'existence (et une forme d'unicité) de la décomposition d'une forme quadratique réelle en carrés de formes linéaires indépendantes.

Soit E un espace vectoriel sur \mathbb{R} de dimension finie $n \geq 1$. Soit Φ une forme quadratique sur E .

Notation 1. — On note φ la forme polaire associée à Φ .

— Si Γ est une partie de E^* , on note Γ° son orthogonal (ie. $\Gamma^\circ = \{x \in E \mid \forall f \in \Gamma, f(x) = 0\}$).

Lemme 2. Il existe une base de E qui soit Φ -orthogonale.

[GOU21]
p. 243

Démonstration. On procède par récurrence sur n .

- Si $n = 1$: il n'y a rien à montrer, tout base est Φ -orthogonale.
- On suppose le résultat vrai à un rang $n \geq 1$ et montrons le au rang $n + 1$. Si $\Phi = 0$, alors tout base de E est Φ -orthogonale. Sinon, il existe $v \in E$ tel que $\Phi(v) \neq 0$. Dans ce cas, l'application $f = \varphi(v, \cdot)$ est une forme linéaire non nulle sur E .

$H = \text{Ker}(f)$ est un hyperplan de E et comme $v \notin H$, on a $E = H \oplus \text{Vect}(v)$. Or, $\dim(H) = n - 1$, donc on peut appliquer l'hypothèse de récurrence à $\Phi|_H$, et on obtient une base \mathcal{B} de H qui est Φ -orthogonale. En particulier, $\mathcal{B} \cup \{v\}$ est une base Φ -orthogonale de E .

□

Théorème 3 (Loi d'inertie de Sylvester).

$$\exists p, q \in \mathbb{N} \text{ et } \exists f_1, \dots, f_{p+q} \in E^* \text{ tels que } \Phi = \sum_{i=1}^p |f_i|^2 - \sum_{i=p+1}^q |f_i|^2$$

où les formes linéaires f_i sont linéairement indépendantes et où $p + q \leq n$. De plus, ces entiers ne dépendent que de Φ et pas de la décomposition choisie.

Le couple (p, q) est la **signature** de Φ et le rang Φ est égal à $p + q$.

Démonstration. Soit $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base Φ -orthogonale (dont l'existence est assurée par le Lemme 2). En posant $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \lambda_i = \Phi(e_i)$, on a

$$\forall x \in E \text{ que l'on écrit } x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n, \Phi(x) = \sum_{i=1}^n |x_i|^2 \Phi(e_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i |x_i|^2$$

Chaque λ_i est strictement positif, strictement négatif, ou nul. Quitte à les réordonner, on peut supposer

$$\lambda_1, \dots, \lambda_p > 0, \lambda_{p+1}, \dots, \lambda_{p+q} < 0, \text{ et } \lambda_{p+q+1} = \dots = \lambda_n = 0$$

Pour $i \in \llbracket 1, p \rrbracket$, on peut écrire $\lambda_i = \omega_i^2$ et pour $i \in \llbracket p+1, q \rrbracket$, on peut écrire $\lambda_i = -\omega_i^2$ où les $\omega_i \in \mathbb{R}^*$. On définit :

$$\forall i \in \llbracket 1, q \rrbracket, f_i = \omega_i e_i^*$$

Ainsi définies, les formes linéaires f_i sont linéairement indépendantes et on obtient bien :

$$\Phi = \sum_{i=1}^p |f_i|^2 - \sum_{i=p+1}^q |f_i|^2 \quad (*)$$

Reste maintenant à montrer l'indépendance de p et de q vis-à-vis de la décomposition choisie. Soit donc

$$\Phi = \sum_{i=1}^{p'} |g_i|^2 - \sum_{i=p'+1}^{q'} |g_i|^2 \quad (**)$$

une autre écriture en carrés de formes linéaires indépendantes. Supposons $p' \neq p$ avec par exemple $p' > p$. Complétons $g_1, \dots, g_{p'+q'}$ en une base g_1, \dots, g_n de E^* . Donc, la famille $\Gamma = (f_1, \dots, f_p, g_{p'+1}, \dots, g_n)$ est de cardinal $p + n - p' < n$. Elle ne peut donc pas former une base de E^* . Donc

$$\dim(\Gamma^\circ) = \dim(E^*) - \dim(\Gamma) \geq 1$$

Par conséquent,

$$\exists x \neq 0 \text{ tel que } f_1(x) = \dots = f_p(x) = g_{p'+1}(x) = \dots = g_n(x) = 0$$

Donc $\Phi(x) \leq 0$ par (*). Supposons par l'absurde que

$$g_1(x) = \dots = g_{p'}(x) = 0$$

Comme $(g_i)_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ est une base de E^* et que x s'annule sur cette base, on a $x = 0$: c'est absurde. Donc, il existe $i \in \llbracket 1, p' \rrbracket$ tel que $g_i(x) \neq 0$. En particulier $\Phi(x) > 0$ par (**): contradiction. Ainsi, $p = p'$. On montre de même que $q = q'$.

Dans la base Φ -orthogonale (e_1, \dots, e_n) , la matrice de Φ est

$$\begin{pmatrix} I_p & 0 & 0 \\ 0 & -I_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

d'où le rang de Φ . □

Remarque 4. La preuve du Gourdon est un peu décousue. Il faut savoir recoller les morceaux pour bien montrer existence et "unicité" de la décomposition.

21 Méthode de Newton

On démontre ici la méthode de Newton qui permet de trouver numériquement une approximation précise d'un zéro d'une fonction réelle d'une variable réelle.

Théorème 1 (Méthode de Newton). Soit $f : [c, d] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction de classe \mathcal{C}^2 strictement croissante sur $[c, d]$. On considère la fonction

$$\varphi : \begin{array}{ccc} [c, d] & \rightarrow & \mathbb{R} \\ x & \mapsto & x - \frac{f(x)}{f'(x)} \end{array}$$

(qui est bien définie car $f' > 0$). Alors :

- (i) $\exists ! a \in [c, d]$ tel que $f(a) = 0$.
- (ii) $\exists \alpha > 0$ tel que $I = [a - \alpha, a + \alpha]$ est stable par φ .
- (iii) La suite (x_n) des itérés (définie par récurrence par $x_{n+1} = \varphi(x_n)$ pour tout $n \geq 0$) converge quadratiquement vers a pour tout $x_0 \in I$.

[ROU]
p. 152

Démonstration. Soit $x \in [c, d]$. Comme $f(a) = 0$, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \varphi(x) - a &= x - a - \frac{f(x) - f(a)}{f'(x)} \\ &= \frac{f(a) - f(x) - (a - x)f'(x)}{f'(x)} \end{aligned}$$

Or, la formule de Taylor-Lagrange à l'ordre 2 donne l'existence d'un $z \in]a, x[$ tel que

$$\begin{aligned} f(a) &= f(x) + f'(x)(a - x) + \frac{1}{2}f''(z)(a - x)^2 \\ \Leftrightarrow f(a) - f(x) - f'(x)(a - x) &= \frac{1}{2}f''(z)(a - x)^2 \end{aligned}$$

D'où :

$$\varphi(x) - a = \frac{f''(z)}{2f'(x)}(x - a)^2 \quad (*)$$

Soit $C = \frac{\max_{x \in [c, d]} |f''(x)|}{2 \min_{x \in [c, d]} |f'(x)|}$. Par (*), on a :

$$\forall x \in [c, d], |\varphi(x) - a| \leq C|x - a|^2$$

Soit maintenant $\alpha > 0$ suffisamment petit pour que $C\alpha < 1$ et que $I = [a - \alpha, a + \alpha] \subseteq [c, d]$. Alors :

$$x \in I \Rightarrow |\varphi(x) - a| \leq C\alpha^2 < \alpha$$

(la première inégalité se voit en faisant un dessin, et la seconde vient du fait que $C\alpha < 1$). D'où

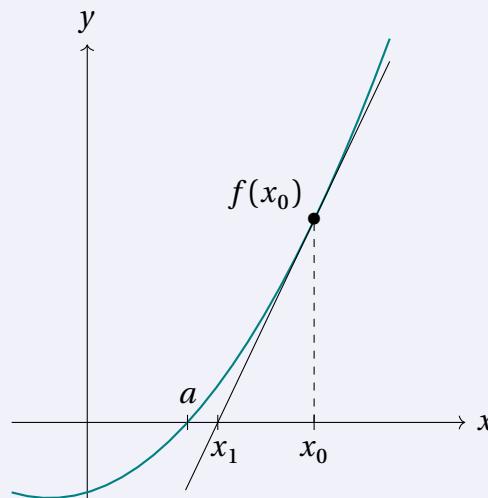
$\varphi(I) \subseteq I$. Et si $x_0 \in I$, on a donc $\forall n \in \mathbb{N}, x_n \in I$ et

$$\begin{aligned} |x_{n+1} - a| &= |\varphi(x_n) - a| \\ &\leq C|x_n - a|^2 \end{aligned}$$

D'où $c|x_n - a| \leq (C|x_0 - a|)^{2^n} \leq (C\alpha)^{2^n}$ où $C\alpha < 1$. On a donc bien convergence quadratique de la suite (x_n) vers le réel a . \square

Remarque 2. On suppose que l'on connaisse une approximation grossière du point que l'on nomme x_0 .

[DEM]
p. 100



L'idée de la méthode est de remplacer la courbe représentative de f par sa tangente au point x_0 :

$$y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$$

L'abscisse x_1 du point d'intersection de cette tangente avec l'axe des abscisses est donnée par

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

d'où le fait d'itérer la fonction $\varphi : x \mapsto x - \frac{f(x)}{f'(x)}$.

Corollaire 3. En reprenant les hypothèses et notations du théorème précédent, et en supposant de plus f strictement convexe sur $[c, d]$, le résultat du théorème est vrai sur $I = [a, d]$. De plus :

- (i) (x_n) est strictement décroissante (ou constante).
- (ii) $x_{n+1} - a \sim \frac{f''(a)}{f'(a)}(x_n - a)^2$ pour $x_0 > a$.

[ROU]
p. 152

Démonstration. La dérivée f' est strictement croissante (car f est strictement convexe) sur $]c, d[$. Ainsi, soit $x \in [a, d]$. Si $x = a$, on a $\varphi(x) = x$, et la suite (x_n) est alors constante. Supposons

maintenant $x > a$. On a :

$$\varphi(x) = x - \frac{\overbrace{f(x)}^{>0}}{\underbrace{f'(x)}_{>0}} < x$$

Et par (*) (de la démonstration précédente), $\exists z \in]a, x[$:

$$\varphi(x) - a = \frac{f''(z)}{2f'(z)}(x - a)^2 > 0 \iff \varphi(x) < a$$

Ainsi, $I = [a, d]$ est stable par φ et pour $x_0 \in]a, d]$, on a $x_n \in]a, d]$ pour tout $n \in \mathbb{N}$ et la suite (x_n) est strictement décroissante. La suite (x_n) admet donc une limite ℓ vérifiant $\varphi(\ell) = \ell \iff f(\ell) = 0$ ie. $\ell = a$ par unicité. Comme dans le théorème précédent, la convergence est quadratique :

$$0 \leq x_{n+1} - a \leq C(x_n - a)^2$$

Enfin, si $x_0 \in]a, d]$, on a comme dans (*) :

$$\forall n \in \mathbb{N}, x_n > a \text{ et } \frac{x_{n+1} - a}{(x_n - a)^2} = \frac{f''(z_n)}{f'(z)}$$

(en faisant la même démarche que pour (*) on obtient $z_n \in]a, x_n[$). On fait tendre n vers l'infini et la fraction de droite tend vers $\frac{f''(a)}{f'(a)}$; d'où le résultat. \square

Remarque 4. L'ajout de l'hypothèse de convexité à la méthode de Newton, nous permet de nous affranchir de l'intervalle I tout en gardant la même vitesse de convergence.

22 Nombres de Bell

En utilisant les propriétés des séries entières, nous calculons le nombre de partitions de l'ensemble $\llbracket 1, n \rrbracket$.

Théorème 1 (Nombres de Bell). Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, on note B_n le nombre de partitions de $\llbracket 1, n \rrbracket$. Par convention on pose $B_0 = 1$. Alors,

$$\forall k \in \mathbb{N}^*, B_k = \frac{1}{e} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n^k}{n!}$$

[GOU21]
p. 314

Démonstration. Notons que clairement $B_1 = 1$. Soit $n \in \mathbb{N}^*$, exprimons B_{n+1} en fonction des termes précédents. Pour tout $k \leq n$, on note E_k l'ensemble des partitions P de $\llbracket 1, n+1 \rrbracket$ tel que la partie de P qui contient l'entier $n+1$ est de taille $k+1$. Choisir P dans E_k , c'est choisir k entiers de $\llbracket 1, n \rrbracket$ (ceux de la partition de P qui contient $n+1$), puis construire une partition des $n-k$ éléments restants. Donc $|E_k| = \binom{n}{k} B_{n-k}$. Comme E_0, \dots, E_n forment une partition de l'ensemble des partitions de $\llbracket 1, n+1 \rrbracket$, on obtient :

$$B_{n+1} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} B_{n-k} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{n-k} B_k = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} B_k \quad (*)$$

À toute partition P de $\llbracket 1, n \rrbracket$, on peut associer une permutation $\sigma_P \in S_n$, qui est le produit des cycles de chaque partition de P . On construit ainsi une application

$$\begin{array}{ccc} \llbracket 1, n \rrbracket & \rightarrow & S_n \\ P & \mapsto & \sigma_P \end{array}$$

injective. D'où :

$$B_n = |\llbracket 1, n \rrbracket| \leq |S_n| = n!$$

On en déduit en particulier que $\frac{B_n}{n!} \leq 1$. En vertu du lemme d'Abel, le rayon de convergence R de la série entière $\sum \frac{B_n}{n!} x^n$ est supérieur ou égal à 1. On peut donc définir

$$B: \begin{array}{ccc}]-R, R[& \rightarrow & \mathbb{R} \\ x & \mapsto & \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{B_n}{n!} x^n \end{array}$$

et en dérivant, $\forall x \in]-R, R[:$

$$\begin{aligned} B'(x) &= \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{B_{n+1}}{n!} x^n \\ &\stackrel{(*)}{=} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} \left(\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} B_k \right) x^n \\ &= \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\sum_{k=0}^n \frac{B_k}{k!} \frac{1}{(n-k)!} \right) x^n \end{aligned}$$

On reconnaît là le produit de Cauchy suivant :

$$B'(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\sum_{k=0}^n \frac{B_k}{k!} \frac{1}{(n-k)!} \right) x^n = \left(\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{B_n}{n!} x^n \right) \left(\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^n}{n!} \right) = B(x) e^x$$

Reste à résoudre cette équation différentielle linéaire homogène d'ordre 1 :

$$B(x) = \lambda e^{e^x}$$

Or, $B(0) = B_0 = 1 = \lambda e^1$. D'où $B(x) = \frac{1}{e} e^{e^x}$. La série entière définissant l'exponentielle a un rayon de convergence infini. On peut donc écrire, pour tout $z \in \mathbb{C}$:

$$e^{e^z} = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{e^{nz}}{n!} = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^{+\infty} \underbrace{\frac{(nz)^k}{n!k!}}_{u_{n,k}(z)}$$

On va appliquer le théorème de Fubini-Lebesgue à $u_{n,k}(z)$ (où $z \in \mathbb{C}$ est fixé) :

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^{+\infty} |u_{n,k}(z)| = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{e^{n|z|}}{n!} = e^{e|z|} < +\infty$$

Donc on peut intervertir les signes de sommations. Pour tout $x \in]-R, R[$,

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{e} e^{e^x} \\ &= \frac{1}{e} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^{+\infty} u_{n,k}(x) \\ &= \frac{1}{e} \sum_{k=0}^{+\infty} \sum_{n=0}^{+\infty} u_{n,k}(x) \\ &= \frac{1}{e} \sum_{k=0}^{+\infty} \left(\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n^k}{n!} \right) \frac{x^k}{k!} \end{aligned}$$

Par unicité du développement en série entière d'une fonction, on en déduit, par identification des coefficients :

$$\forall k \in \mathbb{N}^*, B_k = \frac{1}{e} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n^k}{n!}$$

□

Remarque 2. La partie sur le dénombrement (au début de la preuve) est un peu technique. N'hésitez pas à passer du temps dessus et à y réfléchir en faisant des exemples.

23 Projection sur un convexe fermé

On montre le théorème de projection sur un convexe fermé dans un espace de Hilbert réel en utilisant les suites de Cauchy et des propriétés du produit scalaire.

Soit H un espace de Hilbert réel de norme $\|\cdot\|$ et dont on note $\langle \cdot, \cdot \rangle$ le produit scalaire associé.

Lemme 1 (Identité du parallélogramme). Soient $x, y \in H$. Alors :

$$\|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 = 2(\|x\|^2 + \|y\|^2)$$

[LI]
p. 32

Démonstration. D'une part,

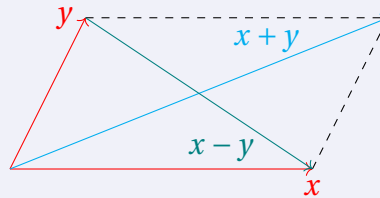
$$\|x + y\|^2 = \langle x + y, x + y \rangle = \|x\|^2 + \|y\|^2 + 2\langle x, y \rangle$$

D'autre part,

$$\|x - y\|^2 = \langle x - y, x - y \rangle = \|x\|^2 + \|y\|^2 - 2\langle x, y \rangle$$

En additionnant les deux lignes, on obtient bien l'égalité voulue. \square

Remarque 2. L'interprétation géométrique de cette égalité est que dans le parallélogramme formé par les vecteurs x et y , la somme des carrés des diagonales est égale à la somme des carrés des côtés.

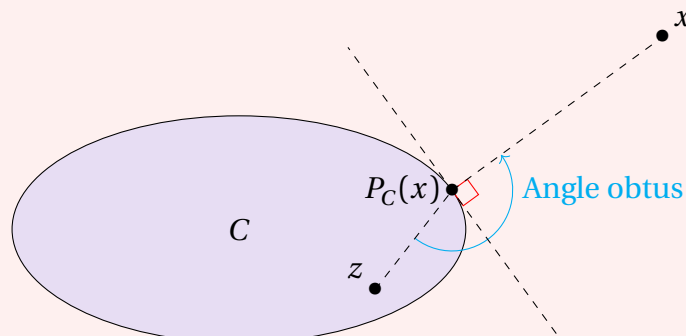


Théorème 3 (Projection sur un convexe fermé). Soit $C \subseteq H$ un convexe fermé non-vide. Alors :

$$\forall x \in H, \exists ! y \in C \text{ tel que } d(x, C) = \inf_{z \in C} \|x - z\| = d(x, y)$$

On peut donc noter $y = P_C(x)$, le **projeté orthogonal de x sur C** . Il s'agit de l'unique point de C vérifiant

$$\forall z \in C, \langle x - P_C(x), z - P_C(x) \rangle \leq 0 \quad (*)$$



[GOU20]
p. 427

Démonstration. Soit $x \in H$. Posons $\delta = d(x, C)$. Par la caractérisation séquentielle de la borne inférieure, il existe (y_n) une suite de C telle que $\|x - y_n\| \rightarrow \delta$. Montrons que (y_n) est une suite de Cauchy. On applique le Lemme 1 :

$$\forall p, q \in \mathbb{N}, \|(x - y_p) + (x - y_q)\|^2 + \|y_p - y_q\|^2 = 2(\|x - y_p\|^2 + \|x - y_q\|^2) \quad (**)$$

Or, C est convexe. Donc $\forall p, q \in \mathbb{N}, \frac{y_p + y_q}{2} \in C$. Par définition,

$$\begin{aligned} \left\| x - \frac{y_p + y_q}{2} \right\| &\geq \delta \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2} \|(x - y_p) + (x - y_q)\| &\geq \delta \\ \Leftrightarrow \|(x - y_p) + (x - y_q)\|^2 &\geq 4\delta^2 \end{aligned}$$

Par (**), quand $p, q \rightarrow +\infty$:

$$\|y_p - y_q\| \leq 2(\underbrace{(\|x - y_p\|^2 - \delta^2)}_{\rightarrow \delta^2} + \underbrace{(\|x - y_q\|^2 - \delta^2)}_{\rightarrow \delta^2}) \rightarrow 0$$

Ainsi (y_n) est une suite de Cauchy de H qui est complet, donc (y_n) converge vers $y \in H$. Mais, C est fermé et (y_n) est une suite de C , donc $y \in C$.

Montrons maintenant que y est unique. Soit $z \in C$ tel que $\delta = d(x, C)$. On définit la suite (z_n) par

$$\forall n \in \mathbb{N}, z_n = \begin{cases} y & \text{si } n \text{ est pair} \\ z & \text{si } n \text{ est impair} \end{cases}$$

Cette suite vérifie $\forall n \in \mathbb{N}, \|x - y_n\| = \delta$ donc en particulier $\|x - y_n\| \rightarrow \delta$, et on peut tout-à-fait refaire le raisonnement précédent pour montrer que (z_n) converge (vers $y = z$, donc). Ainsi, on a bien existence et unicité du projeté.

Soit $y \in C$ vérifiant (*). Montrons que $y = P_C(x)$. $\forall z \in C$,

$$\begin{aligned} \|z - x\|^2 &= \|(z - y) - (x - y)\|^2 \\ &= \|z - y\|^2 + \|x - y\|^2 - 2\langle z - y, x - y \rangle \\ &\geq \|z - y\|^2 + \|x - y\|^2 \\ &\geq \|x - y\|^2 \end{aligned}$$

ie. $\|z - x\| \geq \|x - y\|$. De plus, $y \in C$, donc $d(y, C) = d(x, C)$. D'où $y = P_C(x)$.

Montrons maintenant que $P_C(x)$ vérifie bien (*). Et $\forall z \in C$, on a

$$\|x - z\|^2 \geq \|x - P_C(x)\|^2$$

Or, en développant :

$$\begin{aligned}\|x - z\|^2 &= \|(x - P_C(x)) - (z - P_C(x))\|^2 \\ &= \|x - P_C(x)\|^2 + \|z - P_C(x)\|^2 - 2\langle x - P_C(x), z - P_C(x) \rangle \\ &\geq \|x - P_C(x)\|^2\end{aligned}$$

D'où,

$$\|z - P_C(x)\|^2 - 2\langle x - P_C(x), z - P_C(x) \rangle \geq 0 \quad (***)$$

Soit maintenant $z_0 \in C$. On va appliquer $(***)$ à $z = \lambda z_0 + (1 - \lambda)z_0 \in C$ pour $\lambda \in]0, 1]$:

$$\begin{aligned}\lambda^2 \|z_0 + P_C(x)\|^2 - 2\lambda \langle x - P_C(x), z_0 - P_C(x) \rangle &\geq 0 \\ \implies \lambda \|z_0 + P_C(x)\|^2 - 2\langle x - P_C(x), z_0 - P_C(x) \rangle &\geq 0 \\ \xrightarrow{\lambda \rightarrow 0} -2\langle x - P_C(x), z_0 - P_C(x) \rangle &\geq 0\end{aligned}$$

ce que l'on voulait. □

Remarque 4. $(*)$ traduit le fait géométrique que l'angle du vecteur $\overrightarrow{P_C(x)x}$ avec $\overrightarrow{P_C(x)z}$ est obtus pour tout $z \in C$. En effet, en notant cet angle θ , on a pour $z \in C$:

$$\langle x - P_C(x), z - P_C(x) \rangle = \|x - P_C(x)\| \|z - P_C(x)\| \cos(\theta)$$

et si θ est obtus, on a bien $\cos(\theta) \leq 0$.

Corollaire 5. Soit F un sous-espace vectoriel fermé de H . Alors $F \oplus F^\perp = H$.

Démonstration. Si $x \in F \cap F^\perp$, alors $\|x\| = \langle x, x \rangle = 0$, et donc $x = 0$. Montrons maintenant que $F + F^\perp = H$. Soit $x \in H$. Comme F est un convexe fermé de H (en tant que sous-espace vectoriel fermé), on peut appliquer le Théorème 3. Ainsi, il existe un unique $P_F(x) \in F$ tel que $d(x, F) = d(x, P_F(x))$ et

$$\forall z \in F, \langle x - P_F(x), z - P_F(x) \rangle \leq 0 \quad (*)$$

Soit $z_0 \in F$. on peut appliquer $(*)$ à $z = z_0$:

$$\langle x - P_F(x), z_0 - P_F(x) \rangle \leq 0$$

On va également appliquer $(*)$ à $z = -z_0 + 2P_F(x) \in F$:

$$\langle x - P_F(x), -z_0 + P_F(x) \rangle \leq 0 \iff \langle x - P_F(x), z_0 - P_F(x) \rangle \geq 0$$

Ce qui montre que l'inégalité de $(*)$ est en fait une égalité. On en tire :

$$\forall z \in F, \langle x - P_F(x), z \rangle = \langle x - P_F(x), z - P_F(x) \rangle - \langle x - P_F(x), 0 - P_F(x) \rangle = 0$$

donc $x - P_F(x) \in F^\perp$. En conclusion, on a :

$$x = \underbrace{P_F(x)}_{\in F} + \underbrace{x - P_F(x)}_{\in F^\perp} \in F + F^\perp$$

et on a donc bien la somme directe $H = F \oplus F^\perp$. □

24 SimPLICITÉ de A_n pour $n \geq 5$

On montre que A_n est simple pour $n \geq 5$ en montrant dans un premier temps le cas $n = 5$, puis en s'y ramenant.

Lemme 1. Les 3-cycles sont conjugués dans A_n pour $n \geq 5$.

[PER]
p. 15

Démonstration. Soient $\alpha = (a_1 \ a_2 \ a_3)$ et $\beta = (b_1 \ b_2 \ b_3)$ deux 3-cycles. Soit $\sigma \in S_n$ telle que

$$\forall i \in \llbracket 1, 3 \rrbracket, \sigma(a_i) = b_i$$

On a deux possibilités pour σ :

- σ est paire. Alors $\sigma \in A_n$, et le résultat est démontré pour α et β .
- σ est impaire. Comme $n \geq 5$, il existe c_1, c_2 tels que $c_1, c_2 \notin \{b_1, b_2, b_3\}$. On pose alors $\tau = (c_1 \ c_2)$, et on a

$$(\tau\sigma)(a_1 \ a_2 \ a_3)(\tau\sigma)^{-1} = (b_1 \ b_2 \ b_3)$$

avec $\tau\sigma$ paire. Le résultat est encore démontré pour α et β .

□

Lemme 2. Le produit de deux transpositions est un produit de 3-cycles.

[ROM21]
p. 49

Démonstration. Soient $\alpha = (a_1 \ a_2)$ et $\beta = (b_1 \ b_2)$ deux transpositions. Si $\alpha = \beta$, alors $\alpha\beta = \text{id} = \sigma^3$ où σ désigne n'importe quel 3-cycle.

Si $\alpha \neq \beta$, on a deux possibilités :

- Leur support comporte un élément commun : $a_1 = b_1 = c$. Donc $\alpha = (c \ a_2)$ et $\beta = (c \ b_2)$ avec c, a_2, b_2 distincts. Donc $\alpha\beta = (a_2, c, b_2)$.
- Leur support n'a pas d'élément commun. Dans ce cas a_1, a_2, a_1, b_2 sont distincts et $\alpha\beta = (a_1 \ a_2 \ b_1)(a_2 \ b_1 \ b_2)$.

□

Lemme 3. A_n est engendré par les 3-cycles pour $n \geq 3$.

Démonstration. Soit $\sigma \in A_n$. Comme σ est paire, on peut la décomposer en un produit d'un nombre pair n de transpositions :

$$\sigma = \prod_{i=1}^{n-1} \tau_i \tau_{i+1}$$

Par le Lemme 1, chaque produit $\tau_i \tau_{i+1}$ peut s'écrire comme un produit de 3-cycles. Donc σ est bien un produit de 3-cycles.

□

Lemme 4. A_5 est simple.

Démonstration. Commençons par décrire les types possibles des permutations de A_5 (le “type” d’une permutation désigne les cardinaux des supports des cycles apparaissant dans sa décomposition en cycles disjoints).

Type de permutation	Nombre de permutations
[1]	1
[3]	$\frac{5 \times 4 \times 3}{3} = 20$
[5]	$\frac{5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1}{5} = 24$
[2, 2]	$\frac{1}{2} \frac{5 \times 4 \times 3 \times 2}{4} = 15$

Montrons que les permutations de type [2, 2] sont conjuguées dans A_5 . Soient $\alpha = (a_1 \ b_1)(c_1 \ d_1)(e_1)$ et $\beta = (a_2 \ b_2)(c_2 \ d_2)(e_2)$ deux permutations de type [2, 2]. Il suffit de prendre $\sigma \in A_5$ telle que $\sigma(a_1) = a_2$, $\sigma(b_1) = b_2$ et $\sigma(e_1) = e_2$ pour avoir $\sigma \alpha \sigma^{-1} = \beta$.

Soit $H \triangleleft A_5$ tel que $H \neq \{\text{id}\}$. Montrons que $H = A_5$.

- Si H contient une permutation de type [2, 2], alors par le Lemme 2, le Lemme 1, il les contient toutes.
- Si H contient une permutation de type [3], alors par le Lemme 1, il les contient toutes.
- Si H contient une permutation de type [5], $\sigma = (a \ b \ c \ d \ e)$, il contient alors le commutateur

$$\begin{aligned}
 (a \ b \ c) \sigma (a \ b \ c)^{-1} \sigma^{-1} &= (a \ b \ c) \sigma (c \ b \ a) \sigma^{-1} \\
 &= (a \ b \ c) (\sigma(c) \ \sigma(b) \ \sigma(a)) \\
 &= (a \ b \ c) (d \ c \ b) \\
 &= (b \ d \ a)
 \end{aligned}$$

qui est un 3-cycle. Par le Lemme 1, il les contient tous.

Or, H ne peut pas vérifier qu’un seul des points précédents en vertu du théorème de Lagrange, car ni $16 = 15 + 1$, ni $21 = 20 + 1$ ne divisent $|A_5| = 60$. Donc H vérifie au moins deux des points précédents, et ainsi $|H| \geq 1 + 15 + 20 = 36$. Donc $|H| = 60$ et $H = A_5$. \square

Si les théorèmes de Sylow sont mentionnés dans le plan, il est préférable de mentionner l’argument suivant.

[PER]
p. 28

Remarque 5. Dans le raisonnement précédent, si H contient une permutation de type $[5]$ (qui est donc d'ordre 5), alors H contient le 5-Sylow engendré par cet élément. Or, on sait par les théorèmes de Sylow que les sous-groupes de Sylow sont conjugués entre eux. Donc H contient tous les 5-Sylow et donc contient tous les éléments d'ordre 5.

Théorème 6. A_n est simple pour $n \geq 5$.

Démonstration. Soit $N \triangleleft A_n$ tel que $N \neq \{\text{id}\}$. L'idée générale de la démonstration est de se ramener au cas $n = 5$ à l'aide d'une permutation bien spécifique.

Soit $\sigma \in N \setminus \{\text{id}\}$, il existe donc $a \in \llbracket 1, n \rrbracket$ tel que $\sigma(a) = b \neq a$. Soit $c \in \llbracket 1, n \rrbracket$ différent de a, b et $\sigma(b)$. On pose $\tau = \begin{pmatrix} a & c & b \end{pmatrix} \in A_n$ (on a $\tau^{-1} = \begin{pmatrix} a & b & c \end{pmatrix}$). Soit $\rho = \tau \sigma \tau^{-1} \sigma^{-1}$. Par calcul :

$$\rho = \begin{pmatrix} a & c & b \end{pmatrix} \sigma \begin{pmatrix} a & b & c \end{pmatrix} \sigma^{-1} = \begin{pmatrix} a & c & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma(a) & \sigma(b) & \sigma(c) \end{pmatrix}$$

Notons bien que $\rho \neq \text{id}$ (en tant que produit de 3-cycles, car $\sigma(b) \neq c$). Or, $\tau \sigma \tau^{-1} \in N$ car N est distingué et σ^{-1} aussi car N est un groupe, donc $\rho \in N$.

Notons $\mathcal{F} = \{a, b, c, \sigma(a), \sigma(b), \sigma(c)\}$. Comme $\sigma(a) = b$, $|\mathcal{F}| \leq 5$. Quitte à rajouter, au besoin, des éléments à \mathcal{F} , on peut supposer que $|\mathcal{F}| = 5$. On pose

$$A(\mathcal{F}) = \{\alpha \in A_n \mid \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket \setminus \mathcal{F}, \alpha(i) = i\}$$

le sous-groupe de A_n contenant les éléments qui laissent fixes $\llbracket 1, n \rrbracket \setminus \mathcal{F}$. Si on pose $\mathcal{F} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$, on a une bijection entre \mathcal{F} et $\llbracket 1, 5 \rrbracket$:

$$\begin{aligned} \mathcal{F} &\rightarrow \llbracket 1, 5 \rrbracket \\ a_i &\mapsto i \end{aligned}$$

Donc $A(\mathcal{F})$ et A_5 sont deux groupes isomorphes (en effet, une permutation n'agissant que sur \mathcal{F} peut s'identifier à une permutation n'agissant que sur $\llbracket 1, 5 \rrbracket$). De plus, par le Lemme 4, comme A_5 est simple, $A(\mathcal{F})$ l'est aussi.

Soit $N_0 = N \cap A(\mathcal{F})$. $N_0 \triangleleft A(\mathcal{F})$, en effet, soient $\alpha \in N_0$ et $\beta \in A(\mathcal{F})$:

- $\beta \alpha \beta^{-1} \in A(\mathcal{F})$ car $A(\mathcal{F})$ est un groupe.
- $\beta \alpha \beta^{-1} \in N$ car $N \triangleleft A_5$.

En particulier, N_0 est distingué dans $A(\mathcal{F})$ qui est simple. De plus, $\rho \in N_0$ (car $\text{Supp}(\rho) \subseteq \mathcal{F}$ et $\epsilon(\rho) = (-1)^6 = 1$ donc $\rho \in A(\mathcal{F})$ et par 1., $\rho \in N$). Donc $N_0 \neq \{\text{id}\}$, et ainsi $N_0 = A(\mathcal{F})$. On en déduit :

$$A(\mathcal{F}) = N \cap A(\mathcal{F}) \tag{*}$$

Finalement, τ est un 3-cycle qui n'agit que sur \mathcal{F} , donc $\tau \in A(\mathcal{F})$ et par (*), $\tau \in N$. Or, τ est un 3-cycle et les 3-cycles sont conjugués dans A_n (par le Lemme 1) donc N contient tous les 3-cycles. Et comme ceux-ci engendrent A_n (par le Lemme 3), on a $N = A_n$. \square

25 Sous-groupes distingués et table des caractères

Dans ce développement, on montre que tout sous-groupe distingué d'un groupe fini s'écrit comme intersection de noyaux de caractères irréductibles. On utilise ensuite ce résultat pour donner un critère de simplicité.

Soit G un groupe fini.

[I-P]
p. 66

Notation 1. — On note ρ_1, \dots, ρ_r les représentations irréductibles de G . On suppose que ρ_1 est la représentation triviale.
— On note χ_1, \dots, χ_r les caractères respectifs de ρ_1, \dots, ρ_r .

Théorème 2. Les sous-groupes distingués de G sont exactement les

$$\bigcap_{i \in I} \text{Ker}(\rho_i) \text{ où } I \in \mathcal{P}(\llbracket 1, r \rrbracket)$$

Démonstration. Pour tout $i \in \llbracket 1, r \rrbracket$, le noyau de ρ_i est clairement distingué et donc toute intersection de noyaux de représentations irréductibles l'est aussi. Montrons que ce sont en fait les seuls sous-groupes distingués de G . Soit $N \triangleleft G$. On note $\rho : G/N \rightarrow \text{GL}(V)$ la représentation régulière de G/N , de degré $[G : N]$. On pose $\tilde{\rho} : g \mapsto \rho(\pi_N(g))$ (où $\pi_N : G \rightarrow G/N$ désigne la projection canonique sur le quotient, qui est un morphisme de groupes car N est distingué). On a alors :

$$\forall g, h \in G, \tilde{\rho}(g) \in \text{GL}(V) \text{ et } \tilde{\rho}(gh) = \tilde{\rho}(g)\tilde{\rho}(h)$$

donc $\tilde{\rho}$ est une représentation de G . De plus, comme ρ est injective, on a

$$\text{Ker}(\tilde{\rho}) = \{g \in G \mid \rho(\pi_N(g)) = \text{id}_V\} = \{g \in G \mid \pi_N(g) = e_{G/N}\} = N$$

Comme $\tilde{\rho}$ est une représentation de G , on peut la décomposer en somme directe de représentations irréductibles de G (par le théorème de Maschke) :

$$\tilde{\rho} = \bigoplus_{i \in I} \rho_i \text{ où } I \in \mathcal{P}(\llbracket 1, r \rrbracket) \text{ et } \forall i \in I, \rho_i : G \rightarrow \text{GL}(W_i)$$

Soit $g \in G$. Dans une base adaptée à la décomposition $V = \bigoplus_{i \in I} W_i$, $\tilde{\rho}(g)$ s'écrit comme une matrice diagonale par blocs (où chaque bloc correspond à une sous-représentation irréductible). Ainsi,

$$g \in \text{Ker}(\tilde{\rho}) \iff \forall i \in I, g \in \text{Ker}(\rho_i)$$

d'où $N = \text{Ker}(\tilde{\rho}) = \bigcap_{i \in I} \text{Ker}(\rho_i)$. □

Corollaire 3. G est simple si et seulement si $\forall i \neq 1, \forall g \neq e_G, \chi_i(g) \neq \chi_i(e_G)$.

Démonstration. Sens direct : Supposons G simple. Pour $i \neq 1$, $\text{Ker}(\chi_i) = \text{Ker}(\rho_i) \triangleleft G$, donc

$$\text{Ker}(\chi_i) = G \text{ ou } \text{Ker}(\chi_i) = \{e_G\}$$

Supposons par l'absurde que $\text{Ker}(\chi_i) = G$ et notons n_i le degré de ρ_i de sorte que $\chi_i(g) = \chi_i(e_G) = n_i$ pour tout $g \in G$. En particulier,

$$\langle \chi_1, \chi_i \rangle = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \overline{\chi_1(g)} \chi_i(g) = n_i$$

Mais, χ_1 et χ_i sont orthogonaux, donc $\langle \chi_1, \chi_i \rangle = 0$: absurde. D'où $\text{Ker}(\chi_i) = \{e_G\}$. Donc $\forall g \neq e_G$, $\chi_i(g) \neq \chi_i(e_G)$.

Réciproque : Supposons que $\forall i \neq 1$, $\forall g \neq e_G$, $\chi_i(g) \neq \chi_i(e_G)$. Alors $\forall i \neq 1$, $\text{Ker}(\chi_i) = \{e_G\}$. De plus, comme $\text{Ker}(\chi_1) = G$, toute intersection de ces sous-groupes est triviale. Ainsi, G est simple par le Théorème 2. \square

26 Suite de polygones

Il s'agit ici d'étudier une suite de polygones à l'aide de déterminants classiques, et de montrer qu'elle converge vers l'isobarycentre du polygone de départ.

Lemme 1 (Déterminant circulant). Soient $n \in \mathbb{N}^*$ et $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$. On pose $\omega = e^{\frac{2i\pi}{n}}$. Alors

[GOU21]
p. 153

$$\begin{vmatrix} a_0 & a_1 & \dots & a_{n-1} \\ a_{n-1} & a_0 & \dots & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1 & a_2 & \dots & a_0 \end{vmatrix} = \prod_{j=0}^{n-1} P(\omega^j)$$

où $P = \sum_{k=0}^{n-1} a_k X^k$.

Démonstration. On définit

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & \dots & a_{n-1} \\ a_{n-1} & a_0 & \dots & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1 & a_2 & \dots & a_0 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \text{ et } \Omega = (\omega^{(i-1)(j-1)})_{i,j \in \llbracket 1, n \rrbracket} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$$

Pour $i \geq 2$, la i -ième ligne de A est

$$(a_{n-i+1} \quad \dots \quad a_{n-1} \quad a_0 \quad \dots \quad a_{n-i-2})$$

Si on multiplie cette ligne par la j -ième colonne de Ω , on obtient le coefficient

$$\begin{aligned} & a_{n-i+1} + a_{n-i+2}\omega^{j-1} + \dots + a_0\omega^{(j-1)(i-1)} + a_1\omega^{(j-1)i} + \dots + a_{n-i-2}\omega^{(j-1)(n-1)} \\ &= \omega^{(j-1)(i-1)}(a_0 + a_1\omega^{j-1} + \dots + a_{n-1}\omega^{(j-1)(n-1)}) \\ &= \omega^{(j-1)(i-1)}P(\omega^{j-1}) \end{aligned}$$

et c'est encore vrai pour $i = 1$ puisque $\omega^0 = 1$. Donc la j -ième colonne de $A\Omega$ est égale à la j -ième colonne de Ω multipliée par $P(\omega^{j-1})$. Ceci entraîne que

$$\det(A) \det(\Omega) = \det(A\Omega) = P(1)P(\omega) \dots P(\omega^{n-1}) \det(\Omega)$$

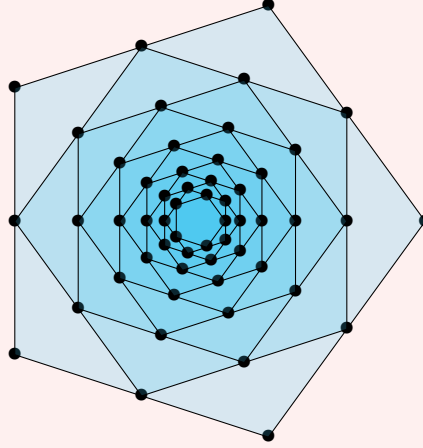
et le déterminant $\det(\Omega)$ est non nul (en tant que déterminant de Vandermonde à paramètres deux-à-deux distincts). D'où :

$$\det(A) = P(1)P(\omega) \dots P(\omega^{n-1})$$

□

[I-P]
p. 389

Théorème 2 (Suite de polygones). Soit P_0 un polygone dont les sommets sont $\{z_{0,1}, \dots, z_{0,n}\}$. On définit la suite de polygones (P_k) par récurrence en disant que, pour tout $k \in \mathbb{N}^*$, les sommets de P_{k+1} sont les milieux des arêtes de P_k .



Alors la suite (P_k) converge vers l'isobarycentre de P_0 .

Démonstration. On identifie P_k au vecteur colonne $Z_k = \begin{pmatrix} z_{k,1} \\ \vdots \\ z_{k,n} \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^n$. Il s'agit de montrer que la

suite (Z_k) converge vers $\begin{pmatrix} g \\ \vdots \\ g \end{pmatrix}$ où g désigne l'isobarycentre de P_0 .

En utilisant la notation matricielle, la relation de récurrence s'écrit

$$\forall k \in \mathbb{N}, Z_{k+1} = \begin{pmatrix} \frac{z_{k,1} + z_{k,2}}{2} \\ \vdots \\ \frac{z_{k,n} + z_{k,1}}{2} \end{pmatrix} = AZ_k \text{ où } A = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

Par une récurrence immédiate (c'est une suite géométrique), on a donc $\forall k \in \mathbb{N}, Z_k = A^k Z_0$. Il suffit donc de montrer que (A^k) converge dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ (muni d'une norme quelconque par équivalence des normes en dimension finie).

Pour cela, étudions les valeurs propres de A :

$$\chi_A = \det(A - XI_n) = \begin{vmatrix} a_0 & a_1 & \dots & a_{n-1} \\ a_{n-1} & a_0 & \dots & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1 & a_2 & \dots & a_0 \end{vmatrix}$$

avec $a_0 = \frac{1}{2} - X$, $a_1 = \frac{1}{2}$ et $\forall i > 2, a_i = 0$. On reconnaît le déterminant circulant du Lemme 1 et en

posant $P(Y) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k Y^k$ et $\omega = e^{\frac{2i\pi}{n}}$, la formule du déterminant circulant nous donne :

$$\chi_A = \prod_{j=1}^n P(\omega^j) = \prod_{j=1}^n \left(\sum_{k=0}^{n-1} a_k \omega^{kj} \right) = \prod_{j=1}^n \left(\frac{1}{2} - X + \frac{1}{2} \omega^j \right) = \prod_{j=1}^n (\lambda_j - X)$$

où $\lambda_j = \frac{1+\omega^j}{2}$. Et comme $\lambda_i = \lambda_j \iff i = j$, le polynôme χ_A est scindé à racines simples. Donc $\exists Q \in \text{GL}_n(\mathbb{C})$ telle que $A = QDQ^{-1}$ et $D = \text{Diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$. Or pour $j \neq n$,

$$|\lambda_j| = \left| \frac{1+\omega^j}{2} \right| = \left| e^{\frac{ij\pi}{n}} \frac{e^{\frac{ij\pi}{n}} + e^{-\frac{ij\pi}{n}}}{2} \right| = \left| \cos\left(\frac{\pi j}{n}\right) \right| < 1$$

Ainsi, $\lambda_j^k \longrightarrow 0$ si $j < n$, donc la suite (A^k) converge dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ vers la matrice $B = Q \text{Diag}(0, \dots, 0, 1) Q^{-1}$ par continuité de l'application $M \mapsto QMQ^{-1}$.

On pose donc $X = BP_0$, de sorte que la suite (Z_k) converge vers X . Par continuité de $M \mapsto AM$, la limite X vérifie forcément $X = AX$ ie. X est vecteur propre de A associé à la valeur propre 1. Or

l'espace propre de A associé à la valeur propre 1 contient le vecteur $\begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$ et est de dimension 1

(car χ_A possède n racines distinctes), donc il est engendré par ce vecteur. Ainsi, il existe $a \in \mathbb{C}$ tel

que $X = \begin{pmatrix} a \\ \vdots \\ a \end{pmatrix}$ ie. (Z_k) converge vers le point d'affixe a .

Enfin, on remarque que si g est l'isobarycentre de P_0 , il est aussi égal à celui de P_k pour tout k (que l'on note g_k) car pour tout $k \geq 1$:

$$g_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{k,i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z_{k-1,i} + z_{k-1,i+1}}{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{k-1,i} = g_{k-1}$$

(en considérant les indices i modulo n). Or, la suite (Z_k) converge vers $\begin{pmatrix} a \\ \vdots \\ a \end{pmatrix}$, et la fonction φ qui

à n points du plan associe son isobarycentre est continue. Donc,

$$g_k = \varphi(Z_k) \longrightarrow \varphi(a, \dots, a) = a$$

et comme pour tout k , $g_k = g$, on a bien $g = a$. □

27 $\exp : \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathrm{GL}_n(\mathbb{R})$ est surjective

Dans ce développement, on démontre que l'exponentielle de matrices est surjective en utilisant des théorèmes d'analyse.

Lemme 1. Soit $M \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$. Alors $M^{-1} \in \mathbb{C}[X]$ (ie. M^{-1} est un polynôme en M).

[I-P]
p. 396

Démonstration. D'après le théorème de Cayley-Hamilton, $\chi_M(M) = 0$. Or, en notant $\chi_M = \sum_{k=0}^n a_k X^k$, on a $a_0 = (-1)^n \det(M)$, d'où

$$0 = M^n + \cdots + a_1 M + (-1)^n \det(M) I_n$$

En notant $Q = X^{n-1} + a_{n-1} X^{n-2} + \cdots + a_2 X + a_1$, on en déduit que $(-1)^{n+1} \det(M) I_n = Q(M)M$. D'où

$$M^{-1} = \frac{(-1)^{n+1}}{\det(M)} Q(M) \in \mathbb{C}[M]$$

ce qu'il fallait démontrer. □

Lemme 2. Soit $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Alors, $\exp(M) \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$.

Démonstration. M et $-M$ commutent, donc

$$\exp(M) \exp(-M) = \exp(M - M) = I_n = \exp(-M) \exp(M)$$

Ainsi $\exp(M)$ est inversible, d'inverse $\exp(-M)$. □

Lemme 3. \exp est différentiable en 0 et,

$$d\exp_0 = I_n$$

Démonstration. Soit $H \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$.

$$\begin{aligned} \exp(0 + H) - \exp(H) &= \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{H^k}{k!} \\ &= I_n + H + \sum_{k=2}^{+\infty} \frac{H^k}{k!} \end{aligned}$$

Soit $\|\cdot\|$ une norme d'algèbre sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. On a :

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{k=2}^{+\infty} \frac{H^k}{k!} \right\| &\leq \sum_{k=2}^{+\infty} \left\| \frac{H^k}{k!} \right\| \\ &\leq \sum_{k=2}^{+\infty} \frac{\|H\|^k}{k!} \end{aligned}$$

Donc,

$$\sum_{k=2}^{+\infty} \frac{\|H\|^k}{k!} = o(\|H\|)$$

ce qui donne le résultat annoncé. \square

Théorème 4. $\exp : \mathcal{M}_n(\mathbb{C}) \rightarrow \mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$ est surjective.

Démonstration. Fixons $C \in \mathcal{M}_n(\mathbb{C})$ pour le reste de la démonstration. Comme $\mathbb{C}[C]$ est un sous-espace vectoriel de l'espace $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$, il est de dimension finie et est donc fermé. En particulier, $\exp(C) \in \mathbb{C}[C]$.

Posons $\mathbb{C}[C]^* = \mathbb{C}[C] \cap \mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$, et montrons que c'est un sous-groupe de $\mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$.

- $I_n \in \mathbb{C}[C]$ et $I_n \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$, donc $I_n \in \mathbb{C}[C]^*$.
- Soit $M \in \mathbb{C}[C]^*$. Comme $M \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$, M^{-1} existe, est inversible, et, par le Lemme 1, $M^{-1} \in \mathbb{C}[C]$.
- Enfin, $\mathbb{C}[C]^*$ est clairement stable par multiplication.

Ainsi, $\mathbb{C}[C]^*$ est un sous-groupe de $\mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$, ce qui, combiné au Lemme 2, nous dit que $\exp : \mathbb{C}[C] \rightarrow \mathbb{C}[C]^*$ est bien définie. Il s'agit de plus d'un morphisme de groupes. En effet, $\forall A, B \in \mathbb{C}[C]$, on a $AB = BA$, d'où $\exp(A)\exp(B) = \exp(A+B) = \exp(B)\exp(A)$.

Montrons que $\mathbb{C}[C]^*$ est un ouvert connexe de $\mathbb{C}[C]$. Notons qu'il s'agit bien d'un ouvert de $\mathbb{C}[C]$, car c'est l'intersection de $\mathbb{C}[C]$ avec $\mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$ qui est ouvert dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{C})$. Ensuite, soient $A, B \in \mathbb{C}[C]^*$. On pose

$$P = \det((1-X)A + XB)$$

P ne s'annule ni en 0, ni en 1 par inversibilité de A et B . P a un nombre fini de racines car n'est pas nul : on peut trouver une fonction continue $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ qui évite ces racines. Donc,

$$\forall t \in [0, 1], \gamma(t) \in \mathbb{C}[C]^*$$

donc $\mathbb{C}[C]^*$ est connexe par arcs, donc est connexe.

Il s'agit maintenant de montrer que $\exp(\mathbb{C}[C]^*)$ est un ouvert-fermé de $\mathbb{C}[C]^*$. Par le théorème d'inversion locale appliqué à $\exp : \mathbb{C}[C] \rightarrow \mathbb{C}[C]$ (qui est bien \mathcal{C}^1 sur l'espace de Banach $\mathbb{C}[C]$ et, par le Lemme 3, $\det(d\exp_0) \neq 0$) : il existe U un voisinage de 0 dans $\mathbb{C}(C)$ et un ouvert V de $\mathbb{C}(C)$ contenant $\exp(0) = I_n$ tels que $\exp : U \rightarrow V$ soit un difféomorphisme de classe \mathcal{C}^1 . Soit $A \in \mathbb{C}[C]$. Posons

$$f_A : \begin{array}{ccc} \mathbb{C}[C] & \rightarrow & \mathbb{C}[C] \\ M & \mapsto & \exp(A)^{-1}M \end{array}$$

Pour tout $B \in V$, $f(\exp(A)B) = \exp(A)^{-1}(\exp(A)B) = B \in V$, donc $\exp(A)V \subseteq f^{-1}(V)$. Soit $B \in f^{-1}(V)$, alors $f(B) \in V$. Or, $f(B) = \exp(A)^{-1}B$, donc $B = \exp(A)f(B) \in \exp(A)V$. On en déduit que $\exp(A)V = f^{-1}(V)$ et que $\exp(A)V$ est un ouvert par continuité de f . Comme V contient I_n , $\exp(A)V$ est un voisinage de $\exp(A)$. Or, $\exp(A)V$ est inclus dans $\mathbb{C}[C]$ car pour tout $B \in V$, il existe $M \in \mathbb{C}[C]$ tel que $\exp(M) = B$. Ainsi,

$$\exp(A)B = \exp(A)\exp(M) = \exp(A+M) \in \exp(\mathbb{C}[C])$$

On en déduit que $\exp(\mathbb{C}[C])$ est un ouvert.

Montrons maintenant que

$$\mathbb{C}[C]^* \setminus \exp(\mathbb{C}[C]) = \bigcup_{A \in \mathbb{C}[C]^* \setminus \exp(\mathbb{C}[C])} A \exp(\mathbb{C}[C]) \quad ((*))$$

Soient $A \in \mathbb{C}[C]^* \setminus \exp(\mathbb{C}[C])$ et $B \in \exp(\mathbb{C}[C])$. Alors $AB \in \mathbb{C}[C]^*$. Supposons par l'absurde que $AB \in \exp(\mathbb{C}[C])$. Il existe donc $M \in \exp(\mathbb{C}[C])$ tel que $AB = M$ et $A = MB^{-1}$. Comme $\exp(\mathbb{C}[C])$ est un groupe multiplicatif, alors $A \in \exp(\mathbb{C}[C])$: absurde. On conclut que

$$\bigcup_{A \in \mathbb{C}[C]^* \setminus \exp(\mathbb{C}[C])} A \exp(\mathbb{C}[C]) \subseteq \mathbb{C}[C]^* \setminus \exp(\mathbb{C}[C])$$

Réciproquement, supposons que $M \in \mathbb{C}[C]^* \setminus \exp(\mathbb{C}[C])$. Comme $I_n \in \exp(\mathbb{C}[C])$, alors $M \in M \exp(\mathbb{C}[C])$. On en déduit $(*)$, d'où la fermeture de $\exp(\mathbb{C}[M])$.

$\exp(\mathbb{C}[M])$ est un ouvert fermé non vide (car contient I_n) de $\mathbb{C}[M]^*$, alors $\exp(\mathbb{C}[M]) = \mathbb{C}[M]^*$. Pour conclure, si $C \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{C})$, alors comme $C \in \mathbb{C}[C]$, $C \in \mathbb{C}[C]^*$. Donc $C \in \exp(\mathbb{C}[C])$, et \exp est bien surjective. \square

Application 5. $\exp(\mathcal{M}_n(\mathbb{R})) = \mathrm{GL}_n(\mathbb{R})^2$, où $\mathrm{GL}_n(\mathbb{R})^2$ désigne les carrés de $\mathrm{GL}_n(\mathbb{R})$.

Démonstration. Soit $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Alors,

$$\exp(M) = \exp\left(\frac{M}{2}\right)^2$$

d'où $\exp(\mathcal{M}_n(\mathbb{R})) \subseteq \mathrm{GL}_n(\mathbb{R})^2$. Réciproquement, soit $A \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{R})^2$. Posons $B = A^2$. D'après le Théorème 4,

$$\exists P \in \mathbb{C}[X] \text{ telle que } A = \exp(P(A))$$

Comme A est une matrice réelle, alors en passant au conjugué, on obtient $A = \exp(\overline{P}(A))$. Ainsi,

$$B = A^2 = \exp((P + \overline{P})(A)) \in \exp(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))$$

d'où $\mathrm{GL}_n(\mathbb{R})^2 \subseteq \exp(\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))$. \square

28 Théorème central limite

En établissant d'abord le théorème de Lévy, on démontre le théorème central limite, qui dit que si (X_n) est une suite de variables aléatoires identiquement distribuées admettant un moment d'ordre 2, alors $\frac{X_1 + \dots + X_n - n\mathbb{E}(X_1)}{\sqrt{n}}$ converge en loi vers $\mathcal{N}(0, \text{Var}(X_1))$.

Notation 1. Si X est une variable aléatoire réelle, on note ϕ_X sa fonction caractéristique.

Théorème 2 (Lévy). Soient (X_n) une suite de variables aléatoires réelles et X une variable aléatoire réelle. Alors :

[Z-Q]
p. 544

$$X_n \xrightarrow{(d)} X \iff \phi_{X_n} \text{ converge simplement vers } \phi_X$$

Démonstration. Sens direct : On suppose que (X_n) converge en loi vers X . Pour tout $t \in \mathbb{R}$, la fonction $g_t : x \mapsto e^{itx}$ est continue et bornée sur \mathbb{R} . Donc par définition de la convergence en loi :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbb{E}(g_t(X_n)) = \mathbb{E}(g_t(X))$$

ce que l'on voulait.

Réciproque : Soit $\varphi \in L_1(\mathbb{R})$, on pose $f = \widehat{\varphi}$. Alors

$$\mathbb{E}(f(X_n)) = \mathbb{E}\left(\int_{\mathbb{R}} e^{itX_n} \varphi(t) dt\right)$$

Comme la fonction $(\omega, t) \mapsto e^{itX_n(\omega)} \varphi(t)$ est intégrable pour la mesure $\mathbb{P}_{X_n} \otimes \lambda$, on peut appliquer le théorème de Fubini-Lebesgue pour intervertir espérance et intégrale :

$$\mathbb{E}(f(X_n)) = \int_{\mathbb{R}} \mathbb{E}(e^{itX_n}) \varphi(t) dt$$

On définit maintenant la suite de fonction $g_n : t \mapsto \mathbb{E}(e^{itX_n}) \varphi(t)$. Alors :

- $\forall n \in \mathbb{N}$, g_n est mesurable.
- La suite de fonction (g_n) converge presque partout vers $g : t \mapsto \mathbb{E}(e^{itX}) \varphi(t)$ par hypothèse.
- $\forall n \in \mathbb{N}$ et pp. en $t \in \mathbb{R}$, $|g_n(t)| \leq \mathbb{E}(|e^{itX_n}|) |\varphi(t)| \leq \mathbb{P}_X(\mathbb{R}) |\varphi(t)|$ avec $|\varphi| \in L_1(\mathbb{R})$.

On peut donc appliquer le théorème de convergence dominée pour obtenir

$$\mathbb{E}(f(X_n)) \longrightarrow \int_{\mathbb{R}} \mathbb{E}(e^{itX}) \varphi(t) dt = \mathbb{E}(f(X))$$

Ainsi, le résultat est vrai pour toute fonction dans l'image de $L_1(\mathbb{R})$ par la transformée de Fourier. En particulier, il est vrai pour tout $f \in \mathcal{S}(\mathbb{R})$, dense dans $(\mathcal{C}(\mathbb{R}), \|\cdot\|_{\infty})$. Soient maintenant $f \in \mathcal{C}(\mathbb{R})$

et (f_k) une suite de fonctions de $\mathcal{S}(\mathbb{R})$ qui converge uniformément vers f . Alors,

$$\begin{aligned} |\mathbb{E}(f(X_n)) - \mathbb{E}(f(X))| &= |\mathbb{E}(f(X_n)) - \mathbb{E}(f_k(X_n)) + \mathbb{E}(f_k(X_n)) \\ &\quad - \mathbb{E}(f_k(X)) + \mathbb{E}(f_k(X)) - \mathbb{E}(f(X))| \\ &\leq 2\|f - f_k\|_\infty + |\mathbb{E}(f_k(X_n)) - \mathbb{E}(f_k(X))| \\ &\longrightarrow 0 \end{aligned}$$

□

Lemme 3. Soient $u, v \in \mathbb{C}$ de module inférieur ou égal à 1 et $n \in \mathbb{N}^*$. Alors

$$|z^n - u^n| \leq n|z - u|$$

[G-K]
p. 307

Démonstration. $|z^n - u^n| = |(z - u) \sum_{k=0}^{n-1} z^k u^{n-1-k}| \leq n|z - u|$.

□

Théorème 4 (Central limite). Soit (X_n) une suite de variables aléatoires réelles indépendantes de même loi admettant un moment d'ordre 2. On note m l'espérance et σ^2 la variance commune à ces variables. On pose $S_n = X_1 + \dots + X_n - nm$. Alors,

$$\left(\frac{S_n}{\sqrt{n}} \right) \xrightarrow{(d)} \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

Démonstration. On a $S_n = \sum_{k=1}^n (X_k - m)$. Notons ϕ la fonction caractéristique de $X_1 - m$. Comme les variables aléatoires $X_1 - m, \dots, X_n - m$ sont indépendantes de même loi, la fonction caractéristique de $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$ vaut $\forall t \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} \phi_{\frac{S_n}{\sqrt{n}}}(t) &= \mathbb{E} \left(e^{iS_n \left(\frac{t}{\sqrt{n}} \right)} \right) \\ &= \mathbb{E} \left(\prod_{k=1}^n e^{i(X_k - m) \left(\frac{t}{\sqrt{n}} \right)} \right) \\ &= \prod_{k=1}^n \phi_{X_k - m} \left(\frac{t}{\sqrt{n}} \right) \\ &= \phi \left(\frac{t}{\sqrt{n}} \right)^n \end{aligned}$$

D'après le Théorème 2, pour montrer que $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$ converge en loi vers $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$, il suffit de montrer que

$$\forall t \in \mathbb{R}, \lim_{n \rightarrow +\infty} \phi \left(\frac{t}{\sqrt{n}} \right)^n = e^{-\frac{\sigma^2}{2} t^2}$$

car $t \mapsto e^{-\frac{\sigma^2}{2} t^2}$ est la fonction caractéristique de la loi $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$.

Comme X_1 admet un moment d'ordre 2, ϕ est de classe \mathcal{C}^2 et

- $\phi(0) = 1$.
- $\phi'(0) = i^1 \mathbb{E}(X_1^1) = 0$.
- $\phi''(0) = i^2 \mathbb{E}(X_1^2) = -E(X^2) = -\sigma^2$ (car $m = 0$).

Ce qui donne le développement limité en 0 de ϕ à l'ordre 2 (par la formule de Taylor-Young) :

$$\phi(t) = \phi(0) + \frac{\phi'(0)}{1!}(t-0) + \frac{\phi''(0)}{2!}(t-0)^2 + o(t^2) = 1 - \frac{\sigma^2 t^2}{2} + o(t^2) \quad (*)$$

Et, en appliquant le Lemme 3 :

$$\begin{aligned} \left| \phi\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right)^n - e^{-\frac{\sigma^2}{2}t^2} \right| &= \left| \phi\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right)^n - \left(e^{-\frac{\sigma^2}{2n}t^2}\right)^n \right| \\ &\leq n \left| \phi\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right) - e^{-\frac{\sigma^2}{2n}t^2} \right| \end{aligned}$$

On a d'une part, par développement limité :

$$e^{-\frac{\sigma^2}{2n}t^2} = 1 - \frac{\sigma^2}{2n}t^2 + o\left(\frac{1}{n}\right)$$

Et d'autre part, par (*) :

$$\phi\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \frac{\sigma^2}{2n}t^2 + o\left(\frac{1}{n}\right)$$

On obtient ainsi le résultat cherché, à savoir :

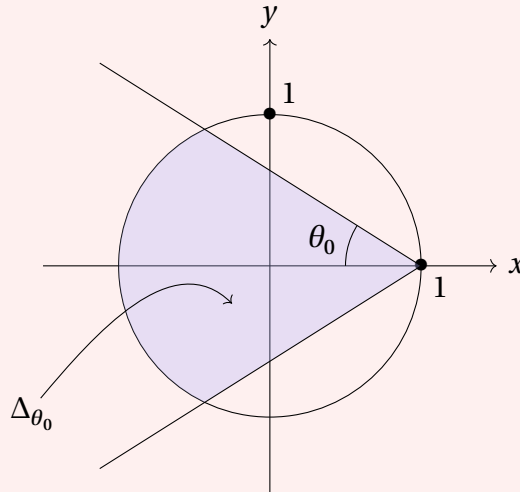
$$n \left| \phi\left(\frac{t}{\sqrt{n}}\right) - e^{-\frac{\sigma^2}{2n}t^2} \right| = o(1)$$

□

29 Théorème d'Abel angulaire

On montre le théorème d'Abel "angulaire", qui permet d'intervertir certaines sommes et limites, et on l'applique justement au calcul de deux sommes.

Théorème 1 (Abel angulaire). Soit $\sum a_n z^n$ une série entière de rayon de convergence supérieur ou égal à 1 tel que $\sum a_n$ converge. On note f la somme de cette série sur le disque unité D de \mathbb{C} . On fixe $\theta_0 \in [0, \frac{\pi}{2}[$ et on pose $\Delta_{\theta_0} = \{z \in D \mid \exists \rho > 0 \text{ et } \exists \theta \in [-\theta_0, \theta_0] \text{ tels que } z = 1 - \rho e^{i\theta}\}$.



Alors $\lim_{\substack{z \rightarrow 1 \\ z \in \Delta_{\theta_0}}} f(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n$.

Démonstration. On note $\forall n \in \mathbb{N}, S = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n, S_n = \sum_{k=0}^n a_k$ et $R_n = S - S_n$. On cherche à majorer $|f(z) - S|$; on va effectuer une transformation d'Abel en écrivant $\forall n \geq 1, a_n = R_{n-1} - R_n$. Soit $z \in D \setminus \{0\}$. $\forall N \in \mathbb{N}^*$, on a

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^N a_n z^n &= \sum_{n=1}^N (R_{n-1} - R_n)(z^n - 1) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} R_n (z^{n+1} - 1) - \sum_{n=1}^N R_n (z^n - 1) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} R_n (z^{n+1} - z^n) - R_N (z^N - 1) \\ &= (z - 1) \sum_{n=0}^{N-1} R_n z^n - R_N (z^N - 1) \end{aligned}$$

Donc en faisant $N \rightarrow +\infty$:

$$f(z) - S = (z - 1) \sum_{n=0}^{+\infty} R_n z^n \quad (*)$$

[GOU20]
p. 263

Soit $\epsilon > 0$. $\exists N \in \mathbb{N}$ tel que $\forall n \geq N$, $|R_n| < \epsilon$. D'après (*), $\forall z \in D$,

$$\begin{aligned} |f(z) - S| &\leq |z - 1| \left| \sum_{n=0}^N R_n z^n \right| + \epsilon |z - 1| \left(\sum_{n=N+1}^{+\infty} |z|^n \right) \\ &\leq |z - 1| \left(\sum_{n=0}^N |R_n| \right) + \epsilon \frac{|z - 1|}{1 - |z|} \end{aligned} \quad (**)$$

Soit $z \in \Delta_{\theta_0}$ de sorte que $z = 1 - \rho e^{i\theta}$ avec $\rho > 0$ et $|\theta| \leq \theta_0$. Notons avant toute chose que $|z - 1| = \rho$. Cherchons maintenant des conditions sur z pour majorer les deux termes :

— On a :

$$\begin{aligned} |z|^2 &= (1 - \rho \cos(\theta))^2 + (\rho \sin(\theta))^2 \\ &= 1 - 2\rho \cos(\theta) + \rho^2 (\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2) \\ &= 1 - 2\rho \cos(\theta) + \rho^2 \end{aligned}$$

En supposant $\rho \leq \cos(\theta_0)$, cela permet de majorer le deuxième terme de (**):

$$\begin{aligned} \frac{|z - 1|}{1 - |z|} &= \frac{|z - 1|}{1 - |z|^2} (1 + |z|) \\ &= \frac{\rho}{2\rho \cos(\theta) - \rho^2} (1 + |z|) \\ &\leq \frac{2}{2\cos(\theta) - \rho} \\ &\leq \frac{2}{2\cos(\theta_0) - \cos(\theta_0)} \\ &= \frac{2}{\cos(\theta_0)} \end{aligned}$$

— Soit $\alpha > 0$ suffisamment petit pour que $\alpha \sum_{n=0}^N |R_n| < \epsilon$. Si $z \in \Delta_{\theta_0}$ tel que $|z - 1| \leq \alpha$, alors on peut majorer le premier terme de (**):

$$|z - 1| \left(\sum_{n=0}^N |R_n| \right) \leq \alpha \left(\sum_{n=0}^N |R_n| \right) < \epsilon$$

Donc, en faisant $z \rightarrow 1$ tel que $z \in \Delta_{\theta_0}$ (on aura bien $\rho = |z - 1| \leq \inf\{\alpha, \cos(\theta_0)\}$), et en injectant les deux majorations trouvées dans (**):

$$|f(z) - S| \leq \epsilon + \epsilon \frac{2}{\cos(\theta_0)} = \epsilon \left(1 + \frac{2}{\cos(\theta_0)} \right)$$

d'où le résultat. □

Application 2.

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} = \frac{\pi}{4}$$

Démonstration. En appliquant le Théorème 1 :

$$\begin{aligned}\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} &= \lim_{\substack{x \rightarrow 1 \\ x < 1}} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} x^n \\ &= \lim_{\substack{x \rightarrow 1 \\ x < 1}} \arctan(x) \\ &= \arctan(1) \\ &= \frac{\pi}{4}\end{aligned}$$

□

Application 3.

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} = \ln(2)$$

Démonstration. Toujours en appliquant le Théorème 1 :

$$\begin{aligned}\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} &= \lim_{\substack{x \rightarrow 1 \\ x < 1}} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} x^n \\ &= \lim_{\substack{x \rightarrow 1 \\ x < 1}} \ln(1+x) \\ &= \ln(2)\end{aligned}$$

□

30 Théorème de Cauchy-Lipschitz linéaire

En construisant un raisonnement autour du théorème du point fixe de Banach, on montre le théorème de Cauchy-Lipschitz, qui garantit l'existence d'une solution répondant à une condition initiale et l'unicité d'une solution maximale.

Soit $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C} .

Lemme 1. Soit I un intervalle compact. L'espace $(\mathcal{C}(I, \mathbb{K}^d), \|\cdot\|_\infty)$ est complet.

Démonstration. Soit (f_n) une suite de Cauchy de $(\mathcal{C}(I, \mathbb{K}^d), \|\cdot\|_\infty)$. Soit $x \in I$, on a

$$\forall p, q \in \mathbb{N}, |f_p(x) - f_q(x)| \leq \|f_p - f_q\|_\infty$$

donc $(f_n(x))$ est de Cauchy dans \mathbb{K} . Comme \mathbb{K} est complet, la suite $(f_n(x))$ converge vers une limite notée $f(x)$. Ainsi, la suite de fonctions (f_n) converge simplement vers la fonction $f : I \rightarrow \mathbb{K}$ nouvellement définie. Il reste à montrer que la fonction f est continue.

Notons déjà que (f_n) est de Cauchy, et est en particulier bornée :

$$\exists M \geq 0 \text{ tel que } \|f_n\|_\infty \leq M$$

donc en particulier, si $x \in I$, $|f_n(x)| \leq M$. Par passage à la limite, on obtient $|f(x)| \leq M$. Donc f est bornée et écrire $\|f\|_\infty$ a bien du sens.

Soit $\epsilon > 0$. Par définition,

$$\exists N \in \mathbb{N} \text{ tel que } \forall p, q \geq N, \|f_p - f_q\|_\infty < \epsilon$$

Donc,

$$\forall x \in I, \forall p, q \geq N, |f_p(x) - f_q(x)| \leq \|f_p - f_q\|_\infty < \epsilon$$

En faisant tendre p vers l'infini, on obtient :

$$\forall x \in I, \forall q \geq N, |f(x) - f_q(x)| < \epsilon$$

Nous venons d'écrire exactement la définition de la convergence uniforme ! Ainsi, (f_n) est une suite de fonctions continues qui converge uniformément vers f , donc f est continue. \square

Théorème 2 (Cauchy-Lipschitz linéaire). Soient $A : I \rightarrow \mathcal{M}_d(\mathbb{K})$ et $B : I \rightarrow \mathbb{K}^d$ deux fonctions continues. Alors $\forall t_0 \in I$, le problème de Cauchy

$$\begin{cases} Y' = A(t)Y + B(t) \\ Y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (C)$$

admet une unique solution définie sur I tout entier.

[DAN]
p. 520

Démonstration. Commençons par supposer l'intervalle I compact. On va montrer l'existence d'une solution globale. On écrit l'équation sous forme intégrale :

$$Y \in \mathcal{C}^1 \text{ vérifie (C)} \iff Y(t) = y_0 + \int_{t_0}^t A(u)Y(u) + B(u) du \quad (*)$$

et on introduit la suite de fonctions (Y_n) définie par récurrence sur I par $Y_0 = y_0$ et :

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, Y_{n+1}(t) = y_0 + \int_{t_0}^t A(x)Y_n(u) + B(u) du \quad (**)$$

Notons $\alpha = \sup_{t \in I} \|A(t)\|$ et $\beta = \sup_{t \in I} \|B(t)\|$. Montrons par récurrence que pour tout $n \geq 1$ et tout $t \in I$:

$$\|Y_n(t) - Y_{n-1}(t)\| \leq (\alpha \|y_0\| + \beta) \frac{\alpha^{n-1} |t - t_0|^n}{n!}$$

Le résultat est clairement vrai pour $n = 1$, supposons donc le vrai à rang $n \geq 1$. Pour $t \geq t_0$:

$$\begin{aligned} \|Y_{n+1}(t) - Y_n(t)\| &= \left\| \int_{t_0}^t A(u) \times (Y_n(u) - Y_{n-1}(u)) du \right\| \\ &\leq \alpha \int_{t_0}^t (\alpha \|y_0\| + \beta) \frac{\alpha^{n-1} |u - t_0|^n}{n!} du \\ &\leq (\alpha \|y_0\| + \beta) \frac{\alpha^n |t - t_0|^{n+1}}{(n+1)!} \end{aligned}$$

et on procède de même pour $t \leq t_0$, ce qui achève la récurrence.

Soit L la longueur de I . On obtient donc :

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \|Y_n - Y_{n-1}\|_\infty \leq (\alpha \|y_0\| + \beta) \frac{\alpha^{n-1}}{n!} L^n$$

Il en résulte que la série de fonction $\sum (Y_n - Y_{n-1})$ est normalement convergente. Comme $(\mathcal{C}(I, \mathbb{K}^d), \|\cdot\|_\infty)$ est complet, la série est uniformément convergente. On a donc l'existence d'une fonction $Y \in \mathcal{C}(I, \mathbb{K}^d)$ telle que

$$\left\| \sum_{n=1}^N (Y_n - Y_{n-1}) - Y \right\|_\infty = \|Y_N - (Y + Y_0)\|_\infty \longrightarrow 0$$

ie. (Y_n) converge vers $Y + Y_0 = Y + y_0 = Z$. Par convergence uniforme sur un intervalle compact, il est possible de passer à la limite dans $(**)$. D'où :

$$\forall t \in I, Z(t) = y_0 + \int_{t_0}^t A(u)Z(u) + B(u) du$$

et comme Z est continue, elle est \mathcal{C}^1 et vérifie donc bien $(*)$.

On peut maintenant montrer l'unicité. Soient Y et Z deux solutions de (C) sur I . Par récurrence sur l'entier n , on montre comme ci-dessus que pour tout $t \in I$:

$$\|Y(t) - Z(t)\| \leq \frac{\alpha^n |t - t_0|^n}{n!} \|Y - Z\|_\infty \longrightarrow 0$$

donc Y et Z coïncident bien sur I .

Supposons maintenant I quelconque. Il existe donc (K_n) une suite croissante d'intervalles compacts telle que $I = \bigcup_{n=0}^{+\infty} K_n$. En particulier, on définit bien l'application

$$\theta: \begin{array}{lcl} I & \rightarrow & \mathbb{K}^d \\ t & \mapsto & Y_n(t) \end{array}$$

(où Y_n est la solution de (C) sur $K_n \ni t$). En particulier, θ est dérivable sur I tout entier, vérifie (C), et prolonge toute solution. \square

31 Théorème de Cauchy-Lipschitz local

En construisant un raisonnement autour du théorème du point fixe de Banach, on montre le théorème de Cauchy-Lipschitz, qui garantit l'existence d'une solution répondant à une condition initiale et l'unicité d'une solution maximale.

Soit E un espace de Banach sur \mathbb{R} ou \mathbb{C} .

[GOU20]
p. 374

Théorème 1 (Cauchy-Lipschitz local). Soient I un intervalle de \mathbb{R} et Ω un ouvert de E . Soit $F : I \times \Omega \rightarrow E$ une fonction continue et localement lipschitzienne en la seconde variable. Alors, pour tout $(t_0, y_0) \in I \times \Omega$, le problème de Cauchy

$$\begin{cases} y' = F(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (C)$$

admet une unique solution maximale.

Démonstration. Nous commençons par montrer l'existence en 4 étapes.

[GOU20]
p. 374

- Localisation : Fixons un réel $r > 0$ tel que le produit $P = [t_0 - r, t_0 + r] \times \overline{B}(y_0, r)$ soit contenu dans $I \times \Omega$. F est continue sur P qui est compact, donc est bornée par M sur P .
- Mise sous forme intégrale : Comme une solution de $y' = F(t, y)$ est de ce fait \mathcal{C}^1 , on a

$$y \in \mathcal{C}^1 \text{ vérifie (C)} \iff y(t) = y_0 + \int_{t_0}^t F(u, y(u)) du \quad (*)$$

- Choix d'un domaine stable : Soit $\alpha \in]0, r[$. Introduisons l'intervalle $I_\alpha = [t_0 - \alpha, t_0 + \alpha]$, l'espace $A_\alpha = \mathcal{C}(I_\alpha, \overline{B}(y_0, r))$, puis l'application

$$\Psi : \begin{array}{ll} A_\alpha & \rightarrow \mathcal{C}(I_\alpha, E) \\ \varphi & \mapsto \left(t \mapsto y_0 + \int_{t_0}^t F(u, \varphi(u)) du \right) \end{array}$$

Le problème est ici de rendre A_α stable par Ψ . Pour tout $t \in I_\alpha$,

$$\begin{aligned} \|F(t, \varphi(t))\| &\leq M \\ \implies \|\Psi(\varphi)(t) - y_0\| &\leq M|t - t_0| \leq \alpha M \end{aligned}$$

Par suite, en choisissant $\alpha M < r$, le domaine A_α est stable par Ψ .

- Détermination d'un domaine de contraction : Ici, A_α est normé par la norme $\|\cdot\|_\infty$, et on veut faire de Ψ une contraction stricte. Soient $\varphi, \phi \in A_\alpha$, par définition, pour tout $t \in I_\alpha$,

$$\begin{aligned} \|(\Psi(\varphi) - \Psi(\phi))(t)\| &= \left\| \int_{t_0}^t (F(u, \varphi(u)) - F(u, \phi(u))) du \right\| \\ &\leq k|t - t_0| \|\varphi - \phi\|_\infty \\ &\leq k\alpha \|\varphi - \phi\|_\infty \end{aligned}$$

où k désigne le rapport de lipschitzianité de F . On choisit désormais α tel que $k\alpha < 1$ et $\alpha M < r$.

- Conclusion : L'application Ψ est, par choix de α , une contraction stricte de $(A_\alpha, \|\cdot\|_\infty)$ dans lui-même. Le fermé $\overline{B}(y_0, r)$ de l'espace de Banach de E est complet, par suite $(A_\alpha, \|\cdot\|_\infty)$ l'est aussi.

Par le théorème du point fixe de Banach, Ψ possède donc un point fixe φ dans A_α . φ est alors de classe \mathcal{C}^1 et vérifie (C) par (*).

Il reste maintenant à montrer l'unicité. On note \mathcal{S} l'ensemble des solutions de (C). $\mathcal{S} \neq \emptyset$, donc peut définir J comme la réunion des intervalles de définition des solutions de (C).

Soient $\varphi, \phi \in \mathcal{S}$ (on note K et L leur intervalle de définition). Une récurrence sur n donne

$$\begin{aligned} \forall t \in K \cap L, \forall n \in \mathbb{N}, \|\varphi(t) - \phi(t)\| &\leq \left| \int_{t_0}^t \|F(u, \varphi(u)) - F(u, \phi(u))\| du \right| \\ &\leq \frac{|t - t_0|^n}{n!} k^n \sup_{t \in K \cap L} |\varphi(t) - \phi(t)| \\ &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

Donc φ et ϕ coïncident sur $K \cap L$.

Ainsi, on définit correctement l'application

$$\theta: \begin{array}{ll} J & \rightarrow E \\ t & \mapsto \phi(t) \end{array}$$

(où $\phi \in \mathcal{S}$ tel que t est dans son intervalle de définition). Si $t \in J$, il existe $\phi \in \mathcal{S}$ tel que t soit dans son intervalle de définition K . Comme ϕ et θ coïncident sur K , θ est dérivable sur K et

$$\forall t \in K, \theta'(t) = \phi'(t) = F(t, \phi(t)) = F(t, \theta(t))$$

Et comme $\theta(t_0) = y_0$, $\theta \in \mathcal{S}$ et prolonge toute solution. Donc θ est maximale et est bien unique. \square

32 Théorème de Dirichlet faible

En raisonnant par l'absurde et en utilisant certaines propriétés des polynômes cyclotomiques, on démontre que l'ensemble des premiers congrus à 1 modulo un certain entier n est infini.

Lemme 1. Soient $a \in \mathbb{N}$ et p premier tels que $p \mid \Phi_n(a)$ mais $p \nmid \Phi_d(a)$ pour tout diviseur strict d de n . Alors $p \equiv 1 \pmod n$.

[GOU21]
p. 99

Démonstration. On a,

$$X^n - 1 = \prod_{d \mid n} \Phi_d = \Phi_n \underbrace{\prod_{\substack{d \mid n \\ d \neq n}} \Phi_d}_{=F}$$

Comme $F \in \mathbb{Z}[X]$, en évaluant en a :

$$a^n - 1 = \Phi_n(a)F(a) \implies p \mid a^n - 1 \text{ car } F(a) \in \mathbb{Z}$$

Autrement dit, $a^n \equiv 1 \pmod p$. En notant m l'ordre de \bar{a} dans $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$, on a $a^m \equiv 1 \pmod p$. D'où $m \mid n$. Ainsi :

- Si $m = n$, alors \bar{a} est d'ordre n . Donc par le théorème de Lagrange, $n \mid |(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*| = p - 1$ ie. $p \equiv 1 \pmod n$.
- Sinon, $m < n$. Comme $m \mid n$,

$$X^n - 1 = \prod_{d \mid n} \Phi_d = \Phi_n \left(\prod_{d \mid m} \Phi_d \right) \left(\prod_{\substack{d \mid n \\ d \nmid m}} \Phi_d \right) = \Phi_n(X^m - 1) \left(\prod_{\substack{d \mid n \\ d \nmid m}} \Phi_d \right)$$

Mais, \bar{a} est racine de $\overline{\Phi_n}$ et $X^m - 1 \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}[X]$. En particulier, \bar{a} est (au moins) racine double de $X^n - \bar{a}$. On peut donc écrire,

$$X^n - 1 \equiv (X - a)^2 G(X) \pmod p$$

Avec $X = Y + a$, cela donne :

$$(Y + a)^n - 1 \equiv Y^2 G(Y + a) \pmod p$$

Le polynôme de droite est de degré ≥ 2 , donc p divise les coefficients des termes de degré 0 et 1 de $(Y + a)^n - 1$, ie.

$$p \mid a^n - 1 \text{ et } p \mid \binom{n}{1} a^{n-1} = n a^{n-1}$$

De la première égalité, on en tire $p \nmid a$. Ainsi, a est premier avec p (c'est donc également vrai pour a^{n-1}). Finalement, on tire de la deuxième égalité que $p \mid n$.

□

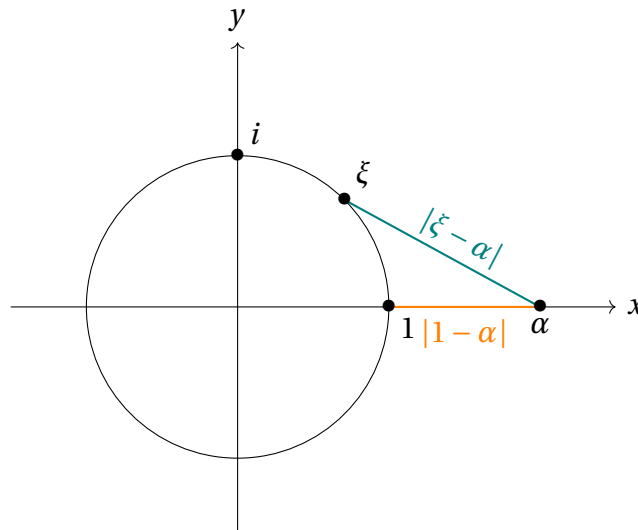
Théorème 2 (Dirichlet faible). Pour tout entier n , il existe une infinité de nombres premiers congrus à 1 modulo n .

Démonstration. On suppose par l'absurde qu'il n'existe qu'un nombre fini de premiers de la forme $1 + kn$, que l'on note p_1, \dots, p_m . On considère $N = \Phi_n(\alpha)$ où $\alpha = np_1 \dots p_m$. On remarque en particulier que $N \equiv a_0 \pmod{\alpha}$, où a_0 est le coefficient constant de Φ_n (cela se voit en écrivant $\Phi_n = \sum_{k=0}^{\varphi(n)} a_k X^k$, ce qui donne $N = a_0 + \alpha \sum_{k=1}^{\varphi(n)} a_k \alpha^{k-1}$ une fois évalué en α).

Or, $X^n - 1 = \prod_{d|n} \Phi_d$. En évaluant en 0, on en tire :

$$-1 = \prod_{d|n} \Phi_d(0) \implies \pm 1 = a_0, \text{ car } \forall d | n, \Phi_d \in \mathbb{Z}[X]$$

Ainsi, $N \equiv \pm 1 \pmod{\alpha}$. Or $|N| = |\Phi_n(\alpha)| = \prod_{\xi \in \pi_n^*} |\alpha - \xi| \geq 2$. On peut en effet interpréter $|\alpha - \xi|$ comme la distance du complexe α au complexe ξ ; le premier est sur l'axe réel et est ≥ 2 , le second est sur le cercle unité :



En particulier, $\exists p$ premier tel que $p \mid N$. Par le Lemme 1 :

- Ou bien $p \mid n$, dans ce cas $p \mid \alpha = np_1 \dots p_m$.
- Ou bien $p \equiv 1 \pmod{n}$, dans ce cas $p = p_k$ pour un certain $k \in \llbracket 1, m \rrbracket$. Et on a encore $p \mid \alpha$.

Pour conclure, on écrit $N = \alpha q \pm 1$ (par division euclidienne), et on a $p \mid N - \alpha q = \pm 1$: absurde. \square

Remarque 3. Si vous choisissez de présenter ce développement, il faut au moins connaître l'énoncé de la version forte du théorème.

Théorème 4 (Progression arithmétique de Dirichlet). Pour tout entier n et pour tout m premier avec n , il existe une infinité de nombres premiers congrus à m modulo n .

33 Théorème de Fejér

Dans ce développement, on montre le théorème de Fejér, qui assure la convergence de la série de Fourier d'une fonction vers sa série de Fourier au sens de Cesàro.

Notation 1. Pour tout $p \in [1, +\infty]$, on note $L_p^{2\pi}$ l'espace des fonctions $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, 2π -périodiques et mesurables, telles que $\|f\|_p < +\infty$.

Notation 2. On note $\forall N \in \mathbb{N}^*$:

- $e_n : x \mapsto e^{inx}$.
- $D_N : x \mapsto \sum_{n=-N}^N e_n$, le noyau de Dirichlet.
- $K_N = \frac{D_0 + \dots + D_{N-1}}{N}$, le noyau de Fejér.

Notation 3. On note également, pour toute fonction $f \in L_1^{2\pi}$.

- $c_n(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) e^{-int} dt$, le n -ième coefficient de Fourier de f .
- $S_N(f) : x \mapsto \sum_{n=-N}^N c_n(f) e_n$, la somme partielle d'ordre N de la série de Fourier de f .
- $\sigma_N(f) : x \mapsto \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N S_n(f)(x)$, la moyenne de Cesàro des sommes partielles de la série de Fourier de f .

Lemme 4. Soit $N \in \mathbb{N}$.

- (i) D_N est une fonction paire, 2π -périodique, et de norme 1.
- (ii)

$$\forall x \in \mathbb{R} \setminus 2\pi\mathbb{Z}, D_N(x) = \frac{\sin\left(\left(N + \frac{1}{2}\right)x\right)}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)}$$

- (iii) Pour tout $f \in L_1^{2\pi}$, $S_N(f) = f * D_N$.

[AMR08]
p. 184

Démonstration. Soit $N \in \mathbb{N}$.

- (i) Soit $x \in \mathbb{R}$.

$$D_N(-x) = \sum_{n=-N}^N e_n(-x) = \sum_{n=-N}^N e_{-n}(x) = \sum_{n=-N}^N e_n(x) = D_N(x)$$

Donc D_N est bien paire. Elle est 2π -périodique car e_n l'est pour tout $n \in \mathbb{Z}$. De plus,

$$1 = c_0(D_N) = \int_{-\pi}^{\pi} D_N(x) dx = \|D_N\|_1$$

(ii) Soit $x \in \mathbb{R} \setminus 2\pi\mathbb{Z}$. On a :

$$\begin{aligned}
 D_n(x) &= e^{-iNx} \sum_{n=0}^{2N} e^{inx} \\
 &= e^{-iNx} \frac{e^{(2N+1)ix} - 1}{e^{ix} - 1} \\
 &= e^{-iNx} \frac{e^{(2N+1)i\frac{x}{2}} \left(e^{(2N+1)i\frac{x}{2}} - e^{-(2N+1)i\frac{x}{2}} \right)}{e^{i\frac{x}{2}} (e^{i\frac{x}{2}} - e^{-i\frac{x}{2}})} \\
 &= \frac{2i \sin\left((N + \frac{1}{2})x\right)}{2i \sin\left(\frac{x}{2}\right)} \\
 &= \frac{\sin\left((N + \frac{1}{2})x\right)}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)}
 \end{aligned}$$

(iii) Soit $f \in L_1^{2\pi}$.

$$f * D_N(f) = \sum_{n=-N}^N f * e_n = \sum_{n=-N}^N c_n(f) e_n = S_N(f)$$

□

Lemme 5. Soient $N \in \mathbb{N}^*$ et $f \in L_1^{2\pi}$.

(i) K_N est une fonction positive et de norme 1.

(ii)

$$\forall x \in \mathbb{R} \setminus 2\pi\mathbb{Z}, K_N(x) = \frac{1}{N} \left(\frac{\sin\left(\frac{Nx}{2}\right)}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)} \right)^2$$

(iii) $K_N = \sum_{n=-N}^N \left(1 - \frac{|n|}{N}\right) e_n$.

(iv) $\sigma_N(f) = f * K_N$.

Démonstration. Soit $N \in \mathbb{N}^*$. Nous allons user et abuser du Lemme 4.

(i) La positivité résulte directement du point suivant. De plus,

$$\|K_N\|_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K_N(x) dx = 1$$

(ii) Soit $x \in \mathbb{R} \setminus 2\pi\mathbb{Z}$.

$$\begin{aligned}
 NK_N(x) &= \sum_{n=0}^{N-1} D_n(x) \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{|n| \leq j} e_j \right) \\
 &= \sum_{|n| \leq N-1} e_n \left(\sum_{|n| \leq j \leq N-1} 1 \right) \\
 &= \sum_{|n| \leq N-1} (N - |n|) e_n \\
 &= \sum_{n=-N}^N (N - |n|) e_n
 \end{aligned}$$

(iii)

$$\begin{aligned}
 NK_N &= \sum_{n=0}^{N-1} D_n \\
 &= \sum_{n=0}^N \frac{\sin((n + \frac{1}{2})x)}{\sin(\frac{x}{2})} \\
 &= \frac{1}{\sin(\frac{x}{2})} \operatorname{Im} \left(\sum_{n=0}^{N-1} e^{i(n + \frac{1}{2})x} \right) \\
 &= \frac{1}{\sin(\frac{x}{2})} \operatorname{Im} \left(e^{\frac{ix}{2}} \frac{e^{iNx-1}}{e^{ix} - 1} \right) \\
 &= \frac{1}{\sin(\frac{x}{2})} \operatorname{Im} \left(e^{\frac{ix}{2}} \frac{e^{\frac{iNx}{2}} 2i \sin(\frac{Nx}{2})}{e^{\frac{ix}{2}} 2i \sin(\frac{x}{2})} \right) \\
 &= \frac{\sin(\frac{Nx}{2})}{\sin(\frac{x}{2})^2} \operatorname{Im} \left(e^{\frac{iNx}{2}} \right) \\
 &= \frac{\sin(\frac{Nx}{2})^2}{\sin(\frac{x}{2})^2}
 \end{aligned}$$

(iv)

$$N\sigma_N(f) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(f) = \sum_{n=0}^{N-1} f * D_n = f * \left(\sum_{n=0}^{N-1} D_n \right)$$

Donc on a bien $\sigma_N(f) = f * K_N$.

□

Théorème 6 (Fejér). Soit $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction 2π -périodique.

- (i) Si f est continue, alors $\|\sigma_N(f)\|_\infty \leq \|f\|_\infty$ et $(\sigma_N(f))$ converge uniformément vers f .
- (ii) Si $f \in L_p^{2\pi}$ pour $p \in [1, +\infty[$, alors $\|\sigma_N(f)\|_p \leq \|f\|_p$ et $(\sigma_N(f))$ converge vers f pour $\|\cdot\|_p$.

[AMR08]
p. 190

Démonstration. (i) On suppose f continue.

- Sur l'intervalle compact $[0, 2\pi]$, f est bornée et atteint ses bornes. En particulier, $\|f\|_\infty$ est bien définie. De plus, si $x \in \mathbb{R}$, par le Lemme 5 on a :

$$\sigma_N(f)(x) = (f * K_N)(x)$$

Donc,

$$|\sigma_N(f)(x)| \leq \|f\|_\infty \underbrace{\|K_N\|_1}_{=1} = \|f\|_\infty$$

d'où $\sigma_N(f)$ est bornée avec

$$\|\sigma_N(f)\|_\infty \leq \|f\|_\infty$$

- Soit $\delta \in]0, \pi]$. Posons

$$\omega(\delta) = \sup_{|u-v| \leq \delta} \{|f(u) - f(v)|\}$$

le module de continuité de f . Pour tout $x \in \mathbb{R}$, on a :

$$\begin{aligned} f(x) - \sigma_N(f)(x) &= f(x) - (f * K_N)(x) \\ &= f(x) - \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) K_N(t) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) - f(x-t)) K_N(t) dt \end{aligned} \quad (*)$$

d'où

$$\begin{aligned} |f(x) - \sigma_N(f)(x)| &\leq \frac{1}{2\pi} \int_{|t| \leq \delta} (f(x) - f(x-t)) K_N(t) dt \\ &\quad + \frac{1}{2\pi} \int_{\delta \leq |t| \leq \pi} (f(x) - f(x-t)) K_N(t) dt \\ &\leq \frac{\omega(\delta)}{2\pi} \int_{|t| \leq \delta} K_N(t) dt + 2\|f\|_\infty \frac{1}{2\pi} \int_{\delta \leq |t| \leq \pi} K_N(t) dt \\ &\leq \frac{\omega(\delta)}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} K_N(t) dt + \frac{2\|f\|_\infty}{N \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)^2} \\ &= \omega(\delta) + \frac{2\|f\|_\infty}{N \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)^2} \end{aligned}$$

Donc, on a :

$$\|f(x) - \sigma_N(f)(x)\|_\infty \leq \omega(\delta) + \frac{2\|f\|_\infty}{N \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)^2} \quad (**)$$

On peut passer à la limite supérieure dans (**) pour obtenir :

$$\limsup_{N \rightarrow +\infty} \|f(x) - \sigma_N(f)(x)\|_\infty \leq \omega(\delta)$$

Comme f est continue sur le compact $[0, 2\pi]$, elle y est uniformément continue par le

théorème de Heine :

$$\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0, \forall (x, y) \in [0, 2\pi]^2, |x - y| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(y)| < \epsilon$$

On peut donc faire tendre δ vers 0 pour obtenir $\limsup_{N \rightarrow +\infty} \|f(x) - \sigma_N(f)(x)\|_\infty \leq 0$ ie.

$$\limsup_{N \rightarrow +\infty} \|f(x) - \sigma_N(f)(x)\|_\infty = 0$$

Comme,

$$0 \leq \liminf_{N \rightarrow +\infty} \|f(x) - \sigma_N(f)(x)\|_\infty \leq \limsup_{N \rightarrow +\infty} \|f(x) - \sigma_N(f)(x)\|_\infty = 0$$

On a bien,

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \|f(x) - \sigma_N(f)(x)\|_\infty = 0$$

(ii) — Par le Lemme 5, on a :

$$\forall x \in \mathbb{R}, |\sigma_N(f)(x)|^p = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) K_N(t) dt \right|^p$$

On applique l'inégalité de Hölder à $\frac{K_N}{2\pi}$:

$$\forall x \in \mathbb{R}, |\sigma_N(f)(x)|^p \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x-t)|^p K_N(t) dt$$

Enfin, en intégrant par parties et en utilisant le théorème de Fubini-Tonelli :

$$\begin{aligned} \|\sigma_N(f)\|_p^p &\leq \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} K_N(t) (|f(x-t)|^p dx) dt \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} K_N(t) (|f(x)|^p dx) dt \\ &= \|K_N\|_1 \|f\|_p^p \\ &= \|f\|_p^p \end{aligned}$$

— Par (*) :

$$\|\sigma_N(f) - f\|_p^p \leq \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} K_N(t) (|f(x-t)|^p dx) dt$$

En posant $g : t \mapsto \|f - \tau_t f\|_p^p$ (où τ est l'opérateur de translation) :

$$\begin{aligned} \|\sigma_N(f) - f\|_p^p &\leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} K_N(t) g(-t) dt \\ &= (g * K_N)(0) \\ &= \sigma_N(g)(0) \end{aligned}$$

Comme g est continue et 2π -périodique, on a par le point précédent

$$\sigma_N(g)(0) \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} g(0) = 0$$

Donc, on a bien,

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \|\sigma_N(f) - f\|_p = 0$$

□

Remarque 7. Dans ce développement, il est courant de ne prouver que le premier point.

34 Théorème de Frobenius-Zolotarev

Nous démontrons le théorème de Frobenius-Zolotarev qui permet de calculer la signature d'un endomorphisme d'un espace vectoriel sur un corps fini possédant au moins 3 éléments.

Soient $p \geq 3$ un nombre premier et V un espace vectoriel sur \mathbb{F}_p de dimension finie.

Définition 1. Soit H un hyperplan de V et soit G une droite supplémentaire de H dans V . La dilatation u de base H , de direction G , et de rapport $\lambda \in \mathbb{K}^*$ est l'unique endomorphisme de V défini par

$$\forall g \in G, \forall h \in H, u(g + h) = h + \lambda g$$

[I-P]
p. 203

Remarque 2. On suppose connu le fait que les transvections et les dilatations engendrent $GL(V)$.

[PER]
p. 99

Lemme 3. Soient $u \in GL(V)$ et H un hyperplan de V tel que $u|_H = \text{id}_H$. Si $\det(u) \neq 1$, alors u est une dilatation.

p. 96

Démonstration. On note $n = \dim(V)$. Comme $u|_H = \text{id}_H$ et $\dim(H) = n - 1$, on en déduit que 1 est valeur propre de multiplicité $n - 1$ de u et que H est le sous-espace propre associé :

$$H = E_1(u) = \text{Ker}(u - \text{id}_V)$$

On pose $\lambda = \det(u) \notin \{0, 1\}$. λ est valeur propre de u (on peut le voir par exemple en calculant le polynôme caractéristique de u) de multiplicité 1. Donc u est diagonalisable, et dans une base \mathcal{B} adaptée à la diagonalisation, on a :

$$\text{Mat}(u, \mathcal{B}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

d'où le résultat. □

Lemme 4. Les dilatations engendrent $GL(V)$.

[I-P]
p. 203

Démonstration. Pour obtenir le résultat, il suffit de montrer que toute transvection est la composée de deux dilatations (cf. Remarque 2). Soit u une transvection d'hyperplan H . Comme \mathbb{F}_p contient au moins 3 éléments, il existe alors v une dilatation d'hyperplan H et de rapport $\lambda \neq 1$.

Ainsi, l'application $w = u \circ v$ est dans $GL(V)$ et fixe H . Comme $\det(w) = \det(v) = \lambda \neq 1$, le Lemme 3 permet de conclure que w est une dilatation. Ainsi, $u = w \circ v^{-1}$ est le produit de deux dilatations v^{-1} est une dilatation (toujours d'après le Lemme 3). □

Notation 5. Soit $a \in \mathbb{F}_p$. On note $\left(\frac{a}{p}\right)$ le symbole de Legendre de a modulo p .

Théorème 6 (Frobenius-Zolotarev).

$$\forall u \in \text{GL}(V), \epsilon(u) = \left(\frac{\det(u)}{p}\right)$$

où u est vu comme une permutation des éléments de V .

Démonstration. Le groupe multiplicatif d'un corps fini est cyclique, donc il existe $a \in \mathbb{F}_p^*$ tel que

$$\mathbb{F}_p^* = \langle a \rangle$$

En conséquence, si u est la dilatation de V de base H , de direction G , et de rapport $\lambda \in \mathbb{F}_p^*$, alors il existe $k \in \mathbb{N}^*$ tel que $\lambda = a^k$. On en déduit que si v est la dilatation de V de base H , de direction G , et de rapport a , alors $\forall x \in V$ écrit $x = g + h$ avec $g \in G$ et $h \in H$:

$$v^k(x) = v^k(g + h) = h + a^k g = h + \lambda g = u(g + h) = u(x)$$

d'où $v^k = u$. Ainsi, toute dilatation est une puissance d'une dilatation de rapport a .

Comme \det , $\left(\frac{\cdot}{p}\right)$ et ϵ sont tous trois des morphismes de groupes, et comme les dilatations engendrent $\text{GL}(V)$ (cf. Lemme 4), il suffit de montrer le résultat pour les dilatations de rapport a .

Soit u une dilatation de base H , de direction G , et de rapport a . Supposons par l'absurde que $\left(\frac{\det(u)}{p}\right) = 1$. Comme $\det(u) = a$, on a $\left(\frac{a}{p}\right) = 1$. Mais, $\mathbb{F}_p^* = \langle a \rangle$, donc $\forall x \in \mathbb{F}_p^*$, $\left(\frac{x}{p}\right) = 1$ ie. tout élément de \mathbb{F}_p^* est un carré. Or, il y a $\frac{p-1}{2}$ carrés dans \mathbb{F}_p^* (et $|\mathbb{F}_p^*| = p-1$, bien-sûr) : contradiction.

Il ne reste qu'à montrer que $\epsilon(u) = -1$. Pour cela, on va étudier les orbites des éléments V sous l'action de u .

Soit $h \in H$. On a $u(h) = h$, donc son orbite est réduite à $\{h\}$ qui est de cardinal 1. Elle compte donc comme un $+$ dans le signe de $\epsilon(u)$.

Soit maintenant $x \in V$ écrit $x = g + h$ avec $g \in G \setminus \{0\}$ et $h \in H$ de sorte que $u^k(x) = h + a^k g$ pour tout $k \in \mathbb{N}$.

- \mathbb{F}_p^* est cyclique d'ordre $p-1$, donc $a^{p-1} = 1$. Ainsi, $u^{p-1}(x) = x$.
- Supposons par l'absurde que $\exists 1 \leq i < j \leq p-1$ tel que $u^i(x) = u^j(x)$. On a,

$$\begin{aligned} h + a^j g &= h + a^i g \iff a^{j-i}(a^i - 1) \underset{\neq 0}{g} = 0 \\ &\implies a^{j-i} = 0 \text{ ou } a^i = 1 \end{aligned}$$

ce qui est absurde dans les deux cas.

L'orbite de x sous l'action de u est donc $\{x, \dots, u^{p-2}(x)\}$ qui est de cardinal $p-1$ (pair) et compte donc comme un $-$ dans le signe de $\epsilon(u)$.

Il ne reste qu'à compter le nombre d'orbites de cardinal $p - 1$. Les éléments contenus dans ces orbites forment exactement l'ensemble

$$\bigcup_{h \in H} \{g + h \mid g \in G, g \neq 0\}$$

et il y en a donc

$$|H| \times (|G| - 1) = p^{n-1}(p - 1)$$

(car H est un hyperplan et G est une droite). Comme ces orbites sont de cardinal $p - 1$, il y a donc exactement p^{n-1} orbites. Or, p^{n-1} est impair, donc $\epsilon(u)$ est de signe négatif. Ainsi, $\epsilon(u) = -1$. \square

35 Théorème de Kronecker

En utilisant les polynômes symétriques, nous montrons ici que toutes les racines d'un polynôme unitaire à coefficients entiers dont les racines sont dans $D(0, 1) \setminus \{0\}$, sont en fait des racines de l'unité.

Lemme 1 (Relations de Viète). Soient A un anneau commutatif unitaire intègre et $P = \sum_{i=1}^n a_i X^i \in A[X]$ que l'on suppose scindé dans $A[X]$ et tel que $a_n \in A^*$. Si on note $\Sigma_k(X_1, \dots, X_n)$ le k -ième polynôme symétrique élémentaire en n variables et $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ les racines de P (comptées avec multiplicité), alors $\Sigma_k(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = (-1)^k a_{n-k} a_n^{-1}$.

Démonstration. On a $P = a_n \prod_{i=1}^n (X - \alpha_i)$. En développant partiellement P , on a de même :

$$P = a_n X^n - a_n(\alpha_1 + \dots + \alpha_n) X^{n-1} + \dots + (-1)^n a_n \alpha_1 \dots \alpha_n$$

Par identification avec la forme développée, les coefficients de X^{n-1} doivent être égaux. En particulier :

$$a_{n-1} = -a_n(\alpha_1 + \dots + \alpha_n) \iff \underbrace{\alpha_1 + \dots + \alpha_n}_{=\Sigma_1(\alpha_1, \dots, \alpha_n)} = -a_{n-1} a_n^{-1}$$

Et on procède de même pour trouver les autres coefficients. Par exemple, $a_0 = (-1)^n a_n \alpha_1 \dots \alpha_n \iff \Sigma_n(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = (-1)^n a_0 a_n^{-1}$. \square

Remarque 2. Tout au long de ce développement, nous utiliserons implicitement le fait que tout polynôme à coefficient dans \mathbb{C} (donc à fortiori aussi dans \mathbb{Z}) admet n racines complexes comptées avec multiplicité. Il s'agit du théorème de d'Alembert-Gauss.

Théorème 3 (Kronecker). Soit $P \in \mathbb{Z}[X]$ unitaire tel que toutes ses racines complexes appartiennent au disque unité épointé en l'origine (que l'on note D). Alors toutes ses racines sont des racines de l'unité.

[I-P]
p. 279

Démonstration. Notons par Ω_n l'ensemble des polynômes unitaires à coefficients dans \mathbb{Z} tels que toutes leurs racines complexes appartiennent à D . Soit $P \in \Omega_n$ dont on note a_0, \dots, a_n les coefficients et z_1, \dots, z_n les racines complexes. On note $\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $\sigma_k = \Sigma_k(z_1, \dots, z_n)$. D'après le Lemme 1, on a :

$$\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket, \sigma_k = (-1)^k a_{n-k} \quad (*)$$

D'où $\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket$:

$$\begin{aligned} |\sigma_k| &= \left| \sum_{I \in \mathcal{P}_k(\llbracket 1, n \rrbracket)} \prod_{i \in I} z_i \right| \\ &\leq \sum_{I \in \mathcal{P}_k(\llbracket 1, n \rrbracket)} \prod_{i \in I} |z_i| \\ &\leq |\mathcal{P}_k(\llbracket 1, n \rrbracket)| \times 1 \\ &= \binom{n}{k} \end{aligned}$$

Et par (*),

$$\forall k \in \llbracket 0, n \rrbracket, |a_k| \leq \binom{n}{n-k} = \binom{n}{k}$$

Ω_n est donc un ensemble fini (car on n'a qu'un nombre limité de choix possibles pour les coefficients a_k).

On pose maintenant

$$\forall k \in \mathbb{N}, P_k = \prod_{j=0}^n (X - z_j^k)$$

qui sont des polynômes unitaires de degré n dont les racines z_1^k, \dots, z_n^k appartiennent toutes à D . Soient $k \in \mathbb{N}$ et $r \in \llbracket 0, n \rrbracket$. D'après le Lemme 1, le coefficient de X^{n-r} de P_k est $(-1)^r \Sigma_r(z_1^k, \dots, z_n^k)$. Mais, $\Sigma_r(X_1^k, \dots, X_n^k) \in \mathbb{Z}[X]$, donc on peut y appliquer le théorème fondamental des polynômes symétriques :

$$\exists Q_{r,k} \in \mathbb{Z}[X] \text{ tel que } \Sigma_r(X_1^k, \dots, X_n^k) = Q_{r,k}(\Sigma_1(X_1, \dots, X_n), \dots, \Sigma_n(X_1, \dots, X_n))$$

Or, comme $P \in \mathbb{Z}[X]$, on a $\forall j \in \llbracket 0, n \rrbracket, \Sigma_j(z_1, \dots, z_n) \in \mathbb{Z}$ d'après le Lemme 1. En particulier, on a $\Sigma_r(X_1^k, \dots, X_n^k) \in \mathbb{Z}[X]$ car $Q_{r,k} \in \mathbb{Z}[X]$. On en déduit que $\forall k \in \mathbb{N}, P_k \in \Omega_n$.

Comme Ω_n est fini, l'ensemble des racines de tous les P_k ; qui est $\{z \in \mathbb{C} \mid \exists k \in \mathbb{N}, P_k(z) = 0\}$ est fini. Soit $j \in \llbracket 1, n \rrbracket$. L'ensemble $\{z_j^k \mid k \in \mathbb{N}\}$ est inclus dans l'ensemble de ces racines, qui est fini ; il est donc lui-même fini :

$$\exists k \neq k' \text{ tel que } z_j^k = z_j^{k'}$$

Quitte à échanger les deux, on peut supposer $k \geq k'$. Comme $z_j \neq 0$, on a $z_j^{k-k'} = 1$. Donc z_j est une racine de l'unité ; ce que l'on voulait. \square

Corollaire 4. Soit $P \in \mathbb{Z}[X]$ unitaire et irréductible sur \mathbb{Q} tel que toutes ses racines complexes soient de module inférieur ou égal à 1. Alors $P = X$ ou P est un polynôme cyclotomique.

Démonstration. Si 0 est racine de P , alors $X \mid P$, donc $P = X$ par irréductibilité et unitarité. Sinon, 0 n'est pas racine de P . On peut donc appliquer le Théorème 3 à P ; et donc les racines de P sont des racines de l'unité. Ainsi, en notant N le maximum des ordres des racines de P , on a :

$$P \mid (X^N - 1)^n \text{ où } n = \deg(P)$$

Or, la décomposition en irréductibles de $X^N - 1$ est

$$X^N - 1 = \prod_{d|N} \Phi_d$$

Puisque $\mathbb{Q}[X]$ est un anneau factoriel, P est premier. Donc d'après le lemme de Gauss, comme $P \mid X^N - 1$:

$$\exists d \mid N \text{ tel que } P = \Phi_d$$

□

36 Théorème de Maschke

Dans ce développement, nous montrons le théorème de Maschke qui dit que toute représentation linéaire de degré non-nul est somme directe d'un nombre fini de représentations linéaires irréductibles.

Soit G un groupe fini de cardinal r . Tous les espaces vectoriels considérés ici sont de dimension finie. [ULM21]
p. 148

Lemme 1. Soit $\rho : G \rightarrow \text{GL}(V)$ une représentation de G et soit W un sous-espace de V stable par $\rho(g)$ pour tout $g \in G$. Alors il existe un supplémentaire de W dans V stable par $\rho(g)$ pour tout $g \in G$.

Démonstration. Soit $p : V \rightarrow W$ une projection de V sur W . Formons la moyenne p_0 des transformées de p par les éléments de G :

$$p_0 = \frac{1}{r} \sum_{g \in G} \rho(g)p\rho(g)^{-1}$$

Puisque W est stable par $\rho(g)$ pour tout $g \in G$, on a $\text{Im}(p_0) \subseteq W$.

D'autre part, si $x \in W$, on a $\rho(g)^{-1}(x) = \rho(g^{-1})(x) \in W$. D'où :

$$(p \circ \rho(g)^{-1})(x) = \rho(g)^{-1}(x) \implies (\rho(g) \circ p \circ \rho(g)^{-1})(x) = x$$

D'où $p_0(x) = \frac{1}{r}x = x$. Donc $\text{Im}(p_0) = W$ et $p_0^2 = p_0$ ie. p_0 est le projecteur de V sur W parallèlement au supplémentaire $W_0 = \text{Ker}(p_0)$ de W .

Si l'on calcule $\rho(h)p_0\rho(h)^{-1}$, on trouve :

$$\rho(h)p_0\rho(h)^{-1} = \frac{1}{r} \sum_{g \in G} \rho(h)\rho(g)p\rho(g)^{-1}\rho(h)^{-1} = \frac{1}{r} \sum_{g \in G} \rho(hg)p\rho(hg)^{-1} = p_0$$

car $g \mapsto hg$ est une bijection de G dans G . Donc on a :

$$\rho(h)p_0 = p_0\rho(h)$$

Si maintenant $x \in W_0$, on a $p_0(x) = 0$. D'où $\forall g \in G, (p_0 \circ \rho(g))(x) = (\rho(g) \circ p_0)(x) = 0$ ie. $\rho(g)(x) \in W_0$, ce que l'on voulait. □

Théorème 2 (Maschke). Toute représentation linéaire de degré non-nul est somme directe d'un nombre fini de représentations linéaires irréductibles.

Démonstration. Soit $\rho : G \rightarrow \text{GL}(V)$ une représentation linéaire de G . On raisonne par récurrence sur $n = \dim(V)$.

— Si $n = 1$: la représentation ρ est irréductible, donc le résultat est évident.

- Supposons le résultat vrai à un rang $n \geq 1$ et montrons-le au rang $n + 1$. Si ρ est irréductible, il n'y a rien à montrer. Dans le cas contraire, on note W le sous-espace de V laissé stable par $\rho(g)$ pour tout $g \in G$. Par le Lemme 1, il existe W_0 tel que $E = W \oplus W_0$ avec W_0 laissé stable par $\rho(g)$ pour tout $g \in G$. Par l'hypothèse de récurrence, $\rho_W : g \mapsto \rho(g)|_W$ et $\rho_{W_0} : g \mapsto \rho(g)|_{W_0}$ sont sommes directes de représentations irréductibles, et comme $\rho = \rho_W \oplus \rho_{W_0}$, on a le résultat.

□

37 Théorème de Wedderburn

En utilisant les polynômes cyclotomiques, nous montrons que tout corps fini est commutatif.

Lemme 1. Soient \mathbb{K} et \mathbb{L} deux corps tels que \mathbb{K} est commutatif et $\mathbb{K} \subseteq \mathbb{L}$. Alors $\exists d \in \mathbb{N}^*$ tel que $|\mathbb{L}| = |\mathbb{K}|^d$.

[GOU21]
p. 100

Démonstration. \mathbb{L} est un espace vectoriel sur \mathbb{K} de dimension finie d (car \mathbb{L} est fini). Donc \mathbb{L} est isomorphe en tant que \mathbb{K} -espace vectoriel à \mathbb{K}^d . En particulier, $|\mathbb{L}| = |\mathbb{K}|^d$. \square

Théorème 2 (Wedderburn). Tout corps fini est commutatif.

Démonstration. Soit \mathbb{K} un corps. L'idée va être de procéder par récurrence sur le cardinal du corps.

- Si $|\mathbb{K}| = 2$: alors $\mathbb{K} = \{0, 1\}$ est commutatif.
- On suppose le résultat vrai pour tout corps fini de cardinal strictement inférieur à $|\mathbb{K}|$. On veut montrer que \mathbb{K} est commutatif. Supposons par l'absurde que \mathbb{K} ne l'est pas. On pose

$$Z = Z(\mathbb{K}) = \{x \in \mathbb{K} \mid \forall y \in \mathbb{K}, xy = yx\}$$

le centre de \mathbb{K} dont on note q le cardinal. C'est un sous-corps de \mathbb{K} qui est (par hypothèse) inclus strictement dans \mathbb{K} . Donc Z est commutatif, et par le Lemme 1, on peut écrire $|\mathbb{K}| = q^n$ où $n \in \mathbb{N}^*$. Si $x \in \mathbb{K}$, on pose

$$\mathbb{K}_x = Z_{\mathbb{K}}(\{x\}) = \{y \in \mathbb{K} \mid xy = yx\}$$

Montrons que

$$\exists d \mid n \text{ tel que } |\mathbb{K}_x| = q^d \quad (*)$$

Notons déjà encore une fois que \mathbb{K}_x est un sous-corps de \mathbb{K} .

- Si $\mathbb{K}_x = \mathbb{K}$, on a $|\mathbb{K}_x| = |\mathbb{K}| = q^n$. Il suffit donc de prendre $d = n$.
- Sinon, $\mathbb{K}_x \subsetneq \mathbb{K}$, donc \mathbb{K}_x est commutatif par hypothèse. Par le Lemme 1, il existe $k \in \mathbb{N}^*$ tel que $|\mathbb{K}| = |\mathbb{K}_x|^k$.

Mais, Z est un sous-corps (commutatif) de \mathbb{K}_x , donc d'après le Lemme 1, il existe $d \in \mathbb{N}^*$ tel que $|\mathbb{K}_x| = |Z|^d$. Donc on a

$$q^n = |\mathbb{K}| = |\mathbb{K}_x|^k = (q^d)^k = q^{dk}$$

d'où $d \mid n$.

On considère l'action par conjugaison \cdot de \mathbb{K} sur lui-même $x \cdot y = xyx^{-1}$. Si $y \in \mathbb{K}^*$, alors

$$\text{Stab}_y = \{x \in \mathbb{K}^* \mid x \cdot y = y\} = \mathbb{K}_y^*$$

Soit Ω un système de représentants associé à la relation d'équivalence "être dans la même orbite". L'équation aux classes donne alors

$$|\mathbb{K}^*| = \sum_{\omega \in \Omega} \frac{|\mathbb{K}^*|}{|\text{Stab}_\omega|}$$

Or,

$$\text{Stab}_\omega = \mathbb{K}^* \iff \forall x \in \mathbb{K}^*, \omega x = x\omega \iff \omega \in Z^*$$

donc en notant $\Omega' = \Omega \setminus Z^*$, on a :

$$|\mathbb{K}^*| = \sum_{\omega \in Z^*} \frac{|\mathbb{K}^*|}{|\text{Stab}_\omega|} + \sum_{\omega \in \Omega'} \frac{|\mathbb{K}^*|}{|\text{Stab}_\omega|} = |Z^*| + \sum_{\omega \in \Omega'} \frac{|\mathbb{K}^*|}{|\mathbb{K}^*|} \quad (**)$$

Soit $\omega \in \Omega'$. Par (*),

$$\exists d \mid n \text{ tel que } |\text{Stab}_\omega| = |\mathbb{K}_\omega^*| = q^d - 1$$

De plus, $d \neq n$ (car $\omega \notin Z^*$). Si maintenant on pose

$$\forall d \mid n, \lambda_d = |\{\omega \in \Omega' \mid |\text{Stab}_\omega| = q^d - 1\}|$$

on peut alors écrire en remplaçant dans (**):

$$q^n - 1 = |\mathbb{K}^*| = (q - 1) + \sum_{d \mid n} \lambda_d \left(\frac{q^n - 1}{q^d - 1} \right) \quad (***)$$

Si $d \parallel n$, on a

$$X^n - 1 = \prod_{k \mid n} \Phi_k = \Phi_n \left(\prod_{k \mid d} \Phi_k \right) \left(\prod_{\substack{k \mid n \\ k \nmid d}} \Phi_k \right) = \Phi_n (X^m - 1) \left(\prod_{\substack{k \mid n \\ k \nmid d}} \Phi_k \right)$$

Donc, $\Phi_n \mid \frac{X^n - 1}{X^d - 1}$ dans $\mathbb{Z}[X]$. Ceci étant vrai quelque soit d divisant strictement n , on en déduit

$$\Phi_n \mid \sum_{d \parallel n} \lambda_d \frac{X^n - 1}{X^d - 1} \text{ dans } \mathbb{Z}[X]$$

Comme de plus, $\Phi_n \mid X^n - 1$ dans $\mathbb{Z}[X]$, on conclut que

$$\Phi_n \mid X^n - 1 - \sum_{d \parallel n} \lambda_d \frac{X^n - 1}{X^d - 1} \text{ dans } \mathbb{Z}[X]$$

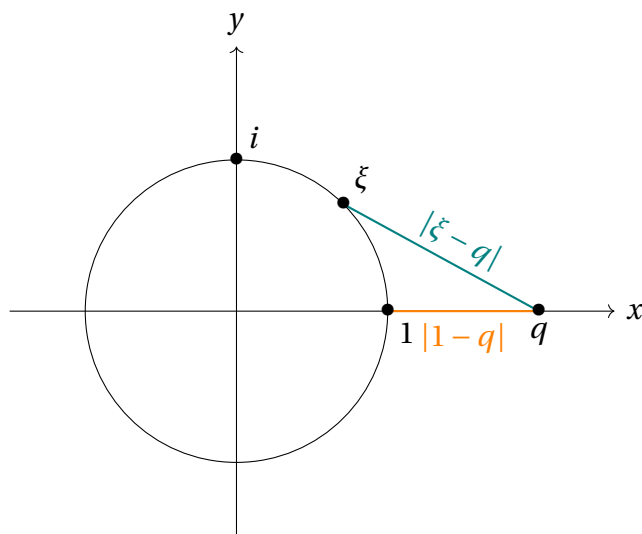
ce qui donne, une fois évalué en q :

$$\Phi_n(q) \mid q^n - 1 - \sum_{d \parallel n} \lambda_d \frac{q^n - 1}{q^d - 1} \stackrel{(***)}{=} q - 1 \implies |\Phi_n(q)| \leq q - 1$$

Mais $n \geq 2$, donc

$$\begin{aligned} |\Phi_n(q)| &= \prod_{\xi \in \mu_n^*} |q - \xi| \\ &> \prod_{i=1}^{\varphi(n)} |q - 1| \\ &\geq |q - 1| \end{aligned}$$

On peut en effet interpréter $|q - \xi|$ comme la distance du complexe q au complexe ξ ; le premier est sur l'axe réel et est ≥ 2 , le second est sur le cercle unité mais n'est pas sur l'axe réel :



cela nous permet de justifier l'inégalité stricte. On a donc une contradiction.

□

38 Théorème de Weierstrass (par la convolution)

On montre le théorème de Weierstrass par la convolution (sans forcément développer toute la théorie derrière, ce qui peut être utile dans certaines leçons).

Notation 1. $\forall n \in \mathbb{N}$, on note :

$$a_n = \int_{-1}^1 (1-t^2)^n dt \text{ et } p_n : t \mapsto \frac{(1-t^2)^n}{a_n} \mathbb{1}_{[-1,1]}(t)$$

[GOU20]

p. 304

Lemme 2. La suite (p_n) vérifie :

- (i) $\forall n \in \mathbb{N}, p_n \geq 0$.
- (ii) $\forall n \in \mathbb{N}, \int_{\mathbb{R}} p_n(t) dt = 1$.
- (iii) $\forall \alpha > 0, \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_{|t| > \alpha} p_n(t) dt = 0$.

Autrement dit, (p_n) est une **approximation positive de l'identité**.

Démonstration. Notons tout d'abord que

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, a_n = 2 \int_0^1 (1-t^2)^n dt \geq 2 \int_0^1 t(1-t^2)^n dt = \left[-\frac{(1-t^2)^{n+1}}{n+1} \right]_0^1 = \frac{1}{n+1}$$

- (i) $\forall n \in \mathbb{N}, p_n \geq 0$ car $a_n \geq 0$ et $(1-t^2)^n \geq 0$ pour tout $t \in [-1, 1]$.
- (ii) $\forall n \in \mathbb{N}, \int_{\mathbb{R}} p_n(t) dt = \frac{1}{a_n} \int_{-1}^1 (1-t^2)^n dt = 1$.
- (iii) Soit $\alpha > 0$.

— Si $\alpha < 1$: $\forall n \in \mathbb{N}^*$,

$$\int_{|t| \geq \alpha} p_n(t) dt = \frac{2}{a_n} \int_{\alpha}^1 (1-t^2)^n dt \leq \frac{2}{a_n} (1-\alpha^2)^n \leq 2(n+1)(1-\alpha^2)^n$$

et comme $|1-\alpha^2| < 1$, on a $\int_{|t| \geq \alpha} p_n(t) dt \rightarrow 0$.

— Si $\alpha \geq 1$:

$$\int_{|t| \geq \alpha} p_n(t) dt = 0$$

□

Théorème 3 (Weierstrass). Toute fonction continue $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ (avec $a, b \in \mathbb{R}$ tels que $a \leq b$) est limite uniforme de fonctions polynômiales sur $[a, b]$.

Démonstration. Soit $f \in \mathcal{C}_c(\mathbb{R})$ continue. Montrons que $(f * p_n)$ converge uniformément vers f . Soit $\epsilon > 0$. Par le théorème de Heine f est uniformément continue sur son support, donc l'est aussi sur \mathbb{R} entier :

$$\exists \eta > 0 \text{ tel que } \forall x, y \in \mathbb{R}, |x - y| < \eta \implies |f(x) - f(y)| < \epsilon$$

De plus, f est bornée et atteint ses bornes (donc écrire $\|f\|_\infty$ a du sens). On peut appliquer le Lemme 2 point (iii) :

$$\exists N \in \mathbb{N} \text{ tel que } \forall n \geq N, \int_{|t| \geq \eta} p_n(t) dt < \epsilon$$

Donc, toujours avec le Lemme 2, pour tout $n \geq N$ et pour tout $x \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} |f * p_n(x) - f(x)| &\stackrel{(ii)}{=} \left| \int_{\mathbb{R}} f(x-t) p_n(t) dt - f(x) \int_{\mathbb{R}} p_n(t) dt \right| \\ &= \left| \int_{\mathbb{R}} (f(x-t) - f(x)) p_n(t) dt \right| \\ &\leq \int_{\mathbb{R}} |f(x-t) - f(x)| p_n(t) dt \\ &\stackrel{(i)}{=} \int_{\mathbb{R}} |f(x-t) - f(x)| p_n(t) dt \\ &= \int_{|t| \geq \eta} |f(x-t) - f(x)| p_n(t) dt + \int_{-\eta}^{\eta} |f(x-t) - f(x)| p_n(t) dt \\ &= 2\|f\|_\infty \epsilon + \epsilon \int_{-\eta}^{\eta} p_n(t) dt \\ &\stackrel{(i)}{\leq} 2\|f\|_\infty \epsilon + \epsilon \int_{\mathbb{R}} p_n(t) dt \\ &= (2\|f\|_\infty + 1)\epsilon \end{aligned}$$

d'où la convergence uniforme. Soit maintenant $n \in \mathbb{N}$. Supposons que f est à support dans $I = [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ et montrons que pour tout $f * p_n$ est une fonction polynômiale.

$$\forall x \in I, (f * p_n)(x) = (p_n * f)(x) = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} p_n(x-t) f(t) dt \quad (*)$$

Notons que $\forall x, t \in I, |x-t| \leq 1$, donc

$$p_n(x-t) = \frac{(1-(x-t)^2)^n}{a_n} \stackrel{\text{développement}}{=} \sum_{k=0}^{2n} q_k(t) x^k$$

où $\forall k \in \llbracket 0, 2n \rrbracket$, q_k est une fonction polynômiale. En remplaçant dans (*), on obtient :

$$\forall x \in I, (f * p_n)(x) = \sum_{k=0}^{2n} \left(\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} q_k(t) f(t) dt \right) x^k$$

qui est bien une fonction polynômiale sur I .

Soient maintenant $[a, b]$ un intervalle fermé de \mathbb{R} et $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$. On considère $[c, d]$ un intervalle plus grand avec $c < a$ et $b < d$ et on prolonge f par :

- Une fonction affine sur $[c, a]$ qui vaut 0 en c et $f(a)$ en a .
- Une fonction affine sur $[b, d]$ qui vaut 0 en d et $f(b)$ en b .

Et on peut encore prolonger cette fonction sur \mathbb{R} tout entier en une fonction \tilde{f} telle que $\tilde{f} = 0$ pour tout $x \notin [c, d]$. On a donc $\tilde{f} \in \mathcal{C}_c(\mathbb{R})$. Nous allons maintenant avoir besoin du changement de

variable suivant :

$$\varphi : \begin{array}{ll} I & \rightarrow [c, d] \\ x & \mapsto (d-c)x + \frac{c+d}{2} \end{array}$$

Comme $\tilde{f} \circ \varphi$ est continue, à support dans I , on peut maintenant affirmer que $\tilde{f} \circ \varphi$ est limite uniforme d'une suite de polynômes (ρ_n) . Donc \tilde{f} est limite uniforme de la suite $(\rho_n \circ \varphi^{-1})$ où $\forall n \in \mathbb{N}$, $\rho_n \circ \varphi^{-1}$ est bien une fonction polynômiale car φ (donc φ^{-1} aussi) est affine. A fortiori, $f = \tilde{f}|_{[a,b]}$ est aussi limite de fonctions polynômiales sur $[a, b]$. \square

39 Théorème de Weierstrass (par les probabilités)

On montre le théorème de Weierstrass en faisant un raisonnement sur des variables aléatoires suivant une loi de Bernoulli.

Théorème 1 (Bernstein). Soit $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ continue. On note

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, B_n(f) : x \mapsto \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f\left(\frac{k}{n}\right) x^k (1-x)^{n-k}$$

le n -ième polynôme de Bernstein associé à f . Alors la suite de fonctions $(B_n(f))$ converge uniformément vers f .

[G-K]
p. 195

Démonstration. Soit $x \in]0, 1[$. On se place sur un espace probabilité $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ et considère (X_k) une suite de variables aléatoires indépendantes de même loi $\mathcal{B}(x)$. On note $\forall n \in \mathbb{N}^*, S_n = \sum_{k=1}^n X_k$. Ainsi, $S_n \sim \mathcal{B}(n, x)$ et donc par la formule de transfert,

$$\mathbb{E}\left(\frac{S_n}{n}\right) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f\left(\frac{k}{n}\right) x^k (1-x)^{n-k} = B_n(f)(x)$$

La fonction f est continue sur $[0, 1]$ qui est un compact de \mathbb{R} , donc par le théorème de Heine; elle y est uniformément continue. Soit donc $\epsilon > 0$,

$$\exists \eta > 0 \text{ tel que } \forall x, y \in [0, 1], |x - y| < \eta \implies |f(x) - f(y)| < \epsilon$$

On a,

$$\begin{aligned} |B_n(f)(x) - f(x)| &= \left| \mathbb{E}\left(f\left(\frac{S_n}{n}\right)\right) - f(x) \right| \\ &= \left| \mathbb{E}\left(f\left(\frac{S_n}{n}\right) - f(x)\right) \right| \\ &\leq \mathbb{E}\left|f\left(\frac{S_n}{n}\right) - f(x)\right| \\ &\leq \mathbb{E}\left(\mathbb{1}_{\left\{\left|\frac{S_n}{n} - x\right| < \eta\right\}} \left|f\left(\frac{S_n}{n}\right) - f(x)\right|\right) + \mathbb{E}\left(\mathbb{1}_{\left\{\left|\frac{S_n}{n} - x\right| \geq \eta\right\}} \left|f\left(\frac{S_n}{n}\right) - f(x)\right|\right) \\ &\leq \mathbb{E}(\epsilon) + 2\|f\|_\infty \mathbb{E}\left(\mathbb{1}_{\left\{\left|\frac{S_n}{n} - x\right| \geq \eta\right\}}\right) \\ &= \epsilon + 2\|f\|_\infty \mathbb{P}\left(\left|\frac{S_n}{n} - x\right| \geq \eta\right) \end{aligned} \quad (*)$$

Comme $\mathbb{E}\left(\frac{S_n}{n}\right) = x$, on peut appliquer l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev :

$$\mathbb{P}\left(\left|\frac{S_n}{n} - x\right| \geq \eta\right) = \mathbb{P}\left(\left|\frac{S_n}{n} - \mathbb{E}\left(\frac{S_n}{n}\right)\right| \geq \eta\right) \leq \frac{1}{\eta^2} \text{Var}\left(\frac{S_n}{n}\right)$$

Comme les X_k sont indépendantes et de même loi :

$$\text{Var}\left(\frac{S_n}{n}\right) = \frac{1}{n^2} \text{Var}(S_n) = \frac{1}{n} \text{Var}(X_1) = \frac{x(1-x)}{n} \leq \frac{1}{n}$$

En réinjectant cela dans (*), cela donne

$$|B_n(f)(x) - f(x)| \leq \epsilon + \frac{2\|f\|_\infty}{n\eta^2}$$

qui est une majoration indépendante de x . Comme la fonction $B_n(f) - f$ est continue sur $[0, 1]$, on peut passer à la borne supérieure :

$$\|B_n(f) - f\|_\infty = \sup_{x \in [0,1]} |B_n(f)(x) - f(x)| \leq \epsilon + \frac{2\|f\|_\infty}{n\eta^2}$$

ce qui donne après un passage à la limite supérieure :

$$\begin{aligned} \limsup_{n \rightarrow +\infty} \|B_n(f) - f\|_\infty &\leq \epsilon \\ \stackrel{\epsilon \rightarrow 0}{\Rightarrow} \limsup_{n \rightarrow +\infty} \|B_n(f) - f\|_\infty &= 0 \\ \Rightarrow \lim_{n \rightarrow +\infty} \|B_n(f) - f\|_\infty &= 0 \end{aligned}$$

□

Théorème 2 (Weierstrass). Toute fonction continue $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ (avec $a, b \in \mathbb{R}$ tels que $a \leq b$) est limite uniforme de fonctions polynômiales sur $[a, b]$.

Démonstration. On va avoir besoin du changement de variable suivant :

$$\varphi : \begin{array}{ccc} [0, 1] & \rightarrow & [a, b] \\ x & \mapsto & a + (b - a)x \end{array}$$

Par le Théorème 1, la fonction $f \circ \varphi$ est limite uniforme d'une suite de fonctions polynômiales (p_n) . Donc f est limite uniforme de la suite $(p_n \circ \varphi^{-1})$ où $\forall n \in \mathbb{N}$, $p_n \circ \varphi^{-1}$ est bien une fonction polynômiale car φ (donc φ^{-1} aussi) est affine. □

40 Théorème des deux carrés de Fermat

Nous démontrons le théorème des deux carrés de Fermat (qui donne des conditions sur la décomposition en facteurs premiers d'un entier pour que celui-ci soit somme de deux carrés) à l'aide de l'anneau des entiers de Gauss $\mathbb{Z}[i]$.

Lemme 1. Soit $p \geq 3$ un nombre premier. Alors $x \in \mathbb{F}_p^*$ est un carré si et seulement si $x^{\frac{p-1}{2}} = 1$.

[I-P]
p. 137

Démonstration. On pose $X = \{x \in \mathbb{F}_p \mid x^{\frac{p-1}{2}} = 1\}$, et on note S l'ensemble des carrés de \mathbb{F}_p^* . Comme un polynôme de degré d sur \mathbb{F}_p possède au plus d racines, on a $|X| \leq \deg(X^{\frac{p-1}{2}} - 1) = \frac{p-1}{2}$.

D'autre part, si $x \in S$, on peut écrire $x = y^2$ et on a donc $x^{\frac{p-1}{2}} = y^{p-1} = 1$ car $|\mathbb{F}_p^*| = p-1$. Donc, $S \subseteq X$.

Pour conclure, calculons le cardinal de S . Pour cela, considérons le morphisme

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{F}_p^* & \rightarrow & S \\ x & \mapsto & x^2 \end{array}$$

dont le noyau est $\{x \in \mathbb{F}_p^* \mid x^2 = 1\} = \{\pm 1\}$ qui est de cardinal 2. En appliquant le premier théorème d'isomorphisme, et en considérant les cardinaux; on obtient $|S| = \frac{p-1}{2}$. Donc $S = X$. \square

Introduisons maintenant des notations qui seront utiles pour la suite.

Notation 2. On note

$$N : \begin{array}{ccc} \mathbb{Z}[i] & \rightarrow & \mathbb{N} \\ a + ib & \mapsto & a^2 + b^2 \end{array}$$

et Σ l'ensemble des entiers qui sont somme de deux carrés.

Remarque 3. $n \in \Sigma \iff \exists z \in \mathbb{Z}[i] \text{ tel que } N(z) = n$.

Lemme 4. Voici quelques propriétés sur N et $\mathbb{Z}[i]$ dont nous aurons besoin :

- (i) N est multiplicative.
- (ii) $\mathbb{Z}[i]^* = \{z \in \mathbb{Z}[i] \mid N(z) = 1\} = \{\pm 1, \pm i\}$.
- (iii) $\mathbb{Z}[i]$ est euclidien de stathme N .

Démonstration. (i) On a $\forall z, z' \in \mathbb{C}, |zz'|^2 = |z|^2 |z'|^2$ (par multiplicativité de $(.)^2$ et de $|\cdot|$). Et N n'est que la restriction de $|\cdot|^2$ à $\mathbb{Z}[i]$. Il est également tout-à-fait possible de montrer cette propriété par un calcul direct.

- (ii) Soit $z \in \mathbb{Z}[i]^*$. On a $N(z)N(z^{-1}) = N(zz^{-1}) = N(1) = 1$. Comme N est à valeurs dans \mathbb{N} , on a $N(z) = N(z^{-1}) = 1$. En écrivant $z = a + ib$, on a $N(z) = a^2 + b^2 = 1$, d'où $a = \pm 1$ ou $b = \pm 1$. Réciproquement, ± 1 et $\pm i$ sont bien inversibles dans $\mathbb{Z}[i]$ et de module 1.

(iii) Soient $z, t \in \mathbb{Z}[i]$. On pose $\frac{z}{t} = x + iy \in \mathbb{C}$ avec $x, y \in \mathbb{R}$. Soient $a, b \in \mathbb{Z}$ tels que :

- $|x - a| \leq \frac{1}{2}$.
- $|y - b| \leq \frac{1}{2}$.

(Ces nombres existent bien, ne pas hésiter à faire un dessin pour s'en convaincre.) On pose $q = a + ib \in \mathbb{Z}[i]$, et on a

$$\left| \frac{z}{t} - q \right|^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2 \leq \frac{1}{4} + \frac{1}{4} < 1$$

On pose alors $r = z - qt$, et on a bien

$$z = tq + r \text{ et } N(r) = r^2 = |t|^2 \left| \frac{z}{t} - q \right|^2 < |t|^2 = N(t)$$

□

Lemme 5. Soit p un nombre premier. Si p n'est pas irréductible dans $\mathbb{Z}[i]$, alors $p \in \Sigma$.

Démonstration. On suppose que p n'est pas irréductible dans $\mathbb{Z}[i]$. On peut donc écrire $p = uv$ avec $u, v \in \mathbb{Z}[i]$ non inversibles. Ainsi,

$$p^2 = N(p) = N(uv) = \underbrace{N(u)}_{\neq 1} \underbrace{N(v)}_{\neq 1} \stackrel{p \text{ premier}}{\implies} N(u) = N(v) = p$$

Par la Remarque 3, $p \in \Sigma$.

□

Théorème 6 (Deux carrés de Fermat). Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Alors $n \in \Sigma$ si et seulement si $\nu_p(n)$ est pair pour tout p premier tel que $p \equiv 3 \pmod{4}$ (où $\nu_p(n)$ désigne la valuation p -adique de n).

Démonstration. Sens direct : On écrit $n = a^2 + b^2$ avec $a, b \in \mathbb{Z}$. Soit $p \mid n$ tel que $p \equiv 3 \pmod{4}$. Montrons que $p \in \Sigma$. On suppose par l'absurde que l'on peut écrire $p = c^2 + d^2$ avec $c, d \in \mathbb{Z}$. On va discerner les cas :

- Si $c \equiv \pm 1 \pmod{4}$, alors $c^2 \equiv 1 \pmod{4}$ (et de même pour d^2).
- Si $c \equiv \pm 2 \pmod{4}$, alors $c^2 \equiv 0 \pmod{4}$ (et de même pour d^2).

Donc $p = c^2 + d^2 \equiv 0, 1$ ou $2 \pmod{4}$: absurde. En particulier, par le Lemme 5 (en prenant la contraposée), p est irréductible dans $\mathbb{Z}[i]$. Comme $\mathbb{Z}[i]$ est euclidien (cf. Lemme 4), p est un élément premier de $\mathbb{Z}[i]$. Mais, $p \mid n = (a + ib)(a - ib)$. Donc $p \mid a + ib$ ou $p \mid a - ib$. Dans les deux cas, on a $p \mid a$ et $p \mid b$. Ainsi,

$$\left(\frac{a}{p} \right)^2 + \left(\frac{b}{p} \right)^2 = \frac{n}{p^2}$$

donc de deux choses l'une; on a :

$$p^2 \mid n \text{ et } \frac{n}{p^2} \in \Sigma$$

Il suffit alors d'itérer le processus (en remplaçant n par $\frac{n}{p^2}$) k fois jusqu'à ce que p ne divise plus $\frac{n}{p^{2k}}$. On a alors $n = p^{2k}u$ avec $p \nmid u$. D'où $v_p(n) = 2k$.

Réciproque : Soit p premier tel que $p \equiv 3 \pmod{4}$. Alors $p^{v_p(n)} = \left(p^{\frac{v_p(n)}{2}}\right)^2$ est un carré, donc $p^{v_p(n)} \in \Sigma$.

Soit maintenant p premier tel que $p = 2$ ou $p \equiv 1 \pmod{4}$. Alors en conséquence du Lemme 1 (le cas $p = 2$ étant trivial), -1 est un carré de \mathbb{F}_p ie. $\exists a \in \mathbb{Z}$ tel que $-1 \equiv a^2 \pmod{p}$. Donc $p \mid a^2 + 1 = (a - i)(a + i)$. Oui mais, p ne divise ni $a - i$, ni $a + i$. Donc p n'est pas un élément premier de $\mathbb{Z}[i]$ et n'est donc pas irréductible dans $\mathbb{Z}[i]$ (toujours parce que $\mathbb{Z}[i]$ est euclidien, cf. Lemme 4). En vertu du Lemme 5, $p \in \Sigma$.

Comme N est multiplicative, par la Remarque 3, on en déduit que Σ est stable par multiplication. Donc $n \in \Sigma$ (en décomposant n en produit de facteurs premiers). \square

Remarque 7. Le fait qu'un élément irréductible d'un anneau euclidien est premier est une conséquence directe du lemme d'Euclide, vrai dans les anneaux factoriels (donc à fortiori aussi dans les anneaux euclidiens).

[PER]
p. 48

41 Transformée de Fourier d'une gaussienne

On calcule la transformée de Fourier d'une fonction de type gaussienne $x \mapsto e^{-ax^2}$ à l'aide du théorème intégral de Cauchy.

Proposition 1. On définit $\forall a \in \mathbb{R}_*^+$,

$$\gamma_a : \begin{array}{ccc} \mathbb{R} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ x & \mapsto & e^{-ax^2} \end{array}$$

Alors,

$$\forall \xi \in \mathbb{R}, \widehat{\gamma_a}(\xi) = \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-\frac{\xi^2}{4a}}$$

[AMR08]

p. 156

Démonstration. Soit $a \in \mathbb{R}_*^+$. On a

$$\forall \xi \in \mathbb{R}, \widehat{\gamma_a}(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2} e^{-ix\xi} dx$$

et en écrivant

$$ax^2 + ix\xi = a \left(x^2 + i \frac{x\xi}{a} \right) = a \left(\left(x + i \frac{\xi}{2a} \right)^2 + \frac{\xi^2}{4a^2} \right)$$

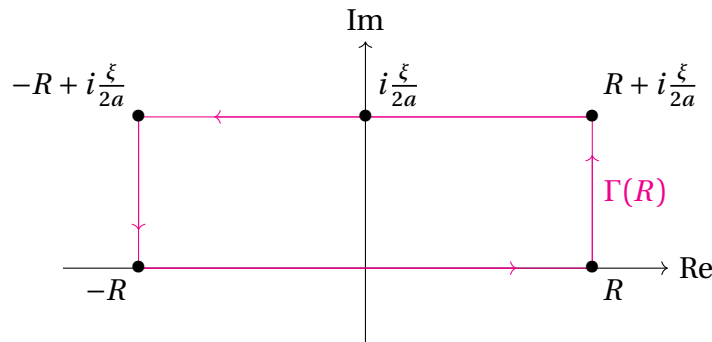
on en déduit que

$$\forall \xi \in \mathbb{R}, \widehat{\gamma_a}(\xi) = e^{-\frac{\xi^2}{4a}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-a \left(x + i \frac{\xi}{2a} \right)^2} dx \quad (*)$$

On va considérer la fonction

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{C} & \rightarrow & \mathbb{C} \\ z & \mapsto & e^{-az^2} \end{array}$$

Pour $R > 0$ et $\xi \in \mathbb{R}$, on note $\Gamma(R)$ le rectangle de sommets $-R, R, R + i \frac{\xi}{2a}, -R + i \frac{\xi}{2a}$ parcouru dans le sens direct :



On a,

$$\underbrace{\int_{\Gamma(R)} e^{-az^2} dz}_{=I(R)} = \underbrace{\int_{-R}^R e^{-az^2} dz}_{=I_1(R)} + \underbrace{\int_R^{R+i\frac{\xi}{2a}} e^{-az^2} dz}_{=I_2(R)} + \underbrace{\int_{R+i\frac{\xi}{2a}}^{-R+i\frac{\xi}{2a}} e^{-az^2} dz}_{=I_3(R)} + \underbrace{\int_{-R+i\frac{\xi}{2a}}^{-R} e^{-az^2} dz}_{=I_4(R)}$$

Nous allons traiter les intégrales séparément.

- Pour $I_1(R)$: On a affaire à une intégrale sur l'axe réel. Or, on connaît la valeur de l'intégrale de Gauss :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y^2} dy = \sqrt{\pi}$$

Donc en faisant le changement de variable $y = \sqrt{ax}$, on obtient :

$$\sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\pi} \iff \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

D'où :

$$I_1(R) \longrightarrow \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

quand $R \longrightarrow +\infty$.

- Pour $I_2(R)$: On a :

$$\begin{aligned} \forall z \in \left[R, R + i \frac{\xi}{2a} \right], z = R + it \text{ avec } t \in \left[0, \frac{\xi}{2a} \right] \\ \implies dz = i dt \end{aligned}$$

D'où :

$$I_2(R) = i \int_0^{\frac{\xi}{2a}} e^{-a(R+it)^2} dt$$

On en déduit,

$$\begin{aligned} |I_2(R)| &\leq \int_0^{\frac{\xi}{2a}} \left| e^{-a(R+it)^2} \right| dt \\ &= \int_0^{\frac{\xi}{2a}} \left| e^{-a(R^2-t^2)} \right| \underbrace{|e^{i2aRt}|}_{=1} dt \\ &= \int_0^{\frac{\xi}{2a}} e^{-a(R^2-t^2)} dt \\ &= e^{-aR^2} \int_0^{\frac{\xi}{2a}} e^{at^2} dt \\ &\longrightarrow 0 \end{aligned}$$

quand $R \longrightarrow +\infty$.

- Pour $I_3(R)$: On a :

$$\begin{aligned} \forall z \in \left[R + i \frac{\xi}{2a}, -R + i \frac{\xi}{2a} \right], z = t + i \frac{\xi}{2a} \text{ avec } t \in [R, -R] \\ \implies dz = dt \end{aligned}$$

D'où :

$$I_3(R) = \int_R^{-R} e^{-a\left(t+i\frac{\xi}{2a}\right)^2} dt = - \int_{-R}^R e^{-a\left(t+i\frac{\xi}{2a}\right)^2} dt = -e^{\frac{\xi^2}{4a}} \int_{-R}^R e^{-a\left(t+i\frac{\xi}{2a}\right)^2} dt$$

qui est une intégrale généralisée absolument convergente. Ainsi par (*),

$$I_3(R) \longrightarrow -e^{\frac{\xi^2}{4a}} \widehat{\gamma}_a(\xi)$$

quand $R \longrightarrow +\infty$.

— Pour $I_4(R)$: Ce cas-ci se traite exactement comme $I_2(R)$. On a :

$$\begin{aligned} \forall z \in \left[-R + i\frac{\xi}{2a}, -R \right], z = -R + it \text{ avec } t \in \left[\frac{\xi}{2a}, 0 \right] \\ \Rightarrow dz = i dt \end{aligned}$$

D'où :

$$I_4(R) = i \int_{\frac{\xi}{2a}}^0 e^{-a(-R+it)^2} dt = -i \int_0^{\frac{\xi}{2a}} e^{-a(-R+it)^2} dt$$

On en déduit,

$$|I_4(R)| \leq \int_0^{\frac{\xi}{2a}} \left| e^{-a(-R+it)^2} \right| dt = e^{-aR^2} \int_0^{\frac{\xi}{2a}} e^{at^2} dt \longrightarrow 0$$

quand $R \longrightarrow +\infty$.

— Pour $I(R)$: La fonction $z \mapsto e^{-az^2}$ est holomorphe et le contour $\Gamma(R)$ est fermé. Donc $I(R) = 0$ en vertu du théorème intégral de Cauchy.

En passant à la limite, on obtient ainsi :

$$0 = \sqrt{\frac{\pi}{a}} + 0 - e^{\frac{\xi^2}{4a}} \widehat{\gamma}_a(\xi) + 0 \iff \widehat{\gamma}_a(\xi) = \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-\frac{\xi^2}{4a}}$$

□

Bibliographie

Analyse de Fourier dans les espaces fonctionnels

[AMR08]

Mohammed EL-AMRANI. *Analyse de Fourier dans les espaces fonctionnels. Niveau M1*. Ellipses, 28 août 2008.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/3908-14232-analyse-de-fourier-dans-les-espaces-fonctionnels-niveau-m1-9782729839031.html>.

Objectif agrégation

[BMP]

Vincent BECK, Jérôme MALICK et Gabriel PEYRÉ. *Objectif agrégation*. 2^e éd. H&K, 22 août 2005.

<https://objectifagregation.github.io>.

Nouvelles histoires hédonistes de groupes et de géométries

[C-G]

Philippe CALDERO et Jérôme GERMONI. *Nouvelles histoires hédonistes de groupes et de géométries. Tome 1*. Calvage & Mounet, 13 mai 2017.

<http://www.calvage-et-mounet.fr/2022/05/09/nouvelles-histoires-hedoniste-de-groupes-et-de-geometrie/>.

Mathématiques pour l'agrégation

[DAN]

Jean-François DANTZER. *Mathématiques pour l'agrégation. Analyse et probabilités*. De Boeck Supérieur, 20 avr. 2021.

<https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782807332195-mathematiques-pour-l-agregation-analyse-et-probabilites>.

Analyse numérique et équations différentielles

[DEM]

Jean-Pierre DEMAILLY. *Analyse numérique et équations différentielles*. 4^e éd. EDP Sciences, 11 mai 2016.

<http://www.grenoble-sciences.fr/pap-ebook/demailly/>.

Oraux X-ENS Mathématiques

[FGN2]

Serge FRANCINO, Hervé GIANELLA et Serge NICOLAS. *Oraux X-ENS Mathématiques. Volume 2*. 2^e éd. Cassini, 16 mars 2021.

<https://store.cassini.fr/fr/enseignement-des-mathematiques/111-oraux-x-ens-mathematiques-nouvelle-serie-vol-2.html>.

De l'intégration aux probabilités

[G-K]

Olivier GARET et Aline KURTZMANN. *De l'intégration aux probabilités*. 2^e éd. Ellipses, 28 mai 2019.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/4593-14919-de-l-integration-aux-probabilites-2e-edition-augmentee-9782340030206.html>.

Les maths en tête**[GOU20]**

Xavier GOURDON. *Les maths en tête. Analyse*. 3^e éd. Ellipses, 21 avr. 2020.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/10446-les-maths-en-tete-analyse-3e-edition-9782340038561.html>.

Les maths en tête**[GOU21]**

Xavier GOURDON. *Les maths en tête. Algèbre et probabilités*. 3^e éd. Ellipses, 13 juill. 2021.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/13722-25266-les-maths-en-tete-algebre-et-probabilites-3e-edition-9782340056763.html>.

Théorie de Galois**[GOZ]**

Ivan GOZARD. *Théorie de Galois. Niveau L3-M1*. 2^e éd. Ellipses, 1^{er} avr. 2009.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/4897-15223-theorie-de-galois-niveau-l3-m1-2e-edition-9782729842772.html>.

L'oral à l'agrégation de mathématiques**[I-P]**

Lucas ISENMANN et Timothée PECATTE. *L'oral à l'agrégation de mathématiques. Une sélection de développements*. 2^e éd. Ellipses, 26 mars 2024.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/15218-28346-loral-a-lagregation-de-mathematiques-une-selection-de-developpements-2e-edition-9782340086487.html>.

Cours d'analyse fonctionnelle**[LI]**

Daniel LI. *Cours d'analyse fonctionnelle. avec 200 exercices corrigés*. Ellipses, 3 déc. 2013.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/6558-cours-danalyse-fonctionnelle-avec-200-exercices-corriges-9782729883058.html>.

Cours d'algèbre**[PER]**

Daniel PERRIN. *Cours d'algèbre. pour l'agrégation*. Ellipses, 15 fév. 1996.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/7778-18110-cours-d-algebre-agregation-9782729855529.html>.

Éléments d'analyse réelle**[ROM19]**

Jean-Étienne ROMBALDI. *Éléments d'analyse réelle*. 2^e éd. EDP Sciences, 6 juin 2019.

<https://laboutique.edpsciences.fr/produit/1082/9782759823789/elements-d-analyse-reelle>.

Mathématiques pour l'agrégation**[ROM21]**

Jean-Étienne ROMBALDI. *Mathématiques pour l'agrégation. Algèbre et géométrie*. 2^e éd. De Boeck Supérieur, 20 avr. 2021.

<https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782807332201-mathematiques-pour-l-agregation-algebre-et-geometrie>.

Petit guide de calcul différentiel

[ROU]

François ROUVIÈRE. *Petit guide de calcul différentiel. à l'usage de la licence et de l'agrégation*. 4^e éd. Cassini, 27 fév. 2015.

<https://store.cassini.fr/fr/enseignement-des-mathematiques/94-petit-guide-de-calcul-differentiel-4e-ed.html>.

Analyse réelle et complexe

[RUD]

Walter RUDIN. *Analyse réelle et complexe. Cours et exercices*. 3^e éd. Dunod, 21 oct. 2020.

<https://www.dunod.com/sciences-techniques/analyse-reelle-et-complexe-cours-et-exercices-0>.

Anneaux, corps, résultants

[ULM18]

Felix ULMER. *Anneaux, corps, résultants. Algèbre pour L3/M1/agrégation*. Ellipses, 28 août 2018.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/9852-20186-anneaux-corps-resultants-algebre-pour-l3-m1-agregation-9782340025752.html>.

Théorie des groupes

[ULM21]

Felix ULMER. *Théorie des groupes. Cours et exercices*. 2^e éd. Ellipses, 3 août 2021.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/13760-25304-theorie-des-groupes-2e-edition-9782340057241.html>.

Analyse pour l'agrégation

[Z-Q]

Claude ZUILY et Hervé QUEFFÉLEC. *Analyse pour l'agrégation. Agrégation/Master Mathématiques*. 5^e éd. Dunod, 26 août 2020.

<https://www.dunod.com/prepas-concours/analyse-pour-agregation-agregationmaster-mathematiques>.