

Analyse III

David Wiedemann

Table des matières

1	Rappels	3
2	Nombres Complexes	3
3	Nombres Complexes	3
3.1	Topologie sur \mathbb{C}	4
3.2	Echange de sommes	4
4	Analyse Complexe	4
4.1	Fonctions analytiques complexes	4
4.2	Rayon de Convergence	5
4.3	Analyticite et recentrage	6
4.4	Zeros isolés	7
5	Fonctions exp, log, sin, cos, sinh, cosh	8
5.1	exp	8
5.2	Logarithme	10
6	Fonctions holomorphes	11
6.1	Analytique \Rightarrow Holomorphe	12
7	Integration Complexe	13
8	Holomorphie et deformation de Contours	15
8.1	Integration sur un petit carre	16
8.2	Deformations	16

List of Theorems

1	Theorème (de la fonction inverse)	3
2	Theorème (de la fonction implicite)	3
4	Theorème (fondamental de l'algebre)	4
5	Corollaire	4

1	Definition (Serie entiere)	5
2	Definition (Convergence de series entieres)	5
3	Definition (Convergence uniforme)	5
4	Definition (Convergence d'une suite de fonctions)	5
6	Lemme	5
5	Definition (Rayon de convergence)	5
7	Lemme	5
8	Lemme	5
9	Lemme	5
10	Lemme	6
6	Definition	6
11	Lemme (Lemme de recentrage)	6
12	Proposition	7
13	Corollaire	7
14	Corollaire	8
7	Definition (Exponentielle)	8
8	Definition	10
16	Proposition	10
9	Definition (Fonction Holomorphe)	11
10	Definition	12
17	Proposition	12
11	Definition	12
18	Proposition	12
19	Corollaire	13
12	Definition (Operateurs de Wirtinger)	13
13	Definition (Chemin)	13
14	Definition	14
15	Definition (Longueur)	14
16	Definition (Lacet)	14
21	Proposition (Integration par parties)	15
22	Proposition	15
17	Definition (Homotopie)	16
18	Definition (Contractable)	17
19	Definition	17

1 Rappels

Theorème 1 (de la fonction inverse)

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $U \subset \mathbb{R}^n$ de classe C^1 tel que $Df|_x$ est inversible. Alors il existe un voisinage V de x , un voisinage W de $f(x)$ tel que f est une bijection de V à W et dont l'inverse est aussi dérivable. De plus $Df^{-1}|_{f(x)} = (Df|_x)^{-1}$

Theorème 2 (de la fonction implicite)

Soit $U \subset \mathbb{R}^n$, $W \subset \mathbb{R}^p$ et $f : U \times W \rightarrow \mathbb{R}^n$ une fonction C^1 et $(x, z) \in U \times W$ tel que

$$Df|_{(x,z)} = [D_x f|_{(x,z)} | D_z f|_{(x,z)}]$$

est telle que $D_x f|_{(x,z)}$ est inversible.

Alors si $f(x, z) = 0$, il existe un voisinage Z de z et une fonction $g : Z \rightarrow U$ tel que $f(g(\tilde{z}), \tilde{z}) = 0$ et

$$Dg|_z = -(D_x f|_{(x,z)})^{-1} D_z f|_{(x,z)}$$

2 Nombres Complexes

De même que \mathbb{R} est obtenu à partir de \mathbb{Q} en faisant une opération de complétion (topologique).

\mathbb{C} est obtenu à partir de \mathbb{R} en faisant une opération de complétion algébrique ; on requiert simplement qu'il existe une solution à $x^2 + 1 = 0$.

Lecture 2: Intro Complexes

3 Nombres Complexes

Si on veut étendre \mathbb{R} en un corps qui contienne i , on obtient \mathbb{C} .

On perd la relation d'ordre sur les complexes.

Géométriquement, on représente les nombres complexes dans le plan.

Remarque

L'argument d'un nombre complexe n'est défini que modulo 2π .

La représentation polaire est particulièrement pertinente pour la multiplication

$$|zw| = |z||w| \text{ et } \arg(zw) = \arg(z) + \arg(w)$$

Ce sera prouvé de manière élégante plus tard, mais on pourrait le vérifier avec les formules trigonométriques.

C'est consistant avec la notation $z = re^{i\theta}$. Un choix frequent pour θ est de definir \arg sur $\mathbb{C} \setminus \mathbb{R}^-$ en le prenant dans $(-\pi, \pi)$.

Solutions de $z^n = w$

pour $n \in \mathbb{N}^*, w \in \mathbb{C}^*$, il existe n solutions

$$\left\{ |\omega|^{\frac{1}{n}} e^{i(\arg(w) + 2k\pi)/n} \mid k \in \mathbb{Z} \right\}$$

3.1 Topologie sur \mathbb{C}

Comme en analyse reelle, l'outil principal est $|\cdot|$ complexe.

Les objets de choix pour parler de convergence sont $(x-r, x+r)$ et $[x-r, x+r]$ sur \mathbb{R} et sur \mathbb{C} leurs analogues sont $D(z, r) = \{\omega \in \mathbb{C} \mid |z - \omega| < r\}$.

On a $\partial D(z, r) = \overline{D}(z, r) \setminus D(z, r)$ est le cercle de rayon r centre en z .

Un ensemble $U \subset \mathbb{C}$ est dit ouvert si $\forall z \in U \exists \delta > 0$ tel que $D(z, \delta) \subset U$.

Un domaine est un ouvert connexe.

3.2 Echange de sommes

— Sur \mathbb{R} , si $a_{n,m} \geq 0$ on peut toujours dire

$$\sum_n \sum_m a_{n,m} = \sum_m \sum_n a_{n,m}$$

— Idem si la somme converge absolument.

Theorème 4 (fondamental de l'algebre)

Si P est un polynome de degre ≥ 1 , alors $\exists z \in \mathbb{C}$ tel que $P(z) = 0$

Corollaire 5

Tous les polynomes peuvent etre factorise.

4 Analyse Complexe

4.1 Fonctions analytiques complexes

But : aller plus loin que les polynomes.

On considere des series entieres

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_*)^n$$

Les fonctions analytiques sont les fonctions definies par des series entieres convergentes.

Definition 1 (Serie entiere)

$\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_*)^n$ une serie entiere centree en z_*

Definition 2 (Convergence de series entieres)

$\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_*)^n$ si $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n a_k(z - z_*)^k$ existe.

Definition 3 (Convergence uniforme)

$\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_*)^n$ converge uniformement sur $K \subset \mathbb{C}$ si elle converge sur K et si

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left\| \sum_{k=0}^n a_k(z - z_*)^k - \sum_{k=0}^{\infty} a_k(z - z_*)^k \right\|_{\infty, K} = 0$$

Definition 4 (Convergence d'une suite de fonctions)

Si $f_k : K \rightarrow \mathbb{C}$ est une suite de fonctions tel que $\sum_{k=0}^{\infty} \|f_k\|_{\infty, K} < +\infty$, on dit que $\sum f_k$ converge normalement.

Lemme 6

La convergence normale implique la convergence uniforme.

Lecture 3: fonctions complexes

Thu 30 Sep

4.2 Rayon de Convergence**Definition 5 (Rayon de convergence)**

Le rayon de convergence de $\sum_n a_n(z - z_*)^n$ est

$$\rho = \sup \left\{ r \geq 0 : \sum a_n(z - z_*)^n \text{ converge sur } D(z^*, r) \right\}$$

On a $\rho \in [0, \infty]$.

Ou de maniere equivalent

$$\sup \left\{ r \geq 0 : \sum |a_n| r^n \text{ converge} \right\}$$

Lemme 7

Si $\sum a_n z^n$ a rayon de convergence ρ , alors la serie converge normalement sur $D(0, \rho)$

Lemme 8

Si $\limsup |a_k| \rho^k < \infty$, alors le rayon de convergence est $\geq \rho$.

Lemme 9

Si

$$\left| \frac{a_{k+1}}{a_k} \right|$$

converge quand $k \rightarrow \infty$ alors $\left| \frac{a_{k+1}}{a_k} \right| \rightarrow \rho^{-1}$

$$\rho^{-1} = \limsup (|a_n|)^{\frac{1}{n}}$$

Lemme 10

$\sum a_k z^k, \sum b_n z^n$ convergent, alors

$$\sum (a_k + b_k) z^k$$

converge et vaut $\sum a_k z^k + \sum b_k z^k$.

Et si on pose $c_n = \sum_{i+j=n} a_i b_j$, alors

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n z^n$$

converge et vaut le produit.

4.3 Analyticite et recentrage

Definition 6

Si f est donnee par une serie entiere $\sum a_n z^n$.

On definit les series entieres "derivees" par

$$f'(z) = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n z^{n-1}$$

ou les series derivees ont le meme rayon de convergence que la serie de base car

$$\limsup |a_n|^{\frac{1}{n}} = \limsup (n^k |a_n|)^{\frac{1}{n}}$$

Lemme 11 (Lemme de recentrage)

Soit $f : D(0, r) \rightarrow \mathbb{C}$ donnee par $\sum a_n z^n$ avec rayon de convergence r .

Soit $z_* \in D(0, r)$. On a que la serie

$$\sum \frac{1}{n!} f^{(n)}(z_*) (z - z_*)^n$$

converge avec rayon de convergence $\geq r - |z_*|$ ou f^n est la derivee formelle de f definie ci-dessus.

Preuve

$$\begin{aligned} f(z) &= \sum a_n z^n \\ &= \sum a_n (z - z_* + z_*)^n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (z - z_*)^k z_*^{n-k} \\
&= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=k}^{\infty} \binom{n}{k} z_*^{n-k} (z - z_*)^k \\
&= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=k}^{\infty} \frac{1}{k!} n(n-1) \dots (n-k+1) z_*^{n-k} (z - z_*)^k \\
&= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(z_*)}{k!} (z - z_*)^k
\end{aligned}$$

Si on a

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n 1_{k \leq n} |a_n| \binom{n}{k} |z_*^{n-k}| |z - z_*|^k < \infty \quad \square$$

or ceci converge car $z_* \in D(0, r)$ en effet $\exists \epsilon > 0$ tel que $|z_*| + \epsilon < r$

4.4 Zeros isolés

Proposition 12

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ analytique, non nulle, alors l'ensemble

$$\{z \in U : f(z) = 0\}$$

ne contient pas de points d'accumulation dans U .

Preuve

Supposons $z_* \in U$ un point d'accumulation.

Par le lemme de recentrage $\exists \epsilon > 0$ tel que $f(z) = \sum a_n (z - z_*)^n$.

Par hypothèse $\exists m$ tel que $a_m \neq 0$.

Soit n le plus petit tel entier

$$f(z) = (z - z_*)^m \sum_{n=0}^{\infty} a_{m+n} (z - z_*)^n \quad \square$$

Donc il existe un voisinage de z_* où f est continue (parce que la série converge uniformément sur les compacts).

Lecture 4: Series entieres suite

Mon 04 Oct

Corollaire 13

Une fonction analytique $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ a un unique développement en série entière au voisinage de chaque $z_* \in U$.

Preuve

Sans perte de généralité $z_* = 0$.

Si on a deux développements en série $\sum a_n z^n$ et $\sum \tilde{a}_n z^n$ qui définissent la même fonction, donc

$$\sum (a_n - \tilde{a}_n) z^n$$

s'annule au voisinage de 0, donc $a_n = \tilde{a}_n$. □

Corollaire 14

Soient $f, g : U \rightarrow \mathbb{C}$ analytiques.

Si f et g coïncident sur un ensemble avec un point d'accumulation dans Σ , alors $f(z) = g(z) \forall z \in \Sigma$.

Preuve

Montrons d'abord que si z_* est un point d'accumulation de Σ , alors $z_* \in \Sigma$ et $\exists r > 0$ tel que $\Sigma \ni D(z_*, r)$.

On développe $f - g$ en série au voisinage de z_* et on obtient une série nulle au voisinage de z_* .

Pour conclure que $\Sigma = U$, on utilise un argument de connexité.

Soit $z' \in U$, comme U est un domaine, $\exists \gamma : [0, 1] \rightarrow U$ allant de $z_* \in \Sigma$ à z' .

Soit $s \geq 0$ défini par $s = \sup \{S \geq 0 \mid f(\gamma(t)) = g(\gamma(t)) \forall t \in [0, S]\}$.

Si on a que $s = 1$, on a fini.

Si on avait $s < 1$, on sait que $s > 0$ car z_* est un point d'accumulation. $\gamma(s)$ est donc un point d'accumulation de Σ , donc

$$\exists r > 0 \text{ tel que } f - g$$

s'annule sur $D(\gamma(s), r)$ mais du coup on a que $f(\gamma(t)) = g(\gamma(t))$ pour $t \in [0, s]$. □

5 Fonctions exp, log, sin, cos, sinh, cosh

5.1 exp

Definition 7 (Exponentielle)

$\exp(z)$ aussi noté e^z est la fonction analytique définie par

$$\sum \frac{z^n}{n!}$$

La propriété fondamentale est qu'elle transforme l'addition en multiplication

$$\exp(z + w) = \exp(z) \exp(w)$$

En effet

$$\exp(z + w) = \sum_n \sum_{k=0}^n \frac{z^k w^{n-k}}{n!} \binom{n}{k}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \frac{z^k}{k!} \frac{w^{n-k}}{(n-k)!} \\
&= \sum_n \sum_k 1_{k \leq n} \frac{z^k}{k!} \frac{w^n}{n!} \\
&= \sum_k \sum_{n=k}^{\infty} \frac{w^{n-k}}{(n-k)!} \frac{z^k}{k!} \\
&= \exp(w) \exp(z)
\end{aligned}$$

L'échange est justifié car la série converge absolument.

Car $\exp > 0$, et $\exp' > 0$, \exp est strictement croissante sur $[0, \infty)$ et de même (car $\exp(-x) = \frac{1}{\exp(x)}$), elle envoie $(-\infty, 0]$ sur $(0, 1]$ bijectivement.

Pour $t \in \mathbb{R}$, on définit $\cos(t) = \operatorname{Re}(\exp(it))$ et $\sin(t) = \operatorname{Im}(\exp(it))$.

Sur $i\mathbb{R}$, on a $e^{\bar{it}} = e^{-it}$ (on regarde le développement en série), on en déduit

$$|e^{it}| = \sqrt{e^{it} e^{\bar{it}}} = \sqrt{1}$$

Et donc

$$\cos t = \frac{e^{it} + e^{-it}}{2} \text{ et } \sin t = \frac{e^{it} - e^{-it}}{2i}$$

On peut maintenant étendre ces définitions à tout $z \in \mathbb{C}$, en posant

$$\cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} \text{ et } \sin z = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$$

De même, on pose

$$\cosh(z) = \frac{e^z + e^{-z}}{2} \text{ et } \sinh z = \frac{e^z - e^{-z}}{2}$$

exp sur $i\mathbb{R}$

$$\mathbb{R} \rightarrow S^1 \quad t \mapsto e^{it} := \cos t + i \sin t$$

Comme on a le développement en série de \sin et \cos , on a

$$\sin' t = \cos t \text{ et } \cos'(t) = -\sin(t)$$

On sait donc qu'il existe un point t^* tel que $\cos(t^*) = 0$ (sinon \cos serait borné inférieurement, et \sin grandirait à l'infini).

\exp est périodique dans la direction imaginaire, montrons que 2π est la plus petite période possible, c'est-à-dire que $\forall t \in (0, 2\pi)$.

Pour cela, notons que sur $(0, \frac{\pi}{2})$ \cos et \sin sont strictement positifs.

Posons $t = 4s$, $s \in (0, \frac{\pi}{2})$

$$e^{it} = (e^{is})^4 = (u + iv)^4, u, v > 0$$

Donc

$$e^{it} = (u + iv)^4 = u^4 + v^4 - 6u^2v^2 + 4i(u^2 - v^2)$$

Si on veut $e^{it} = 0$, alors $u^2 - v^2 = 0 \Rightarrow u^2 = v^2$ donc $u^2 = v^2 = 1$, mais alors

$$u^4 + v^4 - 6u^2v^2 \neq 0$$

Contradiction

Lecture 5: ...

Thu 07 Oct

5.2 Logarithme

Moralement, on aimerait définir le logarithme comme "l'inverse" de l'exponentielle.

Dans les reel, c'est ainsi qu'on avait procede, mais la difference, c'était que la fonction exponentielle etait bijective.

Ici, on a que la fonction exponentielle $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}^*$ est surjective.

Du coup on aurait envie de définir le log sur \mathbb{C}^* , mais la fonction exponentielle n'est pas injective.

En fait, cela fait qu'on ne peut pas définir une fonction log qui soit continue sur \mathbb{C}^* . Si on essaie de poser

$$\begin{aligned}\log \exp(a + ib) &= a + ib \\ \log e^a e^{ib} &= \log |w| + i \arg w\end{aligned}$$

Comment choisir $\arg w$.

Definition 8

Une determination du logarithme est une fonction

$$L : U \rightarrow \mathbb{C}$$

ou U est un ouvert de \mathbb{C} tel que $e^{L(z)} = z$

Remarque

Sur $\mathbb{C} \setminus \mathbb{R}_-$, on a une determination de l'argument et du log : $\forall z \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}_-$, on prend $\arg w$ dans $(-\pi, \pi)$.

Proposition 16

*Il n'existe pas de determination continue du logarithme sur \mathbb{C}^**

Preuve

Tous les problemes viennent du fait qu'on fait un tour autour de l'origine.

Montrons qu'il n'en existe pas sur \mathbb{S}^1 .

Supposons qu'on ait une telle determination du log.

Posons $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ definie par $u^\theta = f(e^{i\theta})$. On a $u(\theta) - \theta = 2\pi i n\theta$ puisque

$$e^{u(\theta)} - \theta$$

Donc

$$\operatorname{Im} u(\theta) = \arg(e^{i\theta}) + 2\pi\mathbb{Z}$$

Cependant

$$u(\theta + 2\pi) = \theta + 2\pi + n = u(\theta) \quad \square$$

6 Fonctions holomorphes

On souhaite generaliser la notion de derivee aux fonctions complexes.

Une possibilite est de voir le plan \mathbb{R}^2 et en utilisant les notions de calcul differentiel sur \mathbb{R}^2

La notion d'holomorphic, c'est celle d'etre derivable au sens d'une variable complexe, et on verra que c'est une notion beaucoup plus forte que celle d'etre differentiable au sens de \mathbb{R}^2 , mais suffisamment naturelle pour etre verifiee dans beaucoup de cas

Definition 9 (Fonction Holomorphe)

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ ou U est un domaine de \mathbb{C} . On dit que f est holomorphe en $z \in U$ s'il existe une limite notee $f'(z) \in \mathbb{C}$ si la limite suivante existe

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(z+h) - f(z)}{h}$$

ou la limite est prise au sens complexe.

Formellement, cela veut dire $\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0$ tel que si $h \in D(0, \delta) \setminus \{0\}$ on a

$$\left| \frac{f(z+h) - f(z)}{h} - f'(z) \right| \leq \epsilon$$

Une autre maniere d'ecrire cela

$$f(z+h) = f(z) + f'(z)h + o(h)$$

ou $o(h)$ est telle que $|o(h)/h| \rightarrow 0$.

Comment comprendre ca en termes de derivees partielles en faisant l'identification $\mathbb{R}^2 \simeq \mathbb{C}$?

Dire que la fonction a un developpement de Taylor au 1er ordre pour une fonction $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$

$$\begin{pmatrix} f_1(x_1 + h_1, x_2 + h_2) \\ f_2(x_1 + h_1, x_2 + h_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial_1 f_1(x_1, x_2) & \partial_2 f_1(x_1, x_2) \\ \partial_1 f_2(x_1, x_2) & \partial_2 f_2(x_1, x_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + o(h_1, h_2)$$

Donc la matrice Df_{x_1, x_2} doit etre la matrice de la composition d'une rotation et d'une homothetie. Donc la contrainte d'etre differentiable au sens complexe est

equivalence a celle de demander d'être différentiable au sens de deux variables réelles et d'avoir que la jacobienne soit de la forme

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -B & A \end{pmatrix}$$

donc

$$\partial_1 \operatorname{Re} f = \partial_2 \operatorname{Im} f \text{ et } \partial_1 \operatorname{Im} f = -\partial_2 \operatorname{Re} f$$

Definition 10

On dit que f satisfait les équations de Cauchy-Riemann si

$$\partial_1 \operatorname{Re} f = \partial_2 \operatorname{Im} f \text{ et } \partial_1 \operatorname{Im} f = -\partial_2 \operatorname{Re} f$$

Proposition 17

f est holomorphe en $z = x_1 + ix_2 \iff f$ est dérivable au sens de \mathbb{R}^2 et satisfait les équations de Cauchy-Riemann.

Definition 11

On dit que f est holomorphe sur un ouvert $U \subset \mathbb{C}$ si elle est C^1 (au sens de \mathbb{R}^2) et qu'elle est holomorphe en tout point de U

6.1 Analytique \Rightarrow Holomorphe

Proposition 18

Si

$$f(z) = \sum a_k (z - z_*)^k$$

avec comme rayon de convergence ρ , alors f est holomorphe sur $D(z_*, \rho)$ et f' est donnée par la série entière

$$f'(z) = \sum k a_k (z - z_*)^{k-1}$$

qui a aussi comme rayon de convergence ρ .

Preuve

La série qui donne la dérivée converge avec rayon de convergence ρ . Maintenant, ce qu'il nous faut, c'est de montrer que

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(z+h) - f(z) - hf'(z)}{h} = 0$$

Supposons $z_* = 0$.

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k (z+h)^k - a_k z^k}{h} - hf'(z) \rightarrow 0$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k[(z+h)^k - z^k - khz^{k-1}]}{h} \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k[h[(z+h^{k-1}) + (z+h)^{k-2} + \dots + z^{k-1}]] - khz^{k-1}}{h} \end{aligned}$$

On va montrer que $\forall \epsilon > 0$, on peut rendre la queue de la serie plus petite que $\frac{\epsilon}{2}$ en allant assez loin dans la serie et qu'ensuite, pour le N fixe qui sortira, on pourra prendre h assez petit pour que les N premieres termes soient plus petits que $\frac{\epsilon}{2}$.

Notons que pour mh suffisamment petit (il existe $\delta_1 > 0$ tel que si $h \in D(0, \delta_1), z+h \in D(0, \rho)$) et du coup on aura la convergence de

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k[|z+h|^{k-1} + \dots + |z|^{k-1}] + k|z|^{k-1}]$$

vu que

$$[|z+h|^{k-1} + \dots] \leq k(|z| + |h|)^k \quad \square$$

Lecture 6: ...

Mon 11 Oct

Corollaire 19

Si f est analytique, f est infiniment derivable au sens complexe.

Preuve

f' est analytique, donc holomorphe, avec deriivee f'' , elle meme aussi analytique \square

Definition 12 (Operateurs de Wirtinger)

Pour $f : U \rightarrow \mathbb{C}$, C^1 vue comme $f : S \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{C}$.

On note

$$\partial_z f = \partial f = \frac{1}{2} (\partial_x - i\partial_y)$$

et

$$\partial_{\bar{z}} f = \frac{1}{2} (\partial_x + i\partial_y)$$

7 Integration Complexe

But : Trouver l'operation "inverse" de la derivation complexe.

Definition 13 (Chemin)

Un chemin de a a b dans $U \subset \mathbb{C}$ est une fonction continue $\gamma : [0, 1] \rightarrow U$ C^1 par morceaux, avec deriivee bornee, avec $\gamma(0) = a, \gamma(1) = b$

Definition 14

Soit $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ continue et $\gamma : [0, 1] \rightarrow U$ un chemin.

On définit

$$\int_{\gamma} f(z)dz = \int_0^1 f(\gamma(t))\gamma'(t)dt$$

Remarque

L'intégrale complexe $\int_{\gamma} f(z)dz$ dépend en général du chemin de γ mais pas de sa paramétrisation.

Si $\phi : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ est bijective, croissante, dérivable sur $(0, 1)$ et $\tilde{\gamma} = \gamma \circ \phi$ alors

$$\int_{\gamma} f(z)dz = \int_{\tilde{\gamma}} f(z)dz$$

Preuve

Formule de changement de variable.

En supposant γ C^1 (pas par morceaux)

$$\begin{aligned} \int_0^1 f(\gamma(t))\gamma'(t)dt &= \int_0^1 f(\gamma(\phi(s)))\gamma'(\phi(s))\phi'(s)ds \\ &= \int_0^1 f(\tilde{\gamma})\tilde{\gamma}'(s)ds \end{aligned}$$

□

Definition 15 (Longueur)

Pour γ un chemin, sa longueur est donnée par

$$l(\gamma) = \int_0^1 |\gamma'(t)|dt$$

Definition 16 (Lacet)

Si $\gamma(0) = \gamma(1)$, γ est un lacet.

Propriété de l'intégration complexe

— Si $\gamma : [0, 1] \rightarrow U$ et $\ominus\gamma : [0, 1] \rightarrow U$ est défini par $\ominus\gamma(s) = \gamma(1 - s)$

$$\int_{\ominus\gamma} f(z)dz = - \int_{\gamma} f(z)dz$$

— Si $\gamma, \tilde{\gamma} : [0, 1] \rightarrow U$ avec $\gamma(1) = \tilde{\gamma}(0)$, alors

$$\gamma \oplus \tilde{\gamma} : [0, 1] \rightarrow U$$

est défini par

$$\gamma \oplus \tilde{\gamma}(s) = \begin{cases} \gamma(2s) & \text{si } s \leq \frac{1}{2} \\ \tilde{\gamma}(2s - 1) & \text{si } s \geq \frac{1}{2} \end{cases}$$

et on a

$$\int_{\gamma \oplus \tilde{\gamma}} f(z)dz = \int_{\gamma} f(z)dz + \int_{\tilde{\gamma}} f(z)dz$$

— Si $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ est holomorphe

$$\int_{\gamma} f'(\zeta) d\zeta = f(\gamma(1)) - f(\gamma(0))$$

Lecture 7: Integration Complexe

Thu 14 Oct

Preuve

Considerons la fonction

$$t \mapsto f'(\gamma(t))\gamma'(t)$$

est la dérivée (au sens réel) de

$$t \mapsto f(\gamma(t))$$

et on peut donc y appliquer le théorème fondamental du CDI. \square

Proposition 21 (Integration par parties)

Soient $f, g : U \rightarrow \mathbb{C}$ holomorphes et $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ un chemin, alors

$$\int_{\gamma} f'g = f(\gamma(x))g(\gamma(x))\Big|_0^1 - \int_{\gamma} fg'$$

Preuve

$$(fg)' = f'g + fg'$$

et on intègre. \square

Proposition 22

Si $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ continue, $\gamma : [0, 1] \rightarrow U$, alors

$$\int_{\gamma} f(z) dz \leq l(\gamma) \max_{\gamma} |f(z)|$$

Preuve

Suit de

$$\int_0^1 g(t) dt \leq \max g$$

pour les intégrales réelles. \square

8 Holomorphie et déformation de Contours

But : Savoir dans quelle mesure

$$\int_{\gamma} f(z) dz$$

depend de γ . L'astuce est de déformer progressivement le chemin.

Si $\gamma, \tilde{\gamma} : [0, 1] \rightarrow U$ avec $\gamma(1) = \tilde{\gamma}(1)$ et $\gamma(0) = \tilde{\gamma}(0)$, on a que $\gamma \ominus \tilde{\gamma}$ est un lacet.

8.1 Integration sur un petit carre

Si $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ est C^1 , avec $\partial Q(z, \epsilon) \subset U$.

Calculons

$$\oint_{\partial Q(z, \epsilon)} f(z) dz = \left(\int_b + \int_d + \int_g + \int_h \right) (f(z) dz)$$

On va supposer $z = 0$

$$\begin{aligned} b(t) &= -\frac{\epsilon}{2} + \left(t - \frac{1}{2}\right)\epsilon \\ d(t) &= \frac{\epsilon}{2} + i\left(t - \frac{1}{2}\right)\epsilon \\ h(t) &= \frac{i\epsilon}{2} + \left(t - \frac{1}{2}\right)\epsilon \\ g(t) &= \frac{\epsilon}{2} + \left(t - \frac{1}{2}\right)\epsilon \end{aligned}$$

Donc

$$\int_b f(z) dz = \int_0^1 f\left(\frac{\epsilon i}{2} + \left(t - \frac{1}{2}\right)\epsilon\right) \epsilon dt$$

et

$$\int_d f(z) dz = \int_0^1 f\left(\frac{\epsilon}{2} + i\left(t - \frac{1}{2}\right)\epsilon\right) \epsilon dt$$

Comme f est C^1

$$f\left(-\frac{i\epsilon}{2} + \left(t - \frac{1}{2}\right)\epsilon\right) = f(0) - \frac{\epsilon}{2} \partial_x f(0) + \left(t - \frac{1}{2}\right)\epsilon \partial_y f(0) + o(\epsilon)$$

Si on somme les 4 termes multiplie par leur facteur, on obtient $\epsilon^2(i\partial_1 f(0) - \partial_2 f(0)) + o(\epsilon^2)$.

Si on integre sur un carre de cote 1, le nombre de carres est d'ordre $\frac{1}{\epsilon^2}$, si f est holomorphe, la somme sur ces contributions tend vers 0.

8.2 Deformations

On a envie de montrer que pour une deformation locale d'un contour qui ne change pas les extremités, l'integrale de contour de f holomorphe ne change pas.

Definition 17 (Homotopie)

Un lacet γ est dit homotope a un autre lacet $\tilde{\gamma}$ s'il existe une fonction

$$F : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow U$$

tel que $f(\cdot, 0) = \gamma, F(\cdot, 1) = \tilde{\gamma}$

et $\forall s \in [0, 1], F(\cdot, s)$ est un lacet.

Definition 18 (Contractable)

Un lacet est contractible s'il est homotope au lacet trivial.

Definition 19

Un ouvert est dit simplement connexe si tout lacet dans U est contractible, et il est dit étoile par rapport à $z^ \in U$ si $\forall w \in U$ le segment $[z^*, w] \in U$*