UNIVERSITÉ PAUL SABATIER
L3 PARCOURS SPÉCIAL, ANALYSE COMPLEXE 1, 2019-20
TD 3 - FORMULE DES RÉSIDUS, PRINCIPE DU MAXIMUM

PASCAL J. THOMAS

Les exercices marqués d'une astérisque (*) ne sont pas essentiels, ou destinés à ceux qui veulent approfondir la théorie.

5. Calculs d'intégrales

5.1. a) Calculer l'intégrale définie $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{1+x^4}$ par la méthode des résidus.

b) Calculer l'intégrale définie $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^2dx}{1+x^4}$ par la méthode des résidus.

c) Calculer l'intégrale définie $\int_0^{+\infty} \frac{\cos x-1}{x^2}dx$ par la méthode des résidus. On utilisera la parité de la fonction.

5.2. On considère la fonction $f(z) = e^{-z^2}$. Sur quel domaine est-elle analytique ? Pour tout $\xi > 0$, on considère le contour fermé Γ_A composé des quatre segments orientés suivants :

$$\begin{aligned}
\gamma_1(x) &:= x, \quad -A \leq x \leq A,\\
\gamma_2(x) &:= A+iy, \quad 0 \leq y \leq \xi,\\
\gamma_3(x) &:= -x+i\xi, \quad -A \leq x \leq A,\\
\gamma_4(x) &:= -A+i(\xi-y), \quad 0 \leq y \leq \xi.
\end{aligned}$$

Montrer que $\lim_{A\to+\infty} \int_{\gamma_2} f(z)dz = \lim_{A\to+\infty} \int_{\gamma_4} f(z)dz = 0$.

On rappelle que $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\pi x^2}dx = 1$. Montrer en utilisant le théorème de Cauchy appliqué à la fonction f sur le contour Γ_A et en faisant $A \to +\infty$ que

$$e^{\pi\xi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\pi x^2-2\pi i x\xi}dx = 1.$$

On définit la transformée de Fourier par $\mathcal{F}(g)(\xi) := \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i x\xi}g(x)dx$. Calculer la transformée de Fourier de la fonction $g(x) = e^{-\pi x^2}$.

5.3. a) Calculer la transformée de Fourier de $g(x) := \frac{1}{1+x^2}$ par la méthode des résidus. Vous devrez distinguer les cas $\xi \geq 0$ et $\xi < 0$.

*b) Nous allons calculer la transformée de Fourier de la fonction "sinus cardinal", $g(x) = \frac{\sin x}{x}$. Une conséquence de votre cours d'analyse hilbertienne est qu'on peut écrire ici $\mathcal{F}(g)(\xi) = \lim_{A\to+\infty} \int_{-A}^{A} e^{-2\pi i x\xi}g(x)dx$.

Montrez que

$$\int_{-A}^{A} e^{-2\pi i x\xi} g(x)dx = \lim_{\varepsilon\to 0^+} \left(\int_{-A}^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^{A} e^{-2\pi i x\xi} g(x)dx \right)$$
$$= \lim_{\varepsilon\to 0^+} \left(\int_{-A}^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^{A} e^{-2\pi i x\xi} \frac{e^{ix}}{2ix} dx \right) - \lim_{\varepsilon\to 0^+} \left(\int_{-A}^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^{A} e^{-2\pi i x\xi} \frac{e^{-ix}}{2ix} dx \right)$$

(une partie de la question est de montrer que ces deux dernières limites existent !)

Calculer les limites quand $\varepsilon \to 0$ et $A \to +\infty$ de ces dernières intégrales en utilisant la formule des Résidus et le Lemme de Jordan. Vous serez amenés à distinguer les cas $\xi < -\frac{1}{2\pi}$, $-\frac{1}{2\pi} < \xi < \frac{1}{2\pi}$, $\frac{1}{2\pi} < \xi$.

Quelle célèbre formule d'inversion aurait pu vous épargner ce fastidieux travail ?

5.4. (Extrait du contrôle terminal d'Analyse Complexe 1, octobre 2018)

Le but de cet exercice est de calculer par la méthode des résidus

$$\int_0^{+\infty} \frac{dt}{(1+t^2)\sqrt{t}}.$$

a) Expliquer rapidement pourquoi $\int_0^1 \frac{dt}{(1+t^2)\sqrt{t}}$ et $\int_1^{+\infty} \frac{dt}{(1+t^2)\sqrt{t}}$ sont des intégrales convergentes.

b) Pour $z \in \mathbb{C} \setminus i\mathbb{R}_-$ (le plan complexe privé du demi-axe imaginaire négatif), on pose $\operatorname{Log} z := \ln|z| + i \arg z$, où $\arg z \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}[$ est une détermination continue de l'argument de z.

Montrer que $s(z) := \exp(\frac{1}{2} \operatorname{Log} z)$ vérifie $s(z)^2 = z$ et est continue sur $\mathbb{C} \setminus i\mathbb{R}_-$. En déduire que s est $\mathbb{C}$-dérivable sur $\mathbb{C} \setminus i\mathbb{R}_-$. On posera $z^{1/2} := s(z)$.

Indication : $b - a = \frac{b^2-a^2}{b+a}$.

c) On considère le chemin fermé γ qui dépend de deux paramètres ε, R, avec $0 < \varepsilon < 1 < R$, composé de la concaténation, dans cet ordre, des chemins suivants :

(1) $\gamma_1(t) := t$, $\varepsilon \le t \le R$;
(2) $\gamma_2(t) := Re^{it}$, $0 \le t \le \pi$;
(3) $\gamma_3(t) := t$, $-R \le t \le -\varepsilon$;
(4) $\gamma_4(t) := \varepsilon e^{i(\pi - t)}$, $0 \le t \le \pi$.

On pose $f(z) := \frac{1}{z^{1/2}(1+z^2)}$ pour $z \in \mathbb{C} \setminus (i\mathbb{R}_- \cup \{i\})$.

Calculer $\int_\gamma f(\zeta)d\zeta$ par la méthode des résidus.

d) Montrer que $\lim_{\varepsilon\to 0} \int_{\gamma_4} f(\zeta)d\zeta = 0$.

e) Montrer que $\lim_{R\to+\infty} \int_{\gamma_2} f(\zeta)d\zeta = 0$.

f) Calculer $\lim_{R\to+\infty, \varepsilon\to 0} \int_{\gamma_3} f(\zeta)d\zeta$.

g) Déduire de ce qui précède la valeur de $\int_0^{+\infty} \frac{dt}{(1+t^2)\sqrt{t}}$.

5.5. a) Calculer l'intégrale définie $\int_0^{+\infty} \frac{x^{1/3}}{1+x^2} dx$ par la méthode des résidus. On utilisera, comme dans le cours, un contour évitant l'origine contenant des portions des cercles centrés en 0 et de rayons ε et R, et des demi-droites $x > 0, y = i\delta$ et $x > 0, y = -i\delta$. On fera $\delta \to 0$, $\varepsilon \to 0$ et $R \to +\infty$, dans cet ordre.

b) Montrer par la même méthode que pour $0 < a < 1$,

$$\int_0^{+\infty} \frac{x^{-a}}{1+x} dx = \frac{\pi}{\sin(\pi a)}.$$

Vous pouvez retrouver cette formule pour $a = \frac{1}{2}$ par des moyens élémentaires.

5.6. a) Calculer l'intégrale définie

$$\int_0^{\infty} \frac{dx}{1+x^n}$$

en utilisant le contour constitué du segment de droite de 0 à $R > 1$, puis de l'arc de cercle centré en 0 qui va de R à $Re^{2\pi i/n}$, puis du segment qui va de $Re^{2\pi i/n}$ à 0.

*b) Calculer l'intégrale définie

$$\int_0^{\infty} \frac{x^{\alpha} dx}{1+x^n}$$

en utilisant le contour constitué du segment de droite de ε à R, puis de l'arc de cercle centré en 0 qui va de R à $Re^{2\pi i/n}$, puis du segment qui va de $Re^{2\pi i/n}$ à $\varepsilon e^{2\pi i/n}$, puis de l'arc de cercle centré en 0 qui va de $\varepsilon e^{2\pi i/n}$ à ε. (Ici $0 < \varepsilon < 1 < R$).

5.7. (extrait de l'examen terminal d'Analyse Complexe 1, Novembre 2017)

a) Résoudre l'équation $z^2 + z + 1 = 0$ dans $\mathbb{C}$. Une façon rapide est de remarquer que $z^3 - 1 = (z-1)(z^2 + z + 1)$.

b) On pose $f_0(z) := \frac{1}{z^2+z+1}$. Calculer $\operatorname{Res}(f_0, e^{2\pi i/3})$.

c) Pour $R > 1$, on considère le chemin (courbe $\mathcal{C}^1$ par morceaux) Γ obtenu par la concaténation du segment $\gamma_1 := [-R, R]$, parcouru dans le sens croissant, et du demi cercle $\gamma_2 := \{Re^{i\theta} : 0 \le \theta \le \pi\}$, parcouru dans le sens trigonométrique.

Calculer $\int_\Gamma f_0(z)dz$.

d) Montrer que $\lim_{R\to\infty} \int_{\gamma_2} f_0(z)dz = 0$ et en déduire la valeur de $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{x^2+x+1}$.

e) On pose $g(z) := \frac{1}{(z^2+z+1)^2}$. Calculer $\operatorname{Res}(g, e^{2\pi i/3})$.

f) En utilisant le même chemin Γ, calculer $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2+x+1)^2}$ par la méthode des résidus.

g) Pour tout $\xi \in \mathbb{R}$, on pose $f_\xi(z) := e^{-2\pi i z\xi} f_0(z)$.

Pour $\xi < 0$, montrer que $\lim_{R\to\infty} \int_{\gamma_2} f_\xi(z)dz = 0$ et calculer $\int_{-\infty}^{+\infty} f_\xi(x)dx$ par la méthode des résidus en utilisant toujours le chemin Γ.

h) Pour $\xi > 0$, calculer $\int_{-\infty}^{+\infty} f_\xi(x)dx$ par la méthode des résidus en utilisant le chemin Γ_1 obtenu par la concaténation du segment $\gamma_3 := [-R, R]$, parcouru dans le sens décroissant, et du demi cercle $\gamma_4 := \{Re^{i\theta} : -\pi \le \theta \le 0\}$, parcouru dans le sens trigonométrique.

On rappelle que la transformée de Fourier d'une fonction g absolument intégrable sur $\mathbb{R}$ est donnée par

$$\hat{g}(\xi) := \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i x\xi} g(x)dx.$$

Si on pose $f(x) = f_0(x)$, pour $x \in \mathbb{R}$, en déduire que

$$\hat{f}(\xi) = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} e^{\pi i \xi} e^{-\pi|\xi|\sqrt{3}}.$$

i) Retrouver le résultat de la question f) par le théorème de Plancherel.

6. Principe du Module Maximum

6.1. Montrer le Lemme de Schwarz : si f est analytique sur le disque unité $\mathbb{D}$ et continue jusqu'au bord, et que $|f(z)| \leq 1$ pour tout $z \in \mathbb{D}$, et que $f(0) = 0$, alors $|f(z)| \leq |z|$ pour tout $z \in \mathbb{D} \setminus \{0\}$ et $|f'(0)| \leq 1$. Si de plus une de ces inégalités est une égalité (pour une seule valeur de z), alors il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $f(z) = e^{i\theta} z$.

6.2. Soit f analytique sur un ouvert Ω. Sous quelles conditions $|f|$ peut-elle admettre un *minimum* local?

Indication : considérer la fonction $1/f$.

On suppose que f est analytique sur un ouvert connexe borné Ω et continue jusqu'au bord. Montrer que soit f s'annule en au moins un point de Ω, soit $|f|$ atteint son minimum en un point de $\partial\Omega$.

6.3. a) Soit f une fonction holomorphe sur un ouvert connexe Ω. Soit Ω' un ouvert non vide, relativement compact dans Ω. On suppose que $|f|$ est constant sur la frontière de Ω'. Montrer que f est constante sur Ω ou s'annule au moins une fois dans Ω'. (Indication : considérer la fonction $1/f$).

*b) Que se passe-t-il si on suppose plutôt que f prend des valeurs réelles sur la frontière de Ω'? (Indication : considérer $\frac{f-yi}{f+yi}$, pour tout $y \in \mathbb{R}$).

6.4. On suppose que f est analytique dans un voisinage du disque fermé $\overline{D}(0,R)$, que $f(0) = 1$ et que $|f(z)| \leq M$ pour tout $z \in \overline{D}(0,R)$. Soient $a_1, \ldots, a_N$ les zéros de f comptés avec leur multiplicité (un zéro double compte deux fois, etc) dans le disque $\overline{D}(0,R/3)$. Montrer que $N \leq \frac{1}{\ln 2} \ln M$.

Indication : appliquer le principe du maximum au point 0 à la fonction

$$g(z) := \frac{f(z)}{\prod_{k=1}^{N} \left(1 - \frac{z}{a_k}\right)}.$$