

# ANALYSE COMPLEXE, PARCOURS SPÉCIAL L3

## NOTES DE COURS

PASCAL THOMAS

Pré-requis : analyse élémentaire dans  $\mathbb{R}$ , convergence uniforme, séries entières, séries de Fourier, calcul différentiel dans le plan (matrice jacobienne, arcs paramétrés, intégrales de fonctions de deux variables réelles). Dérivation des intégrales dépendant d'un paramètre.

On écrira en général  $z = x + iy$  où  $x$  et  $y$  sont réels.

### 1. QUELQUES RAPPELS

Une série (numérique) est une suite définie par  $U_n := \sum_{k=0}^n u_k$ , où  $(u_n)_n$  est une suite à valeurs réelles ou complexes. On la note  $\sum u_n$ . Le nombre  $(U_n)$  est appelé somme partielle. On dit que la série est convergente si  $\lim_n U_n \in \mathbb{C}$ , et dans ce cas on note  $\lim_n U_n = \sum_{k=0}^{\infty} u_k$  (appelée somme de la série). On dit que la série est absolument convergente si  $\sum |u_n|$  est convergente. Toute série absolument convergente est convergente, mais la réciproque est fautive.

Quand on étudie une série à termes positifs ou nuls, i.e.  $u_k \geq 0$  pour tout  $k$ , alors la suite  $(U_n)$  est croissante et la série converge si et seulement si la suite  $(U_n)_n$  est majorée. On écrit parfois  $\sum_{k=0}^{\infty} u_k < \infty$ . **Cette notation est interdite dans le cas où les termes ne sont pas positifs.**

**Théorème 1.** (Théorème de Fubini) Soit  $(u_{j,k})_{j \geq 0, k \geq 0}$  une suite double à valeurs complexes. Si on a

$$\sum_{j=0}^{\infty} \left( \sum_{k=0}^{\infty} |u_{j,k}| \right) \text{ convergente,}$$

alors toutes les séries ci-dessous convergent et on a l'égalité :

$$\sum_{j=0}^{\infty} \left( \sum_{k=0}^{\infty} u_{j,k} \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \left( \sum_{j=0}^{\infty} u_{j,k} \right).$$

Nous admettrons ce théorème, qui peut être démontré directement, ou à partir de la théorie de l'intégration de Lebesgue.

**Définition 2.** Etant données deux séries  $\sum u_n$  et  $\sum v_n$ , le Produit de Cauchy des deux séries est la série  $\sum w_n$  dont le terme général est défini par

$$w_n := \sum_{k=0}^n u_k v_{n-k}.$$

Cette définition peut surprendre, mais elle est motivée par le cas où on a des séries entières (cf. section suivante) avec  $u_n = a_n z^n$ ,  $v_n = b_n z^n$  : le terme  $w_n$  est ce qui sort quand on regroupe les termes de même degré dans le produit (formel) de  $\sum_{n=0}^{\infty} u_n$  et  $\sum_{n=0}^{\infty} v_n$ .

**Théorème 3.** (Théorème de Mertens) Si la série  $\sum u_n$  est convergente et la série  $\sum v_n$  est absolument convergente, alors la série produit est convergente et on a

$$\sum_{n=0}^{\infty} w_n = \left( \sum_{n=0}^{\infty} u_n \right) \left( \sum_{n=0}^{\infty} v_n \right).$$

Soient  $U_n, V_n, W_n$  les sommes partielles des trois séries considérées. Nous savons que  $(\sum_{n=0}^{\infty} u_n)(\sum_{n=0}^{\infty} v_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} U_n V_n$  (produit de deux suites convergentes). Nous allons montrer que, étant donné un nombre  $\delta > 0$  (petit), on peut trouver un indice  $N$  tel que pour  $n \geq N$ ,  $|W_{2n} - U_n V_n| < \delta$ .

Puisqu'une suite convergente est bornée, il existe une constante  $M > 0$  telle que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$|u_n| \leq M, \quad |U_n| \leq M, \quad \sum_{k=0}^n |v_k| \leq M.$$

D'autre part, le critère de Cauchy implique que si on se donne  $\varepsilon > 0$ , alors il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \geq N$ , et pour tout  $p \in \mathbb{N}$ ,

$$|U_{n+p} - U_n| \leq \varepsilon, \quad \sum_{k=n}^{n+p} |v_k| \leq \varepsilon.$$

Alors

$$\begin{aligned} W_{2n} - U_n V_n &= \sum_{0 \leq k \leq n-1, n+1 \leq j \leq 2n-k} u_j v_k + \sum_{n+1 \leq k \leq 2n, 0 \leq j \leq 2n-k} u_j v_k \\ &= \sum_{0 \leq k \leq n-1} v_k (U_{2n-k} - U_n) + \sum_{n+1 \leq k \leq 2n} v_k U_{2n-k}. \end{aligned}$$

Donc

$$|W_{2n} - U_n V_n| \leq \varepsilon \sum_{0 \leq k \leq n-1} |v_k| + M \sum_{n+1 \leq k \leq 2n} |v_k| \leq \varepsilon M + M \varepsilon,$$

que l'on peut majorer par  $\delta$  en choisissant  $\varepsilon$  assez petit.

Il reste à voir que  $w_{2n+1} = W_{2n+1} - W_{2n}$  tend vers zéro. Or

$$|w_{2n+1}| \leq \left| \sum_{k=0}^n v_k u_{2n+1-k} \right| + \left| \sum_{k=0}^n u_k v_{2n+1-k} \right| \leq \varepsilon \sum_{k=0}^n |v_k| + M \sum_{k=0}^n |v_{2n+1-k}| \leq 2M\varepsilon.$$

□

**Définition 4.** Etant donnée une suite réelle  $(u_n)_n$ , on appelle limite supérieure de la suite :

$$\limsup_n u_n := \lim_{n \rightarrow \infty} (\sup \{u_k : k \geq n\})$$

Cette limite existe toujours, éventuellement avec une valeur infinie, car la suite dont on prend la limite est monotone décroissante. On pose aussi  $\liminf_n u_n := -\limsup_n (-u_n)$ . Si la suite converge, alors  $\lim_n u_n = \limsup_n u_n = \liminf_n u_n$ .

On peut écrire (exercice) une autre caractérisation avec des " $\varepsilon$ ", qui est utile dans de nombreuses applications :

On a  $s = \limsup_n u_n$  si et seulement si les deux propriétés suivantes sont vérifiées :

- (1) Pour tout  $\varepsilon > 0$ , il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que si  $n \geq N$ , alors  $u_n \leq s + \varepsilon$ .
- (2) Pour tout  $\varepsilon > 0$  et pour tout  $N \in \mathbb{N}$ , il existe  $n \geq N$  tel que  $u_n \geq s - \varepsilon$ .

Quand  $s = +\infty$ , vous devez remplacer  $s + \varepsilon$  par  $+\infty$  (et la première clause devient vide) et remplacer  $s - \varepsilon$  par n'importe quel nombre fini. En d'autres termes,  $\limsup_n u_n = +\infty$  si et seulement si la suite n'est pas majorée. L'analogie pour  $s = -\infty$  est laissé au lecteur.

## 2. SÉRIES ENTIÈRES ET ANALYTICITÉ

### 2.1. Séries entières.

**Définition 5.** Une série entière est une série de fonctions de la forme  $\sum_k a_k z^k$ , avec  $a_k, z \in \mathbb{C}$ .

**Théorème 6.** Il existe  $R \in [0, +\infty]$ , appelé rayon de convergence, tel que pour tout  $r < R$ , la série est normalement convergente sur  $\overline{D}(0, r)$ , et pour tout  $z$  tel que  $|z| > R$ ,  $(a_k z^k)$  est non bornée.

De plus,  $R$  est donné par la formule d'Hadamard :

$$R = \frac{1}{\limsup_{k \rightarrow \infty} |a_k|^{1/k}}.$$

(Cette formule s'entend avec la convention  $1/+\infty = 0$  et  $1/0 = +\infty$ ).

Le disque ouvert  $D(0, R)$  est appelé disque de convergence de la série entière.

### 2.2. Fonctions analytiques.

**Définition 7.** Soit  $\Omega \subset \mathbb{C}$  un ouvert. Une fonction  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$  est dite analytique si pour tout  $a \in \Omega$ , il existe une série entière  $\sum_k a_k z^k$  de rayon de convergence  $R > 0$  et  $r \leq R$  tel que  $D(a, r) \subset \Omega$ , et pour tout  $z \in D(a, r)$ ,

$$(1) \quad f(z) = \sum_k a_k (z - a)^k.$$

Exemple : tout polynôme complexe est analytique, car

$$\sum_{k=0}^n a_k z^k = \sum_{k=0}^n a_k (a + (z - a))^k,$$

et il suffit de développer pour obtenir une série entière autour de  $a$ , qui n'a bien entendu qu'un nombre fini de termes non-nuls.

**Proposition 8.** La somme d'une série entière  $f(z) = \sum_k a_k z^k$  est analytique sur son disque de convergence  $D(0, R)$ .

*Démonstration.* Soit  $a \in D(0, R)$ . Prenons  $r < R - |a|$ . Posons  $h = z - a$  pour simplifier la notation, donc  $z = z - a + a = a + h$ . Alors, par convergence normale sur  $\overline{D}(0, |a| + r)$ ,

$$\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^k |a_k| C_k^j |a|^j |h|^{k-j} = \sum_{k=0}^{\infty} |a_k| |z|^k < \infty,$$

donc on peut appliquer le théorème de Fubini et

$$\begin{aligned}
 (2) \quad \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k &= \sum_{k=0}^{\infty} a_k (a+h)^k = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^k a_k C_k^j h^j a^{k-j} \\
 &= \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=j}^{\infty} a_k C_k^j h^j a^{k-j} = \sum_{j=0}^{\infty} \left( \sum_{n=0}^{\infty} a_{j+n} C_{j+n}^j a^n \right) h^j.
 \end{aligned}$$

□

Propriétés : les sommes et produits de fonctions analytiques sont analytiques (pour les sommes, c'est facile, pour les produits, c'est une conséquence du théorème de Mertens — dans le cas facile où les deux séries facteurs sont absolument convergentes).

Les compositions, et applications réciproques, le sont aussi (admis pour le moment). Les quotients aussi, sur la partie du domaine de  $f$  où le dénominateur ne s'annule pas ; c'est une conséquence de la propriété sur les compositions et du fait que

$$\begin{aligned}
 f(z)^{-1} &= [f(a) + (f(z) - f(a))]^{-1} = f(a)^{-1} \left( 1 - \frac{f(a) - f(z)}{f(a)} \right)^{-1}, \\
 \text{et } \frac{1}{1-z} &= \sum_{k=0}^{\infty} z^k.
 \end{aligned}$$

### 2.3. Fonctions holomorphes ( $\mathbb{C}$ -différentiables).

**Définition 9.** Soit  $\Omega \subset \mathbb{C}$  un ouvert. Une fonction  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$  est  $\mathbb{C}$ -dérivable en  $a \in \Omega$  si et seulement si la limite suivante existe :

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} =: f'(a) \in \mathbb{C},$$

où  $h$  est un nombre complexe et tend vers 0 au sens de la topologie de  $\mathbb{C} \cong \mathbb{R}^2$ .

Le nombre  $f'(a)$  est parfois aussi noté  $\frac{df}{dz}(a)$ .

Propriétés : les sommes, produits et compositions de fonctions  $\mathbb{C}$ -dérivables le sont aussi, avec les mêmes démonstrations et les mêmes formules que dans le cas réel (la seule différence est que la limite est prise sur des voisinages dans le plan complexe, de petits disques, qui sont plus grands que les petits intervalles utilisés sur  $\mathbb{R}$ ).

La  $\mathbb{C}$ -dérivabilité en  $a$  est équivalente, puisque nous n'avons qu'une variable, au fait que  $f$  soit  $\mathbb{C}$ -différentiable au point  $a$  : il existe une fonction  $\varepsilon(h)$  telle que  $\lim_{h \rightarrow 0} \varepsilon(h) = 0$  et une application  $\mathbb{C}$ -linéaire  $L : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  telles que

$$f(a+h) = f(a) + L(h) + h\varepsilon(h).$$

En effet, il suffit de prendre  $L(h) = f'(a)h$  et  $\varepsilon(h) = \frac{f(a+h) - f(a)}{h} - f'(a)$ .

Une fonction  $f$  qui est  $\mathbb{C}$ -dérivable en tout point  $a \in \Omega$  est dite *holomorphe* sur  $\Omega$ .

Il est important de bien distinguer le fait d'être  $\mathbb{C}$ -dérivable et  $\mathbb{R}$ -différentiable par rapport aux variables  $x$  et  $y$ , à savoir qu'il existe une fonction  $\varepsilon(h)$  telle que  $\lim_{h \rightarrow 0} \varepsilon(h) = 0$  et une application  $\mathbb{R}$ -linéaire  $L : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  telles que

$$f(a+h) = f(a) + L(h) + h\varepsilon(h).$$

Une application  $\mathbb{R}$ -linéaire de  $\mathbb{C}$  dans  $\mathbb{C}$  sera de la forme  $L(x+iy) = bx + cy$ , avec  $b$  et  $c \in \mathbb{C}$ . Une application  $\mathbb{C}$ -linéaire de  $\mathbb{C}$  dans  $\mathbb{C}$  sera de la forme  $L(x+iy) = b(x+iy)$ , avec  $b \in \mathbb{C}$ . Autrement dit, il y a une restriction supplémentaire :  $c = ib$ .

Exemple : la fonction  $z \mapsto \bar{z}$  est  $\mathbb{R}$ -différentiable (elle est même  $\mathbb{R}$ -linéaire), alors qu'elle n'est nulle part  $\mathbb{C}$ -dérivable : on voit facilement que le rapport  $\bar{h}/h$  n'admet pas de limite en 0.

Si une fonction  $f$  est  $\mathbb{R}$ -différentiable en  $a$ , ses dérivées partielles existent en  $a$  et si  $h = h_1 + ih_2$ ,  $h_1, h_2 \in \mathbb{R}$ ,

$$L(h) = \frac{\partial f}{\partial x}(a)h_1 + \frac{\partial f}{\partial y}(a)h_2$$

(attention, ici les valeurs de  $f$  et ses dérivées partielles sont en général complexes ; si cela vous gêne, vous pouvez considérer les parties réelle et imaginaire de  $f$  et dériver séparément — cela revient au même).

On démontre en utilisant les considérations ci-dessus que :

**Proposition 10.** *Une fonction  $f$  est  $\mathbb{C}$ -dérivable en  $a$  si et seulement si  $f$  est  $\mathbb{R}$ -différentiable en  $a$  et ses dérivées partielles  $y$  vérifient les équations de Cauchy-Riemann :*

$$\begin{aligned} \frac{\partial \operatorname{Im} f}{\partial x}(a) &= -\frac{\partial \operatorname{Re} f}{\partial y}(a), \\ \frac{\partial \operatorname{Im} f}{\partial y}(a) &= \frac{\partial \operatorname{Re} f}{\partial x}(a). \end{aligned}$$

**2.4. Relation entre analyticité et holomorphicité.** C'est une conséquence des théorèmes sur les suites de fonctions dérivables qu'une fonction analytique doit être indéfiniment différentiable ( $\mathcal{C}^\infty$ ) sur son domaine, en tant que fonction des deux variables réelles  $x$  et  $y$ .

Mais on a beaucoup mieux.

**Théorème 11.** *Une fonction analytique sur un ouvert  $\Omega$  est  $\mathbb{C}$ -dérivable à tous les ordres, et les coefficients dans (1) sont donnés par  $a_k = \frac{1}{k!} f^{(k)}(a)$ .*

*Démonstration.* Dans un disque autour de  $a$ , on sait que

$$\begin{aligned} f(z) &= \sum_{k=0}^{\infty} a_k (z-a)^k = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k (z-a)^k = a_0 + (z-a) \sum_{k=1}^{\infty} a_k (z-a)^{k-1} \\ &= a_0 + a_1(z-a) + (z-a) \sum_{k=2}^{\infty} a_k (z-a)^{k-1}, \end{aligned}$$

ce qui donne la forme requise car  $a_0 = f(a)$  et la somme qui reste tend vers 0 quand  $z$  tend vers  $a$  (par convergence uniforme). On voit aussi que  $a_1 = f'(a)$ .

Mais nous voulons connaître la valeur de  $f'$  dans tout un disque autour de  $a$ . Soit  $z_0 \in D(a, r)$ . On tire de (2) que

$$f(z_0 + h) - f(z_0) = \sum_{j=1}^{\infty} \left( \sum_{n=0}^{\infty} a_{j+n} C_{j+n}^j z_0^n \right) h^j = h \sum_{n=0}^{\infty} a_{n+1} (n+1) z_0^n + O(h^2),$$

donc en changeant d'indice  $f'(z_0) = \sum_{n=0}^{\infty} n a_n z_0^{n-1}$ , comme on s'y attendait. En itérant cette formule, on trouve la deuxième partie du théorème.  $\square$

Remarque : les coefficients du développement en série entière de  $f$  sont les mêmes que ceux qui apparaissent dans la formule de Taylor ; on pouvait le déduire du fait qu'on peut restreindre le développement de  $f$  à une droite horizontale et appliquer

l'unicité des coefficients dans la formule de Taylor. Le théorème ci-dessus montre aussi que le développement en série entière autour d'un point donné est unique.

C'est un fait important, et non-trivial, que la réciproque de la première phrase du théorème 11 est vraie. Elle est nettement plus difficile. Nous la démontrerons dans un chapitre ultérieur.

**2.5. Exemple : l'exponentielle complexe.** Nous savons déjà que les polynômes (en  $z$ ) sont analytiques sur  $\mathbb{C}$  tout entier, et les fractions rationnelles sont analytiques en dehors des racines de leur dénominateur. Il est intéressant de connaître quelques autres fonctions analytiques explicites. La plus importante est l'exponentielle (et ses cousines, les fonctions trigonométriques et hyperboliques).

**Définition 12.** On définit l'exponentielle complexe par  $\exp(z) := \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!}$ .

**Proposition 13.** L'exponentielle est complexe est analytique sur tout le plan complexe.

De plus,  $\exp(z+w) = \exp(z)\exp(w)$ ,  $\exp(\bar{z}) = \overline{\exp(z)}$ , pour  $y \in \mathbb{R}$ ,  $|\exp(iy)| = 1$ ,  $|\exp(z)| = \exp(\operatorname{Re} z)$ ,  $\frac{d}{dz} \exp(z) = \exp(z)$ .

*Démonstration.* Le rayon de convergence est clairement infini.

D'après le théorème de Mertens,

$$\begin{aligned} \exp(z+w) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \sum_{j=0}^k \frac{k!}{j!(k-j)!} z^j w^{k-j} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^k \frac{1}{j!(k-j)!} z^j w^{k-j} = \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!} \right) \left( \sum_{j=0}^{\infty} \frac{w^j}{j!} \right) = \exp z \exp w. \end{aligned}$$

On calcule  $\exp(\bar{z})$  en constatant que  $(\bar{z})^k = \overline{z^k}$  et en passant à la limite. Donc  $|\exp(iy)|^2 = \exp(iy)\exp(-iy) = \exp(iy - iy) = \exp 0 = 1$ . La propriété suivante est une conséquence immédiate de  $|ab| = |a||b|$ , pour tous nombres complexes  $a, b$ .

D'après la formule pour la dérivée donnée dans la démonstration du théorème 11,

$$\frac{d}{dz} \exp(z) = \sum_{k=1}^{\infty} k \frac{z^{k-1}}{k!} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^{k-1}}{(k-1)!} = \exp(z),$$

après un changement d'indice. □

On pose  $\exp(z) = e^z$  où  $e := \exp(1)$  et on définit  $\cos z := \frac{1}{2}(e^{iz} + e^{-iz})$ , et  $\sin z := \frac{1}{2i}(e^{iz} - e^{-iz})$ .

On a donc

$$(3) \quad (\cos z)^2 + (\sin z)^2 = \frac{1}{4}(e^{2iz} + 2 + e^{-2iz}) - \frac{1}{4}(e^{2iz} - 2 + e^{-2iz}) = \frac{4}{4} = 1.$$

Les fonctions  $\cos$  et  $\sin$  sont analytiques et  $\frac{d}{dz} \cos z = -\sin z$ ,  $\frac{d}{dz} \sin z = \cos z$  (exercice facile!).

**Proposition 14.** Il existe un plus petit nombre strictement positif  $T$  tel que  $e^{iT} = 1$ , et donc la fonction  $\exp$  est périodique de période  $iT$ , et  $\cos$  et  $\sin$  sont périodiques de période  $T$ . On définit  $\pi := T/2$ .

*Démonstration.* Comme la dérivée pour  $t = 0$  de  $t \mapsto e^{it}$  est non-nulle, il existe  $\delta > 0$  tel que  $e^{it} \neq 1$  pour  $0 < t < \delta$ . Si l'ensemble des  $T$  ci-dessus est non-vidé, on sait qu'il est fermé par continuité de l'exponentielle, et donc il contient un plus petit élément non-nul.

Mais il faut voir qu'il est non-vidé. D'après (3), si on trouve  $T'$  tel que  $\sin T' = 1$ , alors  $\exp(iT') = i$  et  $\exp(4iT') = 1$ . Il faut donc trouver  $T_0$ , le plus petit  $T'$  avec cette propriété. Or un calcul immédiat montre que

$$\cos t = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{t^{2k}}{(2k)!},$$

donc les propriétés des séries alternées impliquent que pour  $t \neq 0$ ,

$$1 - \frac{t^2}{2} < \cos t < 1 - \frac{t^2}{2} + \frac{t^4}{24}.$$

Donc  $\cos t > 0$  pour  $0 \leq t \leq \sqrt{2}$  et  $\cos \sqrt{3} < -\frac{1}{8} < 0$ . Donc  $\sin$  est croissante entre 0 et  $T_0$  et  $\sqrt{2} < T_0 < \sqrt{3}$ . On pose  $T = 4T_0$ .  $\square$

**Proposition 15.** *Si  $\exp z_1 = \exp z_2$ , alors  $z_1 - z_2 \in 2\pi i\mathbb{Z}$ .*

*Pour tout  $z \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$ , il existe un unique  $\theta \in ]-\pi, \pi]$  tel que  $e^w = z$  avec  $w = \text{Log } z := \log |z| + i\theta$ . On appelle  $\theta$  l'argument de  $z$  et  $\text{Log}$  la détermination principale du logarithme complexe.*

*Démonstration.* D'après la Proposition 13,  $|\exp z_1| = |\exp z_2|$  implique  $\text{Re } z_1 = \text{Re } z_2$  (l'exponentielle est croissante donc bijective sur  $\mathbb{R}$ ). Donc  $z_1 - z_2 \in i\mathbb{R}$ . L'étude des variations de  $\sin$  et  $\cos$  sur une période montre que  $y \mapsto e^{iy}$  ne prend qu'une fois chaque valeur sur un intervalle du type  $[a, a + 2\pi[$ .  $\square$

Remarque importante : la fonction  $\text{Log}$  n'est pas continue sur  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ , et il n'existe pas de choix continu de l'argument sur ce domaine.

### 3. PROLONGEMENT ANALYTIQUE

#### 3.1. Théorème des zéros isolés.

**Théorème 16.** *Soit  $f$  analytique au voisinage de  $z_0$ , avec  $f(z_0) = 0$ . Alors soit il existe  $r > 0$  tel que pour tout  $z$  tel que  $0 < |z - z_0| < r$ ,  $f(z) \neq 0$ , soit il existe  $r > 0$  tel que pour tout  $z$  tel que  $|z - z_0| < r$ ,  $f(z) = 0$ .*

*Démonstration.* Il existe  $r_0 > 0$  tel que pour  $z \in D(z_0, r_0)$ ,  $f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k (z - z_0)^k$ . L'hypothèse nous dit que  $a_0 = 0$ .

Considérons  $A := \{k \in \mathbb{N} : a_k \neq 0\}$ .

— Cas 1 :  $A = \emptyset$ . Alors le développement en série donne  $f(z) = 0$  pour tout  $z \in D(z_0, r_0)$ , et on peut prendre  $r = r_0$  et on a la première conclusion.

— Cas 2 :  $A \neq \emptyset$ . Soit  $k_0 := \min A \geq 1$ . On peut écrire, pour  $z \in D(z_0, r_0)$ ,

$$f(z) = a_{k_0} (z - z_0)^{k_0} \left( 1 + (z - z_0) \sum_{k=k_0+1}^{\infty} \frac{a_k}{a_{k_0}} (z - z_0)^{k-k_0-1} \right).$$

Le facteur hors parenthèse est non-nul pour  $0 < |z - z_0|$ . Le deuxième terme dans la parenthèse tend vers 0 quand  $z$  tend vers  $z_0$ , donc il existe  $r_1 \leq r_0$  tel que la parenthèse soit non-nulle pour  $|z - z_0| < r_1$ . On peut prendre  $r = r_1$  pour avoir la deuxième conclusion.

□

On rappelle qu'étant donné un ensemble  $A$ , un point  $a$  est un *point d'accumulation* de  $A$  si pour tout  $r > 0$ , il existe  $x \in A$  tel que  $0 < |a - x| < r$ ; et que c'est un *point isolé* de  $A$  si  $a \in A$  et qu'il existe  $r > 0$  tel que  $D(a, r) \cap A = \{a\}$ . Le théorème 16 dit donc que les zéros de  $f$  sont soit isolés, soit dans l'intérieur de l'ensemble des zéros.

### 3.2. Théorème du Prolongement analytique.

**Définition 17.** Soit  $\Omega$  un sous ensemble d'un espace topologique. On dit que  $\Omega$  est connexe si pour tout couple d'ouverts disjoints  $U_1, U_2$  tels que  $U_1 \cup U_2 \supset \Omega$  alors soit  $U_1 \cap \Omega = \emptyset$ , soit  $U_2 \cap \Omega = \emptyset$ .

On dit que  $\Omega$  est connexe par arcs si pour tous  $x, y \in \Omega$ , il existe une courbe continue  $\gamma : [0, 1] \rightarrow \Omega$  telle que  $\gamma(a) = x$ ,  $\gamma(b) = y$ .

Fait : la deuxième propriété implique toujours la première. Pour des ouverts de  $\mathbb{C}$  (ou même d'un espace vectoriel normé), elles sont équivalentes. Dans le cadre de ce cours, nous ne considérerons que la propriété de connexité par arcs.

**Théorème 18.** Si  $\Omega$  est un ouvert connexe de  $\mathbb{C}$ , que  $f$  et  $g$  sont analytiques sur  $\Omega$ , et que l'ensemble  $A := \{z \in \Omega : f(z) = g(z)\}$  possède un point d'accumulation dans  $\Omega$ , alors  $f = g$ .

Autrement dit, sur un ouvert "d'un seul morceau", deux fonctions analytiques doivent, soit coïncider partout, soit être égales seulement en des points isolés.

Corollaire : si  $f$  est analytique sur un ouvert  $\Omega$ , non identiquement nulle, et  $K$  compact dans  $\Omega$ , alors  $f^{-1}\{0\} \cap K$  est un ensemble fini.

Autre application : si deux fonctions sont analytiques sur un ouvert connexe qui intersecte la droite réelle, toute relation algébrique entre ces fonctions valide pour cette portion de la droite réelle demeurera valide sur tout l'ouvert. On étend ainsi les identités trigonométriques habituelles, par exemple.

*Démonstration.* La fonction  $f - g$  est analytique sur  $\Omega$ , donc il suffit de démontrer le théorème dans le cas où  $g = 0$ .

Il suffit de montrer que si  $f$  n'est pas identiquement nulle, alors  $A = f^{-1}\{0\}$  ne possède aucun point d'accumulation, c'est-à-dire que tous les points de  $A$  sont isolés. Soit  $a \in \Omega$  tel que  $f(a) \neq 0$ . Supposons qu'il existe  $b \in A$  qui ne soit pas isolé.

D'après le théorème 16, en tout point  $z_0 \in A$ , deux cas sont possibles : soit  $z_0$  est un zéro isolé, soit  $f$  est nulle dans tout un disque autour de  $z_0$ . Donc il existe  $r_0 > 0$  tel que  $f(z) = 0$  pour tout  $z \in D(b, r_0)$ .

Considérons une courbe  $\gamma$  telle que  $\gamma(0) = a$  et  $\gamma(1) = b$ . On considère l'ensemble de tous les paramètres  $t$  telle que  $f$  soit nulle dans tout un disque autour du point  $\gamma(t)$  :

$$E := \{t \in [0, 1] : \exists r > 0 : \forall z \in D(\gamma(t), r), f(z) = 0\}.$$

Nous venons de voir que  $0 \notin E$  et  $1 \in E$ . De plus, comme  $\gamma$  est continue, il existe  $\delta > 0$  tel que pour  $1 - \delta < t \leq 1$ ,  $f(\gamma(t)) \in D(b, r_0)$ , donc  $f$  s'annule sur  $D(f(\gamma(t)), r_0 - |f(\gamma(t)) - b|)$ , donc  $t \in E$ .

On pose  $T := \inf E \in ]0, 1[$ . Nous voulons montrer que  $T \in E$ . Si jamais  $T \notin E$ , alors comme  $T$  est la borne inférieure de  $E$ , pour tout  $\varepsilon > 0$  il existe  $t_\varepsilon \in ]T, T + \varepsilon[ \cap E$ . Soit  $r > 0$  : par continuité, il existe  $\varepsilon > 0$  tel que si  $t \in ]T, T + \varepsilon[$ , alors  $\gamma(t) \in D(\gamma(T), r)$ . Choisissons  $t_\varepsilon$  comme ci-dessus : alors  $\gamma(t_\varepsilon) \in D(\gamma(T), r)$  et  $f(z) = 0$  dans tout un

(petit) disque autour de  $\gamma(t_\varepsilon)$ . Si il existe un  $\varepsilon > 0$  tel que  $\gamma(t_\varepsilon) = \gamma(T)$ , alors  $T \in E$  et nous aboutissons à une contradiction. Sinon, pour tout  $r > 0$ , nous avons trouvé un point  $\gamma(t_\varepsilon) \in D(\gamma(T), r) \setminus \{\gamma(T)\}$  tel que  $f(\gamma(t_\varepsilon)) = 0$ . Donc  $f(\gamma(T)) = 0$  par continuité, et  $\gamma(T)$  n'est pas un zéro isolé, donc  $f$  doit à nouveau s'annuler dans tout un disque autour de  $\gamma(T)$  : contradiction.

Mais si  $T \in E$ , alors  $f$  s'annule sur un disque  $D(\gamma(T), r_1)$  et par continuité de  $\gamma$ , il existe  $\varepsilon \in ]0, T[$  tel que pour  $T - \varepsilon < t < T$ ,  $\gamma(t) \in D(\gamma(T), r_1)$ . Mais alors  $f$  s'annule sur un disque de rayon  $r_1 - |\gamma(t) - \gamma(T)|$  autour de  $\gamma(t)$ , et donc  $t \in E$ , ce qui contredit le fait que  $T = \inf E$ . Donc il ne peut pas exister de tel point  $b$ , et tous les (éventuels) zéros de  $f$  sont isolés.  $\square$

### 3.3. Exemple d'application : un logarithme complexe.

**Proposition 19.** *La détermination principale du logarithme complexe admet le développement en série suivant sur le disque  $D(1, 1)$  : pour  $|h| < 1$ ,*

$$\operatorname{Log}(1 + h) = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{h^k}{k}.$$

*Démonstration.* On pourrait le faire par un calcul explicite, assez laborieux. Nous allons le faire à l'aide du théorème du Prolongement Analytique, en admettant que notre inverse local est effectivement analytique (ce que nous avons admis en Section 1).

Les deux côtés de l'égalité définissent des fonctions analytiques sur  $D(1, 1)$ , qui est connexe. Pour  $x \in ]-1, +1[$ , les théorèmes sur la dérivation des fonctions inverses et fonctions composées nous donnent

$$\frac{d}{dx} \log(1 + x) = \frac{1}{1 + x} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k x^k,$$

pour toute fonction  $\log$  qui vérifie  $e^{\log x} = x$ ,  $x > 0$ .

Le théorème sur la primitive de la limite d'une suite de fonctions qui converge uniformément, et le choix qui a été fait de poser  $\operatorname{Log} 1 = 0$ , montrent que

$$\operatorname{Log}(1 + x) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{x^{k+1}}{k+1}.$$

Comme les points de  $]0, 2[$  sont non-isolés, l'identité sera vraie sur tout  $D(1, 1)$ .  $\square$

Exercice (facile) : trouver un développement en série entière autour de  $-1$  d'un logarithme complexe. Quel sera son rayon de convergence ? Plus généralement, pouvez-vous le faire autour d'un  $z_0 \neq 0$  ? Et quel rayon de convergence obtiendrez-vous ? Indication :  $\exp(z_0 + \operatorname{Log}(z/z_0)) = z$ .

Plus difficile : quand ces développements coïncideront-ils sur l'intersection de leurs disques de convergence ?

## 4. FORMULE DE CAUCHY ET CONSÉQUENCES

### 4.1. Intégration sur les chemins.

**Définition 20.** *Un chemin dans un ouvert  $\Omega$  est une courbe continue,  $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega$ , qui est  $\mathcal{C}^1$  par morceaux, c'est-à-dire qu'il existe une partition de  $[a, b]$   $a = a_0 < a_1 <$*

$\dots < a_{N-1} < a_N = b$  telle que  $\gamma|_{[a_j, a_{j+1}]}$  soit une fonction  $\mathcal{C}^1$  jusqu'au bord pour  $0 \leq j \leq N-1$ .

On note  $\gamma(t) = \gamma_1(t) + i\gamma_2(t)$ , où  $\gamma_1, \gamma_2$  sont à valeurs réelles.

Nous rappelons qu'une *forme différentielle* est une expression de la forme  $F(x, y) = f_1(x, y)dx + f_2(x, y)dy$ , où  $f_1, f_2$  sont des fonctions continues (à valeurs complexes) qu'on appelle ses coefficients.

Exemple :  $dz = dx + idy$ .

**Définition 21.** *Étant donné un chemin  $\gamma$  dans  $\Omega$  et une forme différentielle  $F$  à coefficients continus sur  $\Omega$ , alors*

$$\int_{\gamma} F := \int_a^b (f_1(\gamma(t))\gamma_1'(t) + f_2(\gamma(t))\gamma_2'(t)) dt$$

Les dérivées de  $\gamma$  ne sont pas forcément définies aux points  $a_j$  de la subdivision ; il faut comprendre cette intégrale comme une somme finie d'intégrales sur les intervalles  $[a_j, a_{j+1}]$ .

Si on se souvient que  $\gamma'(t) = \gamma_1'(t) + i\gamma_2'(t)$ , on voit que si  $F = f(z)dz$ , alors

$$\int_{\gamma} F = \int_a^b f(\gamma(t))\gamma'(t) dt.$$

C'est le plus souvent cette forme que nous utiliserons.

Exemple :  $\gamma(t) = (1-t)z_1 + tz_2 = z_1 + t(z_2 - z_1)$ ,  $t \in [0, 1]$ . Alors

$$\int_{\gamma} F := \int_0^1 (f_1(\gamma(t)) \operatorname{Re}(z_2 - z_1) + f_2(\gamma(t)) \operatorname{Im}(z_2 - z_1)) dt.$$

En particulier, si  $F = dz$ , on trouve  $\int_{\gamma} dz = z_2 - z_1$ , ce qui semble raisonnable !

**Proposition 22.** *Si  $\sigma$  est une bijection croissante de  $[c, d]$  dans  $[a, b]$ , alors  $\int_{\gamma} F = \int_{\gamma \circ \sigma} F$ . On dit que l'intégrale ne dépend pas du paramétrage de la courbe.*

*Si  $\sigma$  est une bijection décroissante de  $[c, d]$  dans  $[a, b]$  (donc  $\sigma(d) = a$ ,  $\sigma(c) = b$ ) alors  $\int_{\gamma} F = -\int_{\gamma \circ \sigma} F$ .*

### Démonstration.

Notons  $[a, b]$  un des intervalles de la subdivision, il suffit de démontrer la propriété pour un intervalle, puis de la faire la somme. D'après la règle de dérivation des fonctions composées,

$$\begin{aligned} \int_{\gamma \circ \sigma} F &= \int_c^d (f_1(\gamma(\sigma(t)))\gamma_1'(\sigma(t)) + f_2(\gamma(\sigma(t)))\gamma_2'(\sigma(t))) \sigma'(t) dt \\ &= \int_a^b (f_1(\gamma(u))\gamma_1'(u) + f_2(\gamma(u))\gamma_2'(u)) du = \int_{\gamma} F, \end{aligned}$$

en faisant le changement de variable  $u = \sigma(t)$ , donc  $du = \sigma'(t)dt$ .

Dans le cas où  $\sigma$  est décroissant, l'intégrale de  $c$  à  $d$  se transforme en intégrale de  $b$  à  $a$ , et quand on rétablit l'ordre des bornes on doit changer le signe.  $\square$

Nous allons généraliser l'exemple du segment donné ci-dessus.

**Proposition 23.** *Supposons qu'il existe une fonction  $\Phi$  définie dans un voisinage de  $\gamma([a, b])$  telle que  $f_1(x, y) = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$  et  $f_2(x, y) = \frac{\partial \Phi}{\partial y}$ . Alors  $\int_{\gamma} F = \Phi(b) - \Phi(a)$ .*

**Démonstration.**

D'après la formule de dérivation des fonctions composées et les égalités ci-dessus,

$$\frac{d}{dt} (\Phi(\gamma(t))) = f_1(\gamma(t))\gamma_1'(t) + f_2(\gamma(t))\gamma_2'(t),$$

et on calcule donc aisément  $\int_{\gamma} F$  d'après le théorème fondamental du calcul différentiel.  $\square$

**4.2. Rappel : Formule de Green-Riemann.**

**Définition 24.** Une courbe  $\gamma$  définie sur  $[a, b]$  est dite courbe de Jordan si  $\gamma(a) = \gamma(b)$  et pour tous  $t_1, t_2$  tels que  $t_1 < t_2$ , alors  $\gamma(t_1) = \gamma(t_2)$  implique  $t_1 = a, t_2 = b$ .

Intuitivement, il s'agit d'une courbe fermée qui ne se rencontre jamais elle-même. Par exemple,  $\gamma(t) = e^{it}$ ,  $a = 0, b = 2\pi$ .

Nous admettrons le (difficile) Théorème de Jordan, qui affirme le fait topologique que si  $\gamma$  est une courbe de Jordan dans le plan, alors  $\mathbb{C} \setminus \gamma([a, b])$  admet exactement deux composantes connexes, une bornée ("à l'intérieur" de  $\gamma$ , entourée par  $\gamma$ ) et l'autre non-bornée.

On considère désormais un ouvert borné connexe  $\Omega$  dont la frontière soit l'image d'une courbe de Jordan,  $\mathcal{C}^1$  par morceaux. Cela peut être un disque, un rectangle, un secteur angulaire... On oriente la courbe frontière de telle façon que la base  $(\vec{n}(\gamma(t)), \gamma'(t))$  soit une base orthogonale directe, où  $\vec{n}(z)$  est la normale extérieure au point  $z$ . Par exemple, si on prend le cercle unité, paramétré comme dans l'exemple ci-dessus,  $\vec{n}(e^{it}) = e^{it}$  et  $\gamma'(t) = ie^{it}$ .

**Théorème 25** (Green-Riemann). Si  $P(x, y), Q(x, y)$  sont des fonctions de classe  $\mathcal{C}^1$ , et  $\Omega$  un domaine dont la frontière est l'image d'une courbe de Jordan  $\gamma$  orientée comme ci-dessus, alors

$$\int_{\gamma} P(x, y)dx + Q(x, y)dy = \int \int_{\Omega} \left( \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy.$$

Ce théorème a été vu dans votre cours de calcul différentiel de deuxième année. Nous considérons sans problème des  $P, Q$  à valeurs complexes : pour obtenir la formule dans ce cadre, il suffit d'appliquer la version réelle aux parties réelle et imaginaire de chaque coefficient.

Notez un cas particulier important : si  $\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} = 0$  identiquement, alors si on pouvait montrer, ce qui est facile dans le cas où  $\Omega$  est convexe, que  $(P, Q)$  est le gradient d'une fonction ("potentiel") et  $P(x, y)dx + Q(x, y)dy$  est une différentielle totale (ou forme exacte), on saurait que son intégrale sur une courbe fermée devrait être nulle, d'après la Proposition 23.

**4.3. Théorème et formule de Cauchy.**

**Théorème 26** (de Cauchy). Soit  $\Omega$  un domaine dont la frontière est l'image d'une courbe de Jordan  $\gamma$  orientée comme ci-dessus, et  $f$  une fonction holomorphe (c'est-à-dire  $\mathbb{C}$ -dérivable) et de classe  $\mathcal{C}^1$  sur un voisinage de  $\bar{\Omega}$ . Alors

$$\int_{\gamma} f(z)dz = 0.$$

**Démonstration.** D'après les équations de Cauchy-Riemann,  $\frac{\partial Q}{\partial x} = i\frac{\partial f}{\partial x}$  et  $\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial y} = i\frac{\partial f}{\partial x}$ . On applique la formule de Green-Riemann à  $P = f$  et  $Q = if$  : l'intégrale est nulle.  $\square$

La formule de Cauchy est la plus importante de toute l'analyse complexe. Nous allons maintenant donner la formule de Cauchy dans le cas particulier mais déjà très important d'un disque.

**Théorème 27.** *Soit  $f$  une fonction holomorphe (c'est-à-dire  $\mathbb{C}$ -dérivable) et de classe  $\mathcal{C}^1$  sur un domaine  $U$ . Soient  $a \in U$  et  $r > 0$  tels que  $\overline{D}(a, r) \subset U$ , et  $z \in D(a, r)$ . Alors, en notant  $C(a, r)$  le cercle de centre  $a$  et de rayon  $r$  parcouru une fois dans le sens trigonométrique,*

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{C(a, r)} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta.$$

**Démonstration.**

Nous allons construire une famille de courbes  $\gamma$  et d'ouverts  $\Omega$  auxquels nous appliquerons le théorème 26. Intuitivement, il s'agit de creuser une petite bulle autour du point  $z$  (sans sortir du disque  $D(a, r)$ ), puis un tunnel encore plus étroit qui relie cette bulle à l'extérieur du disque. On appliquera le théorème de Cauchy. Puis on fera tendre vers zéro d'abord la largeur du tunnel, puis le diamètre de la bulle, et la formule voulue sortira à la limite.

Nous allons, pour simplifier, écrire d'abord les formules dans le cas où  $a = 0$ ,  $r = 1$  et  $0 \leq z < 1$  (puis nous transporterons la construction dans  $\overline{D}(a, r) \subset U$ ). Considérons un cercle de centre  $z$  et de rayon  $\delta < 1 - z$ , et pour  $0 < \varepsilon < \delta$ , les droites  $L_\varepsilon := \{y = \varepsilon\}$  et  $L_{-\varepsilon} := \{y = -\varepsilon\}$ . La droite  $L_\varepsilon$  a exactement un point d'intersection  $A_{\delta, \varepsilon}$  avec le cercle  $C(z, \varepsilon)$  tel que  $\operatorname{Re} A_{\delta, \varepsilon} > z$ . Elle a un point d'intersection  $B_{\delta, \varepsilon}$  avec le cercle unité  $C(0, 1)$  tel que  $\operatorname{Re} B_{\delta, \varepsilon} > 0$ . De façon symétrique, la droite  $L_{-\varepsilon}$  intersecte le cercle  $C(z, \varepsilon)$  au point  $D_{\delta, \varepsilon} := \overline{A_{\delta, \varepsilon}}$ , et le cercle unité au point  $C_{\delta, \varepsilon} := \overline{B_{\delta, \varepsilon}}$ .

Le chemin  $\gamma_{\delta, \varepsilon}$  sera composé de quatre morceaux successifs :

- $\gamma_1$ , le segment de droite de  $A_{\delta, \varepsilon}$  à  $B_{\delta, \varepsilon}$ , orienté dans le sens des  $x$  croissants ;
- $\gamma_2$ , l'arc de cercle de  $B_{\delta, \varepsilon}$  à  $C_{\delta, \varepsilon}$ , orienté dans le sens trigonométrique ;
- $\gamma_3$ , le segment de droite de  $C_{\delta, \varepsilon}$  à  $D_{\delta, \varepsilon}$ , orienté dans le sens des  $x$  décroissants ;
- $\gamma_4$ , l'arc de cercle de  $D_{\delta, \varepsilon}$  à  $A_{\delta, \varepsilon}$ , orienté dans le sens trigonométrique inverse.

Nous avons omis les  $\varepsilon$  et  $\delta$  pour alléger la notation.

Pour obtenir notre chemin  $\gamma$  dans le cas général, nous appliquons à  $\gamma_{\delta, \varepsilon}$  une homothétie de rapport  $r$ , puis une rotation d'angle égal à l'argument dans  $]-\pi, \pi]$  de  $z - a$  (si  $z = a$ , on ne fait pas de rotation), et enfin une translation de vecteur  $a$ . L'image du chemin  $\gamma$  est désormais contenue dans  $\overline{D}(a, r)$ , et celle de l'ouvert  $\Omega$  entouré par  $\gamma$  également. De plus le point  $z$ , qui est l'unique point de  $U$  où  $\zeta \mapsto \frac{f(\zeta)}{\zeta - z}$  ne soit pas holomorphe, reste en dehors de  $\overline{\Omega}$ .

Donc nous sommes dans les conditions d'application du théorème 26 et  $\int_\gamma \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = 0$ .

Maintenant, quand  $\varepsilon \rightarrow 0$ , nous voyons que  $\gamma_2$  tend vers le segment  $[z + \delta, 1]$  orienté dans le sens des  $x$  croissants, tandis que  $\gamma_4$  tend vers le même segment, mais orienté dans le sens des  $x$  décroissants. La même chose se produit pour les portions correspondantes du chemin  $\gamma$ , avec convergence vers le segment  $[a + (z - a)(1 + r\delta), a + r\frac{z - a}{|z - a|}]$ . Comme la fonction  $f$  est en particulier continue sur le compact  $\overline{D}(a, r)$ , donc

uniformément continue, on voit que les intégrales correspondantes se décomposent en des intégrales sur des intervalles dont la longueur tend vers 0 (et l'intégrande est borné) et d'autres sur lesquels la convergence est uniforme, et donc les intégrales convergent vers les intégrales sur deux fois le même segment orienté dans des sens opposés : leur somme tend vers 0.

D'autre part, il est aussi facile de voir que l'intégrale sur  $\gamma_1$  tend vers l'intégrale sur le cercle  $C(a, r)$  de  $\frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta$ , et que l'intégrale sur  $\gamma_3$  tend vers l'opposé de l'intégrale sur le cercle  $C(z, \delta)$  (orienté dans le sens trigonométrique) de  $\frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta$ . Donc  $\int_{\gamma} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = 0$  nous donne : pour tout  $\delta > 0$  assez petit,

$$\int_{C(a,r)} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - \int_{C(z,\delta)} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = 0.$$

Maintenant nous considérons la limite de l'intégrale sur le cercle de rayon  $\delta$  quand  $\delta \rightarrow 0$ . Une paramétrisation de  $C(a, \delta)$  est donnée par  $\gamma_{\delta}(t) := z + \delta e^{it}$ ,  $0 \leq t \leq 2\pi$  (il est facile de voir que changer le point de départ et d'arrivée sur le cercle ne changera pas l'intégrale).

Alors  $\gamma_{\delta}(t) - z = \delta e^{it}$  et  $\gamma'_{\delta}(t) = i\delta e^{it}$ , donc

$$\int_{C(z,\delta)} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \int_0^{2\pi} \frac{f(z + \delta e^{it}) i\delta e^{it}}{\delta e^{it}} dt = \int_0^{2\pi} f(z + \delta e^{it}) i dt,$$

et comme  $f$  est continue au point  $z$ ,  $\lim_{\delta \rightarrow 0} f(z + \delta e^{it}) = f(z)$  uniformément en  $t \in [0, 2\pi]$ . Donc

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \int_0^{2\pi} f(z + \delta e^{it}) i dt = \int_0^{2\pi} f(z) i dt = 2\pi i f(z).$$

□

**4.4. Conséquences de la formule de Cauchy.** Nous pouvons maintenant démontrer que les fonctions holomorphes de classe  $\mathcal{C}^1$  sont la même chose que les fonctions analytiques. (On peut démontrer que l'hypothèse de classe  $\mathcal{C}^1$  n'est pas indispensable, mais ce serait trop long à notre niveau).

**Théorème 28.** *Soit  $f$  une fonction holomorphe (c'est-à-dire  $\mathbb{C}$ -dérivable) et de classe  $\mathcal{C}^1$  sur un domaine  $U$ . Alors  $f$  est développable en série entière autour de tout  $a \in U$  avec un rayon de convergence supérieur ou égal au plus grand  $r > 0$  tel que  $D(a, r) \subset U$  (qui est la distance de  $a$  au complémentaire de  $U$ ).*

Remarque : ce théorème dit qu'une fonction est holomorphe et de classe  $\mathcal{C}^1$  sur un ouvert si et seulement si elle est analytique sur cet ouvert. C'est donc une réciproque au théorème 11. Mais il donne quelque chose de nouveau même pour une fonction déjà supposée analytique : on avait simplement supposé qu'une telle fonction est développable en série entière autour de chaque  $a \in U$ , mais avec un rayon de convergence de la série qui peut être beaucoup plus petit. Or comme une telle fonction est nécessairement holomorphe et de classe  $\mathcal{C}^1$ , sa série de Taylor en  $a$  devra converger sur le plus grand disque possible centré en  $a$  et contenu dans  $U$ .

**Démonstration.** Considérons  $r$  comme ci-dessus (éventuellement infini). Soit  $r' < r$ . On peut appliquer la formule de Cauchy dans le disque  $\overline{D}(a, r')$ . De plus, pour

$z \in \overline{D}(a, r')$ ,  $\zeta \in C(a, r')$ ,  $\frac{|z-a|}{|\zeta-a|} \leq r'/r < 1$ . Alors

$$\frac{1}{\zeta - z} = \frac{1}{(\zeta - a) - (z - a)} = \frac{1}{\zeta - a} \frac{1}{1 - \frac{z-a}{\zeta-a}} = \frac{1}{\zeta - a} \sum_{k=0}^{\infty} \left( \frac{z-a}{\zeta-a} \right)^k,$$

avec convergence normale sur  $\overline{D}(a, r')$ . On peut donc échanger l'intégration et la sommation dans la formule de Cauchy :

$$(4) \quad f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{C(a, r')} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \sum_{k=0}^{\infty} (z-a)^k \int_{C(a, r')} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - a)^{k+1}} d\zeta.$$

□

**Corollaire 29.** (1) Pour tout  $k \in \mathbb{N}$ , si  $\overline{D}(a, r) \subset U$ ,

$$\frac{f^{(k)}(a)}{k!} = \frac{1}{2\pi i} \int_{C(a, r)} \frac{f(z) dz}{(z-a)^{k+1}},$$

où  $C(a, r)$  désigne le cercle de centre  $a$  et de rayon  $r$ , parcouru une fois dans le sens trigonométrique.

(2) (Inégalités de Cauchy).

Sous les mêmes hypothèses,

$$|f^{(k)}(a)| \leq k! \frac{\max_{\overline{D}(a, r)} |f|}{r^k}.$$

**Démonstration.** Le premier énoncé provient de la relation entre dérivées successives et coefficients du développement en série de Taylor. Le deuxième en appliquant la majoration d'une intégrale par le maximum du module de l'intégrande multiplié par la longueur du chemin (ici égale à  $2\pi r$ ). □

Si on applique le premier énoncé ci-dessus pour  $k = 0$ , on voit après un calcul similaire à celui de la preuve de la formule de Cauchy (mais plus simple) que

$$f(a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(a + re^{it}) dt.$$

Cet énoncé est connu comme la *formule de la moyenne* (on obtient la valeur de  $f$  en un point en faisant la moyenne de ses valeurs sur un cercle autour du point). Comme  $dt$  est une mesure réelle, on voit que cette formule est aussi valable pour  $\operatorname{Re} f$  et  $\operatorname{Im} f$ . C'est plus généralement une propriété des fonctions harmoniques (celles dont le Laplacien est nul).

**Théorème 30** (de Liouville). Si  $f$  est holomorphe et bornée sur  $\mathbb{C}$  tout entier, alors  $f$  est constante.

**Démonstration.** On applique les inégalités de Cauchy pour  $k = 1$  et un disque de rayon  $R$  aussi grand qu'on veut :

$$|f'(a)| \leq \frac{\max_{\overline{D}(a, R)} |f|}{R} \leq \frac{M}{R} \rightarrow 0 \text{ pour } R \rightarrow +\infty.$$

La dérivée de  $f$  est identiquement nulle, donc  $f$  est constante (utiliser l'expression de  $f(b) - f(a)$  comme intégrale de la dérivée). □

**Corollaire 31** (Théorème Fondamental de l'Algèbre). *Tout polynôme de degré supérieur ou égal à 1 possède au moins une racine complexe.*

On déduit facilement de ce théorème que tout polynôme de degré  $n$  (exactement) se factorise en  $n$  facteurs de degré 1 et admet donc  $n$  racines complexes éventuellement confondues, et que les polynômes à coefficients réels se factorisent en facteurs irréductibles de degré inférieur ou égal à 2.

**Démonstration.** Soit  $P$  un polynôme. Si  $P$  n'admet aucune racine, alors  $\frac{1}{P(z)}$  est une fonction holomorphe sur tout  $\mathbb{C}$ , et continue. Si le degré de  $P$  est supérieur ou égal à 1, alors  $\lim_{|z| \rightarrow \infty} \frac{1}{|P(z)|} = 0$ , donc  $\frac{1}{P(z)}$  est bornée sur  $\mathbb{C}$ , donc constante d'après le théorème de Liouville : contradiction, donc en fait  $P$  devait être de degré 0.  $\square$