

Chapitre 5

Ensemble des nombres complexes

Résumé -

Dans ce chapitre, nous reprenons des résultats de lycée sur les nombres complexes et leur lien avec la géométrie du plan. Ce sont des bons outils pour reprendre les propriétés trigonométriques!

Comme, ces nombres ont été inventés/découverts pour résoudre tout type d'équation polynomiale, il est normal que ce chapitre soit associé à la recherche des solutions de $x^n = 1$, i.e. la recherche des racines de l'unité.

Puis nous nous intéressons aux transformations géométriques du plan. Lorsque l'espace géométrique étudié est de dimension 2 (plan $\mathbb{R}^2$), les nombres complexes sont de parfaits outils pour faire cette étude. En effet, ces nombres ont un lien fort avec la géométrie (revue au chapitre suivant) : addition de complexes = translation et multiplication de complexes = homothétie et rotation (similitude)...

- Micmath - La conjugaison complexe est un automorphisme de corps. <https://www.youtube.com/watch?v=AVDMpnwsztg>
- Les maths en finesse - Racines nième de l'unité. <https://www.youtube.com/watch?v=aZLGdnktO8k>
- Exo7Math - Nombres complexes part.4 : géométrie. <https://www.youtube.com/watch?v=ej9zpQYsQs8>
- AEV - Nombres complexes / Applications à la géométrie. <https://www.youtube.com/watch?v=HfxqAQ1SiGo>

Sommaire

1. Problèmes	66
2. EULER : manipulateur des nombres du diable	66
2.1. Racine de polynômes	66
2.2. Calcul algébrique	67
2.3. Représentation graphique (addition et longueur) . .	69
2.4. Inégalités	69
3. Le visionnaire : GAUSS et la multiplication complexe . . .	71
3.1. Les complexes de module 1	71
3.2. Notation exponentielle	72
3.3. Formules d'Euler et de de Moivre	74
3.4. Argument, forme trigonométrique	75
4. Racines d'un nombre complexe	76
4.1. Recherche de racines carrées	76
4.2. Racines n -ièmes de l'unité	77
4.3. Racines n -ièmes d'un nombre complexe	78
5. $\mathbb{R}^2 = \mathbb{C} = \mathcal{P}$	79
5.1. Regard géométrique sur le plan complexe	79
5.2. Lignes de niveau	80
5.3. Transformations du plan (point de vue complexe) .	82

1. Problèmes

? Problème 21 - Multiplication de nombres

Que représente la multiplication complexe $Z = z \times z'$ pour des points $M(z)$ et $M'(z')$.

En particulier, existe-t-il un algorithme géométrique pour tracer cette multiplication?

On pourra dans un premier temps, considérer que $z \in \mathbb{R}$, $z \in \mathbb{U}$

? Problème 22 - Théorème de Napoléon

En exploitant les nombres complexes, démontrer le théorème de Napoléon :

Si nous construisons trois triangles équilatéraux à partir des côtés d'un triangle quelconque, tous à l'extérieur ou tous à l'intérieur, les centres de ces triangles équilatéraux forment eux-mêmes un triangle équilatéral.

Beaucoup de problèmes (théorème de Ptolémée, théorème de Cotes...), du plan se démontre par *calculs* avec des nombres complexes.

? Problème 23 - Transformation du plan

A l'aide des nombres complexes, comment trouver toutes les transformations du plan qui conserve les longueurs et/ou les angles?

? Problème 24 - Application en physique

On connaît beaucoup d'applications en physique des nombres complexes (notés j), en particulier en électricité ou pour l'étude de Fourier. La loi de Snell-Descartes donne pour la réfraction entre deux milieux d'indices n_1 et n_2 : $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.

Lorsque $n_1 > n_2$ et θ_1 proche de 0 (donc $\sin \theta_1$ proche de 1), on trouve $\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 > 1$, et donc $\cos \theta_2 \in \mathbb{C}$.

Avec ce nombre complexe, Augustin FRESNEL unifiait en une seule formule ce qui se présentait jusqu'alors sous deux formes. Quelle est cette formule?

2. EULER : manipulateur des nombres du diable

2.1. Racine de polynômes

○ Analyse - Problème de Cardan (1545)

Histoire - Citation

« Au reste tant les vraies racines que les fausses ne sont pas toujours réelles; mais quelques seulement imaginaires; c'est à dire qu'on peut bien toujours en imaginer autant que iay dit en chasque Equation; mais qu'il n'y a quelquefois aucune quantité, qui corresponde a celles qu'on imagine. » DESCARTES (1637)

Les règles de calcul sont données par Raphaël Bombelli (1572), dans son algebra. Pendant deux siècles les mathématiciens se querellent quant à leur existence et à leurs emplois.

Exercice

On reprend un exercice historique de Bombelli.

En reprenant les règles classiques de calcul, évaluer $(2 + \sqrt{-1})^3$.

En employant les formules de Cardan, trouver les racines de $x^3 = 15x + 4$.

2.2. Calcul algébrique

Euler invente la notation i bien pratique et les manipule avec précision. Il écrit à Diderot : « $e^{i\pi} = -1$ donc Dieu existe ».

Remarque - Unicité

Un complexe est un « nombre » z qui s'écrit $z = a + ib$ où a et b sont des réels et i vérifie $i^2 = -1$. Cette écriture est unique et s'appelle la forme algébrique de z .

Comme la construction de $\mathbb{C}$ n'est pas donnée, il n'est pas possible de démontrer l'unicité de l'écriture de z , ni la justification des règles de calcul. Nous les admettons alors. Ce n'est pas rien...

 **Pour aller plus loin - Construction de $\mathbb{C}$**
Rassurons nous : nous construirons bien $\mathbb{C}$ par la suite, selon la méthode proposée par Cauchy (avec des classes d'équivalence).

Définition - Notation de nombre complexe (1748)

Soit $z = a + ib$ un complexe (a et b sont des réels).

$a = \Re z$ s'appelle la **partie réelle** de z .

$b = \Im z$ s'appelle la **partie imaginaire** de z ;

z est dit **imaginaire pur** ($z \in i\mathbb{R}$) si sa partie réelle est nulle.

$\bar{z} = a - ib$ s'appelle le **conjugué** de $z = a + ib$.

$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ s'appelle le **module** de z .

Notons tout de suite comment se comportent les calculs habituelles addition et multiplication sur $\mathbb{C}$ (il s'agit presque de définition ici...)

Définition - (et proposition ?) $\mathbb{C}$ est un corps

Pour tout $(z, z') \in \mathbb{C}^2$, $\lambda, \lambda' \in \mathbb{R}$,

— $\Re(\lambda z + \lambda' z') = \lambda \Re(z) + \lambda' \Re(z')$ (la partie réelle est $\mathbb{R}$ -linéaire sur $\mathbb{C}$)

— $\Im(\lambda z + \lambda' z') = \lambda \Im(z) + \lambda' \Im(z')$ (la partie imaginaire est $\mathbb{R}$ -linéaire sur $\mathbb{C}$)

— si $z = a + ib$ et $z' = a' + ib'$, alors $z \times z' = (aa' - bb') + i(ab' + a'b)$

En particulier $z \times \bar{z} = a^2 + b^2 = |z|^2 = |\bar{z}|^2$, donc $\frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{|z|^2}$.

Remarque - Importance du conjugué

Le fait que $z\bar{z}$ est un nombre réel (pur) explique l'importance de la notion de conjugué.

Démonstration

On a alors

Proposition - Conjugaison

On a les propriétés du conjugué :

$$\forall (z, z') \in \mathbb{C}^2, \forall a \in \mathbb{R}, \quad \overline{\overline{z}} = z$$

$$\overline{z + z'} = \overline{z} + \overline{z'}$$

$$\overline{zz'} = \overline{z}\overline{z'}$$

$$\overline{\left(\frac{1}{z}\right)} = \frac{1}{\overline{z}}$$

$$\Re z = \frac{z + \overline{z}}{2}$$

$$\Im z = \frac{z - \overline{z}}{2i}$$

Démonstration**Proposition - Puissance et conjugaison**

On définit les puissances d'un nombre complexe par

$$\begin{cases} z^0 = 1 \\ \forall n \in \mathbb{N}, z^{n+1} = z^n z \end{cases}$$

On a alors $\forall n \in \mathbb{N}, \overline{z^n} = \overline{z}^n$.

Pour $z \neq 0$ et $n \in \mathbb{N}$, on pose $z^{-n} = \frac{1}{z^n} = (z^n)^{-1}$, on a alors $\forall n \in \mathbb{Z}, \overline{z^n} = \overline{z}^n$.

Exercice

Faire la démonstration

Exercice

Démontrer la formule de Moivre (1707) : $(\cos a + i \sin a)^n = \cos(na) + i \sin(na)$.

(Il est compliqué de comprendre comment il a cette idée, au. hasard ?)

Proposition - Propriétés du module

On a les propriétés du module :

$$\forall (z, z') \in \mathbb{C}^2, a \in \mathbb{R}_+, \quad |z| = \sqrt{z\bar{z}} \quad |az| = a|z| \quad |zz'| = |z||z'|$$

$$|z| = |\bar{z}| = |-z| \quad \left| \frac{z}{z'} \right| = \frac{|z|}{|z'|} \text{ (si } z' \neq 0 \text{)}$$

Démonstration**Remarque - Valeur absolue et module**

Pour un réel, valeur absolue et module coïncident !

2.3. Représentation graphique (addition et longueur)

On munit le plan d'un repère orthonormé direct $(0, \vec{u}, \vec{v})$. Le point M de coordonnées (a, b) , caractérisé par $\vec{OM} = a\vec{u} + b\vec{v}$, peut alors être représenté par le complexe $z = a + ib$.

Définition - Affixe d'un point. Affixe d'un vecteur

$z = a + ib$ est alors appelé **affixe** du point $M(a, b)$, on peut noter $z = \text{Aff}(M)$.

Réciproquement, le point M est appelé (point) image de z .

De même, si $\vec{w}$ est un vecteur de coordonnées (a, b) , $a + ib$ est appelé affixe de $\vec{w}$ (noté $\text{Aff}(\vec{w})$), lui-même appelé (vecteur) image du complexe $a + ib$.

Remarque - Axes

Les points de l'axe des abscisses correspondent aux points d'affixe réelle.

Les points de l'axe des ordonnées correspondent aux points d'affixe imaginaire pure.

Proposition - Opération complexe et correspondance sur le plan géométrique

Si z est l'affixe de M alors $\bar{z}$ est l'affixe du symétrique de M par rapport à l'axe des abscisses.

Si $z = \text{Aff}(M)$ alors $|z|$ est égal à la distance OM .

Si $z = \text{Aff}(M)$ et $z_0 = \text{Aff}(M_0)$, alors $\text{Aff}(\vec{M_0M}) = z - z_0$ et $|z - z_0| = M_0M$

Histoire - John WALLIS (1616-1703)

Il semble que John Wallis ait imaginé représenter les nombres complexes dans un plan.

Certainement, avait-il compris comment additionner les nombres complexes; mais l'essentiel : il n'avait pas compris le rôle géométrique de la multiplication.

Wallis est par ailleurs un grand manipulateur de l'infini.

2.4. Inégalités**Théorème - Inégalités**

Pour $(z, z') \in \mathbb{C}^2$, on a les inégalités suivantes :

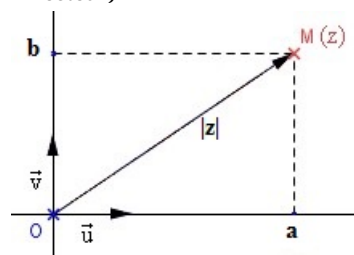
$$\Re z \leq |z| \text{ avec égalité si et seulement si } z \in \mathbb{R}^+$$

$$\Im z \leq |z| \text{ avec égalité si et seulement si } z \in i\mathbb{R}^+$$

$$||z| - |z'|| \leq |z + z'| \leq |z| + |z'| \text{ (Inégalité triangulaire)}$$

avec égalité dans l'inégalité de droite

si et seulement si $z' = 0$ ou il existe $\lambda \in \mathbb{R}^+$ tel que $z = \lambda z'$ (z, z'

***Représentation - Affixe d'un point (ou d'un vecteur)**

positivement liés).

⚠ Attention - Module ou valeur absolue?

↗ Il y a des modules et des valeurs absolues partout ici

🔍 Analyse - Interprétation de l'inégalité triangulaire

Démonstration

Par récurrence :

Proposition - Inégalités

Pour n complexes $z_1, \dots, z_n$ on a

$$|z_1 + \dots + z_n| \leq |z_1| + \dots + |z_n|.$$

Proposition - Caractérisation des complexes remarquables

$$z = 0 \Leftrightarrow |z| = 0 \Leftrightarrow \Re z = \Im z = 0$$

$$z \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \Im z = 0 \Leftrightarrow \bar{z} = z \Leftrightarrow |z|^2 = (\Re z)^2$$

$$z \in i\mathbb{R} \Leftrightarrow \Re z = 0 \Leftrightarrow \bar{z} = -z \Leftrightarrow |z|^2 = (\Im z)^2$$

3. Le visionnaire : GAUSS et la multiplication complexe

3.1. Les complexes de module 1

En 1800, les mathématiciens manipulent les nombres complexes, mais ces nombres manquent de légitimité.

C'est Gauss qui les justifie géométriquement sur $\mathbb{R}^2$ (Argand et Wessel semblent, chacun de leur côté, avoir eu la même idée).

Le groupe unitaire $\mathbb{U}$

Définition - Groupe unitaire

On note $\mathbb{U}$ l'ensemble des complexes de module 1, c'est aussi le cercle unité de $\mathbb{C}$, ensemble des affixes des points du cercle trigonométrique

$$\mathbb{U} = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}.$$

Proposition - Conjugaison sur $\mathbb{U}$

$$\forall (z, z') \in \mathbb{U}^2, zz' \in \mathbb{U}, \quad \forall z \in \mathbb{U}, \bar{z} = \frac{1}{z} \in \mathbb{U}.$$

On dit que l'ensemble $\mathbb{U}$ muni de l'opération multiplication est un groupe commutatif.

Démonstration

Interprétation géométrique du calcul $u \times z$ pour $u \in \mathbb{U}$ et $z \in \mathbb{C}$

Analyse - Géométrie

Définition - Argument de $u \in \mathbb{U}$, de $z \in \mathbb{C}$

Soit $u \in \mathbb{U}$. On note I , le point du plan d'affixe 1 et M celui d'affixe u .

On appelle argument de $u \in \mathbb{U}$ noté $\text{Arg}(u)$, l'angle (principal) $(\overrightarrow{OI}, \overrightarrow{OM}) \in]-\pi, \pi]$.

Dans un premier temps, on note $\angle\theta$ ce nombre complexe de module 1 et d'argument θ .

On a alors $u = \cos\theta + i\sin\theta$, pour $\theta = \text{Arg}(u)$.

**Remarque - Angle aigu**

Le résultat se conçoit bien pour $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$, mais il reste vrai pour toute mesure d'angle (dans $\mathbb{R}$), par propriété de parité (cos), imparité (sin) et 2π -périodicité.

Démonstration**Pour aller plus loin - Le problème est en fait lié à la relation d'égalité...**

Nous allons essayer de faire avec, au mieux. Mais lorsqu'on aura proprement défini ce que sont des relations d'équivalence, cela sera plus simple...

Proposition - Multiplication par $u \in \mathbb{U}$

Soit $z \in \mathbb{C}$ et $u \in \mathbb{U} \setminus \{1\}$.

Notons $\theta = \arg(u)$.

Alors $u \times z$ est l'affixe du point obtenu par rotation de centre 0 et d'angle θ , à partir du point d'affixe z

La démonstration a été faite plus haut (dans l'analyse).

**Attention - Mauvaise définition de l'argument...**

La définition donnée ici est peu satisfaisante; avec un argument principal, on n'a pas nécessairement $\text{Arg}zz' = \text{Arg}z + \text{Arg}z'$, mais seulement des congruences.

3.2. Notation exponentielle**Argument ou argument (classe d'équivalence)****Corollaire - Propriété de $\angle$.**

Pour tout $\theta, \theta' \in \mathbb{R}$, $\angle\theta \times \angle\theta' = \angle(\theta + \theta')$

Démonstration**Analyse - Non injectivité**

Définition - et Propriété. Argument de z

Pour tout $z \in \mathbb{U}$, on note $\arg z = \{\text{Arg} z + 2k\pi, k \in \mathbb{Z}\}$, on le considère comme un nombre.

Pour $z, z' \in \mathbb{U}$: $\arg(z \times z') = \arg z + \arg z'$ ou (de manière équivalente) : $\text{Arg}(z \times z') \equiv \text{Arg} z + \text{Arg} z' [2\pi]$.

Démonstration**Notation d'Euler****Définition - Notation d'Euler**

Nous verrons que dans le cas réel, on appelle exponentielle les fonctions qui vérifient $f(a+b) = f(a) \times f(b)$.

Elles s'écrivent (dans le cas réel) sous la forme $x \mapsto A^x$ où $A = f(1)$.

Par uniformité de notation, suivant L. Euler, on notera maintenant $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$

On a alors, plus globalement :

Théorème - Propriétés

Soient $(\theta, \theta') \in \mathbb{R}^2$. On a :

$$e^{i(\theta+\theta')} = e^{i\theta} e^{i\theta'}$$

$$\overline{e^{i\theta}} = e^{-i\theta} = \frac{1}{e^{i\theta}}$$

$$e^{i\frac{\pi}{2}} = i$$

$$e^{i\pi} = -1$$

$$e^{i\theta} = 1 \Leftrightarrow \theta \equiv 0[2\pi] \Leftrightarrow \theta \in 2\pi\mathbb{Z}$$

$$e^{i\theta} = e^{i\theta'} \Leftrightarrow \theta \equiv \theta' [2\pi]$$

** Pour aller plus loin - Une vraie démonstration**

Euler a bien démontré cette démonstration ; il ne s'agit pas d'une simple notation. Il faut donc voir qu'ici, :

- il s'agit bien du nombre $e = 2,718281\dots$
- il s'agit bien d'une puissance complexe

Démonstration** Histoire - D'où vient la notation e ?**

Ce n'est pas le e d'exponentielle, mais bien le e du suisse Leonard Euler

La formule d'Euler $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ a été obtenue à partir du développement sous forme infinie de $\exp$, $\cos$ et $\sin$ (chapitre précédent), mais Euler n'a pas compris les propriétés géométriques du produit de complexes.

Corollaire - Formule d'additions trigonométriques

Soient $a, b \in \mathbb{R}$,

$$\cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b \text{ et } \sin(a+b) = \sin a \cos b + \cos a \sin b$$

Démonstration**Exercice**

En déduire les formules donnant $\cos(a-b)$ et $\sin(a-b)$.

3.3. Formules d'Euler et de de Moivre

Formules

Proposition - Formules d'Euler

$$\cos \theta = \Re(e^{i\theta}) = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}, \quad \sin \theta = \Im(e^{i\theta}) = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i}.$$

Exercice

Calculer $\frac{1}{3} + \frac{1}{4}$, en déduire une expression de $\cos \frac{7\pi}{12}$ et $\sin \frac{7\pi}{12}$.

On exploitera ces résultats plus tard.

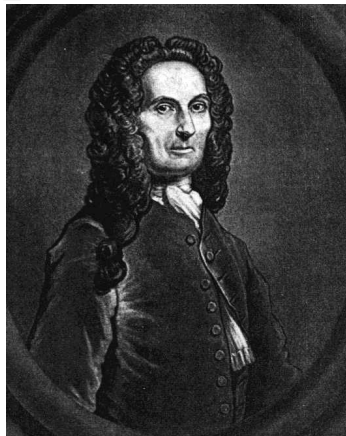
Proposition - Formule de Moivre

$$\forall n \in \mathbb{Z}, (e^{i\theta})^n = e^{in\theta}$$

$$\forall n \in \mathbb{Z}, (\cos \theta + i \sin \theta)^n = \cos n\theta + i \sin n\theta$$

Démonstration

Histoire - De Moivre



Abraham De MOIVRE (1667, 1754), mathématicien d'origine française, mais qui du vivre en Angleterre. Hormis la formule de de Moivre (1707), il est connu pour son ouvrage sur les probabilités : *the Doctrine of chances*

Angle moitié (pour factoriser)

Truc & Astuce pour le calcul - Factorisation de l'angle moitié

Lorsqu'on rencontre un expression de la forme $e^{ia} \pm e^{ib}$ (a, b réels), il faut toujours penser à factoriser par la moitié :

$$a = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2}, \quad b = \frac{a+b}{2} - \frac{a-b}{2}$$

Cela donne :

$$e^{ia} \pm e^{ib} = e^{i\frac{a+b}{2}} \left(e^{i\frac{a-b}{2}} \pm e^{-i\frac{a-b}{2}} \right)$$

Et on applique les formules d'Euler

Exercice

Factoriser $1 + e^{i\theta}$ et $1 - e^{i\theta}$. (Re)trouver les formules donnant $1 \pm \cos \theta$

Exercice

Nouveau calcul de $\sum_{k=0}^n \cos kt$ et $\sum_{k=0}^n \sin kt$

Linéarisation

Savoir faire - Linéarisation

Il s'agit d'exprimer $\cos^n \theta$ ou $\sin^n \theta$ sous forme d'une somme de $\cos k\theta$ ou $\sin k\theta$

(il ne doit plus y avoir de puissances ni de produits de cosinus ou sinus).

— Ecrire $\cos^n \theta = \left(\frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \right)^n$.

— Développer avec la formule du binôme.

— Regrouper les termes conjugués pour faire apparaître des cosinus ou des sinus.

Si il n'y a pas de faute de calculs, vous devez obtenir un nombre réel :
donc simplification des $i \dots$

Exercice

Linéariser $\cos^3 \theta$, $\sin^4 \theta$.

Savoir faire - Expressions de $\cos(nt)$ et $\sin(nt)$ en fonction de $\cos t$ et $\sin t$

— Ecrire $\cos(nt) = \Re(e^{int}) = \Re[(e^{it})^n]$ ou $\sin(nt) = \Im[(e^{it})^n]$.

— Utiliser la formule du binôme pour calculer $(e^{it})^n = (\cos t + i \sin t)^n$.

— Récupérer la partie réelle (ou imaginaire) en séparant les indices pairs des indices impairs.

Pour aller plus loin - Polynôme de Tchebychev

Les polynômes de Tchebychev (env. 1860) sont définis par récurrence par :

$$T_0(x) = 1, T_1(x) = x$$

$$T_{n+2}(x) = 2xT_{n+1}(x) - T_n(x)$$

Ils vérifient alors $\forall n \in \mathbb{N}, \forall \theta \in \mathbb{R}$,

$$T_n(\cos \theta) = \cos(n\theta)$$

Exercice

Ecrire $\cos 3t$ en fonction des puissances de $\cos t$, $\sin 3t$ comme le produit de $\sin t$ et d'une expression contenant des puissances de $\cos t$. Faire de même avec $\cos 5t$ et $\sin 5t$.

3.4. Argument, forme trigonométrique**Définition - Argument**

Soit $z \in \mathbb{C}$, $z \neq 0$, on a $\frac{z}{|z|} \in \mathbb{U}$ donc il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $\frac{z}{|z|} = e^{i\theta}$.

On dit que θ est un argument de z . On note $\theta = \arg z$.

L'écriture $z = re^{i\theta}$ où $r = |z|$ est appelée forme trigonométrique de z .

Pour aller plus loin - Moins loin...

Rappelons qu'on a dit précédemment que l'argument était plutôt à considérer comme un ensemble de valeurs; une classe d'équivalence.

L'argument est une fonction logarithmique (qui vérifie $f(ab) = f(a) + f(b)$), mais multivariée (à plusieurs valeurs).

Proposition - Arithmétique de la congruence

Si $(z, z') \in (\mathbb{C}^*)^2$, on a

$$\arg \bar{z} \equiv -\arg z \quad [2\pi]$$

$$\arg \frac{1}{z} \equiv -\arg z \quad [2\pi]$$

$$\arg(zz') \equiv (\arg z + \arg z') \quad [2\pi]$$

$$\arg\left(\frac{z}{z'}\right) \equiv (\arg z - \arg z') \quad [2\pi]$$

Attention - Pas d'unicité

Il n'y a pas unicité de l'argument, il est défini à 2π près. On peut imposer l'unicité de l'argument en le choisissant dans un intervalle de longueur 2π (en général $]-\pi, \pi]$ ou $[0, 2\pi[$).

**Remarque - Géométriquement**

Soit z un complexe non nul et M le point d'affixe z . Toute mesure de l'angle orienté $(\vec{u}, \overrightarrow{OM})$ est un argument de z .

Il faut savoir caractériser les complexes non nuls réels (resp. réels positifs, resp. réels négatifs, resp. imaginaires purs) par leur argument.

Proposition - Relation arg et arc tan

Soit $x \in \mathbb{R}$, alors $\arg(1 + ix) \equiv \arctan x [2\pi]$.

Soit $z \in \mathbb{C}$, alors $\arg z \equiv \arctan \frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)} [\pi]$. Précisément :

$$\arg z \equiv \begin{cases} \arctan \frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)} [2\pi] & \text{si } \operatorname{Re}(z) > 0 \\ \pi + \arctan \frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)} [2\pi] & \text{si } \operatorname{Re}(z) < 0 \end{cases}$$

Démonstration

4. Racines d'un nombre complexe

4.1. Recherche de racines carrées

On dit que $Z \in \mathbb{C}$ est une racine carrée de $z \in \mathbb{C}$ si $Z^2 = z$. On dispose de deux méthodes pour chercher les racines carrées de z .

Résolution trigonométrique (la meilleure!)**Truc & Astuce pour le calcul - Racine carrée. Exploitation de la forme trigonométrique**

On considère un complexe non nul z écrit sous forme trigonométrique $z = |z|e^{i\alpha}$, et on cherche Z sous forme trigonométrique $Z = \rho e^{i\theta}$ où $\rho > 0$.

On a alors $Z^2 = \rho^2 e^{2i\theta}$, on fait ensuite une sorte d'identification entre les modules et les arguments (mais attention...).

Exercice

Trouver les racines carrées de $z = \frac{1-i}{\sqrt{3}-i}$.

On rappelle que $\cos \frac{7\pi}{12} = \frac{\sqrt{2}-\sqrt{6}}{4}$ et $\sin \frac{7\pi}{12} = \frac{\sqrt{2}+\sqrt{6}}{4}$

La méthode-algorithmique précédente nous permet d'affirmer :

Proposition - Deux racines complexes

Tout complexe non nul possède exactement deux racines carrées complexes (opposées).

Résolution algébrique

💡 Truc & Astuce pour le calcul - Racine carrée. Exploitation de la forme algébrique

On considère donc un complexe non nul z écrit sous forme algébrique $z = x + iy$, et on cherche Z sous forme algébrique $Z = X + iY$.

Le principe est d'écrire l'égalité des modules, des parties réelles et imaginaires de z et Z^2 pour se ramener à une résolution simple de système donnant X^2, Y^2 et le signe de XY .

$$Z^2 = z \Leftrightarrow \begin{cases} X^2 + Y^2 = \sqrt{x^2 + y^2} \\ X^2 - Y^2 = x \\ 2XY = y \end{cases}$$

On résout le système formée par les deux premières équations, la troisième donne le signe de XY .

Exercice

Déterminer les racines carrées de $2 - 3i$.

Equation du second degré

Le théorème suivant a déjà été vu. Mais ici, on insiste sur le fait que les coefficients peuvent être des nombres complexes.

Proposition - Nombre de racines et degré

L'équation $az^2 + bz + c = 0$, avec $(a, b, c) \in \mathbb{C}^3$, $a \neq 0$, admet deux solutions complexes (éventuellement confondues) $z_1 = \frac{-b - \delta}{2a}$ et $z_2 = \frac{-b + \delta}{2a}$ où δ est une racine carrée complexe de $b^2 - 4ac$.



Remarque - Bien connu...

On retrouve la résolution déjà connue d'une équation du second degré à coefficients réels.

Proposition - Théorème de Viète

Soient $(S, P) \in \mathbb{C}^2$. Les solutions du système

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = S \\ z_1 \times z_2 = P \end{cases}$$

sont exactement (à permutation près) les solutions de $z^2 - Sz + P = 0$

Exercice

Résoudre dans $\mathbb{C}$ le système d'équation $\begin{cases} z_1 + z_2 = 3 \\ z_1 \times z_2 = 1 - 3i \end{cases}$.

4.2. Racines n -ièmes de l'unité

Théorème - Les n solutions de $z^n = 1$

Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Les n racines n -ièmes de l'unité, c'est à dire les solutions de l'équation $z^n = 1$, sont les n nombres $e^{\frac{2ik\pi}{n}}$ avec $k \in \{0, 1, \dots, n-1\}$.

On note $\mathbb{U}_n = \left\{ e^{\frac{2ik\pi}{n}}; k \in \{0, 1, \dots, n-1\} \right\}$



Pour aller plus loin - Groupes $(\mathbb{U}_n, \times)$

L'ensemble $\mathbb{U}_n$ des racines n -ième de l'unité, avec la loi de multiplication $\times$ en fait un groupe.

Nous reprendrons son étude plus précisément, dans quelques semaines.

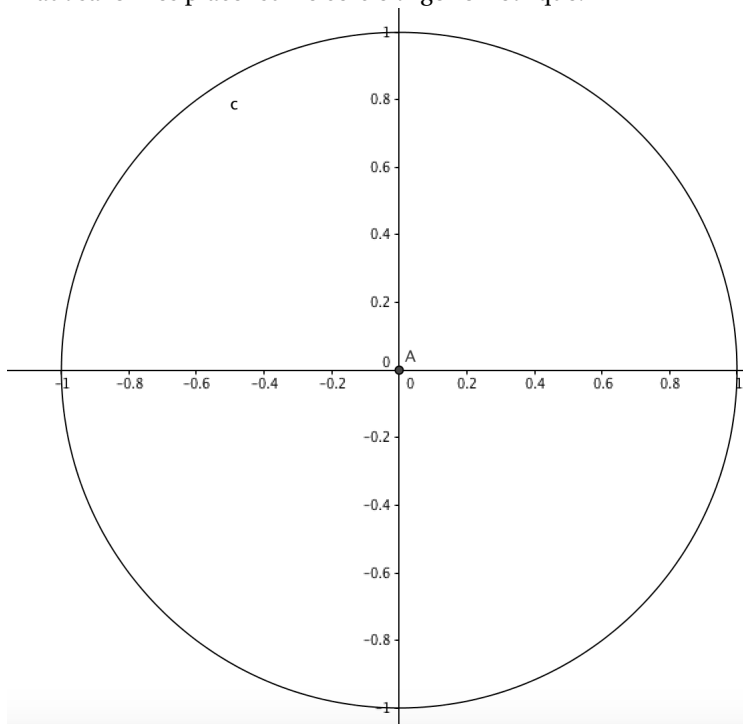
On obtient donc pour

$$n = 2 : 1 \text{ et } -1;$$

$$n = 3 : 1, j = e^{\frac{2i\pi}{3}} = \exp \frac{2i\pi}{3} \text{ et } j^2 = \bar{j} = e^{\frac{4i\pi}{3}} = \exp \frac{4i\pi}{3};$$

$$n = 4 : 1, i, -1 \text{ et } -i.$$

Il faut savoir les placer sur le cercle trigonométrique.



Proposition - Somme des racines n -ième

Soit $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 2$. La somme des racines n -ièmes de l'unité est nulle.
En particulier $1 + j + j^2 = 0$.

Démonstration

4.3. Racines n -ièmes d'un nombre complexe

Théorème - Racines n -ièmes de z_0

Soient $z_0 \in \mathbb{C}^*$ et $n \in \mathbb{N}^*$. Alors z_0 a exactement n racines n -ièmes (solutions de $z^n = z_0$).

Si $z_0 = |z_0|e^{i\alpha}$, alors ce sont les

$$z_k = |z_0|^{1/n} e^{i(\frac{\alpha}{n} + \frac{2k\pi}{n})} \text{ où } k \in \{0, 1, \dots, n-1\}.$$

Exercice

Déterminer les racines n -ièmes de $\frac{1+\sqrt{3}i}{1-i}$.

On rappelle que $\cos \frac{7\pi}{12} = \frac{\sqrt{2}-\sqrt{6}}{4}$ et $\sin \frac{7\pi}{12} = \frac{\sqrt{2}+\sqrt{6}}{4}$

Exercice

Résoudre dans $\mathbb{C}$ l'équation $(z-1)^6 + (z+1)^6 = 0$.

On voit bien sur ces exemples qu'il est préférable d'exploiter la forme géométrique lorsqu'on cherche des racines de nombres complexes...

5. $\mathbb{R}^2 = \mathbb{C} = \mathcal{P}$

5.1. Regard géométrique sur le plan complexe

Proposition - Identification

On munit le plan $\mathcal{P}$ d'un repère orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j})$.

Soient A, B, A', B' quatre points du plan. On a alors (*mesure des angles orientés de vecteurs*) :

$$|z_A| = OA$$

$$AB = |z_B - z_A|$$

$$\arg z_A \equiv (\vec{i}, \overrightarrow{OA})[2\pi] \quad \text{et plus généralement : } \arg(z_B - z_A) \equiv (\vec{i}, \overrightarrow{AB})[2\pi]$$

$$\arg\left(\frac{z_{B'} - z_{A'}}{z_B - z_A}\right) \equiv (\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{A'B'})[2\pi]$$

Le dernier résultat, essentiel, mérite une démonstration

Démonstration

🔗 **Analyse - Le nombre $Z = z' \times \bar{z}$**

Définition - Le complexe Z

Soient A, B, A', B' quatre points du plan d'affixe $z_A, z_B, z_{A'}$ et $z_{B'}$ respectivement.

On note $Z = (z_{B'} - z_{A'}) \times \overline{(z_B - z_A)}$.

Alors

$$\arg Z \equiv (\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{A'B'})[2\pi] \quad \text{et} \quad |Z| = \|\overrightarrow{AB}\| \times \|\overrightarrow{A'B'}\|$$

où $\|\vec{u}\| = \sqrt{x^2 + y^2}$ est par définition la norme (longueur) du vecteur $\vec{u}(x, y)$.

Et donc

$$Z = \|\overrightarrow{AB}\| \|\overrightarrow{A'B'}\| \left[\cos(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{A'B'}) + i \sin(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{A'B'}) \right]$$

Le calcul donne :

Proposition - Partie réelle et imaginaire de Z

Avec les mêmes notations et en notant $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$ d'affixe $z = z_B - z_A = x + iy$ et $\vec{u}' = \overrightarrow{A'B'}$ d'affixe $z' = z_{B'} - z_{A'} = x' + iy'$.

On rappelle que $Z = z' \times \bar{z}$. On a alors :

$$\Re(Z) = \|\vec{AB}\| \|\vec{A'B'}\| \cos(\vec{AB}, \vec{A'B'}) = xx' + yy'$$

$$\Im(Z) = \|\vec{AB}\| \|\vec{A'B'}\| \sin(\vec{AB}, \vec{A'B'}) = xy' - x'y$$

Démonstration

5.2. Lignes de niveau

Une droite est un ensemble de points alignés. Pour définir une (équation de) droite, on exploite donc les deux points de vue sur l'alignement.

Théorème - Utilisation des complexes - Droite

1. La droite (AB) privée des points A et B (d'affixes respectives a et b) est l'ensemble des points M d'affixe z vérifiant

$$\arg\left(\frac{z-b}{z-a}\right) \equiv 0[\pi].$$

2. La droite (AB) privée du point A est l'ensemble des points M d'affixe z vérifiant

$$\frac{z-b}{z-a} = \overline{\left(\frac{z-b}{z-a}\right)}$$

3. La droite (AB) est l'ensemble des points M d'affixe z vérifiant

$$(z-b)(\overline{z-a}) = \overline{(z-b)}(z-a).$$

Pour aller plus loin - Ligne de niveau circulaire

En fait l'ensemble des points M d'affixe z vérifiant

$$\arg\left(\frac{z-b}{z-a}\right) \equiv \theta[\pi]$$

est toujours un cercle (de rayon infini si $\theta \equiv 0[\pi]$) passant par A et B (mais privé de ces points).

Pour démontrer ce résultat, en suivant les mêmes idées que lors de la démonstration précédente, on peut utiliser une information supplémentaire : le centre I de ce cercle se trouve évidemment sur la médiatrice de $[AB]$ et l'angle $(\vec{IA}, \vec{IB}) \equiv 2\theta[\pi]$ (cf. angle au centre et angle au sommet dans un cercle...).

Démonstration

Exercice

Donner l'équation de la droite (complexe) qui passe par les points $A(1+i)$ et $B(2-i)$.

Théorème - Ligne de niveau - Cercle

Soient A, B, C trois points distincts d'affixes respectives a, b et c .

1. $(AB) \perp (AC) \Leftrightarrow \arg\left(\frac{c-a}{b-a}\right) \equiv \frac{\pi}{2}[\pi]$

2. L'ensemble des points M d'affixe z vérifiant

$$\arg\left(\frac{z-b}{z-a}\right) \equiv \frac{\pi}{2} [\pi]$$

est le cercle de diamètre $[AB]$ privé des points A et B .

3. L'ensemble des points M d'affixe z vérifiant

$$\frac{z-b}{z-a} = -\overline{\left(\frac{z-b}{z-a}\right)}$$

est le cercle de diamètre $[AB]$ privé du point A .

4. L'ensemble des points M d'affixe z vérifiant $(z-b)\overline{(z-a)} = -\overline{(z-b)}(z-a)$ est le cercle de diamètre $[AB]$.

Démonstration

5.3. Transformations du plan (point de vue complexe)

Transformations « élémentaires »

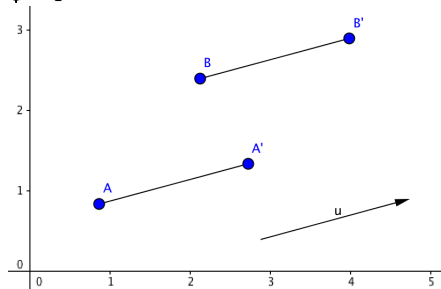
Définition - Transformation du plan

On appelle transformation du plan toute bijection du plan dans lui-même.

⚠ Attention - Projection

↗ Une projection sur une droite n'est pas une transformation du plan.

✳ Représentation - Translation de vecteur $\vec{u}$



Définition - Translation

On appelle translation de vecteur $\vec{u}$ l'application

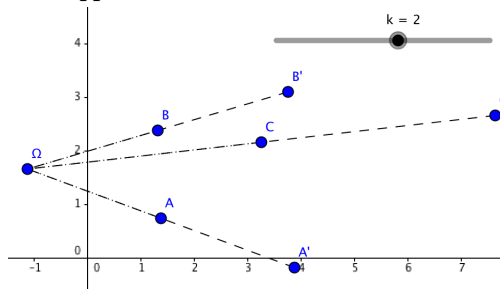
$$t_{\vec{u}}: \mathcal{P} \rightarrow \mathcal{P} \\ M \mapsto M' \text{ tel que } \overrightarrow{MM'} = \vec{u}$$

En complexes, $t_{\vec{u}}$ est représentée par l'application de $\mathbb{C}$ dans $\mathbb{C}$ définie par

$$z \mapsto z + z_0$$

où z_0 est l'afixe du vecteur $\vec{u}$.

✳ Représentation - Homothétie de centre Ω et de rapport $k = 2$



Définition - Homothétie

On appelle homothétie de centre Ω et de rapport le réel $k \neq 0$ l'application

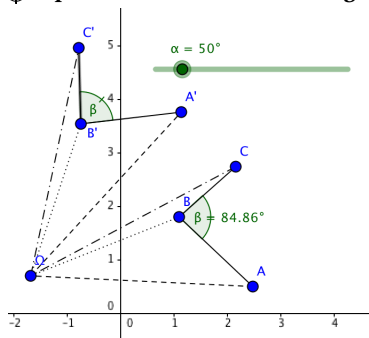
$$h_{\Omega, k}: \mathcal{P} \rightarrow \mathcal{P} \\ M \mapsto M' \text{ tel que } \overrightarrow{\Omega M'} = k \overrightarrow{\Omega M}$$

En complexes, $h_{\Omega, k}$ est représentée par l'application de $\mathbb{C}$ dans $\mathbb{C}$ définie par

$$z \mapsto z_0 + k(z - z_0)$$

où z_0 est l'afixe du point Ω .

✳ Représentation - Rotation d'angle α



Définition - Rotation

On appelle rotation de centre Ω et d'angle θ l'application

$$R_{\Omega, \theta}: \mathcal{P} \rightarrow \mathcal{P} \\ M \mapsto M' \text{ tel que } \begin{cases} \Omega M' = \Omega M \\ (\overrightarrow{\Omega M}, \overrightarrow{\Omega M'}) \equiv \theta [2\pi] \end{cases} \text{ si } M \neq \Omega \\ \Omega \mapsto \Omega$$

En complexes, $R_{\Omega, \theta}$ est représentée par l'application de $\mathbb{C}$ dans $\mathbb{C}$ définie par

$$z \mapsto z_0 + e^{i\theta}(z - z_0)$$

où z_0 est l'afixe du point Ω .

Similitudes (directes)

Il s'agit de composition de rotation et d'homothétie...

Définition - Similitude directe

On appelle similitude directe du plan toute transformation représentée dans le plan complexe par une application de la forme

$$z \mapsto az + b$$

avec $(a, b) \in \mathbb{C}^* \times \mathbb{C}$.

**Remarque - Les transformations élémentaires**

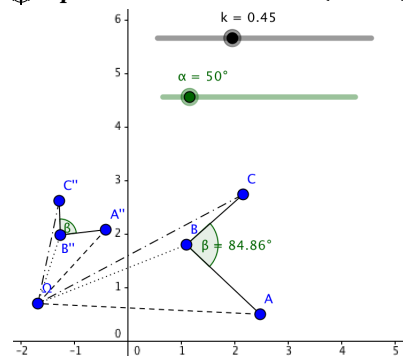
Translations, homothéties et rotations sont des similitudes directes, il suffit de regarder leur expression en complexe.

🔍 Analyse - Résultats caractéristiques**Proposition - Similitude directe**

Une similitude directe conserve les angles et les rapports des distances.

Si A, B, C sont trois points distincts d'images respectives A', B', C' par Alors

$$(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AC}) \equiv (\overrightarrow{A'B'}, \overrightarrow{A'C'})[2\pi] \quad \text{et} \quad \frac{AB}{AC} = \frac{A'B'}{A'C'}$$

Démonstration**✳️ Représentation - Similitude (directe)****Théorème - Caractérisation**

Soit f la transformation du plan représentée par $z \mapsto az + b$ avec $a \in \mathbb{C}^*, b \in \mathbb{C}$.

- Si $a = 1$, f est la translation de vecteur d'affixe b .
- Si $a \neq 1$, f admet un unique point fixe (point invariant) $\Omega(\frac{b}{1-a})$ appelé centre de la similitude.

f s'écrit alors : $f = h \circ r = r \circ h$ avec

- r rotation de centre Ω d'angle de mesure $\arg a$
- h homothétie de centre Ω et de rapport $|a|$.

On dit que $|a|$ est le rapport de la similitude, et $\arg a$ est (la mesure de) l'angle de la similitude.

Démonstration

**Remarque - Cas particuliers avec $a \neq 1$:**

- Si $a \in \mathbb{R}^*$, f est l'homothétie de centre Ω de rapport a .
- Si $|a| = 1$, f est la rotation de centre Ω , d'angle $\theta = \arg a$.

Corollaire - Caractérisation de la similitude

La similitude de centre d'affixe z_0 , de rapport k et d'angle θ est représentée par

$$z \mapsto z_0 + ke^{i\theta}(z - z_0).$$

**Savoir faire - Reconnaître une similitude**

Etant donnée une transformation, pour reconnaître une similitude il faut :

1. chercher le point fixe : la solution de $f(z) = z$.
On le note z_0 , c'est le centre de la similitude.
2. chercher le complexe a tel que $f(z) - z_0 = a(z - z_0)$.
Ce complexe a donne le rapport et l'angle de la similitude

Proposition - Composée de similitudes

La composée de deux similitudes est une similitude dont le rapport est le produit des rapports et l'angle, la somme des angles.

On a les cas particuliers suivants :

- la composée de deux translations est une translation de vecteur la somme des deux vecteurs,
- la composée de deux homothéties est soit une homothétie soit une translation,
- la composée de deux rotations de même centre est une rotation de même centre et d'angle la somme des deux angles (éventuellement d'angle nul, i.e. l'identité du plan)
- la composée de deux rotations de centres distincts, d'angles respectifs θ et θ' est :
 - une rotation si $\theta + \theta' \not\equiv 0[2\pi]$
 - une translation (éventuellement de vecteur nul, i.e. l'identité) sinon.

Démonstration

Corollaire - Transformation réciproque (ou inverse)

On a les transformations réciproques suivantes :

$$t_{\vec{u}}^{-1} = t_{-\vec{u}}; \quad h_{\Omega, k}^{-1} = h_{\Omega, \frac{1}{k}}; \quad R_{\Omega, \theta}^{-1} = R_{\Omega, -\theta}.$$

Proposition - Transformation du plan

Etant donné deux segments $[MN]$ et $[M'N']$ de longueurs non nulles, il existe une et une seule similitude directe transformant M en M' et N en N' .

Démonstration

Symétries

Définition - Symétries

On appelle :

- Symétrie centrale de centre Ω l'application

$$s_{\Omega} : \mathcal{P} \rightarrow \mathcal{P}$$

$$M \mapsto M' \text{ tel que } \overrightarrow{\Omega M'} = -\overrightarrow{\Omega M}$$

En complexes, s_{Ω} est représentée par l'application de $\mathbb{C}$ dans $\mathbb{C}$ définie par $z \mapsto 2z_0 - z$ où z_0 est l'abscisse du point Ω .

- Symétrie orthogonale d'axe la droite $\mathcal{D}$ (ou réflexion d'axe $\mathcal{D}$) l'application

$$s_{\mathcal{D}} : \mathcal{P} \rightarrow \mathcal{P}$$

$$M \mapsto M' \text{ tel que } \begin{cases} M' = M \text{ si } M \in \mathcal{D} \\ \mathcal{D} \text{ est la médiatrice de } [MM'] \text{ sinon} \end{cases}$$

La symétrie orthogonale par rapport à Ox est représentée par l'application de $\mathbb{C}$ dans $\mathbb{C}$ définie par $z \mapsto \bar{z}$.

**Remarque - Symétrie centrale**

Une symétrie centrale peut être considérée comme une homothétie de rapport -1 ou une rotation d'angle π , c'est une similitude directe.

Attention - Réflexion

⚡ Une réflexion n'est pas une similitude directe

Proposition - Involution

Une symétrie est une transformation du plan : $s^{-1} = s$.

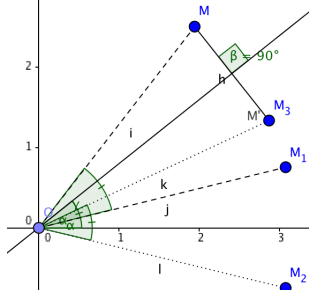
Démonstration

Pour aller plus loin - Symétrie axiale (orthogonale) et composition

Une réflexion peut s'écrire comme une composée de similitude directe et de $\text{conj} : z \mapsto \bar{z}$. La figure suivant donne une décomposition possible :

$$r(z) = [R_{0,\theta} \circ \text{conj} \circ R_{0,\theta}^{-1}](z)$$

où θ est l'angle entre l'axe de abscisse et l'axe de symétrie.



Pour aller plus loin - Inversion

L'inversion est une transformation essentielle en géométrie projective.

L'inversion par rapport au cercle $\mathcal{C}$ de centre $\Omega(\omega)$ et de rayon $r \in \mathbb{R}$ est l'application $M(z) \mapsto M'(z')$ tel que $(z - \omega) \times (z' - \omega) = r^2$.

Pour que Ω puisse avoir une image, on la définit sur $\mathbb{C} \cup \{\infty\}$

6. Bilan

Synthèse

↪ Les relations trigonométriques permettent d'obtenir une relation algébrique simple lorsqu'on considère la fonction d'EULER à valeurs

complexes $t \mapsto \cos t + i \sin t$, notée $e^{it} : e^{i(a+b)} = e^{ia} \times e^{ib}$. A partir de celle-ci, on retrouve toutes les formules (en exploitant la relation de DE MOIVRE, le binôme de NEWTON ou les fonctions linéaires $\Re$ ou $\Im$).

A savoir-faire manipuler absolument!

- ↪ Très souvent la question se pose de manière réciproque : étant donné une longueur de quel angle en est-elle le cos? Le problème, la fonction n'est pas injective : on peut avoir $\theta \neq \theta'$ et $\cos \theta = \cos \theta'$. On restreint donc l'intervalle image. On crée ainsi une fonction réciproque arccos à la fonction $\cos|_{[0,\pi]} : [0,\pi] \rightarrow [-1,1]$. De même pour les fonctions $\sin|_{[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}]}$ et $\tan|_{[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}]}$.
- ↪ On se pose la même question pour $z \mapsto z^2$ et plus largement $z \mapsto z^n$. Étant donné un nombre complexe $Z = \rho e^{i\alpha}$, il y a exactement n nombres complexes différents $z_1, \dots, z_n$ tels que pour tout $k \in \mathbb{N}_n$, $(z_k)^n = Z$. Ce sont les racines n -ième de Z . Pour les obtenir, on se ramène aux **classiques racines n -ième de l'unité** $e^{2ik\pi/n}$ en divisant par $\sqrt[n]{\rho} e^{i\alpha/n}$.
Au passage, on trouve une méthode complémentaire (algébrique) dans le simple cas de la racine carrée d'un nombre complexe.
- ↪ La géométrie plane (de $\mathbb{R}^2$) se code parfaitement par du calcul, sur $\mathbb{C}$. Les concepts naturels de géométrie (longueur, orthogonalité, parallélisme) se réduisent exactement par du calcul, selon le rêve de Descartes ou de Leibniz.
- ↪ En retour, le calcul complexe simple : addition, multiplication, division devient une opération géométrique : translation, similitude sans ou avec conjugaison respectivement voire inversion...

Savoir-faire et Truc & Astuce du chapitre

- Truc & Astuce pour le calcul - Factorisation de l'angle moitié
- Savoir-faire - Linéarisation
- Savoir-faire - Expression de $\cos(nt)$ et $\sin(nt)$ en fonction de $\cos t$ et $\sin t$
- Truc & Astuce pour le calcul - Racine carrée. Exploitation de la forme trigonométrique
- Truc & Astuce pour le calcul - Racine carrée. Exploitation de la forme algébrique
- Savoir-faire - Obtenir l'équation d'une droite (avec un point et un vecteur directeur ou avec deux points)
- Savoir-faire - Interprétation en terme de projection
- Savoir-faire - Obtenir l'équation d'une droite (avec un point et un vecteur normal)
- Savoir-faire - Reconnaître une similitude

Notations

Notations	Définitions	Propriétés	Remarques
$\Re, \Im$	Fonctions partie réelles et parties imaginaires, appliquées à un nombre complexe	Elles sont $\mathbb{R}$ -linéaires ($\forall a_1, a_2 \in \mathbb{R}, z_1, z_2 \in \mathbb{C}, \Re(a_1 z_1 + a_2 z_2) = a_1 \Re(z_1) + a_2 \Re(z_2)$...)	
$e^{i\theta}$	$e^{i\theta} := \cos \theta + i \sin \theta$ (Euler)	$e^{i(\theta+\theta')} = e^{i\theta} \times e^{i\theta'}$	Relations de de Moivre : $\cos \theta = \Re(e^{i\theta}) = \frac{1}{2}(e^{i\theta} + e^{-i\theta})$, $\sin \theta = \Im(e^{i\theta}) = \frac{1}{2i}(e^{i\theta} - e^{-i\theta})$.
j	$j := e^{2i\pi/3} = \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2}$	$j^3 = 1, 1 + j + j^2 = 0$	Racine primitive troisième de l'unité (avec $\bar{j} = j^2$)
$\mathbb{U}_n$	Ensemble des racines n -ième de l'unité $\mathbb{U}_n := \{z \in \mathbb{C} \mid z^n = 1\}$	$z \in \mathbb{U}_n$ si et seulement si $\exists ! k \in \mathbb{N}_n$ (ou $\exists ! k \in [0, n-1]$) tq $z = e^{2ik\pi/n}$	Reviendra souvent dans l'année.

Retour sur les problèmes

16. Multiplication des nombres.

$z \times z'$ donne (géométriquement) le nombre complexe obtenu par similitude de centre O , de longueur $|z|$, et d'angle $\arg(z)$ à partir du point $Z'(z')$.

On peut l'obtenir en appliquant le théorème de Thalès. On note I , l'intersection du cercle unité et de la droite OZ' . Puis on trace la parallèle à IZ passant par Z' . L'intersection de cette droite avec OZ donne le point $Z''(z \times z')$.

17. Le centre du triangle équilatéral sur le côté $[AB]$ a pour affixe $z_1 = \frac{b - e^{i\pi/6}a}{1 - e^{i\pi/6}} = \frac{ibe^{-i\pi/12} - iae^{i\pi/12}}{2\sin \frac{\pi}{12}}$ car $(b - z_1) = e^{i\pi/6}(a - z_1) \dots$

18. Transformation du plan

Tout le chapitre répond à cet exercice

19. $\cos \theta_2 = i \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{n_2}$. Pour le reste, voir avec M. Lagoute.