

Nombres complexes

De la même manière que des nombres irrationnels tels que $\sqrt{2}$ ont motivé la construction de l'ensemble des nombres réels, ce dernier ne suffit plus. En effet, l'équation $x^2 + 1 = 0$ n'admet pas de racine réelle. Au XVI^{ème} siècle, Bombelli (après avoir lu les travaux de Cardan, eux-même inspirés de ceux de Tartaglia) en « invente » une pour résoudre des équations du troisième degré (à racines réelles !) et introduit la notation $\sqrt{-1}$. C'est l'apparition des nombres complexes. Ce nombre imaginaire est désormais noté i .

7.1 Introduction du corps des nombres complexes

7.1.1 Construction

On considère $\mathbb{R}^2 = \{(a, b) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}\}$ l'ensemble des points du plan. L'axe des abscisses est identifié à la droite des nombres réels et tout point de la forme $(a, 0)$ est identifié au nombre réel a . On munit $\mathbb{R}^2$ des opérations $+$ et $\times$ définies par

$$(a, b) + (a', b') = (a + a', b + b')$$

et

$$(a, b) \times (a', b') = (aa' - bb', ab' + a'b).$$

Remarquons que ces opérations sont commutatives par commutativité des lois $+$ et $\times$ sur $\mathbb{R}$. Ces opérations étendent les lois $+$ et $\times$ définies sur $\mathbb{R}$: en effet, soient a et a' deux nombres réels. On a

$$(a, 0) + (a', 0) = (a + a', 0)$$

qui est identifié au nombre réel $a + a'$ et

$$(a, 0) \times (a', 0) = (aa', 0)$$

qui est identifié au nombre réel aa' .

De plus, on remarque que

$$(0, 1)^2 = (0, 1) \times (0, 1) = (-1, 0).$$

Ainsi, si on note $i = (0, 1)$, on a bien $i^2 = -1$.

Plus généralement, pour tout $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, on a

$$(a, b) = (a, 0) + (0, b) = (a, 0) + (0, 1)(b, 0) = a + ib.$$

On peut donc donner la définition de l'ensemble des nombres complexes :

Définition 1

On définit l'ensemble des nombres complexes, noté $\mathbb{C}$, par

$$\mathbb{C} = \{a + ib, (a, b) \in \mathbb{R}^2\}.$$

Tout nombre complexe s'écrit de façon unique sous la forme $z = a + ib$, où a et b sont des nombres réels. Cette écriture est appelée écriture algébrique (ou cartésienne) du nombre complexe z .

Le réel a est appelé la partie réelle du nombre complexe z et on note $a = \operatorname{Re}(z)$.

Le réel b est appelé la partie imaginaire du nombre complexe z et on note $b = \operatorname{Im}(z)$.

Exemple 1. Soit $z = 2 + 3i$. Alors $\operatorname{Re}(z) = 2$ et $\operatorname{Im}(z) = 3$.

Remarque 1. • On a les inclusions $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$.

On note $\mathbb{C}^* = \mathbb{C} \setminus \{0\}$.

• Au vu de la construction des nombres complexes, on peut donc représenter les nombres complexes comme l'ensemble des points du plan $\mathbb{R}^2$, le nombre complexe $a + ib$ étant identifié au point (a, b) .

• Soient $(z, z') \in \mathbb{C}^2$. Alors

$$z = z' \Leftrightarrow (\operatorname{Re}(z) = \operatorname{Re}(z') \quad \text{et} \quad \operatorname{Im}(z) = \operatorname{Im}(z')).$$

Proposition 1

Soit $z = \operatorname{Re}(z) + i\operatorname{Im}(z) \in \mathbb{C}$. Alors

$$z \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \operatorname{Im}(z) = 0.$$

Définition 2: Imaginaire pur

Soit $z \in \mathbb{C}$.

Si $\operatorname{Re}(z) = 0$, on dit que z est un imaginaire pur.

Ainsi, z est un imaginaire pur si $z = i\operatorname{Im}(z)$.

On note $i\mathbb{R}$ l'ensemble des imaginaires purs.

Remarque 2. Si on représente géométriquement l'ensemble des nombres complexes comme les points de $\mathbb{R}^2$, les imaginaires purs sont les points situés sur l'axe des ordonnées.

Remarquons que $\mathbb{R} \cap i\mathbb{R} = \{0\}$.

7.1.2 Propriétés

Soit $z = a + ib$ et $z' = a' + ib'$ avec $(a, a', b, b') \in \mathbb{R}^4$. En utilisant l'écriture algébrique des nombres complexes, l'addition et la multiplication s'écrivent :

$$z + z' = (a + ib) + (a' + ib) = \underbrace{(a + a')}_{\in \mathbb{R}} + i \underbrace{(b + b')}_{\in \mathbb{R}} \in \mathbb{C}$$

et

$$z \times z' = (a + ib) \times (a' + ib') = \underbrace{(aa' - bb')}_{\in \mathbb{R}} + i \underbrace{(ab' + a'b)}_{\in \mathbb{R}} \in \mathbb{C}.$$

On remarque que l'addition et la multiplication de deux nombres complexes sont des nombres complexes.

Ces deux écritures sont naturelles : en effet, la première est celle qu'on écrirait naturellement et la deuxième découle du fait que $i^2 = -1$ puisque si on développe le produit comme on le ferait pour des nombres réels, on a

$$z \times z' = (a + ib) \times (a' + ib') = aa' + iab' + iba' + i^2bb' = (aa' - bb') + i(ab' + a'b).$$

Enfin, comme pour les nombres réels, on note très souvent (quasiment toujours, en fait) zz' au lieu de $z \times z'$.

Exemple 2. • $(1 - 2i)(6 + i) = (1 \times 6 - (-2) \times 1) + i(1 \times 1 - 2 \times 6) = 8 - 11i$.

Proposition 2

L'addition et la multiplication des nombres complexes vérifient les propriétés suivantes :

1. L'addition est associative et commutative. Elle admet 0 pour élément neutre. De plus, tout nombre complexe $z = \operatorname{Re}(z) + i\operatorname{Im}(z)$ admet $-z = -\operatorname{Re}(z) - i\operatorname{Im}(z)$ pour opposé pour la loi $+$.
2. La multiplication est associative et commutative. Elle admet 1 pour élément neutre. De plus, tout nombre complexe non nul $z = \operatorname{Re}(z) + i\operatorname{Im}(z)$ admet

$$\frac{1}{z} = \frac{\operatorname{Re}(z) - i\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)^2 + \operatorname{Im}(z)^2}$$

pour inverse pour la loi $\times$.

3. La multiplication est distributive par rapport à l'addition.

Démonstration.

1. Soient $(a, b, a', b') \in \mathbb{R}^4$. On a déjà vu que

$$(a + ib) + (a' + ib') = (a + a') + i(b + b') = (a' + a) + i(b' + b) = (a' + ib') + (a + ib)$$

donc l'addition est commutative.

Soit $(a'', b'') \in \mathbb{R}^2$.

$$\begin{aligned} ((a + ib) + (a' + ib')) + (a'' + ib'') &= ((a + a') + i(b + b')) + (a'' + ib'') \\ &= (a + a' + a'') + i(b + b' + b'') \\ &= (a + ib) + ((a' + a'') + i(b' + b'')) \\ &= (a + ib) + ((a' + ib') + (a'' + ib'')), \end{aligned}$$

ce qui prouve que l'addition est associative.

Par définition de l'addition, on a

$$a + ib + 0 = (a + 0) + ib = a + ib = (0 + a) + ib = 0 + a + ib$$

donc 0 est bien l'élément neutre de l'addition.

Enfin, $(a + ib) + (-a - ib) = (a - a) + i(b - b) = 0$ donc $-a - ib$ est bien l'opposé de $a + ib$.

2. Soient $(a, b, a', b') \in \mathbb{R}^4$. On a déjà vu que

$$(a + ib)(a' + ib') = (aa' - bb') + i(ab' + a'b) = (a'a - b'b) + i(b'a + a'b) = (a' + ib')(a + ib),$$

donc la multiplication est commutative.

Soit $(a'', b'') \in \mathbb{R}^2$.

$$\begin{aligned}
 [(a + ib)(a' + ib')](a'' + ib'') &= [(aa' - bb') + i(a'b + ab')](a'' + ib'') \\
 &= (aa' - bb')a'' - (a'b + ab')b'' + i((aa' - bb')b'' + (a'b + ab')a'') \\
 &= aa'a'' - a''bb' - a'b b'' - ab'b'' + i(aa'b'' - bb'b'' + a'a''b + aa''b') \\
 &= a(a'a'' - b'b'') - b(a''b' + a'b'') + i(a(a'b'' + a''b') + b(a'a'' - b'b'')) \\
 &= (a + ib)[(a'a'' - b'b'') + i(a''b' + a'b'')] \\
 &= (a + ib)[(a' + ib')(a'' + ib'')],
 \end{aligned}$$

ce qui assure l'associativité de la multiplication.

Par définition de la multiplication, on a

$$(a + ib) \times 1 = (a + ib) \times (1 + 0i) = a + ib = (1 + 0i) \times (a + ib) = 1 \times (a + ib),$$

donc 1 est bien l'élément neutre de la multiplication.

Supposons que $a + ib \neq 0$, ce qui implique que $(a, b) \neq (0, 0)$, de telle sorte que $a^2 + b^2 \neq 0$.

Alors on a

$$\frac{1}{a^2 + b^2}(a - ib)(a + ib) = \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2} = 1,$$

donc l'inverse de $z = a + ib$ pour la loi $\times$ est bien $\frac{1}{z} = \frac{a - ib}{a^2 + b^2}$.

3. Soient $(a, a', a'', b, b', b'') \in \mathbb{R}^6$. On a

$$\begin{aligned}
 (a + ib)[(a' + ib') + (a'' + ib'')] &= (a + ib)(a' + a'' + i(b' + b'')) \\
 &= a(a' + a'') - b(b' + b'') + i(a(b' + b'') + b(a' + a'')) \\
 &= aa' + aa'' - bb' - bb'' + i(ab' + ab'' + ba' + ba'') \\
 &= [aa' - bb' + i(ab' + a'b)] + [aa'' - bb'' + i(ab'' + a''b)] \\
 &= (a + ib)(a' + ib') + (a + ib)(a'' + ib''),
 \end{aligned}$$

ce qui prouve la distributivité de la multiplication par rapport à l'addition. ■

Exemple 3.

$$\frac{1}{i} = -i.$$

En effet, $(-i) \times i = -i^2 = -(-1) = 1$.

Notons que $i^3 = i^2 \times i = -i$, $i^4 = i^3 \times i = -i \times i = 1$, $i^5 = i$, $i^6 = -1$...

Remarque 3. • On peut résumer toutes ces propriétés en disant que $\mathbb{C}$ est un corps.

• Soient $(z, z') \in \mathbb{C}^2$ tels que $zz' = 0$. Alors $z = 0$ ou $z' = 0$.

En effet, si $z = 0$, c'est fini. Supposons que $z \neq 0$. On peut donc multiplier zz' par $\frac{1}{z}$ et on obtient :

$$\frac{1}{z}(zz') = 0 \Rightarrow \left(\frac{1}{z}z\right)z' = 0 \Rightarrow z' = 0.$$

• Il y a bien unicité de l'opposé de z .

Supposons que $z + z' = z + z'' = 0$.

Alors $z' = z' + (z + z'') = (z' + z) + z'' = z''$.

• Si $z \neq 0$, il y a bien unicité de l'inverse de z . Supposons que $zz' = z'z = zz'' = z''z = 1$.

Alors $z' = z'(zz'') = (z'z)z'' = z''$.

• Pour tout $(z, z') \in \mathbb{C} \times \mathbb{C}^*$, $\frac{z}{z'} = z \times \frac{1}{z'}$.

- Le produit de deux imaginaires purs est un réel.

En effet, soit $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, alors $ia \times ib = -ab \in \mathbb{R}$.

- Toutes les règles usuelles de calcul vues sur $\mathbb{R}$ s'étendent naturellement à celles de $\mathbb{C}$, notamment celles sur les fractions et les puissances.

Ceci nous permet de prouver la propriété qu'on souhaitait et qui est la raison d'être de $\mathbb{C}$: pour tout nombre réel négatif a , il existe un nombre complexe dont le carré vaut a .

En effet, $(i\sqrt{-a})^2 = i^2\sqrt{-a}^2 = (-1) \times (-a) = a$.

De même, $(-i\sqrt{-a})^2 = (-i)^2\sqrt{-a}^2 = (-1) \times (-a) = a$.

Ainsi, tout nombre réel non nul admet deux racines carrées dans $\mathbb{C}$. On peut se demander si tout nombre complexe admet une racine carrée dans $\mathbb{C}$. On verra plus loin que c'est également le cas.

Exemple 4.

$$\left(\frac{\sqrt{2}}{2} + i\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 + 2i\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 + \left(i\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = \frac{1}{2} + i - \frac{1}{2} = i.$$

On remarque que $\left(\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + i\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\right)^2 = i$.

Proposition 3

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

$$\operatorname{Re}(\lambda z + z') = \lambda \operatorname{Re}(z) + \operatorname{Re}(z') \quad \text{et} \quad \operatorname{Im}(\lambda z + z') = \lambda \operatorname{Im}(z) + \operatorname{Im}(z').$$

Remarque 4. On dit que les fonctions $\begin{array}{ccc} \mathbb{C} & \longrightarrow & \mathbb{R} \\ z & \longmapsto & \operatorname{Re}(z) \end{array}$ et $\begin{array}{ccc} \mathbb{C} & \longrightarrow & \mathbb{R} \\ z & \longmapsto & \operatorname{Im}(z) \end{array}$ sont $\mathbb{R}$ -linéaires.

Démonstration. Soient $(z, z') \in \mathbb{C}^2$. Soit $\lambda \in \mathbb{R}$. On a

$$\lambda z + z' = \lambda(\operatorname{Re}(z) + i\operatorname{Im}(z)) + \operatorname{Re}(z') + i\operatorname{Im}(z') = (\lambda \operatorname{Re}(z) + \operatorname{Re}(z')) + i(\lambda \operatorname{Im}(z) + \operatorname{Im}(z')).$$

Par unicité des parties réelle et imaginaire d'un nombre complexe, on en déduit par identification que

$$\operatorname{Re}(\lambda z + z') = \lambda \operatorname{Re}(z) + \operatorname{Re}(z') \quad \text{et} \quad \operatorname{Im}(\lambda z + z') = \lambda \operatorname{Im}(z) + \operatorname{Im}(z').$$

■

Remarque 5. Plus généralement, pour tous nombres complexes $(z_1, \dots, z_n) \in \mathbb{C}^n$, et pour tous réels $(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in \mathbb{R}^n$, on a

$$\operatorname{Re}\left(\sum_{k=1}^n \lambda_k z_k\right) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \operatorname{Re}(z_k) \quad \text{et} \quad \operatorname{Im}\left(\sum_{k=1}^n \lambda_k z_k\right) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \operatorname{Im}(z_k).$$

7.2 Représentation géométrique des nombres complexes

7.2.1 Affixe d'un point, d'un vecteur

On se place dans le plan muni d'un repère orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j})$.

Définition 3: Affixe

- Soit (x, y) un point du plan.
On appelle affixe du point (x, y) le nombre complexe $z = x + iy$.
- Soit $\vec{u}$ un vecteur de coordonnées $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$.
On appelle affixe du vecteur $\vec{u}$ le nombre complexe $z = x + iy$.

Remarque 6. • Tout point situé sur l'axe des abscisses (resp. ordonnées) a pour affixe un nombre réel (resp. imaginaire pur).

- Tout vecteur colinéaire à $\vec{i}$ (resp. à $\vec{j}$) a pour affixe un nombre réel (resp. imaginaire pur).

Exemple 5. Le point M situé sur le cercle trigonométrique de telle sorte que $\widehat{(\vec{i}, \vec{OM})} = \frac{\pi}{3}$ a pour affixe le nombre complexe $z = \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}\right)\right) + i\left(\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)\right) = \frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Remarque 7. Soit $z = x + iy$ et $z' = x' + iy'$ avec $(x, x', y, y') \in \mathbb{R}^4$. Soient M et M' les points du plan de coordonnées respectives (x, y) et (x', y') (de telle sorte que z et z' soient les affixes respectives de M et M'). Ainsi on a les vecteurs

$$\vec{OM} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{OM'} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}.$$

On a $z + z' = (x + x') + i(y + y')$. Soit M'' le point du plan ayant pour affixe $z + z'$. Ses coordonnées sont donc $(x + x', y + y')$. Le vecteur $\vec{OM''}$ a donc pour coordonnées

$$\vec{OM''} \begin{pmatrix} x + x' \\ y + y' \end{pmatrix} = \vec{OM} + \vec{OM'}.$$

Ainsi, la somme des deux nombres complexes $z + z'$ est l'affixe du point M'' tel que $\vec{OM''}$ est la somme des deux vecteurs $\vec{OM}$ et $\vec{OM'}$ où M et M' sont les points du plan d'affixes respectives z et z' .

La somme de deux nombres complexes s'interprète donc géométriquement comme une somme de deux vecteurs.

Proposition 4

Soient M et M' deux points du plan d'affixes respectives z et z' .
Alors le vecteur $\vec{MM'}$ a pour affixe $z' - z$.

Démonstration. Soient $(a, b, a', b') \in \mathbb{R}^4$ tels que $z = a + ib$ et $z' = a' + ib'$.

Par définition, les points M et M' ont pour coordonnées respectives (a, b) et (a', b') .

Ainsi, le vecteur $\vec{MM'}$ a pour coordonnées $\begin{pmatrix} a' - a \\ b' - b \end{pmatrix}$ et donc pour affixe

$$a' - a + i(b' - b) = z' - z.$$

■

7.2.2 Conjugué d'un nombre complexe

Définition 4: Conjugué d'un nombre complexe

Soit $(a, b) \in \mathbb{R}^2$.

Le conjugué du nombre complexe $z = a + ib$, noté $\bar{z}$, est défini par

$$\bar{z} = a - ib.$$

Remarque 8.

$$\bar{z} = 0 \Leftrightarrow a - ib = 0 \Leftrightarrow (a, b) = (0, 0) \Leftrightarrow a + ib = 0 \Leftrightarrow z = 0.$$

Exemple 6. • $\overline{2 + 3i} = 2 - 3i$.

- $\bar{5} = 5$.
- $\bar{i} = -i$.

Remarque 9. Soit $z \in \mathbb{C}$. Soit M le point du plan d'affixe z . Le point M' du plan ayant pour affixe $\bar{z}$ est le symétrique de M par rapport à l'axe des abscisses.

En effet, M a pour coordonnées (a, b) tandis que M' a pour coordonnées $(a, -b)$.

Proposition 5: Propriétés du conjugué

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

1. $\bar{\bar{z}} = z$.
2. $\operatorname{Re}(z) = \frac{z + \bar{z}}{2}$ et $\operatorname{Im}(z) = \frac{z - \bar{z}}{2i}$.
3. $\overline{z + z'} = \bar{z} + \bar{z'}$ et $\overline{z \times z'} = \bar{z} \times \bar{z'}$.
4. Si $z \neq 0$, $\overline{\left(\frac{1}{z}\right)} = \frac{1}{\bar{z}}$ et si $z' \neq 0$, $\overline{\left(\frac{z}{z'}\right)} = \frac{\bar{z}}{\bar{z'}}$.
5. Si $z \neq 0$, $\forall n \in \mathbb{Z}, \bar{z^n} = (\bar{z})^n$.

Démonstration. On note $z = a + ib$ et $z' = a' + ib'$ avec $(a, a', b, b') \in \mathbb{R}^4$, de telle sorte que $\bar{z} = a - ib$ et $\bar{z'} = a' - ib'$.

$$1. \bar{\bar{z}} = \overline{a - ib} = a + ib = z.$$

2. On a

$$\frac{z + \bar{z}}{2} = \frac{(a + ib) + (a - ib)}{2} = \frac{2a}{2} = a = \operatorname{Re}(z)$$

et

$$\frac{z - \bar{z}}{2i} = \frac{(a + ib) - (a - ib)}{2i} = \frac{2ib}{2i} = b = \operatorname{Im}(z).$$

3. On a

$$\overline{z + z'} = \overline{(a + a') + i(b + b')} = a + a' - i(b + b') = a - ib + a' - ib' = \bar{z} + \bar{z'}$$

et

$$\overline{z \times z'} = \overline{aa' - bb' + i(ab' + a'b)} = aa' - bb' - i(ab' + a'b) = (a - ib)(a' - ib') = \bar{z} \times \bar{z'}.$$

4. Supposons que $z \neq 0$.

D'après la propriété précédente, on a

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

$$\text{d'où } \overline{\left(\frac{1}{z}\right)} = \frac{1}{\bar{z}}.$$

On en déduit que si $z' \neq 0$,

$$\overline{\left(\frac{z}{z'}\right)} = \overline{\left(z \times \frac{1}{z'}\right)} = \bar{z} \times \overline{\left(\frac{1}{z'}\right)} = \frac{\bar{z}}{\bar{z'}}.$$

5. Montrons par récurrence que pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\overline{z^n} = (\bar{z})^n$.

Pour $n = 0$, on a $\overline{z^0} = \bar{1} = 1 = (\bar{z})^0$.

Soit $n \in \mathbb{N}$ fixé. On suppose que $\overline{z^n} = (\bar{z})^n$. Alors

$$\overline{z^{n+1}} = \overline{z^n \times z} = \overline{z^n} \times \bar{z} = (\bar{z})^n \times \bar{z} = (\bar{z})^{n+1},$$

ce qui prouve la propriété au rang $n + 1$ et achève la récurrence.

Étendons cette propriété aux entiers relatifs strictement négatifs. Soit $n \in \mathbb{Z}$, avec $n < 0$.

Alors $-n \in \mathbb{N}^*$ donc

$$\overline{z^n} = \overline{\left(\frac{1}{z^{-n}}\right)} = \frac{1}{\overline{z^{-n}}} = \frac{1}{(\bar{z})^{-n}} = \bar{z}^n,$$

donc finalement la propriété est vraie pour tout entier $n \in \mathbb{Z}$. ■

Remarque 10. On peut généraliser ces propriétés.

Pour tous nombres complexes $(z_1, \dots, z_n) \in \mathbb{C}^n$, on a

$$\overline{\sum_{k=1}^n z_k} = \sum_{k=1}^n \bar{z}_k$$

et

$$\overline{\prod_{k=1}^n z_k} = \prod_{k=1}^n \bar{z}_k.$$

Corollaire 1: Caractérisation des réels et des imaginaires purs

Soit $z \in \mathbb{C}$.

1. z est réel si et seulement si $\bar{z} = z$.
2. z est imaginaire pur si et seulement si $\bar{z} = -z$.

Démonstration.

1. On a les équivalences :

$$z \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \operatorname{Im}(z) = 0 \Leftrightarrow \frac{z - \bar{z}}{2i} = 0 \Leftrightarrow \bar{z} = z.$$

2. On a les équivalences :

$$z \in i\mathbb{R} \Leftrightarrow \operatorname{Re}(z) = 0 \Leftrightarrow \frac{z + \bar{z}}{2} = 0 \Leftrightarrow \bar{z} = -z.$$
■

7.2.3 Module d'un nombre complexe

Définition 5: Module d'un nombre complexe

Soit $z = a + ib$ avec $(a, b) \in \mathbb{R}^2$.

On appelle module du nombre complexe z , et on note $|z|$ le nombre défini par

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Remarque 11. On remarque que pour tout $z \in \mathbb{C}$, $|z| \in \mathbb{R}_+$.

De plus, si z est réel, le module de z et la valeur absolue de z coïncident.

En effet, si $z = a + 0i$ avec $a \in \mathbb{R}$, alors

$$|z| = \sqrt{a^2} = |a|.$$

Exemple 7. • $|i| = \sqrt{0^2 + 1^2} = 1$.

$$\bullet |-4 + 6i| = \sqrt{(-4)^2 + 6^2} = \sqrt{16 + 36} = \sqrt{52} = 2\sqrt{13}.$$

Proposition 6

Soit $z \in \mathbb{C}$. Soit M le point du plan $(O, \vec{i}, \vec{j})$ dont l'axe est z .

Alors

$$|z| = OM.$$

Démonstration. En effet, si $z = a + ib$, avec $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, le vecteur $\overrightarrow{OM}$ a pour coordonnées $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$ donc sa longueur est

$$OM = \sqrt{a^2 + b^2} = |z|.$$

■

Remarque 12. Ainsi, pour tout nombre complexe z , le module de z s'interprète comme la distance à l'origine du point du plan d'axe z .

Proposition 7

Soit $z \in \mathbb{C}$.

Alors

$$|z| = \sqrt{z\bar{z}}.$$

Démonstration. Soit $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ tel que $z = a + ib$.

$$\text{Alors } z\bar{z} = (a + ib)(a - ib) = a^2 + b^2.$$

$$\text{Ainsi, } \sqrt{z\bar{z}} = \sqrt{a^2 + b^2} = |z|.$$

■

Remarque 13. Ceci est une propriété fondamentale du module, qu'on écrit souvent $|z|^2 = z\bar{z}$. Ainsi, si $z \neq 0$, on a

$$\frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{|z|^2},$$

formule qu'on a déjà vue écrite sous la forme $\frac{1}{a + ib} = \frac{a - ib}{a^2 + b^2}$.

En particulier, si $|z| = 1$, alors $\frac{1}{z} = \bar{z}$.

Proposition 8: Propriétés du module

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

1. $|\bar{z}| = |z|$;
2. $|z| = 0 \Leftrightarrow z = 0$;
3. $|zz'| = |z||z'|$;
4. Si $z \neq 0$, $\left|\frac{1}{z}\right| = \frac{1}{|z|}$ et si $z' \neq 0$, $\left|\frac{z}{z'}\right| = \frac{|z|}{|z'|}$;
5. Si $z \neq 0, \forall n \in \mathbb{Z}, |z^n| = |z|^n$;
6. $\max(|\operatorname{Re}(z)|, |\operatorname{Im}(z)|) \leq |z| \leq |\operatorname{Re}(z)| + |\operatorname{Im}(z)|$;
7. (Inégalité triangulaire) $|z + z'| \leq |z| + |z'|$ et $|z - z'| \leq |z| + |z'|$.

Démonstration.

Soient $z = a + ib$ et $z' = a' + ib'$ avec $(a, b, a', b') \in \mathbb{R}^4$.

1. On a

$$|\bar{z}| = |a - ib| = \sqrt{a^2 + (-b)^2} = \sqrt{a^2 + b^2} = |z|.$$

2. On a $|z| = 0 \Leftrightarrow a^2 + b^2 = 0$. Or, une somme de nombres positifs est nulle si et seulement si tous ses termes sont nuls, donc finalement

$$|z| = 0 \Leftrightarrow (a^2, b^2) = (0, 0) \Leftrightarrow (a, b) = (0, 0) \Leftrightarrow z = 0.$$

3. On a

$$|zz'| = \sqrt{zz' \overline{zz'}} = \sqrt{z\bar{z}z'\bar{z}'} = \sqrt{z\bar{z}}\sqrt{z'\bar{z}'} = |z||z'|.$$

4. Si $z \neq 0$, on a

$$\left|\frac{1}{z}\right| = \left|\frac{\bar{z}}{|z|^2}\right| = \underbrace{\left|\frac{1}{|z|^2}\right|}_{\in \mathbb{R}_+} |\bar{z}| = \frac{|z|}{|z|^2} = \frac{1}{|z|}.$$

Si $z' \neq 0$, on a

$$\left|\frac{z}{z'}\right| = |z| \left|\frac{1}{z'}\right| = |z| \frac{1}{|z'|} = \frac{|z|}{|z'|}.$$

5. Soit $n \in \mathbb{Z}$. Si $z \neq 0$, on a

$$|z^n| = \sqrt{z^n \overline{z^n}} = \sqrt{z^n \bar{z}^n} = \sqrt{(z\bar{z})^n} = (\sqrt{z\bar{z}})^n = |z|^n.$$

6. Montrons que $|\operatorname{Re}(z)| \leq |z|$.

On a $a^2 \leq a^2 + b^2$ donc $\operatorname{Re}(z)^2 \leq |z|^2$.

En prenant la racine carrée, on obtient $\sqrt{\operatorname{Re}(z)^2} \leq \sqrt{|z|^2}$, i.e. $|\operatorname{Re}(z)| \leq |z|$.

On montre de même que $|\operatorname{Im}(z)| \leq |z|$. En combinant les deux inégalités, ceci donne $\max(|\operatorname{Re}(z)|, |\operatorname{Im}(z)|) \leq |z|$.

D'autre part, on a

$$(|\operatorname{Re}(z)| + |\operatorname{Im}(z)|)^2 = a^2 + 2|ab| + b^2 \geq a^2 + b^2 = |z|^2.$$

Par croissance de la fonction $x \mapsto \sqrt{x}$ sur $\mathbb{R}_+$, ceci implique que

$$\sqrt{(|\operatorname{Re}(z)| + |\operatorname{Im}(z)|)^2} \geq \sqrt{|z|^2},$$

i.e. $|\operatorname{Re}(z)| + |\operatorname{Im}(z)| \geq |z|$, d'où le résultat.

7. On a

$$\begin{aligned}
 |z + z'|^2 &= (z + z')\overline{(z + z')} \\
 &= (z + z')(\bar{z} + \bar{z}') \\
 &= z\bar{z} + z'\bar{z}' + z\bar{z}' + z'\bar{z} \\
 &= |z|^2 + |z'|^2 + z\bar{z}' + \overline{z\bar{z}'} \\
 &= |z|^2 + |z'|^2 + 2\operatorname{Re}(z\bar{z}') \\
 &\leq |z|^2 + |z'|^2 + 2|z\bar{z}'| \\
 &\leq |z|^2 + |z'|^2 + 2|z||z'| \\
 &\leq (|z| + |z'|)^2.
 \end{aligned}$$

En prenant la racine carrée, puisque $|z + z'|$ et $|z| + |z'|$ sont des nombres positifs, on obtient

$$|z + z'| \leq |z| + |z'|.$$

En remplaçant z' par $-z'$, on obtient la deuxième inégalité. ■

Remarque 14. • On a $|z| = |\operatorname{Re}(z)| \Leftrightarrow z \in \mathbb{R}$ et $|z| = \operatorname{Re}(z) \Leftrightarrow z \in \mathbb{R}_+$.

De même, on a $|z| = |\operatorname{Im}(z)| \Leftrightarrow z \in i\mathbb{R}$.

• On a égalité dans l'inégalité triangulaire $|z + z'| \leq |z| + |z'|$ si et seulement si il existe un réel positif $\alpha \in \mathbb{R}_+$ tel que $z = \alpha z'$ ou $z' = \alpha z$.

Si $z' = 0$, on a bien égalité dans l'inégalité triangulaire et $z' = 0z$.

Supposons dorénavant que $z' \neq 0$ et montrons que $|z + z'| = |z| + |z'|$ si et seulement si il existe un réel positif $\alpha \in \mathbb{R}_+$ tel que $z = \alpha z'$.

En effet, on voit dans la preuve de l'inégalité triangulaire qu'il y a égalité si et seulement si $\operatorname{Re}(z\bar{z}') = |z\bar{z}'|$, c'est à dire si et seulement si $z\bar{z}'$ est un réel positif. Notons $\beta = z\bar{z}' \in \mathbb{R}_+$.

En multipliant par z' , on trouve $z\bar{z}'z' = \beta z' \Leftrightarrow z|z'|^2 = \beta z' \Leftrightarrow z = \frac{\beta}{|z'|^2}z'$ (on peut diviser par $|z'|^2 \neq 0$ car $z' \neq 0$). En posant $\alpha = \frac{\beta}{|z'|^2}$, on a bien $\alpha \in \mathbb{R}_+$ et $z = \alpha z'$.

Réciproquement, s'il existe un réel positif $\alpha \in \mathbb{R}_+$ tel que $z = \alpha z'$, on a

$$|z + z'| = |(\alpha + 1)z'| = |\alpha + 1||z'| = (\alpha + 1)|z'| = \alpha|z'| + |z'| = |\alpha z'| + |z'| = |z| + |z'|.$$

• On peut généraliser ces propriétés : pour tous nombres complexes $(z_1, \dots, z_n)$, alors

$$\left| \prod_{k=1}^n z_k \right| = \prod_{k=1}^n |z_k|$$

et

$$\left| \sum_{k=1}^n z_k \right| \leq \sum_{k=1}^n |z_k|.$$

• Comme pour la valeur absolue, on déduit de l'inégalité triangulaire que pour tout $(z, z') \in \mathbb{C}^2$,

$$||z| - |z'|| \leq |z - z'| \quad \text{et} \quad ||z| - |z'|| \leq |z + z'|.$$

• Pour tout nombre complexe z non nul, $\frac{z}{|z|}$ est de module 1. En effet, si $z \in \mathbb{C}^*$,

$$\left| \frac{z}{|z|} \right| = \frac{|z|}{||z||} = \frac{|z|}{|z|} = 1.$$

Proposition 9

Soient M et M' deux points du plan d'affixes respectives z et z' .
Alors la longueur MM' vérifie

$$MM' = |z' - z|.$$

Démonstration. Notons $z = a + ib$ et $z' = a' + ib'$ avec $(a, a', b, b') \in \mathbb{R}^4$. Les points M et M' ont pour coordonnées respectives (a, b) et (a', b') .

Ainsi, le vecteur $\overrightarrow{MM'}$ a pour coordonnées $\begin{pmatrix} a' - a \\ b' - b \end{pmatrix}$ donc on a

$$MM' = \sqrt{(a' - a)^2 + (b' - b)^2} = |(a' - a) + i(b' - b)| = |z' - z|.$$

■

Corollaire 2: Module et distance

Comme la valeur absolue, le module vérifie les propriétés d'une distance, à savoir :

1. $\forall (z, z') \in \mathbb{C}^2, |z' - z| = 0 \Leftrightarrow z = z'$.
2. $\forall (z, z') \in \mathbb{C}^2, |z' - z| = |z - z'|$.
3. $\forall (z, z', z'') \in \mathbb{C}^3, |z' - z| \leq |z' - z''| + |z'' - z|$.

Démonstration. Ces propriétés découlent directement des propriétés du module montrées ci-dessus.

1. Soient $(z, z') \in \mathbb{C}^2$.

On a

$$|z' - z| = 0 \Leftrightarrow z' - z = 0 \Leftrightarrow z = z'.$$

2. Soient $(z, z') \in \mathbb{C}^2$. Alors

$$|z' - z| = |-(z - z')| = |-1||z - z'| = |z - z'|.$$

3. Soient $(z, z', z'') \in \mathbb{C}^3$. D'après l'inégalité triangulaire, on a

$$|z' - z| = |(z' - z'') + (z'' - z)| \leq |z' - z''| + |z'' - z|.$$

■

7.2.4 Formes trigonométriques et exponentielles des nombres complexes**Définition 6: Exponentielle complexe**

Soit $\theta \in \mathbb{R}$. On définit le nombre complexe $e^{i\theta}$ par

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta).$$

Exemple 8. $e^{i0} = \cos(0) + i \sin(0) = 1$. (Ceci est cohérent avec $e^0 = 1$).

- $e^{i\frac{\pi}{6}} = \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + i \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i$.
- $e^{i\frac{\pi}{3}} = \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) + i \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}$.
- $e^{i\frac{\pi}{2}} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = i$.
- $e^{i\pi} = \cos(\pi) + i \sin(\pi) = -1$.
- $e^{-i\frac{\pi}{2}} = \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) + i \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -i$.

Remarque 15. Soit $\theta \in \mathbb{R}$. On a les équivalences :

$$e^{i\theta} \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \operatorname{Im}(e^{i\theta}) = 0 \Leftrightarrow \sin(\theta) = 0 \Leftrightarrow \theta \equiv 0[\pi]$$

et

$$e^{i\theta} \in i\mathbb{R} \Leftrightarrow \operatorname{Re}(e^{i\theta}) = 0 \Leftrightarrow \cos(\theta) = 0 \Leftrightarrow \theta \equiv \frac{\pi}{2}[\pi].$$

Proposition 10: Caractérisation des nombres complexes de module 1

Soit $z \in \mathbb{C}$.

Alors

$$|z| = 1 \Leftrightarrow \exists \theta \in \mathbb{R}, z = e^{i\theta}.$$

Démonstration. Supposons qu'il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $z = e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta)$.

Alors $|z| = \sqrt{\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)} = 1$.

Réciproquement, supposons que $|z| = 1$.

Soit M le point du plan d'affixe z . Alors $OM = 1$, c'est à dire que le point M se situe sur le cercle trigonométrique. Il existe donc $\theta \in \mathbb{R}$ tel que les coordonnées du point M soient $(\cos(\theta), \sin(\theta))$. Ainsi, l'affixe du point M est $\cos(\theta) + i \sin(\theta) = e^{i\theta}$, d'où $z = e^{i\theta}$. ■

Remarque 16. Il est surtout important de retenir que $\forall \theta \in \mathbb{R}, |e^{i\theta}| = 1$. En particulier, on a pour tout $\theta \in \mathbb{R}, e^{i\theta} \neq 0$.

Proposition 11: Propriétés de l'exponentielle complexe

L'exponentielle complexe vérifie les propriétés suivantes :

1. Pour tout $\theta \in \mathbb{R}$, pour tout $k \in \mathbb{Z}$, $e^{i(\theta+2k\pi)} = e^{i\theta}$ et $e^{i\theta} = e^{i\theta'} \Leftrightarrow \theta \equiv \theta'[2\pi]$.
2. Pour tout $(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2$, $e^{i(\alpha+\beta)} = e^{i\alpha} e^{i\beta}$.
3. Pour tout $\theta \in \mathbb{R}$, $\overline{e^{i\theta}} = e^{-i\theta} = \frac{1}{e^{i\theta}}$.
4. (Formule de Moivre) Pour tout $\theta \in \mathbb{R}$, pour tout $n \in \mathbb{Z}$, $(e^{i\theta})^n = e^{in\theta}$, i.e.

$$(\cos(\theta) + i \sin(\theta))^n = \cos(n\theta) + i \sin(n\theta).$$

Démonstration.

1. Soit $\theta \in \mathbb{R}$, soit $k \in \mathbb{Z}$. Par 2π -périodicité des fonctions cosinus et sinus, on a

$$e^{i(\theta+2k\pi)} = \cos(\theta + 2k\pi) + i \sin(\theta + 2k\pi) = \cos(\theta) + i \sin(\theta) = e^{i\theta}.$$

De même, soit $\theta' \in \mathbb{R}$. On a les équivalences

$$e^{i\theta} = e^{i\theta'} \Leftrightarrow \cos(\theta) + i \sin(\theta) = \cos(\theta') + i \sin(\theta') \Leftrightarrow \begin{cases} \cos(\theta) &= \cos(\theta') \\ \sin(\theta) &= \sin(\theta') \end{cases} \Leftrightarrow \theta \equiv \theta'[2\pi].$$

2. Soit $(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2$. On a

$$\begin{aligned} e^{i\alpha} e^{i\beta} &= (\cos(\alpha) + i \sin(\alpha))(\cos(\beta) + i \sin(\beta)) \\ &= (\cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta)) + i(\sin(\alpha) \cos(\beta) + \sin(\beta) \cos(\alpha)) \\ &= \cos(\alpha + \beta) + i \sin(\alpha + \beta) \\ &= e^{i(\alpha+\beta)}. \end{aligned}$$

3. Soit $\theta \in \mathbb{R}$. Par parité de la fonction cosinus et imparité de la fonction sinus, on a

$$\overline{e^{i\theta}} = \overline{\cos(\theta) + i \sin(\theta)} = \cos(\theta) - i \sin(\theta) = \cos(-\theta) + i \sin(-\theta) = e^{-i\theta}.$$

Par ailleurs, on a $e^{i\theta} \overline{e^{i\theta}} = |e^{i\theta}|^2 = 1$ d'où en divisant par $e^{i\theta}$ qui n'est jamais nul, $\overline{e^{i\theta}} = \frac{1}{e^{i\theta}}$.

4. Soit $\theta \in \mathbb{R}$. Montrons par récurrence que pour tout $n \in \mathbb{N}$, $(e^{i\theta})^n = e^{in\theta}$.

Pour $n = 0$, on a $(e^{i\theta})^0 = 1 = e^{i0}$ donc la propriété est vraie au rang $n = 0$.

Soit $n \in \mathbb{N}$ tel que $(e^{i\theta})^n = e^{in\theta}$. On a alors

$$(e^{i\theta})^{n+1} = (e^{i\theta})^n e^{i\theta} = e^{in\theta} e^{i\theta} = e^{i(n+1)\theta},$$

ce qui prouve la formule au rang $n + 1$.

D'après le principe de récurrence, la formule est donc vraie pour tout $n \in \mathbb{N}$. Il reste à la vérifier pour tout entier strictement négatif.

Soit $n \in \mathbb{Z}$ avec $n < 0$. Alors $-n \in \mathbb{N}$ donc

$$(e^{i\theta})^n = \frac{1}{(e^{i\theta})^{-n}} = \frac{1}{e^{-in\theta}} = e^{in\theta}.$$

■

Remarque 17. • Autrement dit, pour tout $\theta \in \mathbb{R}$, pour tout $n \in \mathbb{Z}$,

$$\operatorname{Re}((\cos(\theta) + i \sin(\theta))^n) = \cos(n\theta) \quad \text{et} \quad \operatorname{Im}((\cos(\theta) + i \sin(\theta))^n) = \sin(n\theta).$$

• Ces propriétés justifient la notation $e^{i\theta}$ puisque les propriétés ci-dessus sont analogues à celles de l'exponentielle réelle, à savoir pour tout $(x, y) \in \mathbb{R}^2$,

$$e^{x+y} = e^x e^y \quad \text{et} \quad \frac{1}{e^x} = e^{-x}.$$

• On peut définir pour tout $z \in \mathbb{C}$,

$$e^z = e^{\operatorname{Re}(z) + i \operatorname{Im}(z)} = e^{\operatorname{Re}(z)} e^{i \operatorname{Im}(z)}.$$

Exemple 9. • Pour tout $\theta \in \mathbb{R}$, $e^{i(\theta+\pi)} = -e^{i\theta}$.

En effet, $e^{i(\theta+\pi)} = e^{i\theta} e^{i\pi} = -e^{i\theta}$.

• On retrouve que $i^2 = (e^{i\frac{\pi}{2}})^2 = e^{2i\frac{\pi}{2}} = e^{i\pi} = -1$.

• Pour tout $\theta \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} \cos(5\theta) &= \operatorname{Re}((\cos(\theta) + i \sin(\theta))^5) \\ &= \operatorname{Re}(\cos^5 \theta + 5i \cos^4 \theta \sin(\theta) - 10 \cos^3 \theta \sin^2(\theta) - 10i \cos^2 \theta \sin^3(\theta) + 5 \cos(\theta) \sin^4(\theta) + i \sin^5(\theta)) \\ &= \cos^5(\theta) - 10 \cos^3(\theta) \sin^2(\theta) + 5 \cos(\theta) \sin^4(\theta) \\ &= \cos^5(\theta) - 10 \cos^3(\theta)(1 - \cos^2(\theta)) + 5 \cos(\theta)(1 - \cos^2(\theta))^2 \\ &= \cos^5(\theta) - 10 \cos^3(\theta) + 10 \cos^5(\theta) + 5 \cos(\theta)(1 - 2 \cos^2(\theta) + \cos^4(\theta)) \\ &= 16 \cos^5(\theta) - 20 \cos^3(\theta) + 5 \cos(\theta). \end{aligned}$$

On peut par exemple vérifier avec cette formule appliquée à $\theta = \frac{\pi}{6}$ que

$$\cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2} = -\cos\left(\frac{\pi}{6}\right).$$

Corollaire 3

Pour tout $(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2$, $\frac{e^{i\alpha}}{e^{i\beta}} = e^{i(\alpha-\beta)}$.

Démonstration. Soit $(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2$. On a

$$e^{i(\alpha-\beta)} = e^{i\alpha} e^{-i\beta} = e^{i\alpha} \times \frac{1}{e^{i\beta}} = \frac{e^{i\alpha}}{e^{i\beta}}.$$

■

Proposition 12: Formules d'Euler

Pour tout réel θ , on a

$$\cos(\theta) = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \quad \text{et} \quad \sin(\theta) = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i}.$$

Démonstration. Soit $\theta \in \mathbb{R}$.

On a $\cos(\theta) = \operatorname{Re}(e^{i\theta})$ et $\sin(\theta) = \operatorname{Im}(e^{i\theta})$ donc

$$\cos(\theta) = \frac{e^{i\theta} + \overline{e^{i\theta}}}{2} = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}$$

et

$$\sin(\theta) = \frac{e^{i\theta} - \overline{e^{i\theta}}}{2i} = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i}.$$

■

Remarque 18. Ces formules seront utiles pour linéariser des expressions, comme nous le verrons par la suite.

Exemple 10. Un exemple d'utilisation fréquent de ces formules est le suivant.

Soit $(\alpha, \beta) \in \mathbb{R}^2$. En utilisant la méthode de l'angle moitié, on obtient :

$$e^{i\alpha} + e^{i\beta} = e^{i\frac{\alpha+\beta}{2}} (e^{i\frac{\alpha-\beta}{2}} + e^{-i\frac{\alpha-\beta}{2}}) = 2e^{i\frac{\alpha+\beta}{2}} \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)$$

et

$$e^{i\alpha} - e^{i\beta} = e^{i\frac{\alpha+\beta}{2}} (e^{i\frac{\alpha-\beta}{2}} - e^{-i\frac{\alpha-\beta}{2}}) = 2ie^{i\frac{\alpha+\beta}{2}} \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right).$$

Proposition 13: Existence de la forme exponentielle

Soit $z \in \mathbb{C}^*$.

Alors il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que

$$z = |z|e^{i\theta}.$$

Démonstration. On a déjà vu que $\frac{z}{|z|}$ est de module 1. Il existe donc $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $\frac{z}{|z|} = e^{i\theta}$, d'où $z = |z|e^{i\theta}$.

■

Définition 7: Forme exponentielle et forme trigonométrique

Soit $z \in \mathbb{C}^*$. Soit $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $z = |z|e^{i\theta}$.

On dit que θ est un argument de z et on note

$$\arg(z) \equiv \theta[2\pi].$$

L'écriture $z = |z|e^{i\theta}$ s'appelle forme exponentielle du nombre complexe z .

En utilisant que $e^{i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta)$, on obtient la forme trigonométrique du nombre complexe z , i.e.

$$z = |z|(\cos(\theta) + i\sin(\theta)).$$

Remarque 19. • Soit $z \in \mathbb{C}^*$, soit M le point du plan $(O, \vec{i}, \vec{j})$ d'affixe z . En fait, on a $\arg(z) \equiv \widehat{(\vec{i}, \vec{OM})}[2\pi]$.

• Si θ est un argument de z , alors pour tout $k \in \mathbb{Z}$, $\theta + 2k\pi$ est également un argument de z puisque

$$|z|e^{i(\theta+2k\pi)} = |z|e^{i\theta} = z.$$

Exemple 11. • $\arg(i) = \arg(e^{i\frac{\pi}{2}}) \equiv \frac{\pi}{2}[2\pi]$.

• $\mathbb{R}_+^* = \{z \in \mathbb{C}^*, \arg(z) \equiv 0[2\pi]\}$ et $\mathbb{R}_-^* = \{z \in \mathbb{C}^*, \arg(z) \equiv \pi[2\pi]\}$.

• Soit $z = 1 + i$. On a $|z| = \sqrt{2}$ donc $\frac{z}{|z|} = \frac{1}{\sqrt{2}} + i\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} + i\frac{\sqrt{2}}{2} = e^{i\frac{\pi}{4}}$.

Ainsi, l'écriture sous forme exponentielle de z est $z = \sqrt{2}e^{i\frac{\pi}{4}}$.

Proposition 14:

Soient $(\rho, \rho') \in (\mathbb{R}_+^*)^2$, soient $(\theta, \theta') \in \mathbb{R}^2$.

Alors

$$\rho e^{i\theta} = \rho' e^{i\theta'} \Leftrightarrow \begin{cases} \rho &= \rho' \\ \theta &\equiv \theta'[2\pi]. \end{cases}$$

Démonstration. L'implication $\begin{cases} \rho &= \rho' \\ \theta &\equiv \theta'[2\pi]. \end{cases} \Rightarrow \rho e^{i\theta} = \rho' e^{i\theta'}$ est immédiate.

Montrons la réciproque. Supposons que $\rho e^{i\theta} = \rho' e^{i\theta'}$.

Ceci implique que $\frac{\rho}{\rho'} = e^{i(\theta'-\theta)}$. En particulier $e^{i(\theta'-\theta)} \in \mathbb{R}_+^*$. On a donc nécessairement $\theta' - \theta \equiv 0[2\pi]$, i.e. $\theta \equiv \theta'[2\pi]$.

On en déduit que $\frac{\rho}{\rho'} = e^{i(\theta'-\theta)} = 1$, d'où $\rho = \rho'$. ■

Remarque 20. Ceci signifie que l'écriture d'un nombre complexe z non nul sous forme exponentielle est unique si on impose $\theta \in [0, 2\pi[$ ou $]-\pi, \pi]$ par exemple.

Autrement dit, si un nombre complexe s'écrit $z = \rho e^{i\theta}$, avec $\rho \in \mathbb{R}_+^*$, alors on peut affirmer que $\rho = |z|$ et $\arg(z) \equiv \theta[2\pi]$.

Exemple 12. Soit $z = -2e^{i\frac{\pi}{6}}$. Puisque $-2 < 0$, on n'a pas $-2 = |z|$. En revanche, en utilisant que $-1 = e^{i\pi}$, on a

$$z = 2e^{i\pi} e^{i\frac{\pi}{6}} = 2e^{i(\pi+\frac{\pi}{6})} = 2e^{i\frac{7\pi}{6}}.$$

On a alors $|z| = 2$ et $\arg(z) \equiv \frac{7\pi}{6}[2\pi]$.

Proposition 15

Soit $z \in \mathbb{C}^*$ et $\arg(z) \equiv \theta[2\pi]$. Alors

$$\cos(\theta) = \frac{\operatorname{Re}(z)}{|z|} \quad \text{et} \quad \sin(\theta) = \frac{\operatorname{Im}(z)}{|z|}.$$

Démonstration. Ecrivons z sous forme trigonométrique :

$$z = |z|(\cos(\theta) + i \sin(\theta)) = |z| \cos(\theta) + i|z| \sin(\theta).$$

On en déduit que $\operatorname{Re}(z) = |z| \cos(\theta)$ et $\operatorname{Im}(z) = |z| \sin(\theta)$ d'où le résultat en divisant par $|z|$. ■

Exemple 13. Soit $z = \sqrt{3} - i$. On a $|z| = \sqrt{3+1} = 2$ d'où

$$\cos(\arg(z)) = \frac{\operatorname{Re}(z)}{|z|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{et} \quad \sin(\arg(z)) = \frac{\operatorname{Im}(z)}{|z|} = -\frac{1}{2}.$$

Ceci nous permet d'affirmer que $\arg(z) \equiv -\frac{\pi}{6}[2\pi]$.

Finalement, $z = 2e^{-i\frac{\pi}{6}}$.

Proposition 16: Propriétés de l'argument

1. Soit $z \in \mathbb{C}^*$. Alors

$$\arg(\bar{z}) \equiv -\arg(z)[2\pi] \quad \text{et} \quad \arg\left(\frac{1}{z}\right) \equiv -\arg(z)[2\pi].$$

2. Soient $(z, z') \in (\mathbb{C}^*)^2$. Alors

$$\arg(zz') \equiv \arg(z) + \arg(z')[2\pi] \quad \text{et} \quad \arg\left(\frac{z}{z'}\right) \equiv \arg(z) - \arg(z')[2\pi].$$

3. Soit $z \in \mathbb{C}^*$. Pour tout $n \in \mathbb{Z}$, on a

$$\arg(z^n) \equiv n \arg(z)[2\pi].$$

Démonstration.

1. Ecrivons z sous forme exponentielle, i.e. $z = |z|e^{i\theta}$.

Alors $\bar{z} = |z|e^{-i\theta}$ ce qui est l'écriture sous forme exponentielle de $\bar{z}$ d'où

$$\arg(\bar{z}) \equiv -\theta[2\pi],$$

i.e. $\arg(\bar{z}) \equiv -\arg(z)[2\pi]$.

De même, on a $\frac{1}{z} = \frac{1}{|z|}e^{-i\theta}$, ce qui est l'écriture sous forme exponentielle de $\frac{1}{z}$ d'où

$$\arg\left(\frac{1}{z}\right) \equiv -\theta[2\pi], \text{ i.e. } \arg\left(\frac{1}{z}\right) \equiv -\arg(z)[2\pi].$$

2. Soient $z = |z|e^{i\theta}$ et $z' = |z'|e^{i\theta'}$ les écritures sous formes exponentielles de z et z' . Alors les écritures en formes exponentielles de zz' et $\frac{z}{z'}$ sont

$$zz' = |z||z'|e^{i(\theta+\theta')} \quad \text{et} \quad \frac{z}{z'} = \frac{|z|}{|z'|}e^{i(\theta-\theta')}$$

d'où $\arg(zz') \equiv \theta + \theta'[2\pi]$, i.e. $\arg(zz') \equiv \arg(z) + \arg(z')[2\pi]$ et $\arg\left(\frac{z}{z'}\right) \equiv \theta - \theta'[2\pi]$, i.e. $\arg\left(\frac{z}{z'}\right) \equiv \arg(z) - \arg(z')[2\pi]$.

3. Soit $z = |z|e^{i\theta}$ l'écriture sous forme exponentielle de z .

Alors pour tout $n \in \mathbb{Z}$, on a $z^n = |z|^n e^{in\theta}$ qui est l'écriture sous forme exponentielle de z^n .

Ainsi, $\arg(z^n) \equiv n\theta \equiv n \arg(z)[2\pi]$.

■

Remarque 21. Pour tout couple de vecteurs $(\vec{u}, \vec{v})$, on a

$$\widehat{(\vec{u}, \vec{v})} = \widehat{(\vec{i}, \vec{v})} - \widehat{(\vec{i}, \vec{u})} \equiv \arg(z_{\vec{v}}) - \arg(z_{\vec{u}})[2\pi] \equiv \arg\left(\frac{z_{\vec{v}}}{z_{\vec{u}}}\right)[2\pi]$$

où $z_{\vec{u}}$ et $z_{\vec{v}}$ sont les affixes respectives de $\vec{u}$ et $\vec{v}$.

Exemple 14. Soient $z = 3e^{i\frac{\pi}{5}}$ et $z' = \pi e^{-i\frac{\pi}{7}}$. Ainsi, $\arg(z) \equiv \frac{\pi}{5}[2\pi]$ et $\arg(z') \equiv -\frac{\pi}{7}[2\pi]$.

- $\arg(zz') \equiv \frac{\pi}{5} - \frac{\pi}{7} \equiv \frac{2\pi}{35}[2\pi]$ et $\arg\left(\frac{z}{z'}\right) \equiv \frac{\pi}{5} + \frac{\pi}{7} \equiv \frac{12\pi}{35}[2\pi]$.
- $\arg(z^{15}) \equiv 15 \times \frac{\pi}{5} \equiv 3\pi \equiv \pi[2\pi]$.

7.2.5 Linéarisation de $\cos^p(x) \sin^q(x)$

A l'aide des formules d'Euler, on peut facilement linéariser des expressions de la forme $\cos^p(x) \sin^q(x)$, c'est à dire les exprimer uniquement en fonction de facteurs de la forme $\cos(px)$ ou $\sin(qx)$.

Aurement dit, pour tout $x \in \mathbb{R}$ et tout $(p, q) \in \mathbb{N}^2$, on a

$$\cos^p(x) = \left(\frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}\right)^p \quad \text{et} \quad \sin^q(x) = \left(\frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}\right)^q.$$

Il ne reste plus qu'à développer en utilisant la formule du binôme de Newton! Par exemple, pour $p = q = 2$, on a

$$\cos^2(x) = \frac{1}{4}(e^{2ix} + e^{-2ix} + 2e^{ix}e^{-ix}) = \frac{1}{4}(2\cos(2x) + 2) = \frac{1 + \cos(2x)}{2}$$

et

$$\sin^2(x) = -\frac{1}{4}(e^{2ix} + e^{-2ix} - 2e^{ix}e^{-ix}) = -\frac{1}{4}(2\cos(2x) - 2) = \frac{1 - \cos(2x)}{2}.$$

On retrouve deux formules déjà vues dans le chapitre « Trigonométrie ».

Exemple 15.

$$\cos^3(x) = \left(\frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}(e^{3ix} + 3e^{ix} + 3e^{-ix} + e^{-3ix}) = \frac{\cos(3x) + 3\cos(x)}{4}$$

et

$$\sin^3(x) = \left(\frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}\right)^3 = -\frac{1}{8i}(e^{3ix} - 3e^{ix} + 3e^{-ix} - e^{-3ix}) = -\frac{1}{8i}(2i\sin(3x) - 6i\sin(x)) = \frac{3\sin(x) - \sin(3x)}{4}.$$

7.3 Application aux équations du second degré

7.3.1 Equations du second degré à coefficients réels

On peut maintenant compléter l'étude des trinômes du second degré vus dans le chapitre « Nombres réels ».

Proposition 17: Trinômes du second degré

Soient a, b, c trois réels avec $a \neq 0$.

Soit $(E) : ax^2 + bx + c = 0$.

On appelle discriminant de l'équation (E) le réel $\Delta = b^2 - 4ac$.

Il y a trois cas :

- Si $\Delta > 0$, alors (E) admet deux solutions réelles (ou racines) distinctes

$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a} \quad \text{et} \quad x_2 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}.$$

- Si $\Delta = 0$, alors (E) admet une seule solution (ou racine double)

$$x = -\frac{b}{2a}.$$

- Si $\Delta < 0$, alors (E) admet deux solutions complexes conjuguées

$$x_1 = \frac{-b - i\sqrt{-\Delta}}{2a} \quad \text{et} \quad x_2 = \frac{-b + i\sqrt{-\Delta}}{2a}.$$

Démonstration. Les cas où $\Delta > 0$ et $\Delta = 0$ ont déjà été traités dans le chapitre « Nombres réels ».

On avait notamment mis l'équation sous forme canonique à savoir

$$(E) \Leftrightarrow a \left[\left(x + \frac{b}{2a} \right)^2 - \frac{\Delta}{4a^2} \right] = 0.$$

Supposons que $\Delta < 0$. Alors $\Delta = (i\sqrt{-\Delta})^2$. On a donc

$$\begin{aligned} (E) &\Leftrightarrow a \left[\left(x + \frac{b}{2a} \right)^2 - \left(\frac{i\sqrt{-\Delta}}{2a} \right)^2 \right] = 0 \\ &\Leftrightarrow a \left(x + \frac{b + i\sqrt{-\Delta}}{2a} \right) \left(x + \frac{b - i\sqrt{-\Delta}}{2a} \right) = 0 \\ &\Leftrightarrow x = \frac{-b - i\sqrt{-\Delta}}{2a} \quad \text{ou} \quad x = \frac{-b + i\sqrt{-\Delta}}{2a}. \end{aligned}$$

On remarque que les solutions sont bien des nombres complexes conjugués. ■

Exemple 16. Cherchons les nombres complexes dont le cube vaut 1, i.e. résolvons l'équation d'inconnue $x \in \mathbb{C}$

$$(E) : x^3 - 1 = 0.$$

$x = 1$ est une solution évidente de (E) . On peut donc factoriser cette équation par $x - 1$ et on obtient

$$(E) \Leftrightarrow (x - 1)(x^2 + x + 1) = 0.$$

Notons (E') l'équation $x^2 + x + 1 = 0$. C'est un trinôme du second degré à coefficients $a = b = c = 1$ réels.

On a $\Delta = b^2 - 4ac = 1 - 4 = -3 < 0$.

D'après la proposition précédente, les racines de (E') sont

$$x_1 = \frac{-1 - i\sqrt{3}}{2} = e^{-\frac{2i\pi}{3}} \quad \text{et} \quad x_2 = \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} = e^{\frac{2i\pi}{3}}.$$

On note souvent $j = e^{\frac{2i\pi}{3}}$ et $\bar{j} = e^{-\frac{2i\pi}{3}}$.

On peut vérifier que

$$j^3 = (e^{\frac{2i\pi}{3}})^3 = e^{3 \times \frac{2i\pi}{3}} = e^{2i\pi} = 1$$

et

$$\bar{j}^3 = (e^{-\frac{2i\pi}{3}})^3 = e^{-3 \times \frac{2i\pi}{3}} = e^{-2i\pi} = 1.$$

Ainsi, $1, j$ et $\bar{j}$ sont les trois nombres complexes dont les cubes valent 1 : on les appelle les racines cubiques de l'unité.

On remarque également que $j^2 = (e^{\frac{2i\pi}{3}})^2 = e^{\frac{4i\pi}{3}} = e^{-\frac{2i\pi}{3}} = \bar{j}$ et puisque j est racine de (E') ,

$$1 + j + j^2 = 1 + j + \bar{j} = 0.$$

Comme dans le chapitre « Nombres réels », on a démontré le corollaire suivant

Corollaire 4

Soit $(E) : ax^2 + bx + c = 0$. Notons x_1 et x_2 les racines de (E) , éventuellement complexes (avec éventuellement $x_1 = x_2$ dans le cas où $\Delta = 0$).

Alors pour tout $x \in \mathbb{R}$, on a

$$ax^2 + bx + c = a(x - x_1)(x - x_2).$$

Démonstration. Le cas où $\Delta \geq 0$ a été traité dans le chapitre « Nombres réels ».

Si $\Delta < 0$, on a mis en évidence la forme factorisée dans la preuve ci-dessus. ■

Enfin, en faisant la même preuve que dans le chapitre « Nombres réels », on a les relations coefficients-racines, valables quel que soit le signe du discriminant.

Corollaire 5: Relations coefficients-racines

Soit $(E) : ax^2 + bx + c = 0$. Notons x_1 et x_2 les racines de (E) , éventuellement complexes (avec éventuellement $x_1 = x_2$ dans le cas où $\Delta = 0$).

On a les relations suivantes entre les coefficients et les racines du trinôme :

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = -\frac{b}{a} \\ x_1 x_2 = \frac{c}{a}. \end{cases}$$

7.3.2 Résolution de l'équation $x^2 = a$, avec $a \in \mathbb{C}$

Dans cette dernière section, on s'intéresse à un type de trinôme du second degré à coefficients complexes.

Etant donné $a \in \mathbb{C}$, on cherche les nombres complexes x tels que $x^2 = a$, c'est à dire les « racines carrées » de a en quelque sorte.

Si $a = 0$, la seule solution de l'équation $x^2 = a$ est évidemment $x = 0$.

Sinon, on a la proposition suivante :

Proposition 18: Racines carrées complexes

Soit $a = |a|e^{i \arg(a)} \in \mathbb{C}^*$.

Alors l'équation $x^2 = a$ admet deux solutions complexes :

$$x_1 = \sqrt{|a|}e^{i \frac{\arg(a)}{2}} \quad \text{et} \quad x_2 = -\sqrt{|a|}e^{i \frac{\arg(a)}{2}}.$$

Démonstration. Cherchons une solution $x \in \mathbb{C}$ écrite sous forme exponentielle, i.e.

$$x = |x|e^{i \arg(x)}.$$

Si x est solution, on a $x^2 = a$, i.e.

$$|x|^2 e^{2i \arg(x)} = |a|e^{i \arg(a)}.$$

D'après la proposition 14, ceci équivaut à

$$\begin{cases} |x|^2 = |a| \\ 2 \arg(x) \equiv \arg(a)[2\pi] \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} |x| = \sqrt{|a|} \quad (\text{car } |x| > 0) \\ \arg(x) \equiv \frac{\arg(a)}{2}[\pi] \end{cases}$$

On a donc deux solutions :

$$x_1 = \sqrt{|a|}e^{i \frac{\arg(a)}{2}}$$

et

$$x_2 = \sqrt{|a|}e^{i(\frac{\arg(a)}{2} + \pi)} = \sqrt{|a|}e^{i \frac{\arg(a)}{2}} e^{i\pi} = -\sqrt{|a|}e^{i \frac{\arg(a)}{2}}.$$

Réciproquement, on vérifie que

$$x_1^2 = (\sqrt{|a|}e^{i \frac{\arg(a)}{2}})^2 = |a|e^{i \arg(a)} = a$$

et que

$$x_2^2 = (-\sqrt{|a|}e^{i \frac{\arg(a)}{2}})^2 = |a|e^{i \arg(a)} = a.$$

■

Remarque 22. On remarque cette fois-ci que les solutions sont opposées.

Exemple 17. Les solutions de l'équation $x^2 = 25e^{i \frac{\pi}{8}}$ sont

$$x_1 = 5e^{i \frac{\pi}{16}} \quad \text{et} \quad x_2 = -5e^{i \frac{\pi}{16}}.$$

Remarque 23. Maintenant qu'on sait que les solutions d'une équation de la forme $x^2 = a$ sont opposées, on peut également les chercher sous forme algébrique lorsque la recherche sous forme exponentielle est compliquée.

Exemple 18. Résolvons l'équation $z^2 = -5 + 12i$

On cherche z sous la forme $z = x + iy$ avec $(x, y) \in \mathbb{R}^2$.

On a alors $z^2 = -5 + 12i \Leftrightarrow (x + iy)^2 = -5 + 12i \Leftrightarrow x^2 - y^2 + 2ixy = -5 + 12i$ d'où par identification des parties réelle et imaginaire :

$$\begin{cases} x^2 - y^2 = -5 \\ 2xy = 12. \end{cases}$$

Par ailleurs, $z^2 = -5 + 12i \Rightarrow |z|^2 = |-5 + 12i| \Rightarrow |z|^2 = \sqrt{(-5)^2 + 12^2} \Rightarrow x^2 + y^2 = 13$.

Ainsi, $2x^2 = (x^2 - y^2) + (x^2 + y^2) = -5 + 13 = 8$ d'où $x^2 = 4$ i.e. $x = 2$ ou $x = -2$.

Si $x = 2$, puisque $2xy = 12$, on a $4y = 12$ d'où $y = 3$, ce qui fournit la solution $z = 2 + 3i$.

Si $x = -2$, puisque $2xy = 12$, on a $-4y = 12$ d'où $y = -3$, ce qui fournit la solution $z = -2 - 3i$.

Réciproquement, on vérifie qu'on a bien $(2 + 3i)^2 = (-2 - 3i)^2 = -5 + 12i$.