

Mathématiques assistées par ordinateur

Chapitre 2 : Notions d'analyse

Michael Eisermann

Mat249, DLST L2S4, Année 2008-2009

www-fourier.ujf-grenoble.fr/~eiserm/cours#mao

Document mis à jour le 6 juillet 2009




Objectifs de ce chapitre

Les connaissances, surtout en mathématiques, se construisent et se transmettent le plus efficacement par des étapes bien organisées, chaque étape faisant appel à des étapes précédentes, par nécessité logique ou bien dans l'objectif de tisser des liens profitables.

Ainsi ce cours se base sur les mathématiques que vous avez acquises, je l'espère, en début de licence : langage mathématique, calcul algébrique, et notamment des arguments d'analyse.

Ce chapitre rappelle/présente quelques notions de base qui sont indispensables pour l'analyse mathématique. L'objectif est de vous guider dans votre révision/approfondissement. Ceci vous donne un point de départ, puis devrait vous encourager à aller plus loin.

Comme outils indispensables pour l'analyse nous discutons ici la convergence des suites et des séries, puis les notions de continuité et de dérivabilité des fonctions. Les résultats fondamentaux sont ensuite appliqués pour étudier l'exemple phare $\exp(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$, qui est sans doute la fonction la plus importante en mathématiques.

 Il existe de nombreux ouvrages d'analyse. En voici un que j'aime : Walter Rudin : *Principes d'analyse mathématique*. Dunod, Paris 2002.

Sommaire

- 1 Suites et séries numériques
- 2 Fonctions continues
- 3 Fonctions dérivables
- 4 Étude de la fonction exponentielle
- 5 Le théorème de Gauss–d'Alembert

Sommaire

- 1 Suites et séries numériques
 - Nombres réels, suites réelles, convergence, critères
 - Nombres complexes, suites complexes, convergence, critères
 - Séries numériques, convergence, critères
- 2 Fonctions continues
- 3 Fonctions dérivables
- 4 Étude de la fonction exponentielle
- 5 Le théorème de Gauss–d'Alembert

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

(A1 : associativité)

$$\forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

(A1 : associativité)

$$\forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

(A2 : commutativité)

$$\forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

(A1 : associativité)

$$\forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

(A2 : commutativité)

$$\forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$$

(A3 : élément neutre)

$$\exists 0 \in \mathbb{R} \forall a \in \mathbb{R} : 0 + a = a$$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

(A1 : associativité)

$$\forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

(A2 : commutativité)

$$\forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$$

(A3 : élément neutre)

$$\exists 0 \in \mathbb{R} \forall a \in \mathbb{R} : 0 + a = a$$

(A4 : élément opposé)

$$\forall a \in \mathbb{R} \exists b \in \mathbb{R} : a + b = 0$$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

- (A1 : associativité) $\forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$
- (A2 : commutativité) $\forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$
- (A3 : élément neutre) $\exists 0 \in \mathbb{R} \forall a \in \mathbb{R} : 0 + a = a$
- (A4 : élément opposé) $\forall a \in \mathbb{R} \exists b \in \mathbb{R} : a + b = 0$

- (M1 : associativité) $\forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

$$(A1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

$$(A2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$$

$$(A3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 0 \in \mathbb{R} \forall a \in \mathbb{R} : 0 + a = a$$

$$(A4 : \text{élément opposé}) \quad \forall a \in \mathbb{R} \exists b \in \mathbb{R} : a + b = 0$$

$$(M1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$

$$(M2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a \cdot b = b \cdot a$$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

$$(A1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

$$(A2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$$

$$(A3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 0 \in \mathbb{R} \forall a \in \mathbb{R} : 0 + a = a$$

$$(A4 : \text{élément opposé}) \quad \forall a \in \mathbb{R} \exists b \in \mathbb{R} : a + b = 0$$

$$(M1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$

$$(M2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a \cdot b = b \cdot a$$

$$(M3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 1 \in \mathbb{R}, 1 \neq 0 \forall a \in \mathbb{R} : 1 \cdot a = a$$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+$: $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication \cdot : $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

$$(A1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

$$(A2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$$

$$(A3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 0 \in \mathbb{R} \forall a \in \mathbb{R} : 0 + a = a$$

$$(A4 : \text{élément opposé}) \quad \forall a \in \mathbb{R} \exists b \in \mathbb{R} : a + b = 0$$

$$(M1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$

$$(M2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a \cdot b = b \cdot a$$

$$(M3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 1 \in \mathbb{R}, 1 \neq 0 \forall a \in \mathbb{R} : 1 \cdot a = a$$

$$(M4 : \text{élément inverse}) \quad \forall a \in \mathbb{R}, a \neq 0 \exists b \in \mathbb{R} : a \cdot b = 1$$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

$$(A1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

$$(A2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$$

$$(A3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 0 \in \mathbb{R} \forall a \in \mathbb{R} : 0 + a = a$$

$$(A4 : \text{élément opposé}) \quad \forall a \in \mathbb{R} \exists b \in \mathbb{R} : a + b = 0$$

$$(M1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$

$$(M2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a \cdot b = b \cdot a$$

$$(M3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 1 \in \mathbb{R}, 1 \neq 0 \forall a \in \mathbb{R} : 1 \cdot a = a$$

$$(M4 : \text{élément inverse}) \quad \forall a \in \mathbb{R}, a \neq 0 \exists b \in \mathbb{R} : a \cdot b = 1$$

$$(D : \text{distributivité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$$

Corps

Les nombres réels forment un ensemble \mathbb{R} muni de deux opérations, l'addition $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ et la multiplication $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Le triplet $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ est un *corps*, c'est-à-dire qu'il jouit des propriétés suivantes :

$$(A1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

$$(A2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a + b = b + a$$

$$(A3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 0 \in \mathbb{R} \forall a \in \mathbb{R} : 0 + a = a$$

$$(A4 : \text{élément opposé}) \quad \forall a \in \mathbb{R} \exists b \in \mathbb{R} : a + b = 0$$

$$(M1 : \text{associativité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$

$$(M2 : \text{commutativité}) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a \cdot b = b \cdot a$$

$$(M3 : \text{élément neutre}) \quad \exists 1 \in \mathbb{R}, 1 \neq 0 \forall a \in \mathbb{R} : 1 \cdot a = a$$

$$(M4 : \text{élément inverse}) \quad \forall a \in \mathbb{R}, a \neq 0 \exists b \in \mathbb{R} : a \cdot b = 1$$

$$(D : \text{distributivité}) \quad \forall a, b, c \in \mathbb{R} : a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$$

Remarque : Vous avez peut-être rencontré la notion de corps en algèbre linéaire. Elle regroupe beaucoup d'exemples, dont les nombres rationnels $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$, réels $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ ou complexes $(\mathbb{C}, +, \cdot)$.

Corps ordonnés

Les nombres réels sont ordonnés : on distingue des éléments positifs, notés $x > 0$, de manière compatible avec les opérations du corps :

- 1 Pour tout $x \in \mathbb{R}$ on a soit $x > 0$ soit $x = 0$ soit $-x > 0$.
- 2 Si $x > 0$ et $y > 0$, alors $x + y > 0$ ainsi que $xy > 0$.

Corps ordonnés

Les nombres réels sont ordonnés : on distingue des éléments positifs, notés $x > 0$, de manière compatible avec les opérations du corps :

- 1 Pour tout $x \in \mathbb{R}$ on a soit $x > 0$ soit $x = 0$ soit $-x > 0$.
- 2 Si $x > 0$ et $y > 0$, alors $x + y > 0$ ainsi que $xy > 0$.

On définit l'ordre strict $x > y$ par $x - y > 0$. L'ordre faible $x \geq y$ veut dire que $x > y$ ou $x = y$; elle est réflexive, transitive, antisymétrique. L'ordre inverse $x < y$ est défini par $y > x$, et $x \leq y$ veut dire que $y \geq x$.

Corps ordonnés

Les nombres réels sont ordonnés : on distingue des éléments positifs, notés $x > 0$, de manière compatible avec les opérations du corps :

- 1 Pour tout $x \in \mathbb{R}$ on a soit $x > 0$ soit $x = 0$ soit $-x > 0$.
- 2 Si $x > 0$ et $y > 0$, alors $x + y > 0$ ainsi que $xy > 0$.

On définit l'ordre strict $x > y$ par $x - y > 0$. L'ordre faible $x \geq y$ veut dire que $x > y$ ou $x = y$; elle est réflexive, transitive, antisymétrique. L'ordre inverse $x < y$ est défini par $y > x$, et $x \leq y$ veut dire que $y \geq x$.

Les intervalles dans \mathbb{R} sont notés comme suit :

$$\begin{aligned} [a, b] &:= \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}, &]a, b] &:= \{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}, \\]a, b[&:= \{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}, & [a, b[&:= \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x < b\}. \end{aligned}$$

Pour tout $x \in \mathbb{R}$ on définit la valeur absolue par $|x| := x$ si $x \geq 0$ et par $|x| := -x$ si $x \leq 0$. On vérifie aisément les propriétés suivantes :

- $|x| \geq 0$, et $|x| = 0$ si et seulement si $x = 0$.
- $|x + y| \leq |x| + |y|$ pour tout $x, y \in \mathbb{R}$.
- $|x \cdot y| = |x| \cdot |y|$ pour tout $x, y \in \mathbb{R}$.

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$.
Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$.
Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

On dit que $s \in \mathbb{R}$ est la *borne supérieure* de A si s est le plus petit majorant de A .

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$.
Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

On dit que $s \in \mathbb{R}$ est la *borne supérieure* de A si s est le plus petit majorant de A . Si elle existe, elle est unique et sera notée $s = \sup A$.

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$. Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

On dit que $s \in \mathbb{R}$ est la *borne supérieure* de A si s est le plus petit majorant de A . Si elle existe, elle est unique et sera notée $s = \sup A$.

Si A n'est pas majorée on pose $\sup A = +\infty$.

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$. Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

On dit que $s \in \mathbb{R}$ est la *borne supérieure* de A si s est le plus petit majorant de A . Si elle existe, elle est unique et sera notée $s = \sup A$.

Si A n'est pas majorée on pose $\sup A = +\infty$.

Pour l'ensemble vide on pose $\sup \emptyset = -\infty$.

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$. Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

On dit que $s \in \mathbb{R}$ est la *borne supérieure* de A si s est le plus petit majorant de A . Si elle existe, elle est unique et sera notée $s = \sup A$.

Si A n'est pas majorée on pose $\sup A = +\infty$.

Pour l'ensemble vide on pose $\sup \emptyset = -\infty$.

De manière symétrique on définit *minorant* et *borne inférieure*.

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$.
Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

On dit que $s \in \mathbb{R}$ est la *borne supérieure* de A si s est le plus petit majorant de A . Si elle existe, elle est unique et sera notée $s = \sup A$.

Si A n'est pas majorée on pose $\sup A = +\infty$.

Pour l'ensemble vide on pose $\sup \emptyset = -\infty$.

De manière symétrique on définit *minorant* et *borne inférieure*.

Une partie est *bornée* si elle est à la fois minorée et majorée.

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$.
Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

On dit que $s \in \mathbb{R}$ est la *borne supérieure* de A si s est le plus petit majorant de A . Si elle existe, elle est unique et sera notée $s = \sup A$.

Si A n'est pas majorée on pose $\sup A = +\infty$.

Pour l'ensemble vide on pose $\sup \emptyset = -\infty$.

De manière symétrique on définit *minorant* et *borne inférieure*.

Une partie est *bornée* si elle est à la fois minorée et majorée.

Exemple : pour $A = \{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \dots\}$ on a $\sup A = 1$ et $\inf A = 0$.

Bornes supérieure et inférieure

Une partie $A \subset \mathbb{R}$ est *majorée* par $m \in \mathbb{R}$ si $a \leq m$ pour tout $a \in A$. Dans ce cas on dit aussi que m est un *majorant* de A .

On dit que $s \in \mathbb{R}$ est la *borne supérieure* de A si s est le plus petit majorant de A . Si elle existe, elle est unique et sera notée $s = \sup A$.

Si A n'est pas majorée on pose $\sup A = +\infty$.
Pour l'ensemble vide on pose $\sup \emptyset = -\infty$.

De manière symétrique on définit *minorant* et *borne inférieure*.
Une partie est *bornée* si elle est à la fois minorée et majorée.

Exemple : pour $A = \{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \dots\}$ on a $\sup A = 1$ et $\inf A = 0$.

Exemple : la partie $A = \{a \in \mathbb{Q} \mid a^2 \leq 2\}$ est majorée mais n'admet pas de borne supérieure dans \mathbb{Q} . Dans \mathbb{R} on a $\sup A = \sqrt{2}$.

Théorème (caractérisation des nombres réels, admis)

*Les nombres réels forment un corps ordonné $(\mathbb{R}, +, \cdot, \leq)$ tel que toute partie non vide majorée de \mathbb{R} admet une borne supérieure dans \mathbb{R} .
Tout corps ayant cette propriété est canoniquement isomorphe à \mathbb{R} .*

Les rationnels sont denses dans les réels

Comme tout corps ordonné, \mathbb{R} contient les nombres naturels $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$, puis les nombres entiers $\mathbb{Z} = \{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$, et ainsi aussi les nombres rationnels $\mathbb{Q} = \{\frac{a}{b} \mid a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0\}$.

Théorème

Le corps \mathbb{R} jouit des propriétés (équivalentes) suivantes :

- 1** *Pour tout $r > 0$ dans \mathbb{R} il existe $n \in \mathbb{N}$ tel que $n > r$.*
- 2** *Pour tout $\varepsilon > 0$ dans \mathbb{R} il existe $n \in \mathbb{N}$ tel que $\frac{1}{n} < \varepsilon$.*
- 3** *L'ensemble des nombres rationnels \mathbb{Q} est dense dans \mathbb{R} . Ceci veut dire que pour tout nombre réel $r \in \mathbb{R}$ et tout $\varepsilon > 0$ il existe un nombre rationnel $q \in \mathbb{Q}$ tel que $|q - r| < \varepsilon$.*

Les rationnels sont denses dans les réels

Comme tout corps ordonné, \mathbb{R} contient les nombres naturels $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$, puis les nombres entiers $\mathbb{Z} = \{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$, et ainsi aussi les nombres rationnels $\mathbb{Q} = \{\frac{a}{b} \mid a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0\}$.

Théorème

Le corps \mathbb{R} jouit des propriétés (équivalentes) suivantes :

- 1** *Pour tout $r > 0$ dans \mathbb{R} il existe $n \in \mathbb{N}$ tel que $n > r$.*
- 2** *Pour tout $\varepsilon > 0$ dans \mathbb{R} il existe $n \in \mathbb{N}$ tel que $\frac{1}{n} < \varepsilon$.*
- 3** *L'ensemble des nombres rationnels \mathbb{Q} est dense dans \mathbb{R} . Ceci veut dire que pour tout nombre réel $r \in \mathbb{R}$ et tout $\varepsilon > 0$ il existe un nombre rationnel $q \in \mathbb{Q}$ tel que $|q - r| < \varepsilon$.*

Les rationnels sont denses dans les réels

Comme tout corps ordonné, \mathbb{R} contient les nombres naturels $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$, puis les nombres entiers $\mathbb{Z} = \{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$, et ainsi aussi les nombres rationnels $\mathbb{Q} = \{\frac{a}{b} \mid a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0\}$.

Théorème

Le corps \mathbb{R} jouit des propriétés (équivalentes) suivantes :

- 1** *Pour tout $r > 0$ dans \mathbb{R} il existe $n \in \mathbb{N}$ tel que $n > r$.*
- 2** *Pour tout $\varepsilon > 0$ dans \mathbb{R} il existe $n \in \mathbb{N}$ tel que $\frac{1}{n} < \varepsilon$.*
- 3** *L'ensemble des nombres rationnels \mathbb{Q} est dense dans \mathbb{R} . Ceci veut dire que pour tout nombre réel $r \in \mathbb{R}$ et tout $\varepsilon > 0$ il existe un nombre rationnel $q \in \mathbb{Q}$ tel que $|q - r| < \varepsilon$.*

Existence des racines réelles

Théorème (existence des racines réelles)

Pour tout $y \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ et $n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ il existe un unique $x \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ tel que $x^n = y$. Ceci permet de définir $\sqrt[n]{y} := x$ de sorte que $(\sqrt[n]{y})^n = y$.

Nous allons reconsidérer ce résultat fondamental à plusieurs reprises et sous différents aspects. Il apparaît ici comme une première conséquence de la borne supérieure (voir la preuve ci-dessous). Plus tard il réapparaîtra comme corollaire du théorème des valeurs intermédiaires. Quant au calcul effectif, nous reprendrons ce problème comme une belle illustration de la méthode de Newton. Nous discuterons aussi sa généralisation aux racines complexes et plus généralement au théorème fondamental de l'algèbre.

Existence des racines réelles

Théorème (existence des racines réelles)

Pour tout $y \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ et $n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ il existe un unique $x \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ tel que $x^n = y$. Ceci permet de définir $\sqrt[n]{y} := x$ de sorte que $(\sqrt[n]{y})^n = y$.

Nous allons reconsidérer ce résultat fondamental à plusieurs reprises et sous différents aspects. Il apparaît ici comme une première conséquence de la borne supérieure (voir la preuve ci-dessous). Plus tard il réapparaîtra comme corollaire du théorème des valeurs intermédiaires. Quant au calcul effectif, nous reprendrons ce problème comme une belle illustration de la méthode de Newton. Nous discuterons aussi sa généralisation aux racines complexes et plus généralement au théorème fondamental de l'algèbre.

Racines réelles : démonstration

Supposons par l'absurde que $x^n < y$. Dans ce cas il existerait $a \in]0, 1[$ vérifiant $a < \frac{y-x^n}{(1+x)^n-x}$, d'où

$$\begin{aligned}(x+a)^n &= x^n + \binom{n}{1}x^{n-1}a + \binom{n}{2}x^{n-2}a^2 + \dots + \binom{n}{n}a^n \\ &\leq x^n + a[\binom{n}{1}x^{n-1} + \binom{n}{2}x^{n-2} + \dots + \binom{n}{n}] \\ &= x^n + a[(1+x)^n - x^n] < y^n + (x - y^n) = x.\end{aligned}$$

Ainsi $x+a \in A$, ce qui contredit l'hypothèse que x majore A .

Racines réelles : démonstration

Supposons par l'absurde que $x^n < y$. Dans ce cas il existerait $a \in]0, 1[$ vérifiant $a < \frac{y-x^n}{(1+x)^n-x}$, d'où

$$\begin{aligned}(x+a)^n &= x^n + \binom{n}{1}x^{n-1}a + \binom{n}{2}x^{n-2}a^2 + \dots + \binom{n}{n}a^n \\ &\leq x^n + a[\binom{n}{1}x^{n-1} + \binom{n}{2}x^{n-2} + \dots + \binom{n}{n}] \\ &= x^n + a[(1+x)^n - x^n] < y^n + (x - y^n) = x.\end{aligned}$$

Ainsi $x+a \in A$, ce qui contredit l'hypothèse que x majore A .

Supposons par l'absurde que $x^n > y$. Dans ce cas il existerait $b \in]0, x[$ vérifiant $b < \frac{x^n-y}{(1+x)^n-x}$. Pour tout $t \geq x-b$ on aurait alors

$$\begin{aligned}t^n &\geq (x-b)^n = x^n - \binom{n}{1}x^{n-1}b + \binom{n}{2}x^{n-2}b^2 - \dots + (-1)^n \binom{n}{n}b^n \\ &\geq x^n - b[\binom{n}{1}x^{n-1} + \binom{n}{2}x^{n-2} + \dots + \binom{n}{n}] \\ &= x^n - b[(1+x)^n - x^n] > y^n - (y^n - x) = x.\end{aligned}$$

Ainsi $x-b$ majorerait A , ce qui contredit l'hypothèse que x est le plus petit majorant de A . Nous concluons que $x^n = y$, comme énoncé. \square

Puissances rationnelles et réelles

Pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$ nous avons défini la puissance x^n par la récurrence $x^0 := 1$ et $x^{n+1} := x^n \cdot x$. Établir les propriétés

$$(*) \quad x^{s+t} = x^s \cdot x^t, \quad (x^s)^t = x^{st}, \quad (x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s.$$

Puissances rationnelles et réelles

Pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$ nous avons défini la puissance x^n par la récurrence $x^0 := 1$ et $x^{n+1} := x^n \cdot x$. Établir les propriétés

$$(*) \quad x^{s+t} = x^s \cdot x^t, \quad (x^s)^t = x^{st}, \quad (x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s.$$

Pour $x \neq 0$ et $a \in \mathbb{Z}$, $a < 0$, nous posons $x^a := \left(\frac{1}{x}\right)^{-a}$.

Établir les propriétés (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}^*$ et $s, t \in \mathbb{Z}$.

Puissances rationnelles et réelles

Pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$ nous avons défini la puissance x^n par la récurrence $x^0 := 1$ et $x^{n+1} := x^n \cdot x$. Établir les propriétés

$$(*) \quad x^{s+t} = x^s \cdot x^t, \quad (x^s)^t = x^{st}, \quad (x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s.$$

Pour $x \neq 0$ et $a \in \mathbb{Z}$, $a < 0$, nous posons $x^a := \left(\frac{1}{x}\right)^{-a}$.

Établir les propriétés (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}^*$ et $s, t \in \mathbb{Z}$.

Pour $x > 0$ et $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ où $a, b \in \mathbb{Z}$ et $b \geq 1$ nous posons $x^{\frac{a}{b}} := \sqrt[b]{x^a}$.

Montrer que $\sqrt[b]{x^a} = \sqrt[b]{x^a}$ et établir (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$ et $r, s \in \mathbb{Q}$.

Puissances rationnelles et réelles

Pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$ nous avons défini la puissance x^n par la récurrence $x^0 := 1$ et $x^{n+1} := x^n \cdot x$. Établir les propriétés

$$(*) \quad x^{s+t} = x^s \cdot x^t, \quad (x^s)^t = x^{st}, \quad (x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s.$$

Pour $x \neq 0$ et $a \in \mathbb{Z}$, $a < 0$, nous posons $x^a := \left(\frac{1}{x}\right)^{-a}$.

Établir les propriétés (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}^*$ et $s, t \in \mathbb{Z}$.

Pour $x > 0$ et $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ où $a, b \in \mathbb{Z}$ et $b \geq 1$ nous posons $x^{\frac{a}{b}} := \sqrt[b]{x^a}$.

Montrer que $\sqrt[b]{x^a} = \sqrt[b]{x^a}$ et établir (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$ et $r, s \in \mathbb{Q}$.

Pour $s \in \mathbb{Q}$ fixé ceci définit une fonction $f: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $f(x) = x^s$.

Pour $s > 0$ elle est strictement croissante, pour $s < 0$ elle est strictement décroissante, et pour $s = 0$ elle est constante.

Puissances rationnelles et réelles

Pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$ nous avons défini la puissance x^n par la récurrence $x^0 := 1$ et $x^{n+1} := x^n \cdot x$. Établir les propriétés

$$(*) \quad x^{s+t} = x^s \cdot x^t, \quad (x^s)^t = x^{st}, \quad (x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s.$$

Pour $x \neq 0$ et $a \in \mathbb{Z}$, $a < 0$, nous posons $x^a := \left(\frac{1}{x}\right)^{-a}$.

Établir les propriétés (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}^*$ et $s, t \in \mathbb{Z}$.

Pour $x > 0$ et $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ où $a, b \in \mathbb{Z}$ et $b \geq 1$ nous posons $x^{\frac{a}{b}} := \sqrt[b]{x^a}$.

Montrer que $\sqrt[b]{x^a} = \sqrt[b]{x^a}$ et établir (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$ et $r, s \in \mathbb{Q}$.

Pour $s \in \mathbb{Q}$ fixé ceci définit une fonction $f: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $f(x) = x^s$.

Pour $s > 0$ elle est strictement croissante, pour $s < 0$ elle est strictement décroissante, et pour $s = 0$ elle est constante.

Pour $x \in \mathbb{R}$ fixé ceci définit une fonction $g: \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $g(s) = x^s$.

Pour $x > 1$ elle est strictement croissante, pour $x < 1$ elle est strictement décroissante, et pour $x = 1$ elle est constante.

Puissances rationnelles et réelles

Pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$ nous avons défini la puissance x^n par la récurrence $x^0 := 1$ et $x^{n+1} := x^n \cdot x$. Établir les propriétés

$$(*) \quad x^{s+t} = x^s \cdot x^t, \quad (x^s)^t = x^{st}, \quad (x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s.$$

Pour $x \neq 0$ et $a \in \mathbb{Z}$, $a < 0$, nous posons $x^a := \left(\frac{1}{x}\right)^{-a}$.

Établir les propriétés (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}^*$ et $s, t \in \mathbb{Z}$.

Pour $x > 0$ et $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ où $a, b \in \mathbb{Z}$ et $b \geq 1$ nous posons $x^{\frac{a}{b}} := \sqrt[b]{x^a}$.

Montrer que $\sqrt[b]{x^a} = \sqrt[b]{x^a}$ et établir (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$ et $r, s \in \mathbb{Q}$.

Pour $s \in \mathbb{Q}$ fixé ceci définit une fonction $f: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $f(x) = x^s$.

Pour $s > 0$ elle est strictement croissante, pour $s < 0$ elle est strictement décroissante, et pour $s = 0$ elle est constante.

Pour $x \in \mathbb{R}$ fixé ceci définit une fonction $g: \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $g(s) = x^s$.

Pour $x > 1$ elle est strictement croissante, pour $x < 1$ elle est strictement décroissante, et pour $x = 1$ elle est constante.

Essayons d'étendre notre construction de x^s aux exposants réels.

Pour $x \geq 1$ et $r \in \mathbb{R}$ on pose $x^r := \sup\{x^s \mid s \in \mathbb{Q}, s \leq r\}$. Pour $x < 1$ on pose $x^r := \left(\frac{1}{x}\right)^{-r}$. Établir (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$ et $r, s \in \mathbb{R}$.

Puissances rationnelles et réelles

Pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$ nous avons défini la puissance x^n par la récurrence $x^0 := 1$ et $x^{n+1} := x^n \cdot x$. Établir les propriétés

$$(*) \quad x^{s+t} = x^s \cdot x^t, \quad (x^s)^t = x^{st}, \quad (x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s.$$

Pour $x \neq 0$ et $a \in \mathbb{Z}$, $a < 0$, nous posons $x^a := \left(\frac{1}{x}\right)^{-a}$.

Établir les propriétés (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}^*$ et $s, t \in \mathbb{Z}$.

Pour $x > 0$ et $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ où $a, b \in \mathbb{Z}$ et $b \geq 1$ nous posons $x^{\frac{a}{b}} := \sqrt[b]{x^a}$.

Montrer que $\sqrt[b]{x^a} = \sqrt[b]{x^a}$ et établir (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$ et $r, s \in \mathbb{Q}$.

Pour $s \in \mathbb{Q}$ fixé ceci définit une fonction $f: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $f(x) = x^s$.

Pour $s > 0$ elle est strictement croissante, pour $s < 0$ elle est strictement décroissante, et pour $s = 0$ elle est constante.

Pour $x \in \mathbb{R}$ fixé ceci définit une fonction $g: \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $g(s) = x^s$.

Pour $x > 1$ elle est strictement croissante, pour $x < 1$ elle est strictement décroissante, et pour $x = 1$ elle est constante.

Essayons d'étendre notre construction de x^s aux exposants réels.

Pour $x \geq 1$ et $r \in \mathbb{R}$ on pose $x^r := \sup\{x^s \mid s \in \mathbb{Q}, s \leq r\}$. Pour $x < 1$ on pose $x^r := \left(\frac{1}{x}\right)^{-r}$. Établir (*) pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$ et $r, s \in \mathbb{R}$.

Une construction alternative sera de poser $x^s := e^{s \ln x}$ après avoir

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ notée $n \mapsto a_n$.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge* vers $a \in \mathbb{R}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge* vers $a \in \mathbb{R}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge vers* $a \in \mathbb{R}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.
- La suite (a_n) *diverge vers* $+\infty$ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : a_n \geq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow +\infty$ ou aussi $\lim a_n = +\infty$.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge vers* $a \in \mathbb{R}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.
- La suite (a_n) *diverge vers* $+\infty$ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : a_n \geq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow +\infty$ ou aussi $\lim a_n = +\infty$.

- La suite (a_n) *diverge vers* $-\infty$ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : a_n \leq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow -\infty$ ou aussi $\lim a_n = -\infty$.

Proposition

Soit $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{R} . Si $a_n \rightarrow a$ et $a_n \rightarrow b$ alors $a = b$.

Ceci justifie la notation $\lim a_n = a$ pour les suites convergentes.

Proposition

Soit $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{R} . Si $a_n \rightarrow a$ et $a_n \rightarrow b$ alors $a = b$.

Ceci justifie la notation $\lim a_n = a$ pour les suites convergentes.

Proposition

Soit $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{R} . Si $a_n \rightarrow a$ et $a_n \rightarrow b$ alors $a = b$.

Ceci justifie la notation $\lim a_n = a$ pour les suites convergentes.

Théorème

- 1 Soit $|q| < 1$. Alors $q^n \rightarrow 0$ pour $n \rightarrow \infty$.
- 2 Soit $a > 0$. Alors $\frac{1}{n^a} \rightarrow 0$ pour $n \rightarrow \infty$.
- 3 Soit $a > 0$. Alors $\sqrt[n]{a} \rightarrow 1$ pour $n \rightarrow \infty$.
- 4 Nous avons $\sqrt[n]{n} \rightarrow 1$ pour $n \rightarrow \infty$.
- 5 Soit $x \in \mathbb{R}$. Alors $\frac{x^n}{n!} \rightarrow 0$ pour $n \rightarrow \infty$.
- 6 Soient $a, b \in \mathbb{R}$ et $b > 1$. Alors $\frac{n^a}{b^n} \rightarrow 0$ pour $n \rightarrow \infty$.

Critères de convergence

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes.

Critères de convergence

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes.

Alors $(a_n + b_n) \rightarrow a + b$ et $\lambda a_n \rightarrow \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$.

Critères de convergence

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes.

Alors $(a_n + b_n) \rightarrow a + b$ et $\lambda a_n \rightarrow \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$.

Puis $(a_n b_n) \rightarrow ab$ ainsi que $(a_n/b_n) \rightarrow a/b$ si $b \neq 0$.

Critères de convergence

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes.

Alors $(a_n + b_n) \rightarrow a + b$ et $\lambda a_n \rightarrow \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$.

Puis $(a_n b_n) \rightarrow ab$ ainsi que $(a_n/b_n) \rightarrow a/b$ si $b \neq 0$.

Si $a_n \leq b_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$, alors $a \leq b$.



Critères de convergence

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes.

Alors $(a_n + b_n) \rightarrow a + b$ et $\lambda a_n \rightarrow \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$.

Puis $(a_n b_n) \rightarrow ab$ ainsi que $(a_n/b_n) \rightarrow a/b$ si $b \neq 0$.

Si $a_n \leq b_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$, alors $a \leq b$.



Théorème

Soit (a_n) une suite réelle croissante, c'est-à-dire $a_0 \leq a_1 \leq a_2 \leq \dots$

Critères de convergence

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes.

Alors $(a_n + b_n) \rightarrow a + b$ et $\lambda a_n \rightarrow \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$.

Puis $(a_n b_n) \rightarrow ab$ ainsi que $(a_n/b_n) \rightarrow a/b$ si $b \neq 0$.

Si $a_n \leq b_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$, alors $a \leq b$.



Théorème

Soit (a_n) une suite réelle croissante, c'est-à-dire $a_0 \leq a_1 \leq a_2 \leq \dots$

- *Si (a_n) n'est pas majorée, alors a_n diverge, $a_n \rightarrow +\infty$.*

Critères de convergence

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes.

Alors $(a_n + b_n) \rightarrow a + b$ et $\lambda a_n \rightarrow \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$.

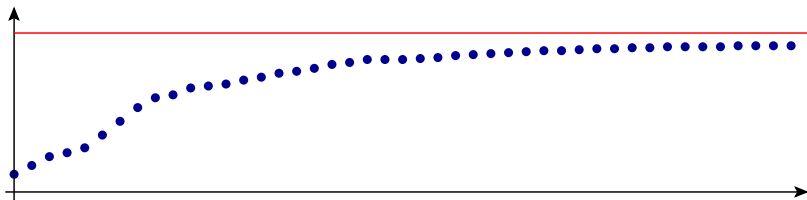
Puis $(a_n b_n) \rightarrow ab$ ainsi que $(a_n/b_n) \rightarrow a/b$ si $b \neq 0$.

Si $a_n \leq b_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$, alors $a \leq b$. □

Théorème

Soit (a_n) une suite réelle croissante, c'est-à-dire $a_0 \leq a_1 \leq a_2 \leq \dots$

- Si (a_n) n'est pas majorée, alors a_n diverge, $a_n \rightarrow +\infty$.
- Si (a_n) est majorée, alors a_n converge, et $\lim a_n = \sup a_n$.



Séries numériques et convergence

À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} .

Séries numériques et convergence

À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} .

Définition

On dit que $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ est *sommable* si la suite $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$ converge. Dans ce cas on appelle $s = \lim s_n$ la *somme*, et on écrit $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = s$.

Séries numériques et convergence

À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} .

Définition

On dit que $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ est *sommable* si la suite $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$ converge. Dans ce cas on appelle $s = \lim s_n$ la *somme*, et on écrit $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = s$.

Exemple (la série géométrique)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} q^k$ converge ssi $|q| < 1$, avec $\sum_{k=0}^{\infty} q^k = \frac{1}{1-q}$.

Séries numériques et convergence


À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{R} .

Définition

On dit que $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ est *sommable* si la suite $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$ converge. Dans ce cas on appelle $s = \lim s_n$ la *somme*, et on écrit $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = s$.

Exemple (la série géométrique)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} q^k$ converge ssi $|q| < 1$, avec $\sum_{k=0}^{\infty} q^k = \frac{1}{1-q}$.

 Par abus de langage $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ dénote deux objets différents :

- La suite $(s_n = \sum_{k=0}^n a_k)_{n \in \mathbb{N}}$, convergente ou non.
- La limite $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = \lim \sum_{k=0}^n a_k$ en cas de convergence.

Développement décimal et B -adique

Soit $B \in \mathbb{N}$, $B \geq 2$; pour le développement décimal on prend $B = 10$.

Développement décimal et B -adique

Soit $B \in \mathbb{N}$, $B \geq 2$; pour le développement décimal on prend $B = 10$.

En base B tout entier $a \in \{0, \dots, B^\ell - 1\}$ s'écrit comme

$$a_1 B^{\ell-1} + a_2 B^{\ell-2} + \dots + a_{\ell-1} B + a_\ell \quad \text{où} \quad a_k \in \{0, \dots, B-1\}.$$

Ce développement s'étend aux nombres réels comme suit :

Théorème

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite arbitraire d'entiers dans $\{0, \dots, B-1\}$.

Alors la série $B^\ell \sum_{k=1}^{\infty} a_k B^{-k}$ converge vers un nombre $x \in [0, B^\ell]$.

Réciproquement, tout $x \in [0, B^\ell]$ s'écrit comme $x = B^\ell \sum_{k=1}^{\infty} a_k B^{-k}$.

Développement décimal et B -adique

Soit $B \in \mathbb{N}$, $B \geq 2$; pour le développement décimal on prend $B = 10$.

En base B tout entier $a \in \{0, \dots, B^\ell - 1\}$ s'écrit comme

$$a_1 B^{\ell-1} + a_2 B^{\ell-2} + \dots + a_{\ell-1} B + a_\ell \quad \text{où} \quad a_k \in \{0, \dots, B-1\}.$$

Ce développement s'étend aux nombres réels comme suit :

Théorème

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite arbitraire d'entiers dans $\{0, \dots, B-1\}$.

Alors la série $B^\ell \sum_{k=1}^{\infty} a_k B^{-k}$ converge vers un nombre $x \in [0, B^\ell]$.

Réciproquement, tout $x \in [0, B^\ell]$ s'écrit comme $x = B^\ell \sum_{k=1}^{\infty} a_k B^{-k}$.

Limites supérieure et inférieure

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{R} , convergente ou non.

Limites supérieure et inférieure

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{R} , convergente ou non.

La suite $b_m = \sup_{n \geq m} a_n$ décroît, il existe donc $b := \lim b_m$.

Limites supérieure et inférieure

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{R} , convergente ou non.

La suite $b_m = \sup_{n \geq m} a_n$ décroît, il existe donc $b := \lim b_m$.

La suite $c_m = \inf_{n \geq m} a_n$ croît, il existe donc $c := \lim c_m$.

Limites supérieure et inférieure

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{R} , convergente ou non.

La suite $b_m = \sup_{n \geq m} a_n$ décroît, il existe donc $b := \lim b_m$.

La suite $c_m = \inf_{n \geq m} a_n$ croît, il existe donc $c := \lim c_m$.

Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $c_m \leq b_m$, donc $c \leq b$.

Limites supérieure et inférieure

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{R} , convergente ou non.

La suite $b_m = \sup_{n \geq m} a_n$ décroît, il existe donc $b := \lim b_m$.

La suite $c_m = \inf_{n \geq m} a_n$ croît, il existe donc $c := \lim c_m$.

Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $c_m \leq b_m$, donc $c \leq b$.

Exemple : $a_n = (-1)^n$. Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $b_m = +1$ et $c_m = -1$.

Limites supérieure et inférieure

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{R} , convergente ou non.

La suite $b_m = \sup_{n \geq m} a_n$ décroît, il existe donc $b := \lim b_m$.

La suite $c_m = \inf_{n \geq m} a_n$ croît, il existe donc $c := \lim c_m$.

Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $c_m \leq b_m$, donc $c \leq b$.

Exemple : $a_n = (-1)^n$. Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $b_m = +1$ et $c_m = -1$.

Définition

À toute suite (a_n) dans \mathbb{R} , convergente ou non, on peut associer

$$\limsup a_n := \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sup_{n \geq m} a_n \right) \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\} \quad \text{et}$$

$$\liminf a_n := \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\inf_{n \geq m} a_n \right) \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}.$$

Limites supérieure et inférieure

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{R} , convergente ou non.

La suite $b_m = \sup_{n \geq m} a_n$ décroît, il existe donc $b := \lim b_m$.

La suite $c_m = \inf_{n \geq m} a_n$ croît, il existe donc $c := \lim c_m$.

Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $c_m \leq b_m$, donc $c \leq b$.

Exemple : $a_n = (-1)^n$. Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $b_m = +1$ et $c_m = -1$.

Définition

À toute suite (a_n) dans \mathbb{R} , convergente ou non, on peut associer

$$\limsup a_n := \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sup_{n \geq m} a_n \right) \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\} \quad \text{et}$$

$$\liminf a_n := \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\inf_{n \geq m} a_n \right) \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}.$$

Exemple : Pour $a_n = (-1)^n$ on a $\limsup a_n = +1$ et $\liminf a_n = -1$.

Limites supérieure et inférieure

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{R} , convergente ou non.

La suite $b_m = \sup_{n \geq m} a_n$ décroît, il existe donc $b := \lim b_m$.

La suite $c_m = \inf_{n \geq m} a_n$ croît, il existe donc $c := \lim c_m$.

Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $c_m \leq b_m$, donc $c \leq b$.

Exemple : $a_n = (-1)^n$. Pour tout $m \in \mathbb{N}$ on a $b_m = +1$ et $c_m = -1$.

Définition

À toute suite (a_n) dans \mathbb{R} , convergente ou non, on peut associer

$$\limsup a_n := \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sup_{n \geq m} a_n \right) \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\} \quad \text{et}$$

$$\liminf a_n := \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\inf_{n \geq m} a_n \right) \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}.$$

Exemple : Pour $a_n = (-1)^n$ on a $\limsup a_n = +1$ et $\liminf a_n = -1$.

Proposition

Une suite (a_n) dans \mathbb{R} converge ssi $\limsup a_n = \liminf a_n$ dans \mathbb{R} .

Le critère de Cauchy

Définition (suite de Cauchy)

Une suite (a_n) est dite *de Cauchy* si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \geq n_0 : |a_n - a_m| \leq \varepsilon$$

Le critère de Cauchy

Définition (suite de Cauchy)

Une suite (a_n) est dite *de Cauchy* si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \geq n_0 : \quad |a_n - a_m| \leq \varepsilon$$

Théorème

Une suite dans \mathbb{R} converge si et seulement si elle est de Cauchy.

Le critère de Cauchy

Définition (suite de Cauchy)

Une suite (a_n) est dite *de Cauchy* si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \geq n_0 : \quad |a_n - a_m| \leq \varepsilon$$

Théorème

Une suite dans \mathbb{R} converge si et seulement si elle est de Cauchy.

Remarque

La définition de convergence d'une suite (a_n) nécessite une limite a pour mesurer la distance $|a_n - a|$ qui doit vérifier $|a_n - a| \rightarrow 0$.

Le critère de Cauchy

Définition (suite de Cauchy)

Une suite (a_n) est dite *de Cauchy* si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \geq n_0 : \quad |a_n - a_m| \leq \varepsilon$$

Théorème

Une suite dans \mathbb{R} converge si et seulement si elle est de Cauchy.

Remarque

La définition de convergence d'une suite (a_n) nécessite une limite a pour mesurer la distance $|a_n - a|$ qui doit vérifier $|a_n - a| \rightarrow 0$.

La définition d'une suite de Cauchy ne parle pas de limite, mais compare les termes a_n entre eux, en mesurant $|a_n - a_m|$.

Le critère de Cauchy

Définition (suite de Cauchy)

Une suite (a_n) est dite *de Cauchy* si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \geq n_0 : \quad |a_n - a_m| \leq \varepsilon$$

Théorème

Une suite dans \mathbb{R} converge si et seulement si elle est de Cauchy.

Remarque

La définition de convergence d'une suite (a_n) nécessite une limite a pour mesurer la distance $|a_n - a|$ qui doit vérifier $|a_n - a| \rightarrow 0$.

La définition d'une suite de Cauchy ne parle pas de limite, mais compare les termes a_n entre eux, en mesurant $|a_n - a_m|$.

Il est parfois plus facile de prouver qu'une suite (a_n) est de Cauchy, sans pour autant expliciter la limite, d'où l'intérêt du théorème.

Séries convergentes et divergentes

Corollaire (du critère de Cauchy)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge si et seulement si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $|\sum_{k=n}^m a_k| \leq \varepsilon$ pour tout $m \geq n \geq N$.

Séries convergentes et divergentes

Corollaire (du critère de Cauchy)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge si et seulement si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $|\sum_{k=n}^m a_k| \leq \varepsilon$ pour tout $m \geq n \geq N$.

Si la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge, alors nécessairement $a_k \rightarrow 0$. □

Séries convergentes et divergentes

Corollaire (du critère de Cauchy)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge si et seulement si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $|\sum_{k=n}^m a_k| \leq \varepsilon$ pour tout $m \geq n \geq N$.

Si la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge, alors nécessairement $a_k \rightarrow 0$. □



La réciproque est fautive, comme montre l'exemple suivant :

Séries convergentes et divergentes

Corollaire (du critère de Cauchy)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge si et seulement si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $|\sum_{k=n}^m a_k| \leq \varepsilon$ pour tout $m \geq n \geq N$.

Si la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge, alors nécessairement $a_k \rightarrow 0$. □

 La réciproque est fautive, comme montre l'exemple suivant :

Exemple (la série harmonique)

La série $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k}$ diverge, c'est-à-dire $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \rightarrow +\infty$ pour $n \rightarrow \infty$.

Séries convergentes et divergentes

Corollaire (du critère de Cauchy)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge si et seulement si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $|\sum_{k=n}^m a_k| \leq \varepsilon$ pour tout $m \geq n \geq N$.

Si la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge, alors nécessairement $a_k \rightarrow 0$. \square

 La réciproque est fautive, comme montre l'exemple suivant :

Exemple (la série harmonique)

La série $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k}$ diverge, c'est-à-dire $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \rightarrow +\infty$ pour $n \rightarrow \infty$.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{2^\ell} \frac{1}{k} &= 1 + \frac{1}{2} + \underbrace{\frac{1}{3} + \frac{1}{4}} + \underbrace{\frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8}} + \cdots + \underbrace{\frac{1}{2^{\ell-1} + 1} + \cdots + \frac{1}{2^\ell}} \\ &\geq 1 + \frac{1}{2} + \underbrace{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}} + \underbrace{\frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8}} + \cdots + \underbrace{\frac{1}{2^\ell} + \cdots + \frac{1}{2^\ell}} \\ &= 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{2} = 1 + \frac{\ell}{2} \rightarrow +\infty \end{aligned}$$

Séries alternées et le critère de Leibniz

Théorème (critère de Leibniz)

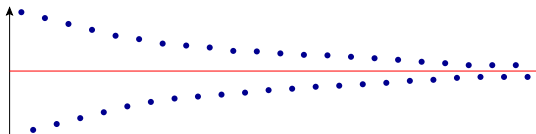
Soit $a_0 \geq a_1 \geq a_2 \geq \dots$ une suite décroissante qui converge vers 0, notée $a_n \searrow 0$. Alors la suite alternée $s_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k a_k$ converge.

Séries alternées et le critère de Leibniz

Théorème (critère de Leibniz)

Soit $a_0 \geq a_1 \geq a_2 \geq \dots$ une suite décroissante qui converge vers 0, notée $a_n \searrow 0$. Alors la suite alternée $s_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k a_k$ converge.

Pour approcher la limite $s = \lim s_n$ on a la majoration $|s - s_n| \leq a_{n+1}$.

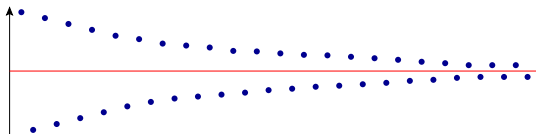


Séries alternées et le critère de Leibniz

Théorème (critère de Leibniz)

Soit $a_0 \geq a_1 \geq a_2 \geq \dots$ une suite décroissante qui converge vers 0, notée $a_n \searrow 0$. Alors la suite alternée $s_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k a_k$ converge.

Pour approcher la limite $s = \lim s_n$ on a la majoration $|s - s_n| \leq a_{n+1}$.



Démonstration.

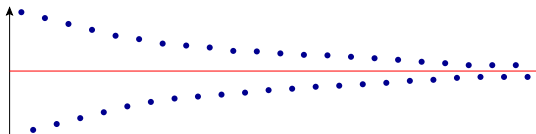
La suite (s_{2m}) décroît, elle est minorée par s_1 , donc elle converge.

Séries alternées et le critère de Leibniz

Théorème (critère de Leibniz)

Soit $a_0 \geq a_1 \geq a_2 \geq \dots$ une suite décroissante qui converge vers 0, notée $a_n \searrow 0$. Alors la suite alternée $s_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k a_k$ converge.

Pour approcher la limite $s = \lim s_n$ on a la majoration $|s - s_n| \leq a_{n+1}$.



Démonstration.

La suite (s_{2m}) décroît, elle est minorée par s_1 , donc elle converge.

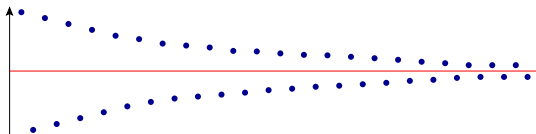
La suite (s_{2m+1}) croît, elle est majorée par s_0 , donc elle converge.

Séries alternées et le critère de Leibniz

Théorème (critère de Leibniz)

Soit $a_0 \geq a_1 \geq a_2 \geq \dots$ une suite décroissante qui converge vers 0, notée $a_n \searrow 0$. Alors la suite alternée $s_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k a_k$ converge.

Pour approcher la limite $s = \lim s_n$ on a la majoration $|s - s_n| \leq a_{n+1}$.



Démonstration.

La suite (s_{2m}) décroît, elle est minorée par s_1 , donc elle converge.

La suite (s_{2m+1}) croît, elle est majorée par s_0 , donc elle converge.

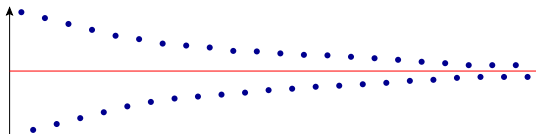
On trouve ainsi que $\limsup s_n = \lim s_{2m}$ et $\liminf s_n = \lim s_{2m+1}$,

Séries alternées et le critère de Leibniz

Théorème (critère de Leibniz)

Soit $a_0 \geq a_1 \geq a_2 \geq \dots$ une suite décroissante qui converge vers 0, notée $a_n \searrow 0$. Alors la suite alternée $s_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k a_k$ converge.

Pour approcher la limite $s = \lim s_n$ on a la majoration $|s - s_n| \leq a_{n+1}$.



Démonstration.

La suite (s_{2m}) décroît, elle est minorée par s_1 , donc elle converge.

La suite (s_{2m+1}) croît, elle est majorée par s_0 , donc elle converge.

On trouve ainsi que $\limsup s_n = \lim s_{2m}$ et $\liminf s_n = \lim s_{2m+1}$,

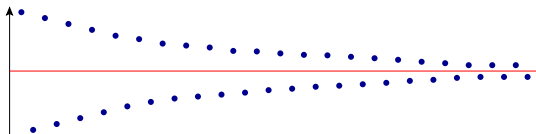
puis $\lim s_{2m} - \lim s_{2m+1} = \lim(s_{2m} - s_{2m+1}) = \lim a_{2m+1} = 0$. □

Séries alternées et le critère de Leibniz

Théorème (critère de Leibniz)

Soit $a_0 \geq a_1 \geq a_2 \geq \dots$ une suite décroissante qui converge vers 0, notée $a_n \searrow 0$. Alors la suite alternée $s_n = \sum_{k=0}^n (-1)^k a_k$ converge.

Pour approcher la limite $s = \lim s_n$ on a la majoration $|s - s_n| \leq a_{n+1}$.



Démonstration.

La suite (s_{2m}) décroît, elle est minorée par s_1 , donc elle converge.

La suite (s_{2m+1}) croît, elle est majorée par s_0 , donc elle converge.

On trouve ainsi que $\limsup s_n = \lim s_{2m}$ et $\liminf s_n = \lim s_{2m+1}$,

puis $\lim s_{2m} - \lim s_{2m+1} = \lim(s_{2m} - s_{2m+1}) = \lim a_{2m+1} = 0$. \square

Exemple (la série de Leibniz)

La série alternée $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k}$ converge (mais très lentement).

Le corps des nombres complexes

Nous voulons construire le corps des nombres complexes

$$\mathbb{C} = \mathbb{R}[i] = \{x + yi \mid x, y \in \mathbb{R}\} \quad \text{où } i^2 = -1.$$

Pour ce faire on munit l'ensemble $\mathbb{C} = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ des deux opérations

$$(x_1, y_1) + (x_2, y_2) := (x_1 + x_2, y_1 + y_2),$$

$$(x_1, y_1) \cdot (x_2, y_2) := (x_1x_2 - y_1y_2, x_1y_2 + y_1x_2).$$

On identifie tout $x \in \mathbb{R}$ avec $(x, 0) \in \mathbb{C}$, puis on définit $i := (0, 1)$.

Ainsi on obtient $i^2 = -1$, comme souhaité. Dans cette notation, tout nombre complexe $z \in \mathbb{C}$ s'écrit de manière unique comme $z = x + yi$ où $x, y \in \mathbb{R}$. Les opérations se réécrivent ainsi comme

$$(x_1 + y_1i) + (x_2 + y_2i) = (x_1 + x_2) + (y_1 + y_2)i,$$

$$(x_1 + y_1i) \cdot (x_2 + y_2i) = (x_1x_2 - y_1y_2) + (x_1y_2 + y_1x_2)i.$$

On vérifie patiemment que $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ est un corps. À chaque nombre complexe $z = x + yi$ on associe le nombre conjugué $\bar{z} = x - yi$.

On voit que $z\bar{z} = x^2 + y^2 \geq 0$, et > 0 si et seulement si $z \neq 0$, d'où

$$\frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{z\bar{z}} = \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{-y}{x^2 + y^2}i.$$

Le corps des nombres complexes

Puisque tout élément $z \in \mathbb{C}$ s'écrit de manière unique comme $z = x + yi$ où $x, y \in \mathbb{R}$, on peut définir $\operatorname{Re}(z) := x$ et $\operatorname{Im}(z) := y$.
On remarque d'ailleurs que $\operatorname{Re}(z) = \frac{1}{2}(z + \bar{z})$ et $\operatorname{Im}(z) = \frac{1}{2i}(z - \bar{z})$.

Le corps des nombres complexes

Puisque tout élément $z \in \mathbb{C}$ s'écrit de manière unique comme $z = x + yi$ où $x, y \in \mathbb{R}$, on peut définir $\operatorname{Re}(z) := x$ et $\operatorname{Im}(z) := y$.
On remarque d'ailleurs que $\operatorname{Re}(z) = \frac{1}{2}(z + \bar{z})$ et $\operatorname{Im}(z) = \frac{1}{2i}(z - \bar{z})$.

Contrairement aux nombres réels, le corps des nombres complexes ne peut être ordonné. Effectivement, tout élément x dans un corps ordonné vérifie $x^2 \geq 0$. Or, pour $i \in \mathbb{C}$ on trouve $i^2 = -1 < 0$.

Le corps des nombres complexes

Puisque tout élément $z \in \mathbb{C}$ s'écrit de manière unique comme $z = x + yi$ où $x, y \in \mathbb{R}$, on peut définir $\operatorname{Re}(z) := x$ et $\operatorname{Im}(z) := y$. On remarque d'ailleurs que $\operatorname{Re}(z) = \frac{1}{2}(z + \bar{z})$ et $\operatorname{Im}(z) = \frac{1}{2i}(z - \bar{z})$.

Contrairement aux nombres réels, le corps des nombres complexes ne peut être ordonné. Effectivement, tout élément x dans un corps ordonné vérifie $x^2 \geq 0$. Or, pour $i \in \mathbb{C}$ on trouve $i^2 = -1 < 0$.

Néanmoins, on peut définir une notion naturelle de distance sur \mathbb{C} : pour tout $z \in \mathbb{C}$ on définit sa norme par $|z| := \sqrt{z\bar{z}}$, ce qui étend la valeur absolue de \mathbb{R} . (Géométriquement $|x + yi| = \sqrt{x^2 + y^2}$ est la distance euclidienne dans le plan $\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$.) Pour tout $u, v \in \mathbb{C}$ on a

- 0 $|\operatorname{Re}(u)| \leq |u|$ et $|\operatorname{Im}(u)| \leq |u|$.
- 1 $|u| \geq 0$, et $|u| = 0$ si et seulement si $u = 0$.
- 2 $|u \cdot v| = |u| \cdot |v|$ et $|\bar{u}| = |u|$.
- 3 $|u + v| \leq |u| + |v|$.

L'inégalité triangulaire (3) découle des propriétés précédentes comme suit : Si $u + v = 0$, alors (3) se déduit de (1). Si $u + v \neq 0$, alors par (2)

$$1 = \operatorname{Re}\left(\frac{u}{u+v}\right) + \operatorname{Re}\left(\frac{v}{u+v}\right) \leq \left|\frac{u}{u+v}\right| + \left|\frac{v}{u+v}\right| = \frac{|u|}{|u+v|} + \frac{|v|}{|u+v|}.$$

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge* vers $a \in \mathbb{C}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge* vers $a \in \mathbb{C}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge vers* $a \in \mathbb{C}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.
- La suite (a_n) *diverge vers* ∞ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n| \geq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow \infty$ ou aussi $\lim a_n = \infty$.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge vers* $a \in \mathbb{C}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.
- La suite (a_n) *diverge vers* ∞ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n| \geq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow \infty$ ou aussi $\lim a_n = \infty$.

Exemple. Considérons un nombre $q \in \mathbb{C}$ et la suite $(q^n)_{n \in \mathbb{N}}$:

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge vers* $a \in \mathbb{C}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.
- La suite (a_n) *diverge vers* ∞ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n| \geq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow \infty$ ou aussi $\lim a_n = \infty$.

Exemple. Considérons un nombre $q \in \mathbb{C}$ et la suite $(q^n)_{n \in \mathbb{N}}$:

- Pour $|q| < 1$ on a $q^n \rightarrow 0$.

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge vers* $a \in \mathbb{C}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.
- La suite (a_n) *diverge vers* ∞ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n| \geq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow \infty$ ou aussi $\lim a_n = \infty$.

Exemple. Considérons un nombre $q \in \mathbb{C}$ et la suite $(q^n)_{n \in \mathbb{N}}$:

- Pour $|q| < 1$ on a $q^n \rightarrow 0$.
- Pour $|q| > 1$ on a $q^n \rightarrow \infty$.

Suites complexes et convergence

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge vers* $a \in \mathbb{C}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.
- La suite (a_n) *diverge vers* ∞ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n| \geq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow \infty$ ou aussi $\lim a_n = \infty$.

Exemple. Considérons un nombre $q \in \mathbb{C}$ et la suite $(q^n)_{n \in \mathbb{N}}$:

- Pour $|q| < 1$ on a $q^n \rightarrow 0$.
- Pour $|q| > 1$ on a $q^n \rightarrow \infty$.
- Pour $q = 1$ on a $q^n \rightarrow 1$, c'est une suite constante.

Suites complexes et convergence

Définition (suite convergente)

Une suite $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} est une fonction $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ notée $n \mapsto a_n$.

- La suite (a_n) *converge vers* $a \in \mathbb{C}$ si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - a| \leq \varepsilon$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow a$ ou aussi $\lim a_n = a$.

- Si (a_n) ne converge pas on dit que la suite *diverge*.
- La suite (a_n) *diverge vers* ∞ si

$$\forall M \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n| \geq M$$

Dans ce cas on écrit $a_n \rightarrow \infty$ ou aussi $\lim a_n = \infty$.

Exemple. Considérons un nombre $q \in \mathbb{C}$ et la suite $(q^n)_{n \in \mathbb{N}}$:

- Pour $|q| < 1$ on a $q^n \rightarrow 0$.
- Pour $|q| > 1$ on a $q^n \rightarrow \infty$.
- Pour $q = 1$ on a $q^n \rightarrow 1$, c'est une suite constante.
- Pour $|q| = 1$, $q \neq 1$ la suite q^n ne converge pas, elle diverge.

Critères de convergence

Proposition

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{C} et soit $a \in \mathbb{C}$. Nous avons $a_n \rightarrow a$ dans \mathbb{C} si et seulement si $\operatorname{Re}(a_n) \rightarrow \operatorname{Re}(a)$ et $\operatorname{Im}(a_n) \rightarrow \operatorname{Im}(a)$ dans \mathbb{R} .

Les critères de convergence vus pour \mathbb{R} restent valables pour \mathbb{C} pourvu qu'ils n'utilisent que la distance $|\cdot \cdot \cdot|$ et pas l'ordre \leq .

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes dans \mathbb{C} .

Alors $(a_n + b_n) \rightarrow a + b$ et $\lambda a_n \rightarrow \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{C}$.

On a aussi $(a_n b_n) \rightarrow ab$ ainsi que $(a_n/b_n) \rightarrow a/b$ si $b \neq 0$. □

Proposition

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{C} et soit $a \in \mathbb{C}$. Nous avons $a_n \rightarrow a$ dans \mathbb{C} si et seulement si $\operatorname{Re}(a_n) \rightarrow \operatorname{Re}(a)$ et $\operatorname{Im}(a_n) \rightarrow \operatorname{Im}(a)$ dans \mathbb{R} .

Proposition

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{C} et soit $a \in \mathbb{C}$. Nous avons $a_n \rightarrow a$ dans \mathbb{C} si et seulement si $\operatorname{Re}(a_n) \rightarrow \operatorname{Re}(a)$ et $\operatorname{Im}(a_n) \rightarrow \operatorname{Im}(a)$ dans \mathbb{R} .

Les critères de convergence vus pour \mathbb{R} restent valables pour \mathbb{C} pourvu qu'ils n'utilisent que la distance $|\cdot\cdot|$ et pas l'ordre \leq .

Critères de convergence

Proposition

Soit (a_n) une suite dans \mathbb{C} et soit $a \in \mathbb{C}$. Nous avons $a_n \rightarrow a$ dans \mathbb{C} si et seulement si $\operatorname{Re}(a_n) \rightarrow \operatorname{Re}(a)$ et $\operatorname{Im}(a_n) \rightarrow \operatorname{Im}(a)$ dans \mathbb{R} .

Les critères de convergence vus pour \mathbb{R} restent valables pour \mathbb{C} pourvu qu'ils n'utilisent que la distance $|\cdot \cdot \cdot|$ et pas l'ordre \leq .

Proposition

Soient $a_n \rightarrow a$ et $b_n \rightarrow b$ deux suites convergentes dans \mathbb{C} .

Alors $(a_n + b_n) \rightarrow a + b$ et $\lambda a_n \rightarrow \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{C}$.

On a aussi $(a_n b_n) \rightarrow ab$ ainsi que $(a_n/b_n) \rightarrow a/b$ si $b \neq 0$. □

Critères de convergence

Les notions \liminf et \limsup n'ont pas de sens pour les suites dans \mathbb{C} car elles reposent sur l'ordre \leq dans \mathbb{R} . Par contre on garde toujours :

Critères de convergence

Les notions \liminf et \limsup n'ont pas de sens pour les suites dans \mathbb{C} car elles reposent sur l'ordre \leq dans \mathbb{R} . Par contre on garde toujours :

Définition (suite de Cauchy)

Une suite (a_n) dans \mathbb{C} est dite *de Cauchy* si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \geq n_0 : \quad |a_n - a_m| \leq \varepsilon$$

Critères de convergence

Les notions \liminf et \limsup n'ont pas de sens pour les suites dans \mathbb{C} car elles reposent sur l'ordre \leq dans \mathbb{R} . Par contre on garde toujours :

Définition (suite de Cauchy)

Une suite (a_n) dans \mathbb{C} est dite *de Cauchy* si

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \geq n_0 : |a_n - a_m| \leq \varepsilon$$

Théorème

Une suite (a_n) dans \mathbb{C} converge si et seulement elle est de Cauchy.

Séries numériques et convergence

À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} .

Séries numériques et convergence

À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} .

Définition

On dit que $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ est *sommable* si la suite $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$ converge. Dans ce cas on appelle $s = \lim s_n$ la *somme*, et on écrit $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = s$.

Séries numériques et convergence

À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} .

Définition

On dit que $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ est *sommable* si la suite $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$ converge. Dans ce cas on appelle $s = \lim s_n$ la *somme*, et on écrit $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = s$.

Exemple (la série géométrique)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} q^k$ converge ssi $|q| < 1$, avec $\sum_{k=0}^{\infty} q^k = \frac{1}{1-q}$.

Séries numériques et convergence


À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} .

Définition

On dit que $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ est *sommable* si la suite $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$ converge. Dans ce cas on appelle $s = \lim s_n$ la *somme*, et on écrit $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = s$.

Exemple (la série géométrique)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} q^k$ converge ssi $|q| < 1$, avec $\sum_{k=0}^{\infty} q^k = \frac{1}{1-q}$.

-  Par abus de langage $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ dénote deux objets différents :
- La suite $(s_n = \sum_{k=0}^n a_k)_{n \in \mathbb{N}}$, convergente ou non.
 - La limite $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = \lim \sum_{k=0}^n a_k$ en cas de convergence.

Séries numériques et convergence


À toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} on peut associer les *sommes partielles* $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$, ce qui définit une nouvelle suite $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ dans \mathbb{C} .

Définition

On dit que $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ est *sommable* si la suite $s_n := \sum_{k=0}^n a_k$ converge. Dans ce cas on appelle $s = \lim s_n$ la *somme*, et on écrit $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = s$.

Exemple (la série géométrique)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} q^k$ converge ssi $|q| < 1$, avec $\sum_{k=0}^{\infty} q^k = \frac{1}{1-q}$.

-  Par abus de langage $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ dénote deux objets différents :
- La suite $(s_n = \sum_{k=0}^n a_k)_{n \in \mathbb{N}}$, convergente ou non.
 - La limite $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = \lim \sum_{k=0}^n a_k$ en cas de convergence.

Corollaire (du critère de Cauchy)

La série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge si et seulement si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $|\sum_{k=n}^m a_k| \leq \varepsilon$ pour tout $m \geq n \geq N$.
Si $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge, alors $a_k \rightarrow 0$. (La réciproque est fausse.) □

Le critère de comparaison

Proposition (séries à termes positifs ou nuls)

Une série $\sum_{k=0}^{\infty} c_k$ à termes positifs ou nuls $c_k \geq 0$ converge ssi la suite des sommes partielles $s_n = \sum_{k=0}^n c_k$ est bornée. □

Théorème (critère de comparaison)

Supposons que $|a_k| \leq c_k$ pour tout $k \geq k_0$.

Le critère de comparaison

Proposition (séries à termes positifs ou nuls)

Une série $\sum_{k=0}^{\infty} c_k$ à termes positifs ou nuls $c_k \geq 0$ converge ssi la suite des sommes partielles $s_n = \sum_{k=0}^n c_k$ est bornée. □

Théorème (critère de comparaison)

*Supposons que $|a_k| \leq c_k$ pour tout $k \geq k_0$.
Si $\sum_{k=0}^{\infty} c_k$ converge, alors $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge.*

Définition

Une série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ est dite *absolument convergente* si la série $\sum_{k=0}^{\infty} |a_k|$ des valeurs absolues converge.

Séries absolument convergentes

Définition

Une série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ est dite *absolument convergente* si la série $\sum_{k=0}^{\infty} |a_k|$ des valeurs absolues converge.

Corollaire (du critère de comparaison)

Toute série absolument convergente est convergente. □

Séries absolument convergentes

Définition

Une série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ est dite *absolument convergente* si la série $\sum_{k=0}^{\infty} |a_k|$ des valeurs absolues converge.

Corollaire (du critère de comparaison)

Toute série absolument convergente est convergente. □

Exemples

Pour tout $q \in \mathbb{C}$ vérifiant $|q| < 1$ la série géométrique $\sum_{k=0}^{\infty} q^k$ est convergente et absolument convergente car $\sum_{k=0}^{\infty} |q|^k$ converge.

Séries absolument convergentes

Définition

Une série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ est dite *absolument convergente* si la série $\sum_{k=0}^{\infty} |a_k|$ des valeurs absolues converge.

Corollaire (du critère de comparaison)

Toute série absolument convergente est convergente. □

Exemples

Pour tout $q \in \mathbb{C}$ vérifiant $|q| < 1$ la série géométrique $\sum_{k=0}^{\infty} q^k$ est convergente et absolument convergente car $\sum_{k=0}^{\infty} |q|^k$ converge.

La série de Leibniz $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k}$ est convergente (série alternée) mais pas absolument convergente car $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k}$ diverge.

Comparaison avec la série géométrique

Corollaire

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{C} telle que $|a_k| \leq Mq^k$ pour certaines constantes $M > 0$ et $q < 1$ et tout k à partir d'un certain rang k_0 .

Corollaire

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{C} telle que $|a_k| \leq Mq^k$ pour certaines constantes $M > 0$ et $q < 1$ et tout k à partir d'un certain rang k_0 . Alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument).

Comparaison avec la série géométrique

Corollaire

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{C} telle que $|a_k| \leq Mq^k$ pour certaines constantes $M > 0$ et $q < 1$ et tout k à partir d'un certain rang k_0 . Alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument).

Démonstration. On peut supposer que $k_0 = 0$.

On compare $\sum |a_k|$ avec la série géométrique $\sum Mq^k$:

Comparaison avec la série géométrique

Corollaire

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{C} telle que $|a_k| \leq Mq^k$ pour certaines constantes $M > 0$ et $q < 1$ et tout k à partir d'un certain rang k_0 . Alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument).

Démonstration. On peut supposer que $k_0 = 0$.

On compare $\sum |a_k|$ avec la série géométrique $\sum Mq^k$:

$$\sum_{k=0}^n |a_k| \leq \sum_{k=0}^n Mq^k = M \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} \leq M \frac{1}{1 - q}.$$

Comparaison avec la série géométrique

Corollaire

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{C} telle que $|a_k| \leq Mq^k$ pour certaines constantes $M > 0$ et $q < 1$ et tout k à partir d'un certain rang k_0 . Alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument).

Démonstration. On peut supposer que $k_0 = 0$.

On compare $\sum |a_k|$ avec la série géométrique $\sum Mq^k$:

$$\sum_{k=0}^n |a_k| \leq \sum_{k=0}^n Mq^k = M \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} \leq M \frac{1}{1 - q}.$$

La suite croissante $(\sum_{k=0}^n |a_k|)_{n \in \mathbb{N}}$ étant bornée, elle converge.

Comparaison avec la série géométrique

Corollaire

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{C} telle que $|a_k| \leq Mq^k$ pour certaines constantes $M > 0$ et $q < 1$ et tout k à partir d'un certain rang k_0 . Alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument).

Démonstration. On peut supposer que $k_0 = 0$.

On compare $\sum |a_k|$ avec la série géométrique $\sum Mq^k$:

$$\sum_{k=0}^n |a_k| \leq \sum_{k=0}^n Mq^k = M \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} \leq M \frac{1}{1 - q}.$$

La suite croissante $(\sum_{k=0}^n |a_k|)_{n \in \mathbb{N}}$ étant bornée, elle converge. Ainsi la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge absolument, donc elle converge. \square

Comparaison avec la série géométrique

Corollaire

Soit $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite dans \mathbb{C} telle que $|a_k| \leq Mq^k$ pour certaines constantes $M > 0$ et $q < 1$ et tout k à partir d'un certain rang k_0 . Alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument).

Démonstration. On peut supposer que $k_0 = 0$.

On compare $\sum |a_k|$ avec la série géométrique $\sum Mq^k$:

$$\sum_{k=0}^n |a_k| \leq \sum_{k=0}^n Mq^k = M \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} \leq M \frac{1}{1 - q}.$$

La suite croissante $(\sum_{k=0}^n |a_k|)_{n \in \mathbb{N}}$ étant bornée, elle converge. Ainsi la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge absolument, donc elle converge. \square

Les critères des quotients et des racines

Corollaire (critère des quotients)

S'il existe un indice $k_0 \in \mathbb{N}$ et une constante $q < 1$ tels que $\frac{|a_{k+1}|}{|a_k|} \leq q$ pour tout $k \geq k_0$, alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument). \square

Les critères des quotients et des racines

Corollaire (critère des quotients)

S'il existe un indice $k_0 \in \mathbb{N}$ et une constante $q < 1$ tels que $\frac{|a_{k+1}|}{|a_k|} \leq q$ pour tout $k \geq k_0$, alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument). \square

Exemple

La série $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$ converge : pour $k \geq 2x$ on a $\frac{x^{k+1}}{(k+1)!} / \frac{x^k}{k!} = \frac{x}{k+1} \leq \frac{1}{2}$.

Les critères des quotients et des racines

Corollaire (critère des quotients)

S'il existe un indice $k_0 \in \mathbb{N}$ et une constante $q < 1$ tels que $\frac{|a_{k+1}|}{|a_k|} \leq q$ pour tout $k \geq k_0$, alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument). \square

Exemple

La série $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$ converge : pour $k \geq 2x$ on a $\frac{x^{k+1}}{(k+1)!} / \frac{x^k}{k!} = \frac{x}{k+1} \leq \frac{1}{2}$.

Corollaire (critère des racines)

Si $\limsup \sqrt[k]{|a_k|} < 1$, alors la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge (absolument).

Réarrangements de séries

Définition

Un *réarrangement* d'une suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ est une suite $(b_\ell)_{\ell \in \mathbb{N}}$ obtenue comme $b_\ell = a_{\tau(\ell)}$ par une bijection $\tau: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$.

Théorème

Si la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge absolument, alors tout réarrangement $\sum_{\ell=0}^{\infty} b_\ell$ converge vers la même limite, $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = \sum_{\ell=0}^{\infty} b_\ell$.

Avertissement (théorème de Riemann)

Si la série $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ converge mais ne converge pas absolument, alors on peut réarranger les termes de sorte que la série $\sum_{\ell=0}^{\infty} a_{\tau(\ell)}$ converge vers n'importe quel nombre donné (y compris $\pm\infty$).

Théorème

Soient $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = a$ et $\sum_{k=0}^{\infty} b_k = b$ deux séries convergentes.

Alors $\sum_{k=0}^{\infty} (a_k + b_k) = a + b$ et $\sum_{k=0}^{\infty} \lambda a_k = \lambda a$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$.

Pour le produit des deux séries on trouve ainsi

$$\left(\sum_{k=0}^{\infty} a_k \right) \cdot \left(\sum_{\ell=0}^{\infty} b_{\ell} \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{\ell=0}^{\infty} a_k b_{\ell} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} a_k b_{\ell}.$$

Si les deux séries convergentes absolument, alors on a même

$$\left(\sum_{k=0}^{\infty} a_k \right) \cdot \left(\sum_{\ell=0}^{\infty} b_{\ell} \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^k a_j b_{k-j}.$$

Théorème

On peut définir $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par la série absolument convergente

$$\exp(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}.$$

La série exponentielle

Théorème

On peut définir $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par la série absolument convergente

$$\exp(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}.$$

Alors pour tout $u, v \in \mathbb{C}$ on a $\exp(u + v) = \exp(u) \cdot \exp(v)$.

Théorème

On peut définir $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par la série absolument convergente

$$\exp(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}.$$

Alors pour tout $u, v \in \mathbb{C}$ on a $\exp(u + v) = \exp(u) \cdot \exp(v)$.

Au lieu de $\exp(z)$ on écrit aussi e^z où $e := \exp(1) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!}$.

Définition

On définit les deux fonctions $\sin, \cos: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par

$$\sin(z) := \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} z^{2k+1}.$$

$$\cos(z) := \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} z^{2k},$$

Ainsi on a $e^{iz} = \cos(z) + i \sin(z)$ pour tout $z \in \mathbb{C}$. (Identité d'Euler)

Définition

On définit les deux fonctions $\sin, \cos: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par

$$\sin(z) := \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} z^{2k+1}.$$

$$\cos(z) := \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} z^{2k},$$

Ainsi on a $e^{iz} = \cos(z) + i \sin(z)$ pour tout $z \in \mathbb{C}$. (Identité d'Euler)

Proposition

Pour tout $\theta \in \mathbb{R}$ nous avons $\cos(\theta) = \operatorname{Re}(e^{i\theta})$ et $\sin(\theta) = \operatorname{Im}(e^{i\theta})$.

Définition

On définit les deux fonctions $\sin, \cos: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par

$$\sin(z) := \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} z^{2k+1}.$$

$$\cos(z) := \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} z^{2k},$$

Ainsi on a $e^{iz} = \cos(z) + i \sin(z)$ pour tout $z \in \mathbb{C}$. (Identité d'Euler)

Proposition

Pour tout $\theta \in \mathbb{R}$ nous avons $\cos(\theta) = \operatorname{Re}(e^{i\theta})$ et $\sin(\theta) = \operatorname{Im}(e^{i\theta})$.

Puisque $|e^{i\theta}|^2 = 1$ il en découle que $\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) = 1$.

Sommaire

- 1 Suites et séries numériques
- 2 Fonctions continues**
 - Définition et exemples
 - Le théorème des valeurs intermédiaires
 - Le théorème du maximum
- 3 Fonctions dérivables
- 4 Étude de la fonction exponentielle
- 5 Le théorème de Gauss–d'Alembert

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction. On dit que f est *continue en* $x \in I$ si pour toute suite $x_n \rightarrow x$ on a $f(x_n) \rightarrow f(x)$.

Fonctions continues

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction. On dit que f est *continue en* $x \in I$ si pour toute suite $x_n \rightarrow x$ on a $f(x_n) \rightarrow f(x)$.
On dit que f est *continue* (sur I) si elle est continue en tout $x \in I$.

Exemples

Toute fonction constante est continue. L'identité est continue.

Si $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ sont continues, alors $f + g$ et $f \cdot g$ sont continues.

Ainsi toutes les fonctions polynomiales sont continues.

Exemples

La fonction $\text{sign}: \mathbb{R} \rightarrow \{-1, 0, +1\}$ n'est pas continue : pour $x_n = \frac{1}{n}$ on trouve $x_n \rightarrow 0$ mais $\text{sign}(x_n) = 1$ ne converge pas vers $\text{sign}(0) = 0$.

Fonctions continues

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction. On dit que f est *continue en* $x \in I$ si pour toute suite $x_n \rightarrow x$ on a $f(x_n) \rightarrow f(x)$.
On dit que f est *continue (sur I)* si elle est continue en tout $x \in I$.

Exemples

Toute fonction constante est continue. L'identité est continue.
Si $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ sont continues, alors $f + g$ et $f \cdot g$ sont continues.
Ainsi toutes les fonctions polynomiales sont continues.

Exemples

La fonction $\text{sign}: \mathbb{R} \rightarrow \{-1, 0, +1\}$ n'est pas continue : pour $x_n = \frac{1}{n}$ on trouve $x_n \rightarrow 0$ mais $\text{sign}(x_n) = 1$ ne converge pas vers $\text{sign}(0) = 0$.
À noter que la fonction $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto |x| = x \cdot \text{sign}(x)$ est continue.

Fonctions continues

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction. On dit que f est *continue en* $x \in I$ si pour toute suite $x_n \rightarrow x$ on a $f(x_n) \rightarrow f(x)$.
On dit que f est *continue (sur I)* si elle est continue en tout $x \in I$.

Exemples

Toute fonction constante est continue. L'identité est continue.
Si $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ sont continues, alors $f + g$ et $f \cdot g$ sont continues.
Ainsi toutes les fonctions polynomiales sont continues.

Exemples

La fonction $\text{sign}: \mathbb{R} \rightarrow \{-1, 0, +1\}$ n'est pas continue : pour $x_n = \frac{1}{n}$ on trouve $x_n \rightarrow 0$ mais $\text{sign}(x_n) = 1$ ne converge pas vers $\text{sign}(0) = 0$.
À noter que la fonction $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto |x| = x \cdot \text{sign}(x)$ est continue.

Proposition

Si $f: I \rightarrow J$ et $g: J \rightarrow \mathbb{R}$ sont continues, alors $g \circ f$ est continue. \square

La fonction exponentielle est continue

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ définie par $\exp(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$ est continue.

La fonction exponentielle est continue

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ définie par $\exp(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$ est continue.

Ici nous étendons la notion de continuité aux fonctions complexes par la même condition que $f(z_n) \rightarrow f(z)$ pour tout $z_n \rightarrow z$. Elle implique bien sûr la continuité de la restriction sur \mathbb{R} .

La fonction exponentielle est continue

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ définie par $\exp(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$ est continue.

Ici nous étendons la notion de continuité aux fonctions complexes par la même condition que $f(z_n) \rightarrow f(z)$ pour tout $z_n \rightarrow z$. Elle implique bien sûr la continuité de la restriction sur \mathbb{R} .

Corollaire

Les fonctions $\sin, \cos: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ données par

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

sont également continues. □

Le théorème des valeurs intermédiaires

Théorème (des valeurs intermédiaires, TVI)

Soit $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue. Si $y \in \mathbb{R}$ vérifie $f(a) \leq y \leq f(b)$, alors il existe $x \in [a, b]$ tel que $f(x) = y$.

Le théorème des valeurs intermédiaires

Théorème (des valeurs intermédiaires, TVI)

Soit $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue. Si $y \in \mathbb{R}$ vérifie $f(a) \leq y \leq f(b)$, alors il existe $x \in [a, b]$ tel que $f(x) = y$.

Ceci permet d'approcher et d'encadrer un $x \in [a, b]$ vérifiant $f(x) = y$.

Application aux polynômes réels

Corollaire (les racines réelles revisitées)

Pour tout $y \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ et $n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ il existe un unique $x \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ tel que $x^n = y$. Ceci permet de définir $\sqrt[n]{y} := x$ de sorte que $(\sqrt[n]{y})^n = y$.

Corollaire (du théorème des valeurs intermédiaires)

Tout polynôme $P \in \mathbb{R}[X]$ de degré impair admet une racine dans \mathbb{R} .


Application aux polynômes réels

Corollaire (les racines réelles revisitées)

Pour tout $y \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ et $n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ il existe un unique $x \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ tel que $x^n = y$. Ceci permet de définir $\sqrt[n]{y} := x$ de sorte que $(\sqrt[n]{y})^n = y$.

Corollaire (du théorème des valeurs intermédiaires)

Tout polynôme $P \in \mathbb{R}[X]$ de degré impair admet une racine dans \mathbb{R} .

 Ceci n'est plus vrai pour tout polynôme de degré pair.
Par exemple $P(x) = x^2 + 1$ vérifie $P(x) > 0$ pour tout $x \in \mathbb{R}$.
Ceci a motivé l'extension au corps $\mathbb{C} = \mathbb{R}[i]$ où $i^2 = -1$.

Caractérisation « ε δ » des fonctions continues

Proposition

Une fonction $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ est continue en $x \in I$ si et seulement si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $\delta > 0$ tel que $|f(t) - f(x)| \leq \varepsilon$ pour tout $t \in I$ vérifiant $|t - x| \leq \delta$.

Caractérisation « ε δ » des fonctions continues

Proposition

Une fonction $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ est continue en $x \in I$ si et seulement si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $\delta > 0$ tel que $|f(t) - f(x)| \leq \varepsilon$ pour tout $t \in I$ vérifiant $|t - x| \leq \delta$.

Le théorème du maximum

Théorème (du maximum)

Soit $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue. Alors f atteint la valeur $\sup f := \sup\{f(t) \mid t \in [a, b]\}$: il existe $x \in [a, b]$ tel que $f(x) = \sup f$.

Le théorème du maximum en \mathbb{R}^d

Définition

Une partie $A \subset \mathbb{R}^d$ est *bornée* s'il existe $m \in \mathbb{R}$ tel que $|a| \leq m$ pour tout $a \in A$.

Le théorème du maximum en \mathbb{R}^d

Définition

Une partie $A \subset \mathbb{R}^d$ est *bornée* s'il existe $m \in \mathbb{R}$ tel que $|a| \leq m$ pour tout $a \in A$. Elle est *fermée* si toute suite $(a_k)_{k \in \mathbb{N}}$ dans A qui converge vers x dans \mathbb{R}^d vérifie $x \in A$.

Théorème (du maximum)

Soit $A \subset \mathbb{R}^d$ une partie bornée fermée. Alors toute fonction continue $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ atteint la valeur $\sup f := \sup\{f(a) \mid a \in A\}$.

Sommaire

- 1 Suites et séries numériques
- 2 Fonctions continues
- 3 Fonctions dérivables**
 - Définition et exemples
 - Le théorème des accroissements finis
 - Fonction dérivée et critère de monotonie
- 4 Étude de la fonction exponentielle
- 5 Le théorème de Gauss–d'Alembert

Fonctions dérivables : définition

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.

Fonctions dérivables : définition

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.
On dit que f est *dérivable en* $x \in I$ si le quotient

$$\frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x}$$

admet une limite ℓ pour toute suite $x_n \rightarrow x$, $x_n \neq x$.

Fonctions dérivables : définition

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.
On dit que f est *dérivable en* $x \in I$ si le quotient

$$\frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x}$$

admet une limite ℓ pour toute suite $x_n \rightarrow x$, $x_n \neq x$.
Dans ce cas on définit la *dérivée* de f en x par

$$f'(x) := \lim_{x_n \rightarrow x, x_n \neq x} \frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x}.$$

Fonctions dérivables : définition

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.
On dit que f est *dérivable en* $x \in I$ si le quotient

$$\frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x}$$

admet une limite ℓ pour toute suite $x_n \rightarrow x$, $x_n \neq x$.
Dans ce cas on définit la *dérivée* de f en x par

$$f'(x) := \lim_{x_n \rightarrow x, x_n \neq x} \frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x}.$$

On dit que f est *dérivable* (sur I) si elle est dérivable en tout $x \in I$.

Fonctions dérivables : définition

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.
On dit que f est *dérivable* en $x \in I$ si le quotient

$$\frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x}$$

admet une limite ℓ pour toute suite $x_n \rightarrow x$, $x_n \neq x$.
Dans ce cas on définit la *dérivée* de f en x par

$$f'(x) := \lim_{x_n \rightarrow x, x_n \neq x} \frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x}.$$

On dit que f est *dérivable* (sur I) si elle est dérivable en tout $x \in I$.
Dans ce cas on définit la *fonction dérivée* $f': I \rightarrow \mathbb{R}$ par $x \mapsto f'(x)$.

Remarque

Si f est dérivable en x alors elle est continue en x , car
 $|f(x_n) - f(x)| = \left| \frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x} \right| \cdot |x_n - x| \rightarrow f'(x) \cdot 0 = 0$.



La fonction $x \mapsto |x|$ est continue mais pas dérivable en 0

Fonctions dérivables : interprétation géométrique

Une fonction $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ est dérivable en $x_0 \in I$ avec dérivée $f'(x_0)$ si et seulement si f s'écrit pour tout $x \in I$ comme

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + (x - x_0)g(x)$$

où $g: I \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction continue en x_0 vérifiant $g(x_0) = 0$.

Fonctions dérivables : interprétation géométrique

Une fonction $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ est dérivable en $x_0 \in I$ avec dérivée $f'(x_0)$ si et seulement si f s'écrit pour tout $x \in I$ comme

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + (x - x_0)g(x)$$

où $g: I \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction continue en x_0 vérifiant $g(x_0) = 0$.

Ainsi la fonction affine $t(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$ approche $f(x)$ de sorte que la différence $f(x) - t(x)$ soit négligeable devant $x - x_0$.

Fonctions dérivables : interprétation géométrique

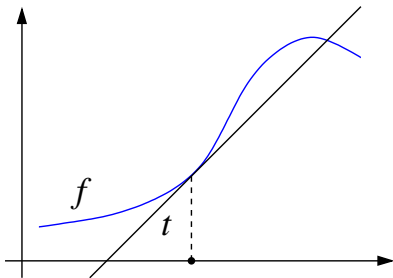
Une fonction $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ est dérivable en $x_0 \in I$ avec dérivée $f'(x_0)$ si et seulement si f s'écrit pour tout $x \in I$ comme

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + (x - x_0)g(x)$$

où $g: I \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction continue en x_0 vérifiant $g(x_0) = 0$.

Ainsi la fonction affine $t(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$ approche $f(x)$ de sorte que la différence $f(x) - t(x)$ soit négligeable devant $x - x_0$.

Dans cette situation on appelle t la tangente à f en x_0 :



Fonctions dérivables : exemples

Exemples

Toute fonction constante $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ est dérivable et $f' = 0$.

Fonctions dérivables : exemples

Exemples

Toute fonction constante $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ est dérivable et $f' = 0$.

La fonction identité $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = x$ est dérivable et $f' = 1$.

Théorème

Si $f, g: I \rightarrow \mathbb{R}$ sont dérivables en $x \in I$, alors $f + g$, fg , et f/g sont dérivables en x (pour f/g nous supposons $g(x) \neq 0$ bien sûr) et on a

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

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

$$(f/g)'(x) = \frac{f'(x)g(x) - f(x)g'(x)}{g(x)^2}$$

Soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ dérivable en x et soit $g: J \rightarrow \mathbb{R}$ dérivable en $f(x) \in J$. Alors $g \circ f$ est dérivable en x et $(g \circ f)'(x) = (g' \circ f)(x) \cdot f'(x)$.

Ceci permet, par exemple, de dériver toute fonction rationnelle.
Pour de plus amples exemples consultez votre livre préféré d'analyse.

La fonction exponentielle est dérivable

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ définie par $\exp(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$ est dérivable, et sa dérivée vérifie $\exp'(z) = \exp(z)$ pour tout $z \in \mathbb{C}$.

Ici nous étendons la notion de dérivabilité aux fonctions complexes par la même condition que $\lim_{z_n \rightarrow z} \frac{f(z_n) - f(z)}{z_n - z}$ existe pour tout $z_n \rightarrow z$. Elle implique bien sûr la dérivabilité de la restriction sur \mathbb{R} .

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.

On dit que $x \in I$ est un *maximum local* de f s'il existe $\delta > 0$ tel que $f(x) \geq f(t)$ pour tout $t \in I$ vérifiant $|t - x| \leq \delta$.

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.

On dit que $x \in I$ est un *maximum local* de f s'il existe $\delta > 0$ tel que $f(x) \geq f(t)$ pour tout $t \in I$ vérifiant $|t - x| \leq \delta$.

On définit *minimum local* de la même manière.

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.

On dit que $x \in I$ est un *maximum local* de f s'il existe $\delta > 0$ tel que $f(x) \geq f(t)$ pour tout $t \in I$ vérifiant $|t - x| \leq \delta$.

On définit *minimum local* de la même manière.

Un *extremum local* est un minimum ou maximum local.

Extrema locaux

Définition

Soit $I \subset \mathbb{R}$ un intervalle et soit $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction.

On dit que $x \in I$ est un *maximum local* de f s'il existe $\delta > 0$ tel que $f(x) \geq f(t)$ pour tout $t \in I$ vérifiant $|t - x| \leq \delta$.

On définit *minimum local* de la même manière.

Un *extremum local* est un minimum ou maximum local.

Théorème

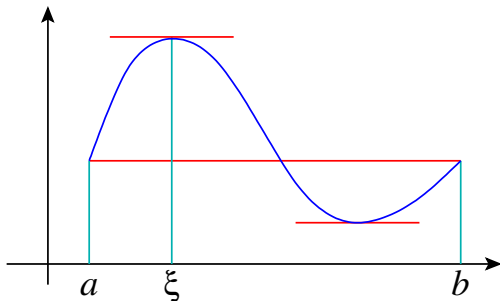
Soit $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ et soit $x \in]a, b[$ un *extremum local*.

Si f est dérivable en x , alors $f'(x) = 0$.

Le théorème de Rolle

Théorème (de Rolle)

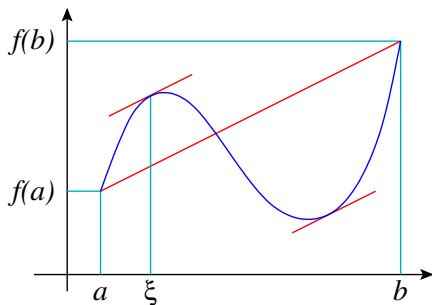
Soit $g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue qui soit dérivable sur $]a, b[$.
Si $g(a) = g(b)$ alors il existe $\xi \in]a, b[$ tel que $f'(\xi) = 0$.



Le théorème des accroissements finis

Théorème (des accroissements finis, TAF)

Soit $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction continue qui soit dérivable sur $]a, b[$.
Alors il existe $\xi \in]a, b[$ tel que $f(b) - f(a) = f'(\xi)(b - a)$.



Corollaire

Soit $f:]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction dérivable.

Corollaire

Soit $f:]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction dérivable.

- *Si $f' > 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement croissante.*

Corollaire

Soit $f:]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction dérivable.

- *Si $f' > 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement croissante.*
- *Si $f' < 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement décroissante.*

Corollaire

Soit $f:]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction dérivable.

- *Si $f' > 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement croissante.*
- *Si $f' < 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement décroissante.*
- *Si $f' \geq 0$ sur $]a, b[$, alors f est croissante.*

Corollaire

Soit $f:]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction dérivable.

- *Si $f' > 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement croissante.*
- *Si $f' < 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement décroissante.*
- *Si $f' \geq 0$ sur $]a, b[$, alors f est croissante.*
- *Si $f' \leq 0$ sur $]a, b[$, alors f est décroissante.*

Corollaire

Soit $f:]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction dérivable.

- Si $f' > 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement croissante.
- Si $f' < 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement décroissante.
- Si $f' \geq 0$ sur $]a, b[$, alors f est croissante.
- Si $f' \leq 0$ sur $]a, b[$, alors f est décroissante.
- Si $f' = 0$ sur $]a, b[$, alors f est constante.

Corollaire

Soit $f:]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction dérivable.

- Si $f' > 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement croissante.
- Si $f' < 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement décroissante.
- Si $f' \geq 0$ sur $]a, b[$, alors f est croissante.
- Si $f' \leq 0$ sur $]a, b[$, alors f est décroissante.
- Si $f' = 0$ sur $]a, b[$, alors f est constante.

Démonstration. Toutes les conclusions se déduisent de

$$f(x_2) - f(x_1) = f'(x)(x_2 - x_1)$$

qui tient pour toute paire $x_1 < x_2$ dans l'intervalle $]a, b[$
et pour un $x \in]x_1, x_2[$ dépendant de x_1, x_2 . □

Corollaire


Soit $f:]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction dérivable.

- Si $f' > 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement croissante.
- Si $f' < 0$ sur $]a, b[$, alors f est strictement décroissante.
- Si $f' \geq 0$ sur $]a, b[$, alors f est croissante.
- Si $f' \leq 0$ sur $]a, b[$, alors f est décroissante.
- Si $f' = 0$ sur $]a, b[$, alors f est constante.

Démonstration. Toutes les conclusions se déduisent de

$$f(x_2) - f(x_1) = f'(x)(x_2 - x_1)$$

qui tient pour toute paire $x_1 < x_2$ dans l'intervalle $]a, b[$
et pour un $x \in]x_1, x_2[$ dépendant de x_1, x_2 . □

 Il est essentiel que f soit définie sur un intervalle de \mathbb{R} .
Considérons la fonction $f: \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(x) = \text{sign}(x)$.
Elle est continue et dérivable en tout point de son domaine de
définition, avec pour dérivée $f' = 0$. Pourtant f n'est pas constante !

Sommaire

- 1 Suites et séries numériques
- 2 Fonctions continues
- 3 Fonctions dérivables
- 4 Étude de la fonction exponentielle
 - Propriétés de la fonction exponentielle $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$
 - Le logarithme $\ln: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$ et puissances réelles
 - Fonctions trigonométriques et racines n -ièmes complexes
- 5 Le théorème de Gauss–d’Alembert

Propriétés de la fonction exponentielle $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$

Comme déjà remarqué dans l'introduction, l'exponentielle est sans doute la fonction la plus importante en mathématiques. Afin de couronner notre bref développement d'analyse, nous pouvons maintenant établir en toute rigueur le beau théorème suivant :

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ définie par $\exp(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$ est infiniment dérivable, vérifiant $\exp' = \exp$. Elle jouit des propriétés suivantes :

- 1** *Pour tout $z_1, z_2 \in \mathbb{C}$ nous avons $\exp(z_1 + z_2) = \exp(z_1) \exp(z_2)$.
En particulier $\exp(z) \neq 0$ et $\exp(-z) = 1/\exp(z)$ pour tout $z \in \mathbb{C}$.*
- 2** *La restriction $\exp: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$ est strictement croissante, vérifiant $\exp(x) \rightarrow +\infty$ pour $x \rightarrow +\infty$, et $\exp(x) \rightarrow 0$ pour $x \rightarrow -\infty$.*
- 3** *Il existe $\pi \in \mathbb{R}_{>0}$ tel que $e^z = 1$ si et seulement si $z \in 2\pi i\mathbb{Z}$.
Cette condition caractérise le nombre π de manière unique.*
- 4** *L'application $\phi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ définie par $\phi(t) = e^{it} = \cos(t) + i \sin(t)$ vérifie $\phi(\mathbb{R}) = \mathbb{S}$ où $\mathbb{S} := \{z \in \mathbb{C}; |z| = 1\}$ est le cercle unité.*
- 5** *Pour tout $w \in \mathbb{C}$, $w \neq 0$, il existe $z \in \mathbb{C}$ tel que $\exp(z) = w$.
On a $\exp(z_1) = \exp(z_2)$ si et seulement si $z_1 - z_2 \in 2\pi i\mathbb{Z}$.*

Le logarithme $\ln: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$

Corollaire

La fonction $\exp: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$ admet une unique inverse $\ln: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$ telle que $\ln(\exp(x)) = x$ et $\exp(\ln(y)) = y$ pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $y \in \mathbb{R}_{>0}$. Elle jouit des propriétés suivantes :

- 1** *On a $\ln(e) = 1$ et $\ln(x \cdot y) = \ln(x) + \ln(y)$ pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$.*
- 2** *\ln est continue et strictement croissante, et nous avons $\ln(x) \rightarrow +\infty$ pour $x \rightarrow +\infty$ ainsi que $\ln(x) \rightarrow -\infty$ pour $x \rightarrow 0$.*
- 3** *\ln est dérivable avec pour dérivée $\ln'(x) = \frac{1}{x}$.*

Le logarithme $\ln: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$

Corollaire

La fonction $\exp: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$ admet une unique inverse $\ln: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$ telle que $\ln(\exp(x)) = x$ et $\exp(\ln(y)) = y$ pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $y \in \mathbb{R}_{>0}$. Elle jouit des propriétés suivantes :

- 1** *On a $\ln(e) = 1$ et $\ln(x \cdot y) = \ln(x) + \ln(y)$ pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$.*
- 2** *\ln est continue et strictement croissante, et nous avons $\ln(x) \rightarrow +\infty$ pour $x \rightarrow +\infty$ ainsi que $\ln(x) \rightarrow -\infty$ pour $x \rightarrow 0$.*
- 3** *\ln est dérivable avec pour dérivée $\ln'(x) = \frac{1}{x}$.*

Le logarithme $\ln: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$

Corollaire

La fonction $\exp: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$ admet une unique inverse $\ln: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$ telle que $\ln(\exp(x)) = x$ et $\exp(\ln(y)) = y$ pour tout $x \in \mathbb{R}$ et $y \in \mathbb{R}_{>0}$. Elle jouit des propriétés suivantes :

- 1** *On a $\ln(e) = 1$ et $\ln(x \cdot y) = \ln(x) + \ln(y)$ pour tout $x, y \in \mathbb{R}_{>0}$.*
- 2** *\ln est continue et strictement croissante, et nous avons $\ln(x) \rightarrow +\infty$ pour $x \rightarrow +\infty$ ainsi que $\ln(x) \rightarrow -\infty$ pour $x \rightarrow 0$.*
- 3** *\ln est dérivable avec pour dérivée $\ln'(x) = \frac{1}{x}$.*

Puissances réelles

Corollaire

Soit $x \in \mathbb{R}_{>0}$. La fonction $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(s) := \exp(s \ln x)$ est continue et vérifie $f(s) = x^s$ pour tout $s \in \mathbb{Q}$. C'est l'unique extension continue des puissances rationnelles aux puissances réelles.

Corollaire

Soit $x \in \mathbb{R}_{>0}$. La fonction $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(s) := \exp(s \ln x)$ est continue et vérifie $f(s) = x^s$ pour tout $s \in \mathbb{Q}$. C'est l'unique extension continue des puissances rationnelles aux puissances réelles.

Ceci justifie de poser $x^s := e^{s \ln x}$ pour tout $x \in \mathbb{R}_{>0}$ et tout $s \in \mathbb{R}$.
On obtient $x^{s+t} = x^s \cdot x^t$ et $(x^s)^t = x^{st}$ ainsi que $(x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s$.
Pour $x > 1$ la fonction $s \mapsto x^s$ est strictement croissante, pour $x < 1$ elle est strictement décroissante, et pour $x = 1$ elle est constante.
Pour $s > 0$ la fonction $x \mapsto x^s$ est strictement croissante, pour $s < 0$ elle est strictement décroissante, et pour $s = 0$ elle est constante.

Corollaire

Soit $x \in \mathbb{R}_{>0}$. La fonction $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(s) := \exp(s \ln x)$ est continue et vérifie $f(s) = x^s$ pour tout $s \in \mathbb{Q}$. C'est l'unique extension continue des puissances rationnelles aux puissances réelles.

Ceci justifie de poser $x^s := e^{s \ln x}$ pour tout $x \in \mathbb{R}_{>0}$ et tout $s \in \mathbb{R}$.
On obtient $x^{s+t} = x^s \cdot x^t$ et $(x^s)^t = x^{st}$ ainsi que $(x \cdot y)^s = x^s \cdot y^s$.
Pour $x > 1$ la fonction $s \mapsto x^s$ est strictement croissante, pour $x < 1$ elle est strictement décroissante, et pour $x = 1$ elle est constante.
Pour $s > 0$ la fonction $x \mapsto x^s$ est strictement croissante, pour $s < 0$ elle est strictement décroissante, et pour $s = 0$ elle est constante.

Corollaire

Les deux fonctions $\sin, \cos: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ définies par

$$\sin(t) := \frac{1}{2i}(e^{it} - e^{-it}) \quad \text{et} \quad \cos(t) := \frac{1}{2}(e^{it} + e^{-it})$$

jouissent des propriétés suivantes :

- 1 On a $\sin, \cos \in C^\infty$ avec $\sin' = \cos$ et $\cos' = -\sin$.
- 2 Les fonctions \sin et \cos sont périodiques de période 2π .
- 3 On a $\sin^2 + \cos^2 = 1$. Pour tout $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ vérifiant $x^2 + y^2 = 1$ il existe un unique $t \in [0, 2\pi[$ tel que $\cos(t) = x$ et $\sin(t) = y$.
- 4 On a $\cos(s + t) = \cos(s)\cos(t) - \sin(s)\sin(t)$
et $\sin(s + t) = \cos(s)\sin(t) + \sin(s)\cos(t)$ pour tout $s, t \in \mathbb{R}$.

Racines n -ièmes de l'unité

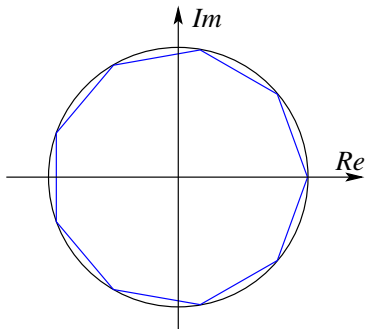
Corollaire

Soit $n \in \mathbb{N}$ tel que $n \geq 1$. Pour $k = 0, \dots, n - 1$ les nombres

$$\zeta_n^k = e^{2\pi i k/n} = \cos\left(\frac{k}{n}2\pi\right) + i \sin\left(\frac{k}{n}2\pi\right)$$

sont deux-à-deux distinctes et vérifient $(\zeta_n^k)^n = \exp(2\pi i k) = 1$,
Ce sont donc les racines n -ièmes de l'unité et on trouve

$$X^n - 1 = (X - 1)(X - \zeta_n) \cdots (X - \zeta_n^{n-1}).$$



Racines n -ièmes d'un nombre complexe

Après le polynôme $X^n - 1$ regardons $X^n - w$ où $w \in \mathbb{C}$ et $n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$.

Corollaire (racines complexes)

Pour tout $w \in \mathbb{C}$ il existe $\xi \in \mathbb{C}$ tel que $\xi^n = w$. Le polynôme $X^n - w$ admet donc n racines dans \mathbb{C} , à savoir $\xi \zeta_n^k$ où $k = 0, \dots, n - 1$:

$$X^n - w = (X - \xi)(X - \xi \zeta_n)(X - \xi \zeta_n^2) \cdots (X - \xi \zeta_n^{n-1}).$$

Sommaire

- 1 Suites et séries numériques
- 2 Fonctions continues
- 3 Fonctions dérivables
- 4 Étude de la fonction exponentielle
- 5 Le théorème de Gauss–d'Alembert**

Le théorème de Gauss–d'Alembert (1/4)

Un polynôme $P \in \mathbb{K}[X]$ de degré n sur un corps \mathbb{K} admet au plus n racines dans \mathbb{K} . S'il admet n racines $r_1, \dots, r_n \in \mathbb{K}$, éventuellement avec répétitions, alors il factorise comme $P = u(X - r_1) \cdots (X - r_n)$.

En général tel n'est pas le cas : penser à $X^2 + 1$ sur \mathbb{R} . Sur le corps \mathbb{C} des nombres complexes, par contre, tout polynôme se factorise ainsi :

Théorème (de Gauss–d'Alembert)

Pour tout $P \in \mathbb{C}[X]$ de degré n il existe $r_1, r_2, \dots, r_n \in \mathbb{C}$ et $u \in \mathbb{C}^\times$ tels que $P = u(X - r_1)(X - r_2) \cdots (X - r_n)$.

Stratégie : Il suffit de montrer que tout polynôme $P \in \mathbb{C}[X]$ de degré ≥ 1 admet *une* racine $z \in \mathbb{C}$. En factorisant $P = (X - z)Q$ on obtient $Q \in \mathbb{C}[X]$ vérifiant $\deg Q = \deg P - 1$, puis on conclut par récurrence.

Nous présentons ici la preuve d'Argand (1814) et de Cauchy (1820). Elle procède par deux étapes, d'abord globale puis locale.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (2/4)

Pour montrer l'existence d'une racine nous utiliserons deux résultats :

Le théorème de Gauss–d'Alembert (2/4)

Pour montrer l'existence d'une racine nous utiliserons deux résultats :

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ vérifie $\exp(x + y) = \exp(x) \exp(y)$ et tout $z \in \mathbb{C}$ s'écrit comme $z = r \exp(i\theta)$ où $r = |z|$ et $\theta \in [0, 2\pi[$. \square

Le théorème de Gauss–d'Alembert (2/4)

Pour montrer l'existence d'une racine nous utiliserons deux résultats :

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ vérifie $\exp(x + y) = \exp(x) \exp(y)$ et tout $z \in \mathbb{C}$ s'écrit comme $z = r \exp(i\theta)$ où $r = |z|$ et $\theta \in [0, 2\pi[$. \square

Ceci nécessite la construction de la fonction \exp puis la preuve des propriétés énoncées. Tout ceci a été établi ci-dessus.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (2/4)

Pour montrer l'existence d'une racine nous utiliserons deux résultats :

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ vérifie $\exp(x + y) = \exp(x) \exp(y)$ et tout $z \in \mathbb{C}$ s'écrit comme $z = r \exp(i\theta)$ où $r = |z|$ et $\theta \in [0, 2\pi[$. \square

Ceci nécessite la construction de la fonction \exp puis la preuve des propriétés énoncées. Tout ceci a été établi ci-dessus.

Théorème

Toute fonction continue $h: X \rightarrow \mathbb{R}$ sur un compact $X \subset \mathbb{R}^n$ atteint son minimum : il existe $x_0 \in X$ tel que $h(x_0) \leq h(x)$ pour tout $x \in X$. \square

Rappelons qu'une partie $X \subset \mathbb{R}^n$ est compacte si et seulement si elle est bornée et fermée.

En l'occurrence X sera le disque fermé $\bar{B}(0, r) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r\}$.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (2/4)

Pour montrer l'existence d'une racine nous utiliserons deux résultats :

Théorème

La fonction $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ vérifie $\exp(x + y) = \exp(x) \exp(y)$ et tout $z \in \mathbb{C}$ s'écrit comme $z = r \exp(i\theta)$ où $r = |z|$ et $\theta \in [0, 2\pi[$. \square


Ceci nécessite la construction de la fonction \exp puis la preuve des propriétés énoncées. Tout ceci a été établi ci-dessus.

Théorème

Toute fonction continue $h: X \rightarrow \mathbb{R}$ sur un compact $X \subset \mathbb{R}^n$ atteint son minimum : il existe $x_0 \in X$ tel que $h(x_0) \leq h(x)$ pour tout $x \in X$. \square

Rappelons qu'une partie $X \subset \mathbb{R}^n$ est compacte si et seulement si elle est bornée et fermée.

En l'occurrence X sera le disque fermé $\bar{B}(0, r) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r\}$.

 La compacité est cruciale ! $h: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$, $h(z) = \frac{1}{1+|z|^2}$ n'a pas de minimum : quelque soit $z_0 \in \mathbb{C}$ il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ tel que $h(z_1) < h(z_0)$. Bien sûr $\inf\{h(z) \mid z \in \mathbb{C}\} = 0$, mais cette valeur n'est pas atteinte.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (3/4)

Lemme (existence d'un minimum global)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale, définie par $f(z) = a_0 + a_1z + \cdots + a_nz^n$ où $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (3/4)

Lemme (existence d'un minimum global)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale, définie par $f(z) = a_0 + a_1z + \cdots + a_nz^n$ où $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$.

Alors la fonction $|f|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ atteint son minimum : il existe $z_0 \in \mathbb{C}$ tel que $|f(z_0)| \leq |f(z)|$ pour tout $z \in \mathbb{C}$.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (3/4)

Lemme (existence d'un minimum global)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale, définie par $f(z) = a_0 + a_1z + \dots + a_nz^n$ où $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$.

Alors la fonction $|f|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ atteint son minimum :
il existe $z_0 \in \mathbb{C}$ tel que $|f(z_0)| \leq |f(z)|$ pour tout $z \in \mathbb{C}$.

Démonstration. C'est clair pour une fonction constante $f(z) = a_0$.
Il reste à analyser le cas où $n \geq 1$ et $a_n \neq 0$. Pour tout $z \in \mathbb{C}$ on a :

$$a_n z^n = f(z) - a_{n-1}z^{n-1} - \dots - a_1z - a_0$$

$$\Rightarrow |a_n z^n| \leq |f(z)| + |a_{n-1}z^{n-1}| + \dots + |a_1z| + |a_0|$$

$$\Rightarrow |f(z)| \geq |a_n||z|^n - |a_{n-1}||z|^{n-1} - \dots - |a_1||z| - |a_0|$$

$|f|$ est grand ici

Ici il existe
un minimum

Le théorème de Gauss–d'Alembert (3/4)

Lemme (existence d'un minimum global)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale, définie par $f(z) = a_0 + a_1z + \dots + a_nz^n$ où $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$.

Alors la fonction $|f|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ atteint son minimum :
il existe $z_0 \in \mathbb{C}$ tel que $|f(z_0)| \leq |f(z)|$ pour tout $z \in \mathbb{C}$.

Démonstration. C'est clair pour une fonction constante $f(z) = a_0$.
Il reste à analyser le cas où $n \geq 1$ et $a_n \neq 0$. Pour tout $z \in \mathbb{C}$ on a :

$$a_n z^n = f(z) - a_{n-1}z^{n-1} - \dots - a_1z - a_0$$

$$\Rightarrow |a_n z^n| \leq |f(z)| + |a_{n-1}z^{n-1}| + \dots + |a_1z| + |a_0|$$

$$\Rightarrow |f(z)| \geq |a_n||z|^n - |a_{n-1}||z|^{n-1} - \dots - |a_1||z| - |a_0|$$

$|f|$ est grand ici

Ici il existe
un minimum

Le minorant à droite tend vers $+\infty$ pour $|z| \rightarrow +\infty$.
Il existe alors $r \geq 0$ tel que $|f(z)| > |a_0|$ pour $|z| > r$.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (3/4)

Lemme (existence d'un minimum global)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale, définie par $f(z) = a_0 + a_1z + \dots + a_nz^n$ où $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$.

Alors la fonction $|f|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ atteint son minimum :
il existe $z_0 \in \mathbb{C}$ tel que $|f(z_0)| \leq |f(z)|$ pour tout $z \in \mathbb{C}$.

Démonstration. C'est clair pour une fonction constante $f(z) = a_0$.
Il reste à analyser le cas où $n \geq 1$ et $a_n \neq 0$. Pour tout $z \in \mathbb{C}$ on a :

$$a_n z^n = f(z) - a_{n-1}z^{n-1} - \dots - a_1z - a_0$$

$|f|$ est grand ici

$$\Rightarrow |a_n z^n| \leq |f(z)| + |a_{n-1}z^{n-1}| + \dots + |a_1z| + |a_0|$$

$$\Rightarrow |f(z)| \geq |a_n||z|^n - |a_{n-1}||z|^{n-1} - \dots - |a_1||z| - |a_0|$$

Ici il existe
un minimum

Le minorant à droite tend vers $+\infty$ pour $|z| \rightarrow +\infty$.

Il existe alors $r \geq 0$ tel que $|f(z)| > |a_0|$ pour $|z| > r$.

Soit $\mu = \inf\{|f(z)| \mid z \in \mathbb{C}\}$. On a $\mu \leq |f(0)| = |a_0|$.

Ainsi $\mu = \inf\{|f(z)| \mid z \in \bar{B}(0, r)\}$ où $\bar{B}(0, r) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r\}$.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (3/4)

Lemme (existence d'un minimum global)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale, définie par $f(z) = a_0 + a_1z + \dots + a_nz^n$ où $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$.

Alors la fonction $|f|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ atteint son minimum :
il existe $z_0 \in \mathbb{C}$ tel que $|f(z_0)| \leq |f(z)|$ pour tout $z \in \mathbb{C}$.

Démonstration. C'est clair pour une fonction constante $f(z) = a_0$.
Il reste à analyser le cas où $n \geq 1$ et $a_n \neq 0$. Pour tout $z \in \mathbb{C}$ on a :

$$a_n z^n = f(z) - a_{n-1}z^{n-1} - \dots - a_1z - a_0$$

$|f|$ est grand ici

$$\Rightarrow |a_n z^n| \leq |f(z)| + |a_{n-1}z^{n-1}| + \dots + |a_1z| + |a_0|$$

$$\Rightarrow |f(z)| \geq |a_n||z|^n - |a_{n-1}||z|^{n-1} - \dots - |a_1||z| - |a_0|$$

Ici il existe
un minimum

Le minorant à droite tend vers $+\infty$ pour $|z| \rightarrow +\infty$.

Il existe alors $r \geq 0$ tel que $|f(z)| > |a_0|$ pour $|z| > r$.

Soit $\mu = \inf\{ |f(z)| \mid z \in \mathbb{C} \}$. On a $\mu \leq |f(0)| = |a_0|$.

Ainsi $\mu = \inf\{ |f(z)| \mid z \in \bar{B}(0, r) \}$ où $\bar{B}(0, r) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r\}$.

Puisque $|f|: \bar{B}(0, r) \rightarrow \mathbb{R}$ est continue et $\bar{B}(0, r)$ est compact,

le minimum est atteint : il existe $z_0 \in \bar{B}(0, r)$ tel que $|f(z_0)| = \mu$. □

Le théorème de Gauss–d'Alembert (4/4)

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n'est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n'est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Démonstration. On définit $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par $g(z) = f(z + z_0)/f(z_0)$.

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n'est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Démonstration. On définit $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par $g(z) = f(z + z_0)/f(z_0)$.

Nous allons montrer que $|g(0)| = 1$ n'est pas un minimum local de $|g|$.

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n'est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Démonstration. On définit $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par $g(z) = f(z + z_0)/f(z_0)$.

Nous allons montrer que $|g(0)| = 1$ n'est pas un minimum local de $|g|$.

La fonction g est polynomiale de même degré n , donc

$g(z) = 1 + b_k z^k + \dots + b_n z^n$ où $b_k, \dots, b_n \in \mathbb{C}$ et $b_k, b_n \neq 0$.

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n'est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Démonstration. On définit $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par $g(z) = f(z + z_0)/f(z_0)$.

Nous allons montrer que $|g(0)| = 1$ n'est pas un minimum local de $|g|$.

La fonction g est polynomiale de même degré n , donc

$g(z) = 1 + b_k z^k + \dots + b_n z^n$ où $b_k, \dots, b_n \in \mathbb{C}$ et $b_k, b_n \neq 0$.

Il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $b_k e^{ik\theta} = -|b_k|$. Pour $z = r e^{i\theta}$ on trouve

$g(r e^{i\theta}) = 1 + b_k r^k e^{ik\theta} + \dots + b_n r^n e^{in\theta} = 1 - |b_k| r^k + \dots + b_n r^n e^{in\theta}$.

Le théorème de Gauss–d'Alembert (4/4)

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n'est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Démonstration. On définit $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par $g(z) = f(z + z_0)/f(z_0)$.

Nous allons montrer que $|g(0)| = 1$ n'est pas un minimum local de $|g|$.

La fonction g est polynomiale de même degré n , donc

$g(z) = 1 + b_k z^k + \dots + b_n z^n$ où $b_k, \dots, b_n \in \mathbb{C}$ et $b_k, b_n \neq 0$.

Il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $b_k e^{ik\theta} = -|b_k|$. Pour $z = r e^{i\theta}$ on trouve

$g(r e^{i\theta}) = 1 + b_k r^k e^{ik\theta} + \dots + b_n r^n e^{in\theta} = 1 - |b_k| r^k + \dots + b_n r^n e^{ik\theta}$.

Ainsi $|g(r e^{i\theta})| \leq |1 - |b_k| r^k| + \dots + |b_n| r^n$. Pour $0 \leq r \leq |b_k|^{-1/k}$

ceci devient $|g(r e^{i\theta})| \leq 1 - r^k (|b_k| - |b_{k+1}| r - \dots - |b_n| r^{n-k})$.

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n'est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Démonstration. On définit $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par $g(z) = f(z + z_0)/f(z_0)$.

Nous allons montrer que $|g(0)| = 1$ n'est pas un minimum local de $|g|$.

La fonction g est polynomiale de même degré n , donc

$g(z) = 1 + b_k z^k + \dots + b_n z^n$ où $b_k, \dots, b_n \in \mathbb{C}$ et $b_k, b_n \neq 0$.

Il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $b_k e^{ik\theta} = -|b_k|$. Pour $z = r e^{i\theta}$ on trouve

$g(r e^{i\theta}) = 1 + b_k r^k e^{ik\theta} + \dots + b_n r^n e^{in\theta} = 1 - |b_k| r^k + \dots + b_n r^n e^{in\theta}$.

Ainsi $|g(r e^{i\theta})| \leq |1 - |b_k| r^k| + \dots + |b_n| r^n$. Pour $0 \leq r \leq |b_k|^{-1/k}$

ceci devient $|g(r e^{i\theta})| \leq 1 - r^k (|b_k| - |b_{k+1}| r - \dots - |b_n| r^{n-k})$.

Pour $r > 0$ assez petit le terme en parenthèse est positif.

Lemme (analyse d'un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n'est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Démonstration. On définit $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par $g(z) = f(z + z_0)/f(z_0)$.

Nous allons montrer que $|g(0)| = 1$ n'est pas un minimum local de $|g|$.

La fonction g est polynomiale de même degré n , donc

$g(z) = 1 + b_k z^k + \dots + b_n z^n$ où $b_k, \dots, b_n \in \mathbb{C}$ et $b_k, b_n \neq 0$.

Il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $b_k e^{ik\theta} = -|b_k|$. Pour $z = r e^{i\theta}$ on trouve

$g(r e^{i\theta}) = 1 + b_k r^k e^{ik\theta} + \dots + b_n r^n e^{in\theta} = 1 - |b_k| r^k + \dots + b_n r^n e^{ik\theta}$.

Ainsi $|g(r e^{i\theta})| \leq |1 - |b_k| r^k| + \dots + |b_n| r^n$. Pour $0 \leq r \leq |b_k|^{-1/k}$

ceci devient $|g(r e^{i\theta})| \leq 1 - r^k (|b_k| - |b_{k+1}| r - \dots - |b_n| r^{n-k})$.

Pour $r > 0$ assez petit le terme en parenthèse est positif.

On conclut que $|g(z)| < 1$, donc $|g(0)| = 1$ n'est pas minimal. \square

Le théorème de Gauss–d’Alembert (4/4)

Lemme (analyse d’un minimum local)

Soit $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ une fonction polynomiale de degré $n \geq 1$.

Si $|f(z_0)| > 0$ alors $|f(z_0)|$ n’est pas un minimum local :

il existe $z_1 \in \mathbb{C}$ arbitrairement proche de z_0 tel que $|f(z_1)| < |f(z_0)|$.

Démonstration. On définit $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ par $g(z) = f(z + z_0)/f(z_0)$.

Nous allons montrer que $|g(0)| = 1$ n’est pas un minimum local de $|g|$.

La fonction g est polynomiale de même degré n , donc

$g(z) = 1 + b_k z^k + \dots + b_n z^n$ où $b_k, \dots, b_n \in \mathbb{C}$ et $b_k, b_n \neq 0$.

Il existe $\theta \in \mathbb{R}$ tel que $b_k e^{ik\theta} = -|b_k|$. Pour $z = r e^{i\theta}$ on trouve

$g(r e^{i\theta}) = 1 + b_k r^k e^{ik\theta} + \dots + b_n r^n e^{in\theta} = 1 - |b_k| r^k + \dots + b_n r^n e^{ik\theta}$.

Ainsi $|g(r e^{i\theta})| \leq |1 - |b_k| r^k| + \dots + |b_n| r^n$. Pour $0 \leq r \leq |b_k|^{-1/k}$

ceci devient $|g(r e^{i\theta})| \leq 1 - r^k (|b_k| - |b_{k+1}| r - \dots - |b_n| r^{n-k})$.

Pour $r > 0$ assez petit le terme en parenthèse est positif.

On conclut que $|g(z)| < 1$, donc $|g(0)| = 1$ n’est pas minimal. \square

Ces deux lemmes prouvent le théorème de Gauss–d’Alembert :

il existe $z_0 \in \mathbb{C}$ tel que $|f(z_0)| = \min |f|$, puis $f(z_0) = 0$.

Un mariage heureux d'algèbre et d'analyse

Contexte historique : Depuis le temps de Gauss, de nombreuses (variantes de) preuves de ce théorème important ont été publiées.

Un mariage heureux d'algèbre et d'analyse

Contexte historique : Depuis le temps de Gauss, de nombreuses (variantes de) preuves de ce théorème important ont été publiées.

D'Alembert (1746) publia la première preuve, encore incomplète.

Gauss (1799) publia la première preuve acceptée comme rigoureuse.

Argand (1814) utilisa le principe du minimum comme présentée ici.

Cauchy (1820) compléta et popularisa la preuve d'Argand.

Un mariage heureux d'algèbre et d'analyse

Contexte historique : Depuis le temps de Gauss, de nombreuses (variantes de) preuves de ce théorème important ont été publiées.

D'Alembert (1746) publia la première preuve, encore incomplète.

Gauss (1799) publia la première preuve acceptée comme rigoureuse.

Argand (1814) utilisa le principe du minimum comme présentée ici.

Cauchy (1820) compléta et popularisa la preuve d'Argand.

Algèbre ou analyse ? En dehors de la France, le théorème de Gauss–d'Alembert s'appelle « théorème fondamental de l'algèbre », en anglais « fundamental theorem of algebra », ou en allemand « Fundamentalsatz der Algebra » d'après Gauss.

Un mariage heureux d'algèbre et d'analyse

Contexte historique : Depuis le temps de Gauss, de nombreuses (variantes de) preuves de ce théorème important ont été publiées.

D'Alembert (1746) publia la première preuve, encore incomplète.

Gauss (1799) publia la première preuve acceptée comme rigoureuse.

Argand (1814) utilisa le principe du minimum comme présentée ici.

Cauchy (1820) compléta et popularisa la preuve d'Argand.

Algèbre ou analyse ? En dehors de la France, le théorème de Gauss–d'Alembert s'appelle « théorème fondamental de l'algèbre », en anglais « fundamental theorem of algebra », ou en allemand « Fundamentalsatz der Algebra » d'après Gauss.

Il parle des polynômes, certes, mais c'est aussi un théorème d'analyse, car \mathbb{R} et \mathbb{C} sont des constructions d'analyse.

Un mariage heureux d'algèbre et d'analyse

Contexte historique : Depuis le temps de Gauss, de nombreuses (variantes de) preuves de ce théorème important ont été publiées.

D'Alembert (1746) publia la première preuve, encore incomplète.
Gauss (1799) publia la première preuve acceptée comme rigoureuse.
Argand (1814) utilisa le principe du minimum comme présentée ici.
Cauchy (1820) compléta et popularisa la preuve d'Argand.

Algèbre ou analyse ? En dehors de la France, le théorème de Gauss–d'Alembert s'appelle « théorème fondamental de l'algèbre », en anglais « fundamental theorem of algebra », ou en allemand « Fundamentalsatz der Algebra » d'après Gauss.

Il parle des polynômes, certes, mais c'est aussi un théorème d'analyse, car \mathbb{R} et \mathbb{C} sont des constructions d'analyse.

Nous souhaitons un algorithme constructif !

Nous savons maintenant que toutes les racines existent dans \mathbb{C} , mais la preuve ci-dessus ne les explicite pas : elle ne nous donne aucune indication comment les trouver / construire / approcher. Nous y reviendrons plus loin.

Résumé

1 Suites et séries numériques

- Nombres réels, suites réelles, convergence, critères
- Nombres complexes, suites complexes, convergence, critères
- Séries numériques, convergence, critères

2 Fonctions continues

- Définition et exemples
- Le théorème des valeurs intermédiaires
- Le théorème du maximum

3 Fonctions dérivables

- Définition et exemples
- Le théorème des accroissements finis
- Fonction dérivée et critère de monotonie

4 Étude de la fonction exponentielle

- Propriétés de la fonction exponentielle $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$
- Le logarithme $\ln: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$ et puissances réelles
- Fonctions trigonométriques et racines n -ièmes complexes

5 Le théorème de Gauss–d’Alembert