



**Licence 1 Mathématiques Informatique.**

## **ANALYSE 1 POUR INFORMATIENS**

**Christophe Poquet**

**Année universitaire 2023/2024**

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Nombres réels</b>	<b>3</b>
1.1	Ensembles de nombres . . . . .	3
1.1.1	Les entiers naturels . . . . .	3
1.1.2	Les entiers relatifs . . . . .	3
1.1.3	Les nombres rationnels . . . . .	3
1.1.4	Les nombres décimaux . . . . .	4
1.1.5	Les nombres réels . . . . .	4
1.2	Opérations et relation d'ordre dans l'ensemble des réels . . . . .	5
1.3	Valeur absolue . . . . .	6
1.4	Intervalles de $\mathbb{R}$ . . . . .	6
1.5	Majorant, minorant, borne inférieure, borne supérieure . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Fonctions réelles</b>	<b>9</b>
2.1	Fonctions et graphes . . . . .	9
2.2	Fonctions injectives, surjectives, bijectives . . . . .	10
2.2.1	Image, antécédent. . . . .	10
2.2.2	Surjectivité. . . . .	10
2.2.3	Injectivité. . . . .	11
2.2.4	Bijektivité. . . . .	11
2.3	Image directe, image réciproque. . . . .	12
2.4	Opérations sur les fonctions. . . . .	13
2.4.1	Somme, produit, quotient. . . . .	13
2.4.2	Composition. . . . .	14
2.5	Propriétés des fonctions et de leur graphe. . . . .	14
2.5.1	Fonction majorée, minorée, bornée. . . . .	14
2.5.2	Monotonie. . . . .	14
2.5.3	Parité et périodicité. . . . .	15
2.6	Limite en un point, continuité, dérivabilité. . . . .	15
2.6.1	Limite en un point. . . . .	16
2.6.2	Continuité. . . . .	16
2.6.3	Dérivabilité. . . . .	16
<b>3</b>	<b>Fonctions usuelles</b>	<b>17</b>
3.1	Fonctions polynomiales . . . . .	17
3.2	Fonction partie entière . . . . .	17
3.3	Fonctions trigonométriques . . . . .	18
3.4	Fonctions trigonométriques réciproques . . . . .	20
3.5	Fonctions exponentielle et logarithme . . . . .	22
3.6	Fonctions hyperboliques . . . . .	23
3.7	Fonctions puissance . . . . .	24
3.8	Croissance comparée . . . . .	25

<b>4</b>	<b>Suites réelles</b>	<b>26</b>
4.1	Définitions . . . . .	26
4.2	Suites classiques . . . . .	27
4.3	Convergence de suite . . . . .	28
4.4	Opérations sur les limites . . . . .	29
4.5	Limites de suites et inégalités . . . . .	31
4.6	Convergence et monotonie . . . . .	32
4.7	Suites extraites . . . . .	33
4.8	Limites infinies . . . . .	33
4.9	Comparaison de suites . . . . .	36
4.10	Suites de Cauchy . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Continuité des fonctions réelles</b>	<b>39</b>
5.1	Limite de fonction . . . . .	39
5.2	Continuité . . . . .	42
5.3	Théorème des valeurs intermédiaires et image continue d'un intervalle . . . . .	43
5.4	Limite, continuité et monotonie . . . . .	44

# Chapitre 1

## Nombres réels

### 1.1 Ensembles de nombres

#### 1.1.1 Les entiers naturels

L'ensemble  $\mathbb{N}$  défini par

$$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\},$$

est l'ensemble des entiers naturels. Si l'on enlève le 0 on définit  $\mathbb{N}^* = \{1, 2, 3, \dots\}$  l'ensemble des entiers naturels non nuls.

#### 1.1.2 Les entiers relatifs

En ajoutant les entiers négatifs on définit l'ensemble des entiers relatifs par

$$\mathbb{Z} = \{\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}.$$

De même, si l'on enlève le 0, on définit  $\mathbb{Z}^* = \{\dots, -3, -2, -1, 1, 2, 3, \dots\}$  l'ensemble des entiers relatifs non nuls.

#### Remarque 1.1.

1. On remarque que l'ensemble  $\mathbb{N}$  est **inclus** dans l'ensemble  $\mathbb{Z}$ , ce que l'on peut écrire de la manière suivante :

$$\mathbb{N} \subset \mathbb{Z},$$

où le symbole  $\subset$  se lit « est inclus dans ». En effet, tout élément de  $\mathbb{N}$  est également élément de  $\mathbb{Z}$ , ce que l'on peut écrire de la manière suivante :

$$\text{si } n \in \mathbb{N}, \quad \text{alors } n \in \mathbb{Z},$$

où le symbole  $\in$  se lit « appartient à ».

2. On voit immédiatement que l'inclusion réciproque est fautive, c'est-à-dire  $\mathbb{Z} \not\subset \mathbb{N}$ , puisque par exemple  $-1 \in \mathbb{Z}$  alors que  $-1 \notin \mathbb{N}$ .
3. Attention à ne pas confondre les symboles  $\subset$  et  $\in$  !

#### 1.1.3 Les nombres rationnels

On définit l'ensemble des nombres rationnels  $\mathbb{Q}$  comme l'ensemble des fractions d'entiers naturels :

$$\mathbb{Q} = \left\{ \frac{a}{b} : a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{Z}^* \right\}.$$

**Remarque 1.2.**

1. Puisque tout entier relatif  $n$  peut être écrit sous la forme

$$n = \frac{n}{1},$$

on a  $\mathbb{Z} \subset \mathbb{Q}$ .

2. Un nombre rationnel peut être représenté par différentes fractions, par exemple  $\frac{1}{2} = \frac{2}{4} = \frac{4}{8} = \dots$ . Plus précisément, pour  $a, a' \in \mathbb{Z}$  et  $b, b' \in \mathbb{Z}^*$ , on a

$$\frac{a}{b} = \frac{a'}{b'} \quad \text{si et seulement si} \quad ab' = a'b.$$

Attention, l'expression «  $P$  si et seulement si  $Q$  », que l'on peut abrégé en «  $P$  ssi  $Q$  » ou «  $P \Leftrightarrow Q$  » (voir le cours d'Algèbre 1), signifie deux choses : « si  $P$  est vraie alors  $Q$  est vraie » et « si  $Q$  est vraie alors  $P$  est vraie ».

**1.1.4 Les nombres décimaux**

On définit l'ensemble des nombres décimaux  $\mathbb{D}$  de la manière suivante :

$$\mathbb{D} = \left\{ \frac{a}{10^n} : a \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N} \right\}.$$

Il s'agit des nombres ayant une suite **finie** de chiffres à droite de la virgule.

**Remarque 1.3.**

1. Tous les éléments de  $\mathbb{D}$  peuvent être écrit sous forme de fraction, et donc  $\mathbb{D} \subset \mathbb{Q}$ .
2. L'inclusion réciproque est fautive, puisque certaines fractions ne peuvent être écrites qu'avec une infinité de chiffres après la virgule, comme par exemple

$$\frac{1}{3} = 0.3333333333333333333333333333 \dots$$

L'ensemble  $\mathbb{D}$  donne un rôle privilégié au nombre 10 (les dix doigts des mains). Du point de vue des mathématiciens, les ensembles  $\mathbb{Q}$  et  $\mathbb{R}$  sont plus importants.

**1.1.5 Les nombres réels**

L'ensemble  $\mathbb{R}$  des nombres réels est l'ensemble des nombres dont l'écriture décimale est composée de

- un signe  $+$  ou  $-$  (généralement omis lorsque c'est le  $+$ ),
- une suite finie de chiffres entre 0 et 9, ne commençant pas par 0 ou étant réduite à 0,
- une virgule,
- une suite infinie de chiffres entre 0 et 9.

**Exemples 1.4.** Par exemple 0, 4,  $-10.3$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\sqrt{2}$ ,  $\pi$  sont des nombres réels.

**Remarque 1.5.**

1. Attention avec cette définition un réel ne s'écrit pas de manière unique, par exemple  $1 = 1.0$ ,  $0 = 0.0 = -0 = -0.00$ ,  $1 = 0.9999999999 \dots$ .
2. On a l'inclusion  $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$ , mais l'inclusion réciproque est fautive, on ne peut par exemple pas écrire  $\sqrt{2}$  comme  $\frac{a}{b}$  avec  $a \in \mathbb{Z}$  et  $b \in \mathbb{Z}^*$  (voir le cours d'Algèbre 1).

## 1.2 Opérations et relation d'ordre dans l'ensemble des réels

Dans l'enfance on apprend à additionner, multiplier et comparer les entiers. Ceci s'étend aux nombres réels (résultat admis, fastidieux à démontrer).

**Proposition 1.6.** *On peut définir sur  $\mathbb{R}$  une addition  $+$  et une multiplication  $\cdot$  (ou  $\times$ ) qui prolongent l'addition et la multiplication de  $\mathbb{N}$  et ont les propriétés suivantes :*

1. **commutativité** : pour tous  $a, b$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$a + b = b + a \quad \text{et} \quad a \cdot b = b \cdot a,$$

2. **associativité** : pour tous  $a, b, c$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$a + (b + c) = (a + b) + c \quad \text{et} \quad a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c,$$

3. **distributivité** : pour tous  $a, b, c$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c,$$

4. **éléments neutres** : pour tout  $a \in \mathbb{R}$  on a

$$a + 0 = a \quad \text{et} \quad a \cdot 1 = a,$$

5. **élément absorbant** : pour tout  $a \in \mathbb{R}$  on a

$$a \cdot 0 = 0.$$

**Proposition 1.7.** *On peut définir sur  $\mathbb{R}$  une relation d'ordre  $\leq$  qui prolonge la relation d'ordre sur  $\mathbb{N}$  et qui vérifie les propriétés suivantes :*

1. **réflexivité** : pour tout  $a$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$a \leq a,$$

2. **antisymétrie** : pour tous  $a, b$  dans  $\mathbb{R}$ ,

$$\text{si } a \leq b \quad \text{et} \quad b \leq a, \quad \text{alors } a = b,$$

3. **transitivité** : pour tous  $a, b, c$  dans  $\mathbb{R}$ ,

$$\text{si } a \leq b \quad \text{et} \quad b \leq c, \quad \text{alors } a \leq c,$$

4. **ordre total** : pour tous  $a, b$  dans  $\mathbb{R}$ ,

$$a \leq b \quad \text{ou} \quad b \leq a,$$

5. **compatibilité avec l'addition** : pour tous  $a, b, c$  dans  $\mathbb{R}$ ,

$$\text{si } a \leq b \quad \text{alors } a + c \leq b + c,$$

6. **compatibilité avec la multiplication** : pour tous  $a, b, c$  dans  $\mathbb{R}$ ,

$$\text{si } a \leq b \quad \text{et} \quad c \geq 0, \quad \text{alors } a \cdot c \leq b \cdot c.$$

**Remarque 1.8.** *En mathématiques le « ou » est inclusif : «  $A$  ou  $B$  » signifie soit  $A$ , soit  $B$ , soit les deux.*

$a \leq b$  se lit «  $a$  inférieur ou égal à  $b$  ». On écrit de plus, pour  $a, b$  dans  $\mathbb{R}$

- $a \geq b$  (qui se lit «  $a$  supérieur ou égal à  $b$  ») si  $b \leq a$ ,
- $a < b$  (qui se lit «  $a$  strictement inférieur à  $b$  ») si  $a \leq b$  et  $a \neq b$ ,
- $a > b$  (qui se lit «  $a$  strictement supérieur à  $b$  ») si  $b < a$ .

On remarque que le contraire de  $a \leq b$  est  $a > b$ .

**Remarque 1.9.**

1. *On ne peut pas soustraire des inégalités : on a  $2 \leq 3$  et  $1 \leq 4$  mais  $2 - 1 = 1$  n'est pas inférieur ou égal à  $3 - 4 = -1$  !*
2. *La multiplication par un réel négatif change le sens de l'inégalité : si  $a, b, c$  sont des réels,*

$$\text{si } a \leq b \quad \text{et} \quad c \leq 0, \quad \text{alors } a \cdot c \geq b \cdot c.$$

### 1.3 Valeur absolue

**Définition 1.10.** Pour tout  $x \in \mathbb{R}$ , on définit la **valeur absolue** de  $x$ , notée  $|x|$ , de la manière suivante :

$$|x| = \begin{cases} x & \text{si } x \geq 0 \\ -x & \text{si } x < 0 \end{cases}.$$

**Proposition 1.11.** La valeur absolue vérifie les propriétés suivantes :

1. pour tout  $a$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$|a| = |-a| = \sqrt{a^2} = \max(-a, a),$$

2. pour tout  $a$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$|a| = 0 \quad \text{si et seulement si} \quad a = 0,$$

3. pour tous  $a, b$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$|a \cdot b| = |a| \cdot |b|,$$

4. **inégalité triangulaire** : pour tous  $a, b$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$|a + b| \leq |a| + |b|,$$

5. **inégalité triangulaire inverse** : pour tous  $a, b$  dans  $\mathbb{R}$  on a

$$|a - b| \geq ||a| - |b||.$$

*Démonstration.* Les trois premiers points sont des conséquences directes de la définition de la valeur absolue.

Démontrons le point 4. Considérons deux réels  $a$  et  $b$ . D'après 1) on a  $|a + b| = \max(a + b, -a - b)$ . Mais comme  $a \leq \max(-a, a) = |a|$  et  $b \leq |b|$  on a  $a + b \leq |a| + |b|$ . De même, comme  $-a \leq |a|$  et  $-b \leq |b|$  on a  $-a - b \leq |a| + |b|$ . Ainsi

$$|a + b| = \max(a + b, -a - b) \leq |a| + |b|.$$

Finalement démontrons le point 5). Considérons à nouveaux deux réels  $a$  et  $b$ . D'une part d'après 4) on a  $|a| = |a - b + b| \leq |a - b| + |b|$  et donc  $|a - b| \geq |a| - |b|$ . D'autre part on a  $|b| = |b - a + a| \leq |b - a| + |a|$  et donc  $|a - b| \geq |b| - |a| = -(|a| - |b|)$ . On en déduit bien

$$|a - b| \geq \max(|a| - |b|, -(|a| - |b|)) = ||a| - |b||.$$

□

### 1.4 Intervalles de $\mathbb{R}$

Intuitivement, un intervalle de  $\mathbb{R}$  est une partie de  $\mathbb{R}$  « sans trou ».

**Définition 1.12** (Intervalles de  $\mathbb{R}$ ). Soit  $I$  un sous-ensemble de  $\mathbb{R}$ . On dit que  $I$  est un intervalle de  $\mathbb{R}$  si, pour tous  $x, y$  éléments de  $I$ , tout réel  $z$  vérifiant  $x \leq z \leq y$  est également un élément de  $I$ .

**Proposition 1.13.** Les intervalles  $I$  de  $\mathbb{R}$  ont l'une des formes suivantes :

1.  $\mathbb{R}$ ,
2.  $\emptyset$ , l'ensemble vide, qui ne contient aucun élément,
3.  $\{a\}$ , un singleton, avec  $a \in \mathbb{R}$ ,
4.  $[a, b] = \{x \in \mathbb{R} : a \leq x \leq b\}$ , un segment, avec  $a, b$  réels vérifiant  $a < b$ ,
5.  $[a, b[ = \{x \in \mathbb{R} : a \leq x < b\}$ ,  $]a, b] = \{x \in \mathbb{R} : a < x \leq b\}$  ou  $]a, b[ = \{x \in \mathbb{R} : a < x < b\}$ , avec  $a, b$  réels vérifiant  $a < b$ ,
6.  $[a, +\infty[ = \{x \in \mathbb{R} : x \geq a\}$ ,  $]a, +\infty[ = \{x \in \mathbb{R} : x > a\}$ ,  $] - \infty, a] = \{x \in \mathbb{R} : x \leq a\}$  ou  $] - \infty, a[ = \{x \in \mathbb{R} : x < a\}$ , avec  $a$  réel.

**Remarque 1.14.** Dans les points 4., 5. et 6. de la proposition précédente les réels  $a$  et  $b$  sont appelés les **bords** de l'intervalle.

## 1.5 Majorant, minorant, borne inférieure, borne supérieure

**Définition 1.15.** Soit  $A$  une partie de  $\mathbb{R}$  et  $a$  un élément de  $A$ .

1. On dit que  $a$  est le **plus grand élément** de  $A$  (ou **maximum** de  $A$ ) si et seulement si tout  $b \in A$  vérifie  $b \leq a$ ,
2. On dit que  $a$  est le **plus petit élément** de  $A$  (ou **minimum** de  $A$ ) si et seulement si tout  $b \in A$  vérifie  $b \geq a$ .

S'il existe, le plus grand élément de  $A$  est unique, on le note  $\max(A)$ . De même, s'il existe, le plus petit élément de  $A$  est unique, on le note  $\min(A)$ .

**Exemples 1.16.**

1. Une partie finie  $A$  de  $\mathbb{R}$  (c'est-à-dire un sous-ensemble de  $\mathbb{R}$  formé d'un nombre fini d'éléments) a toujours un plus grand élément.
2. 1 est le plus grand élément de  $[0, 1]$ .
3.  $\mathbb{N}$  et  $[0, 1[$  n'admettent pas de plus grand élément.

**Définition 1.17.** Soit  $A$  une partie de  $\mathbb{R}$  et  $m$  un réel.

1. On dit que  $m$  est un **majorant** de  $A$  si tout élément  $a$  de  $A$  vérifie  $m \geq a$ .
2. On dit que  $m$  est un **minorant** de  $A$  si tout élément  $a$  de  $A$  vérifie  $m \leq a$ .

**Exemples 1.18.**

1. 1 et 4 sont des majorants de  $[0, 1]$  et  $[0, 1[$ ,
2.  $\mathbb{N}$  n'a pas de majorant.

**Définition 1.19.** On dit qu'une partie  $A$  de  $\mathbb{R}$  est

1. **majorée** si elle admet un majorant,
2. **minorée** si elle admet un minorant,
3. **bornée** si elle admet un majorant et un minorant.

**Exemples 1.20.**

1.  $[0, 1]$  et  $[0, 1[$  sont bornés,
2.  $[0, +\infty[$  est minoré mais n'est pas borné.

On admet le théorème suivant.

**Théorème 1.21** (Théorème de la borne supérieure). Toute partie  $A$  de  $\mathbb{R}$  non-vidée et majorée admet un plus petit majorant, appelé la **borne supérieure** de  $A$  et noté  $\sup(A)$ .

**Exemple 1.22.** On a  $\sup([0, 1]) = \sup([0, 1]) = 1$ .

**Remarque 1.23.** Ce théorème n'est pas vrai dans  $\mathbb{Q}$  : l'ensemble  $\{x \in \mathbb{Q} : x < \sqrt{2}\}$  est majoré mais n'admet pas de plus petit majorant dans  $\mathbb{Q}$ .

De même, si  $A$  est une partie de  $\mathbb{R}$  non vide et minorée, alors elle admet un plus grand minorant, appelée **borne inférieure** de  $A$  et noté  $\inf(A)$ .

Par convention, si  $A$  n'est pas majorée on note  $\sup(A) = +\infty$  et si  $A$  n'est pas minorée on note  $\inf(A) = -\infty$ .

La proposition suivante permet de caractériser la borne supérieure dans  $\mathbb{R}$ .

**Proposition 1.24** (Caractérisation de la borne supérieure). Soit  $A$  une partie non vide et majorée de  $\mathbb{R}$  et  $M$  un majorant de  $A$ . Alors  $M = \sup(A)$  si et seulement si pour tout  $\varepsilon > 0$  l'ensemble  $A \cap ]M - \varepsilon, M]$ <sup>1</sup> est non vide.

1. Pour deux ensembles  $A$  et  $B$ ,  $A \cap B$  est l'ensemble formé des éléments qui sont à la fois dans  $A$  et  $B$ .



*Démonstration.* Supposons tout d'abord que  $M = \sup(A)$  et considérons  $\varepsilon > 0$ . Alors, comme  $M - \varepsilon < M$ ,  $M - \varepsilon$  n'est pas un majorant de  $A$ , puisque  $M$  est le plus petit des majorants. Il existe donc un élément  $a$  de  $A$  tel que  $a > M - \varepsilon$ . Puisque  $M$  est un majorant on a  $a \leq M$ , et donc  $a \in ]M - \varepsilon, M] \cap A$ . L'ensemble  $]M - \varepsilon, M] \cap A$  est donc non vide.

Supposons maintenant que pour tout  $\varepsilon > 0$  l'ensemble  $A \cap ]M - \varepsilon, M]$  est non vide. On veut montrer que si  $m < M$  alors  $m$  n'est pas un majorant de  $A$ , puisque dans ce cas  $M$  est bien le plus petit majorant de  $A$ . Fixons  $m < M$  et posons  $\varepsilon = M - m > 0$ . Par hypothèse l'ensemble  $A \cap ]M - \varepsilon, M] = A \cap ]m, M]$  est non vide, et il existe donc un élément  $a$  de  $A$  qui vérifie  $m < a$ .  $m$  n'est donc pas un majorant de  $A$ .  $\square$

# Chapitre 2

## Fonctions réelles

### 2.1 Fonctions et graphes

**Définition 2.1.** Une **application**  $f$  d'un ensemble de départ  $E$  dans un espace d'arrivée  $F$  est un procédé qui associe à chaque élément  $x$  de  $E$  un unique élément  $f(x)$  de  $F$ . Une telle application est notée

$$f : E \rightarrow F \\ x \mapsto f(x) .$$

On appelle parfois  $E$  le domaine de  $f$  et  $F$  le codomaine de  $f$ .

**Définition 2.2.** On appelle **fonction réelle d'une variable réelle** toute application  $f$  ayant pour ensemble de départ une partie  $A$  de  $\mathbb{R}$ , et ensemble d'arrivée une partie  $B$  de  $\mathbb{R}$  :

$$f : A \rightarrow B \\ x \mapsto f(x) .$$

On appelle l'ensemble  $A$  le **domaine de définition** de  $f$ .

**Remarque 2.3.** Pour simplifier, dans la suite de ce cours, on parlera simplement de fonction pour désigner une fonction réelle d'une variable réelle (les fonctions de plusieurs variables réelles seront par exemple abordées dans des cours ultérieurs).

**Exemples 2.4.** On peut considérer les fonctions suivantes :

$$f_1 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \quad f_2 : \mathbb{R}^* \rightarrow \mathbb{R} \quad |\cdot| : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \\ x \mapsto x \quad x \mapsto \frac{1}{x} \quad x \mapsto \begin{cases} x & \text{si } x \geq 0 \\ -x & \text{si } x < 0 \end{cases} .$$

**Définition 2.5.** Si  $E$  et  $F$  sont deux ensembles, on note  $E \times F$  le **produit cartésien** de  $E$  et  $F$ , défini par

$$E \times F = \{(x, y) : x \in E, y \in F\}.$$

**Remarque 2.6.** Pour un ensemble  $E$  on écrit  $E^2$  plutôt que  $E \times E$ .

**Définition 2.7.** Si  $f : E \rightarrow F$  est une fonction on appelle **graphe** de  $f$  l'ensemble

$$\text{Gr}(f) = \{(x, f(x)) : x \in E\} \subset E \times F.$$

**Remarque 2.8.**

1. Le graphe d'une fonction réelle est une partie de  $\mathbb{R}^2$ , on peut le représenter par un dessin (voir la figure 2.1).
2. Une partie de  $A$  de  $\mathbb{R}^2$  est le graphe d'une fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  si et seulement si toute droite verticale intersecte  $A$  en un unique point.

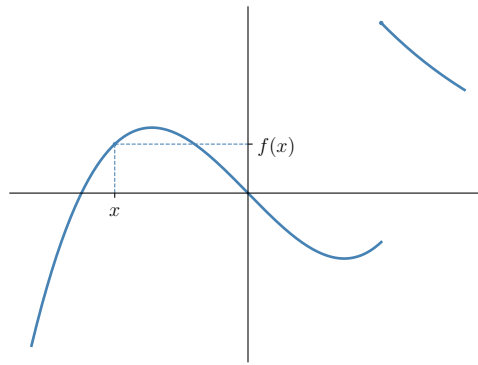


FIGURE 2.1 – Exemple de tracé du graphe d’une fonction réelle.

## 2.2 Fonctions injectives, surjectives, bijectives

### 2.2.1 Image, antécédent.

**Définition 2.9.** Soit  $f : E \rightarrow F$  une fonction. Si  $x \in E$  et  $y \in F$  vérifient  $y = f(x)$ , on dit que  $y$  est l’image de  $x$  par  $f$ , et que  $x$  est **un antécédent** de  $y$  par  $f$ .

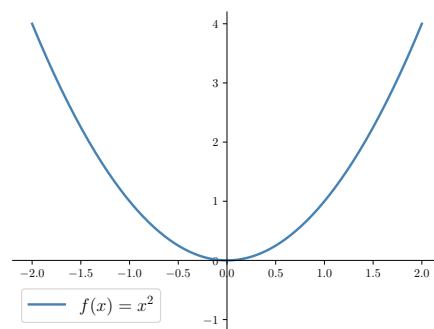
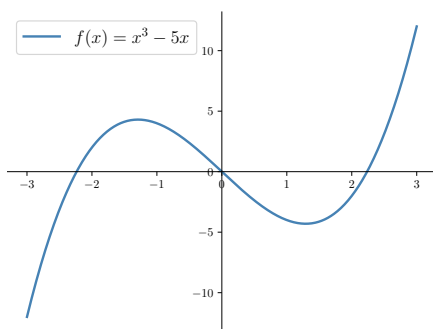
**Remarque 2.10.** Si  $f : E \rightarrow F$ , alors chaque  $x \in E$  admet une et une seule image par  $f$ , alors que  $y \in F$  peut avoir un, plusieurs ou aucun antécédent par  $f$ .

**Exemple 2.11.** Si  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est définie par  $f(x) = x^2$  pour tout  $x \in \mathbb{R}$ ,  $-1$  a pour image  $1$ ,  $2$  a pour antécédents  $-\sqrt{2}$  et  $\sqrt{2}$ , alors que  $-3$  n’a pas d’antécédent par  $f$ .

### 2.2.2 Surjectivité.

**Définition 2.12.** Une fonction  $f : E \rightarrow F$  est dite **surjective** (ou une surjection) si tout élément de  $F$  admet au moins un antécédent, autrement dit<sup>1</sup> :

$$f \text{ surjective} \Leftrightarrow \left( \forall y \in F, \exists x \in E \text{ tel que } y = f(x) \right).$$



(a) La fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = x^3 - 5x$  est surjective.

(b) La fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = x^2$  n’est pas surjective.

FIGURE 2.2 – Exemples de fonctions surjective/non surjective.

**Remarque 2.13.** Lorsque  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f$  est surjective si et seulement si toute droite horizontale intersecte  $\text{Gr}(f)$ .

1. Le symbole  $\forall$  signifie se lit « pour tout », le symbole  $\exists$  se lit « il existe ».

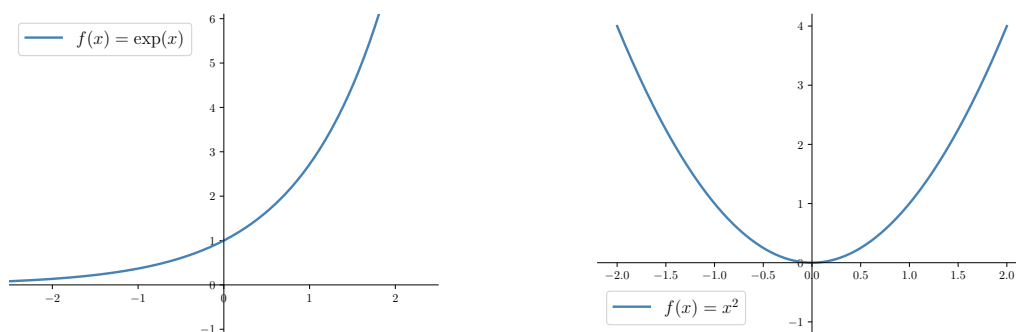
### 2.2.3 Injectivité.

**Définition 2.14.** Une fonction  $f : E \rightarrow F$  est dite **injective** (ou une *injection*) si tout élément de  $F$  admet au plus un antécédent, autrement dit<sup>2</sup> :

$$f \text{ injective} \Leftrightarrow (\forall x, x' \in E, f(x) = f(x') \Rightarrow x = x').$$

**Remarque 2.15.** De manière équivalente, puisque  $P \Rightarrow Q$  équivaut à  $(\text{non} Q) \Rightarrow (\text{non} P)$  (voir le cours d'algèbre 1), on a

$$f \text{ injective} \Leftrightarrow (\forall x, x' \in E, x \neq x' \Rightarrow f(x) \neq f(x')).$$



(a) La fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = \exp(x)$  est injective.

(b) La fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = x^2$  n'est pas injective.

FIGURE 2.3 – Exemples de fonctions injective/non injective.

**Remarque 2.16.** Lorsque  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f$  est injective si et seulement si toute droite horizontale intersecte  $\text{Gr}(f)$  au plus une fois.

### 2.2.4 Bijektivité.

**Définition 2.17.** Une fonction  $f : E \rightarrow F$  est dite **bijective** (ou une *bijection*) si tout élément de  $F$  admet un unique antécédent, autrement dit<sup>3</sup> :

$$f \text{ bijective} \Leftrightarrow (\forall y \in F, \exists! x \in E \text{ tel que } y = f(x)).$$

**Remarque 2.18.** Lorsque  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f$  est bijective si et seulement si toute droite horizontale intersecte  $\text{Gr}(f)$  une et une seule fois.

**Définition 2.19.** Supposons la fonction  $f : E \rightarrow F$  bijective. En associant à tout élément  $y \in F$  son unique antécédent par  $f$  on définit une fonction de  $F$  dans  $E$ . Cette fonction est appelée fonction réciproque de la fonction  $f$ , et est notée  $f^{-1}$ . Elle est caractérisée par la relation suivante :

$$\forall x \in E, \forall y \in F, y = f(x) \Leftrightarrow x = f^{-1}(y).$$

**Remarque 2.20.** Si  $f : E \rightarrow F$  est bijective de bijection réciproque  $f^{-1}$ , alors  $f^{-1} : F \rightarrow E$  est elle-même bijective de bijection réciproque  $(f^{-1})^{-1} = f$ . On a de plus les formules

$$\forall x \in E, \forall y \in F, f^{-1}(f(x)) = x \text{ et } f(f^{-1}(y)) = y.$$

2. Le symbole  $\Rightarrow$  est le symbole de l'implication :  $P \Rightarrow Q$  signifie « si  $P$  est vraie, alors  $Q$  est vraie ».

3. Le symbole  $\exists!$  se lit « il existe un unique ».

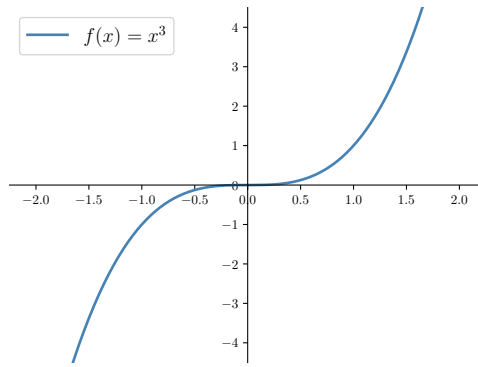


FIGURE 2.4 – La fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = x^3$  est bijective.

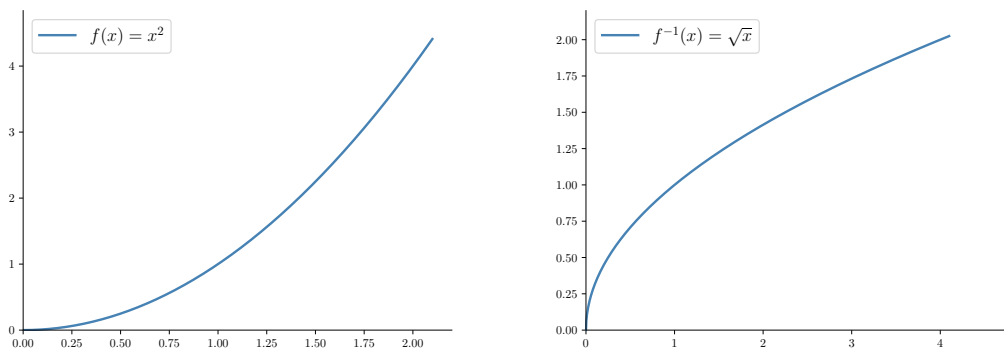


FIGURE 2.5 – La fonction  $f : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$  définie pour tout  $x \in \mathbb{R}_+$  par  $f(x) = x^2$  a pour fonction réciproque  $f^{-1} : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$  définie pour tout  $x \in \mathbb{R}_+$  par  $f^{-1}(x) = \sqrt{x}$ .

### 2.3 Image directe, image réciproque.

**Définition 2.21.** Si  $f : E \rightarrow F$  est une fonction et  $A$  est une partie de  $E$ , l’image directe de  $A$  par  $f$ , notée  $f(A)$ , est la partie de  $F$  définie par

$$f(A) = \{f(x) : x \in A\}.$$

En particulier, pour  $A = E$ , on appelle **image de  $f$**  l’ensemble  $\text{Im}(f) = f(E)$ .

**Exemple 2.22.** Si  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = x^2$ , alors  $f([0, 1]) = [0, 1]$ ,  $f([-2, 1]) = [0, 4]$ ,  $\text{Im}(f) = \mathbb{R}_+$ .

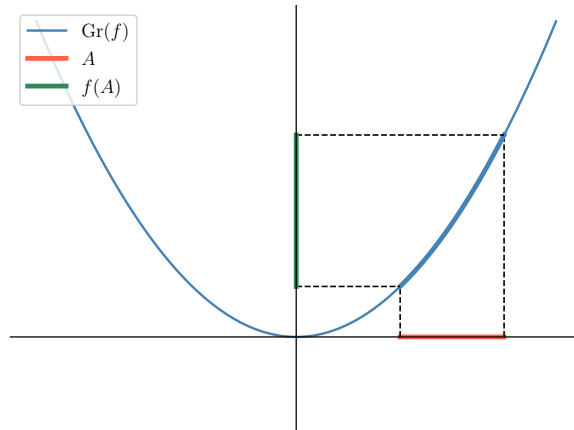
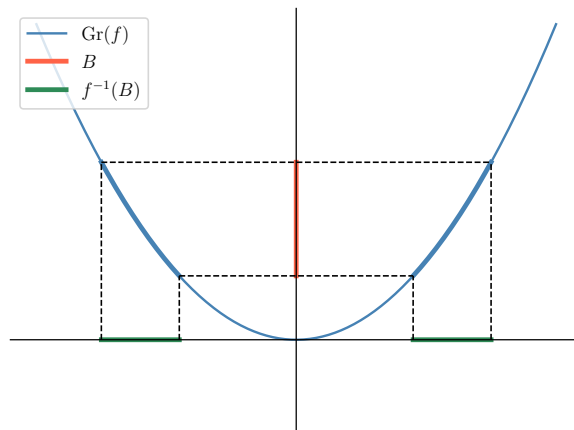
**Définition 2.23.** Si  $f : E \rightarrow F$  est une fonction et  $B$  est une partie de  $F$ , l’image réciproque de  $B$  par  $f$ , notée  $f^{-1}(B)$ , est la partie de  $E$  définie par

$$f^{-1}(B) = \{x \in E : f(x) \in B\}.$$

**Remarque 2.24.**

1. Attention, cette définition ne suppose pas que  $f$  soit bijective !
2. Si  $f$  est bijective,  $f^{-1}(B)$  est l’image directe de  $B$  par  $f^{-1}$ .

**Exemples 2.25.** Si  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = x^2$ , alors  $f^{-1}([0, 1]) = [-1, 1]$ ,  $f^{-1}([-2, 4]) = [-2, 2]$ .

FIGURE 2.6 – Image directe d'une partie  $A$  de  $\mathbb{R}$  par une fonction réelle.FIGURE 2.7 – Image réciproque d'une partie  $B$  de  $\mathbb{R}$  par une fonction réelle.

## 2.4 Opérations sur les fonctions.

### 2.4.1 Somme, produit, quotient.

Soient  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  et  $g : I \rightarrow \mathbb{R}$  deux fonctions ayant le même ensemble de départ. On définit

1. leur **somme** :

$$\begin{aligned} f + g : I &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto f(x) + g(x) \end{aligned} \text{ ,}$$

2. leur **produit** :

$$\begin{aligned} f \cdot g : I &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto f(x) \cdot g(x) \end{aligned} \text{ ,}$$

3. et, si  $g$  ne s'annule pas sur  $I$ , leur **quotient** :

$$\begin{aligned} \frac{f}{g} : I &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto \frac{f(x)}{g(x)} \end{aligned} \text{ .}$$

## 2.4.2 Composition.

**Définition 2.26.** Si  $E, F, G$  sont des parties de  $\mathbb{R}$  et  $f : E \rightarrow F$  et  $g : F \rightarrow G$  des fonctions, on définit la **composition** de  $f$  et  $g$ , notée  $g \circ f$ , par<sup>4</sup>

$$g \circ f : E \rightarrow G \\ x \mapsto g(f(x)) .$$

**Exemple 2.27.** Si  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  et  $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  sont définies pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = \sin(x)$  et  $g(x) = x + 2$ , alors  $g \circ f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  et  $f \circ g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , avec pour tout  $x \in \mathbb{R}$  :

$$g \circ f(x) = \sin(x) + 2 \quad \text{et} \quad f \circ g(x) = \sin(x + 2).$$

**Remarque 2.28.**

1. Pour pouvoir définir  $g \circ f$  il faut que l'ensemble d'arrivée de  $f$  soit inclus dans l'ensemble de départ de  $g$ .
2. Si  $f : E \rightarrow F$  est une bijection, de bijection réciproque  $f^{-1}$ , alors  $f^{-1} \circ f = \text{id}_E$  et  $f \circ f^{-1} = \text{id}_F$ , où si  $A$  est une partie de  $\mathbb{R}$   $\text{id}_A : A \rightarrow A$  est la fonction identité de l'ensemble  $A$ , définie pour tout  $x \in A$  par  $\text{id}_A(x) = x$ .

## 2.5 Propriétés des fonctions et de leur graphe.

### 2.5.1 Fonction majorée, minorée, bornée.

**Définition 2.29.** Soit  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction.

1. On dit que  $f$  est **majorée** si  $f(E)$  est majoré, c'est-à-dire

$$f \text{ majorée} \Leftrightarrow \exists M \in \mathbb{R}, \forall x \in E, f(x) \leq M.$$

2. On dit que  $f$  est **minorée** si  $f(E)$  est minoré, c'est-à-dire

$$f \text{ minorée} \Leftrightarrow \exists m \in \mathbb{R}, \forall x \in E, f(x) \geq m.$$

3. On dit que  $f$  est **bornée** si elle est majorée et minorée, c'est-à-dire

$$f \text{ bornée} \Leftrightarrow \exists m \in \mathbb{R}, \exists M \in \mathbb{R}, \forall x \in E, m \leq f(x) \leq M.$$

**Remarque 2.30.** Une fonction  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  est majorée si et seulement si son graphe se situe au-dessous d'une droite horizontale, et est minorée si et seulement si son graphe se situe au-dessus d'une droite horizontale.

### 2.5.2 Monotonie.

**Définition 2.31.** Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction.

1. On dit que  $f$  est **croissante** sur  $I$  si

$$\forall x \in I, \forall y \in I, x \leq y \Rightarrow f(x) \leq f(y).$$

2. On dit que  $f$  est **décroissante** sur  $I$  si

$$\forall x \in I, \forall y \in I, x \leq y \Rightarrow f(x) \geq f(y).$$

3. On dit que  $f$  est **strictement croissante** sur  $I$  si

$$\forall x \in I, \forall y \in I, x < y \Rightarrow f(x) < f(y).$$

---

4.  $g \circ f$  se lit «  $g$  rond  $f$  »

4. On dit que  $f$  est **strictement décroissante** sur  $I$  si

$$\forall x \in I, \forall y \in I, x < y \Rightarrow f(x) > f(y).$$

5. On dit que  $f$  est **monotone** sur  $I$  si elle est croissante sur  $I$  ou décroissante sur  $I$ .

6. On dit que  $f$  est **strictement monotone** sur  $I$  si elle est strictement croissante sur  $I$  ou strictement décroissante sur  $I$ .

**Remarque 2.32.** Si  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  est une fonction, on a les équivalences suivantes :

1.  $f$  est croissante si et seulement si toute droite passant par deux points de  $\text{Gr}(f)$  est de pente positive.
2.  $f$  est décroissante si et seulement si toute droite passant par deux points de  $\text{Gr}(f)$  est de pente négative.
3.  $f$  est strictement croissante si et seulement si toute droite passant par deux points de  $\text{Gr}(f)$  est de pente strictement positive.
4.  $f$  est strictement décroissante si et seulement si toute droite passant par deux points de  $\text{Gr}(f)$  est de pente strictement négative.

### 2.5.3 Parité et périodicité.

**Proposition 2.33.** Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction.

1. Si l'on définit la fonction  $f_1 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f_1(x) = -f(x)$ , alors le graphe de  $f_1$  est obtenu à partir de celui de  $f$  par symétrie axiale par rapport à l'axe horizontale  $(Ox)$ .
2. Si l'on définit la fonction  $f_2 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f_2(x) = f(-x)$ , alors le graphe de  $f_2$  est obtenu à partir de celui de  $f$  par symétrie axiale par rapport à l'axe verticale  $(Oy)$ .
3. Si l'on définit la fonction  $f_3 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f_3(x) = -f(-x)$ , alors le graphe de  $f_3$  est obtenu à partir de celui de  $f$  par symétrie centrale par rapport à l'origine  $O$ .

**Définition 2.34.** Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  symétrique par rapport à  $O$  (c'est-à-dire tel que  $x \in I$  si et seulement si  $-x \in I$ ), et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction.

1. On dit que  $f$  est **paire** si pour tout  $x \in I$  on a  $f(-x) = f(x)$ .
2. On dit que  $f$  est **impaire** si pour tout  $x \in I$  on a  $f(-x) = -f(x)$ .

**Corollaire 2.35.** Si  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  symétrique par rapport à  $O$  et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  est une fonction, alors

1.  $f$  est paire si et seulement si le graphe de  $f$  est symétrique par rapport à l'axe verticale  $(Oy)$ ,
2.  $f$  est impaire si et seulement si le graphe de  $f$  est symétrique par rapport à l'origine  $O$ .

**Définition 2.36.** Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction et  $T$  un réel strictement positif. On dit que  $f$  est **périodique** de période  $T$  si

$$\forall x \in \mathbb{R}, f(x + T) = f(x).$$

**Proposition 2.37.** Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction et  $T$  un réel strictement positif.  $f$  est périodique de période  $T$  si et seulement si le graphe de  $f$  est invariant par translation de vecteur  $T\vec{i}$ , où  $\vec{i}$  est un vecteur unitaire engendrant l'axe horizontale  $(Ox)$ .

## 2.6 Limite en un point, continuité, dérivabilité.

Les notions de limite et continuité de fonctions seront abordées plus en détails dans le chapitre 5, celle de dérivabilité sera abordée plus en détails dans le cours d'Analyse 2.



### 2.6.1 Limite en un point.

**Définition 2.38.** Soient  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  ou une union d'intervalles de  $\mathbb{R}^5$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction,  $x_0 \in \mathbb{R}$  un élément de  $I$  ou d'un bord de  $I$  et  $\ell \in \mathbb{R}$ . On dit que  $f$  admet une limite  $\ell$  au point  $x_0$ , et on note  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$ , si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, \forall x \in I, \quad |x - x_0| \leq \delta \Rightarrow |f(x) - \ell| \leq \varepsilon.$$

**Exemple 2.39.** Si  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = 1 + x^2$ ,  $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = 1$ .

### 2.6.2 Continuité.

**Définition 2.40.** Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction et  $x_0 \in I$ .

1. Pour  $x_0 \in I$ , on dit que  $f$  est **continue** en  $x_0$  si  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$ .
2. On dit que  $f$  est continue sur  $I$  si elle est continue en tout point de  $I$ .

**Exemple 2.41.** Si  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $f(x) = x^2$ ,  $f$  est continue sur  $\mathbb{R}$ .

### 2.6.3 Dérivabilité.

**Définition 2.42.** Soient  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction et  $x_0 \in I$ . On dit que  $f$  est **dérivable** au point  $x_0$  si la fonction taux d'accroissement  $x \mapsto \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$  définie sur  $I \setminus \{x_0\}$  admet une limite au point  $x_0$ . Cette limite est appelée **dérivée de  $f$  au point  $x_0$**  et est notée  $f'(x_0)$ .

**Remarque 2.43.** Si une fonction  $f$  est dérivable en  $x_0$ , alors  $f'(x_0)$  est la pente de la droite tangente à  $\text{Gr}(f)$  au point  $(x_0, f(x_0))$ .

Les résultats suivants seront démontrés dans le cours d'Analyse 2.

**Proposition 2.44.** Soient  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction dérivable en tout point de  $I$ .

1.  $f$  est croissante sur  $I$  si et seulement si  $f'(x) \geq 0$  pour tout  $x \in I$ .
2.  $f$  est décroissante sur  $I$  si et seulement si  $f'(x) \leq 0$  pour tout  $x \in I$ .
3. Si  $f'(x) > 0$  pour tout  $x \in I$ , alors  $f$  est strictement croissante sur  $I$ .
4. Si  $f'(x) < 0$  pour tout  $x \in I$ , alors  $f$  est strictement décroissante sur  $I$ .

**Proposition 2.45.** Soient  $I$  est un intervalle de  $\mathbb{R}$  et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  et  $g : I \rightarrow \mathbb{R}$  deux fonctions dérivables en  $x \in I$ .

1.  $f + g$  est dérivable en  $x$  et

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

2.  $fg$  est dérivable en  $x$  et

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

3. Si  $g$  ne s'annule pas en  $x$ ,  $\frac{f}{g}$  est dérivable en  $x$  et

$$\left(\frac{f}{g}\right)'(x) = \frac{f'(x)g(x) - f(x)g'(x)}{(g(x))^2}.$$

**Proposition 2.46.** Soient  $I, J$  des intervalles de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow J$ ,  $g : J \rightarrow \mathbb{R}$  des fonctions et  $x \in I$  tel que  $f$  est dérivable en  $x$  et  $g$  est dérivable en  $f(x)$ . Alors  $g \circ f$  est dérivable en  $x$  et

$$(g \circ f)'(x) = f'(x)g'(f(x)).$$

---

5. Pour deux ensembles  $A$  et  $B$ , l'union de  $A$  et  $B$ , notée  $A \cup B$ , est l'ensemble des éléments qui sont dans  $A$  ou dans  $B$ .

# Chapitre 3

## Fonctions usuelles

### 3.1 Fonctions polynomiales

Soient  $n \in \mathbb{N}$  et  $a_0, \dots, a_n$  des réels avec  $a_n \neq 0$ . La fonction

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \end{aligned}$$

est une **fonction polynomiale de degré  $n$** . Cette fonction est dérivable sur  $\mathbb{R}$ , de dérivée satisfaisant, pour tout  $x \in \mathbb{R}$ ,

$$f'(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 \dots + na_nx^{n-1}.$$

**Cas particuliers :**

1. lorsque  $n = 0$  on obtient les **fonctions constantes** (pour  $a \in \mathbb{R}$ ) :

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto a \end{aligned}$$

Le graphe de  $f$  défini ainsi est une droite horizontale.

2. lorsque  $n = 1$  on obtient les **fonction affines** (pour  $a, b \in \mathbb{R}$  avec  $a \neq 0$ ) :

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto ax + b \end{aligned}$$

Le graphe de  $f$  défini ainsi est une droite, et  $f$  est strictement croissante sur  $\mathbb{R}$  si et seulement si  $a > 0$ .

3. lorsque  $n = 2$  on obtient les **fonctions trinôme** (pour  $a, b, c \in \mathbb{R}$ ) :

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto ax^2 + bx + c \end{aligned}$$

Le graphe de  $f$  défini ainsi est une parabole.

### 3.2 Fonction partie entière

Pour tout  $x \in \mathbb{R}$  il existe un unique entier, noté  $E(x)$  et appelé **partie entière de  $x$** , vérifiant

$$E(x) \leq x < E(x) + 1.$$

$E(x)$  est le plus grand entier inférieur ou égal à  $x$ ,  $E(x) + 1$  est le plus petit entier strictement supérieur à  $x$ .

**Exemples 3.1.** On a  $E(1) = 1$ ,  $E(\pi) = 3$ ,  $E(-\pi) = -4$ .

On définit la **fonction partie entière** comme suit :

$$\begin{aligned} E : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto E(x) \end{aligned}$$

$E$  est croissante sur  $\mathbb{R}$  mais pas strictement, est discontinue en tout point de  $\mathbb{Z}$ , et dérivable de dérivée nulle sur  $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Z}$ .

**Remarque 3.2.** La fonction

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto E(x) - x \end{aligned}$$

est périodique de période 1 sur  $\mathbb{R}$ .

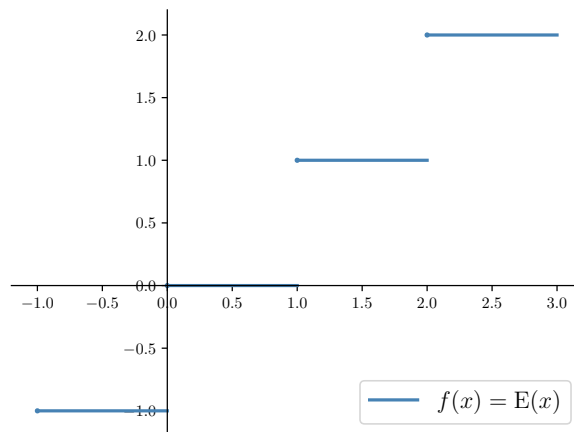


FIGURE 3.1 – Graphe de la fonction partie entière.

### 3.3 Fonctions trigonométriques

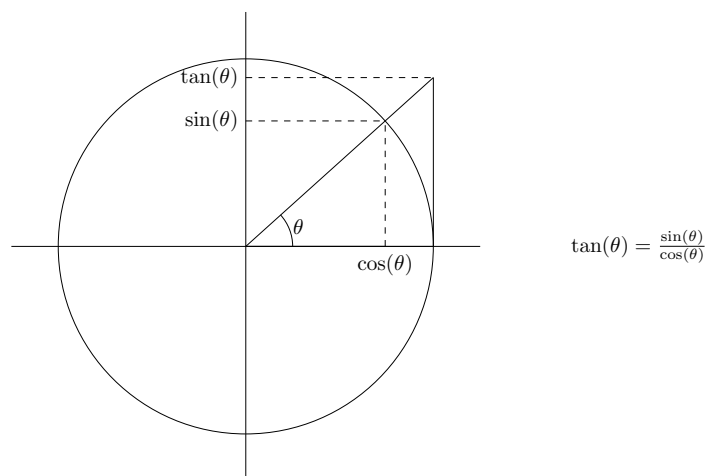


FIGURE 3.2 – Définition géométrique des fonction cos, sin et tan à l'aide d'un cercle de rayon 1.

**Proposition 3.3.** *Les fonctions cos, sin et tan ont les propriétés suivantes.*

	cos	sin	tan
<i>Domaine de définition :</i>	$\mathbb{R}$	$\mathbb{R}$	$\mathbb{R} \setminus \{(2k + 1)\frac{\pi}{2} : k \in \mathbb{Z}\}$
<i>Parité :</i>	<i>paire</i>	<i>impaire</i>	<i>impaire</i>
<i>Période :</i>	$2\pi$	$2\pi$	$\pi$
<i>Dérivée :</i>	sin	$-\cos$	$1 + \tan^2 = \frac{1}{\cos^2}$

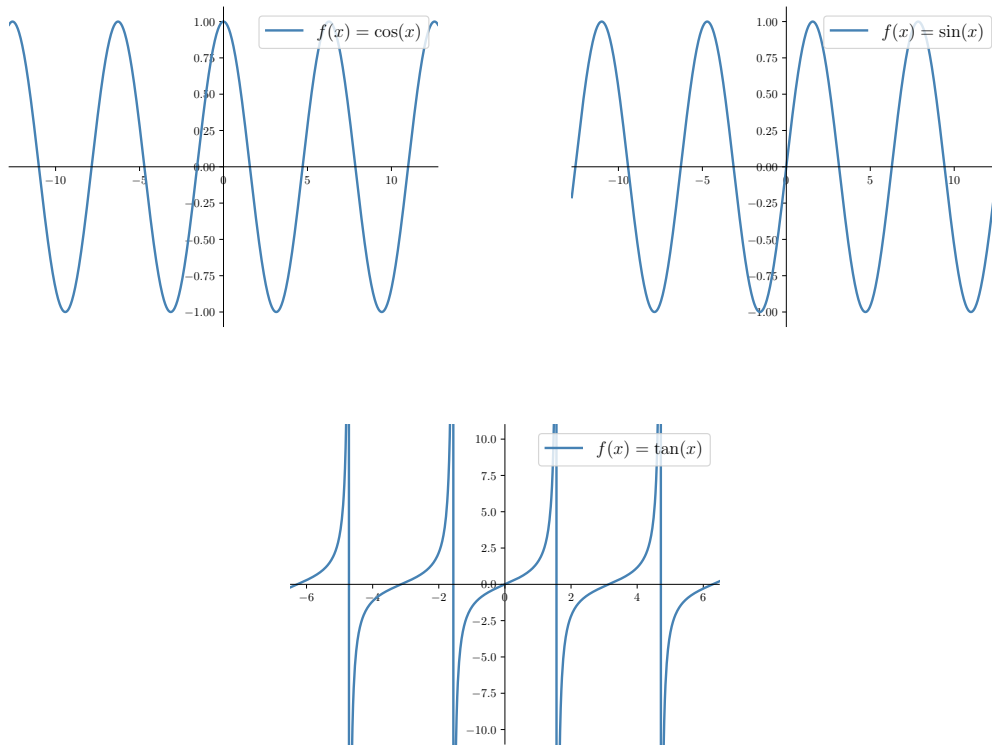


FIGURE 3.3 – Graphes des fonctions cos, sin et tan.

Les formules suivantes (et d'autres) sont démontrées dans le cours d'Algèbre 1.

**Proposition 3.4.** *Pour tout  $x \in \mathbb{R}$  on a*

$$\begin{aligned} \cos^2 x + \sin^2 x &= 1, \\ \cos(-x) &= \cos x, & \sin(-x) &= -\sin x, \\ \cos(\pi - x) &= -\cos x, & \sin(\pi - x) &= \sin x, \\ \cos(\pi + x) &= -\cos x, & \sin(\pi + x) &= -\sin x, \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) &= \sin x, & \sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right) &= \cos x, \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} + x\right) &= -\sin x, & \sin\left(\frac{\pi}{2} + x\right) &= \cos x. \end{aligned}$$

**Proposition 3.5.** *Pour tous  $a, b \in \mathbb{R}$  on a*

$$\begin{aligned} \cos(a + b) &= \cos a \cos b - \sin a \sin b, \\ \sin(a + b) &= \sin a \cos b + \sin b \cos a. \end{aligned}$$

*En particulier, pour  $a = b$  on a*

$$\begin{aligned} \cos(2a) &= \cos^2 a - \sin^2 a = 2 \cos^2 a - 1 = 1 - 2 \sin^2 a, \\ \sin(2a) &= 2 \cos a \sin a. \end{aligned}$$

**Remarque 3.6.** Les fonctions  $\cos$  et  $\sin$  prennent les valeurs remarquables suivantes.

$\theta$	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$
$\cos(\theta)$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$\sin(\theta)$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
$\tan(\theta)$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	Non défini

On remarque que pour la fonction  $\cos$  on pourrait écrire dans l'ordre  $\frac{\sqrt{4}}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{1}}{2}, \frac{\sqrt{0}}{2}$ .

### 3.4 Fonctions trigonométriques réciproques

On remarque que les fonctions suivantes sont bijectives :

$$\sin : \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \rightarrow [-1, 1], \quad \cos : [0, \pi] \rightarrow [-1, 1], \quad \tan : \left]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right[ \rightarrow \mathbb{R}.$$

On peut définir leur bijection réciproque.

**Définition 3.7.** 1. On appelle **arc-sinus** et on note  $\arcsin : [-1, 1] \rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$  la fonction réciproque de la restriction de la fonction sinus à  $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ . On a alors les égalités suivantes :

$$\arcsin(\sin x) = x \quad \forall x \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \quad \text{et} \quad \sin(\arcsin y) = y \quad \forall y \in [-1, 1].$$

2. On appelle **arc-cosinus** et on note  $\arccos : [-1, 1] \rightarrow [0, \pi]$  la fonction réciproque de la restriction de la fonction cosinus à  $[0, \pi]$ . On a alors les égalités suivantes :

$$\arccos(\cos x) = x \quad \forall x \in [0, \pi] \quad \text{et} \quad \cos(\arccos y) = y \quad \forall y \in [-1, 1].$$

3. On appelle **arc-tangente** et on note  $\arctan : \mathbb{R} \rightarrow \left]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right[$  la fonction réciproque de la restriction de la fonction tangente à  $\left]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right[$ . On a alors les égalités suivantes :

$$\arctan(\tan x) = x \quad \forall x \in \left]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right[ \quad \text{et} \quad \tan(\arctan y) = y \quad \forall y \in \mathbb{R}.$$

**Remarque 3.8.** Attention, les égalités  $\arccos(\cos x) = x$ ,  $\arcsin(\sin x) = x$  et  $\arctan(\tan x) = x$  ne sont pas vraies pour tout  $x \in \mathbb{R}$ . Par exemple  $\arccos(\cos(3\pi)) = \arccos(-1) = \pi$ .

**Proposition 3.9.**

1. La fonction  $\arcsin$  est dérivable sur  $] -1, 1[$  et satisfait, pour tout  $x \in ] -1, 1[$ ,

$$\arcsin'(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

2. La fonction  $\arccos$  est dérivable sur  $] -1, 1[$  et satisfait, pour tout  $x \in ] -1, 1[$ ,

$$\arccos'(x) = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

3. La fonction  $\arctan$  est dérivable sur  $\mathbb{R}$  et satisfait, pour tout  $x \in \mathbb{R}$ ,

$$\arctan'(x) = \frac{1}{1+x^2}.$$

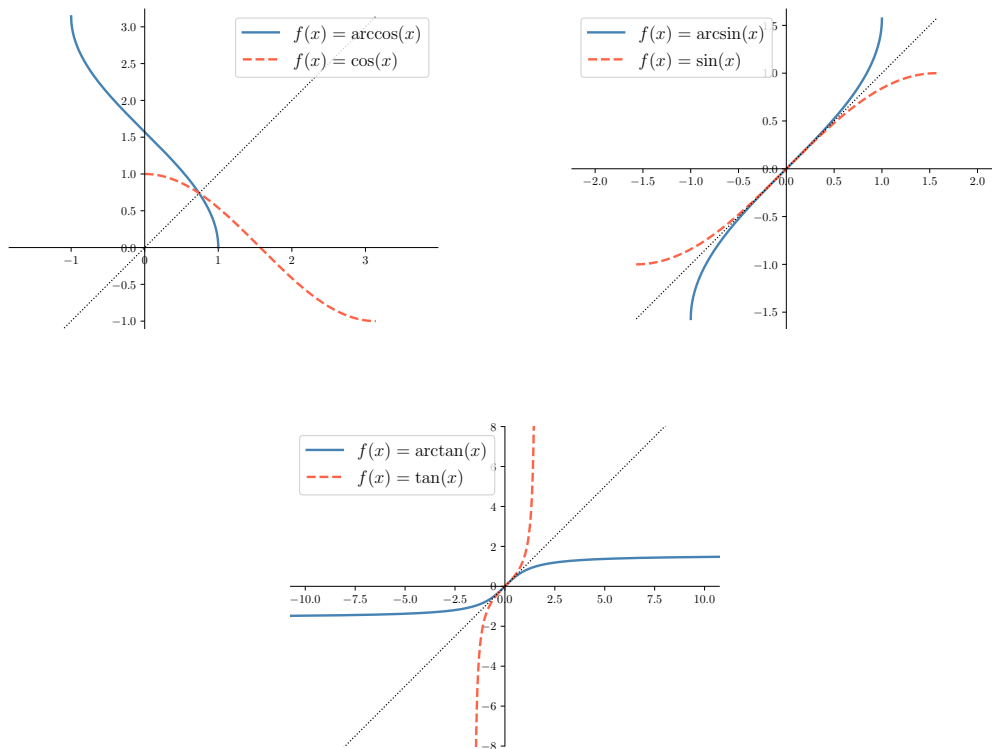


FIGURE 3.4 – Graphes des fonctions arccos, arcsin et arctan.

*Démonstration.* On admet que ces fonctions sont dérivables (elles sont dérivables car fonctions réciproques de fonctions dérivables de dérivée ne changeant pas de signe, ce résultat sera démontré dans le cours d'Analyse 2).

Calculons la dérivée de arcsin. Pour  $x \in ]-1, 1[$  on a l'identité

$$\sin(\arcsin x) = x.$$

En dérivant on obtient

$$\arcsin'(x) \cos(\arcsin x) = 1.$$

On a de plus  $\cos^2(\arcsin x) + \sin^2(\arcsin x) = 1$  et comme  $\arcsin x \in ]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$  on a  $\cos(\arcsin x) > 0$  et donc

$$\cos(\arcsin x) = \sqrt{1 - \sin^2(\arcsin x)} = \sqrt{1 - x^2},$$

ce qui donne le résultat.

Le calcul de la dérivée de arccos est similaire. Calculons maintenant la dérivée de arctan. Pour  $x \in \mathbb{R}$  on a l'identité

$$\tan(\arctan x) = x.$$

En dérivant, on obtient

$$\arctan'(x)(1 + \tan^2(\arctan x)) = 1,$$

et comme  $\tan^2(\arctan x) = x^2$  et  $1 + x^2 > 0$  on en déduit bien

$$\arctan'(x) = \frac{1}{1 + x^2}.$$

□

### 3.5 Fonctions exponentielle et logarithme

On admet le théorème suivant.

**Théorème 3.10.** *Il existe une unique fonction  $f : \mathbb{R} \rightarrow ]0, \infty[$  dérivable sur  $\mathbb{R}$  vérifiant  $f(0) = 1$  et pour tout  $x \in \mathbb{R}$*

$$f'(x) = f(x).$$

Cette fonction est appelée **fonction exponentielle** et est notée

$$\begin{aligned} \exp : \mathbb{R} &\rightarrow ]0, \infty[ \\ x &\mapsto \exp(x) \end{aligned}.$$

**Remarque 3.11.** *On note souvent  $e^x$  au lieu de  $\exp(x)$ .*

**Proposition 3.12.** *Pour tous  $x, y \in \mathbb{R}$  et  $n \in \mathbb{N}$  on a*

1.

$$\exp(x + y) = \exp(x) \exp(y),$$

2.

$$\exp(x - y) = \frac{\exp(x)}{\exp(y)},$$

3.

$$\exp(nx) = (\exp(x))^n.$$

**Proposition 3.13.** *On a les limites suivantes :*

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \exp(x) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \exp(x) = +\infty.$$

**Remarque 3.14.** *Comme on le verra dans le chapitre 5,  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$  signifie*

$$\forall M \in \mathbb{R}, \exists A \in \mathbb{R}, \forall x \in \mathbb{R}, x \geq A \Rightarrow f(x) \geq M,$$

*alors que  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \ell$  signifie*

$$\forall \varepsilon > 0, \exists A \in \mathbb{R}, \forall x \in \mathbb{R}, x \leq A \Rightarrow |f(x) - \ell| \leq \varepsilon.$$

**Proposition 3.15.** *La fonction exponentielle est strictement croissante sur  $\mathbb{R}$ , c'est une bijection de  $\mathbb{R}$  dans  $]0, \infty[$ .*

On peut donc définir la bijection réciproque de la fonction exponentielle.

**Définition 3.16.** *On définit la fonction **logarithme népérien** et on note  $\ln : ]0, \infty[ \rightarrow \mathbb{R}$  la bijection réciproque de la fonction exponentielle. On a donc les égalités suivantes :*

$$\ln(\exp(x)) = x \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad \text{et} \quad \exp(\ln(y)) = y \quad \forall y \in ]0, \infty[.$$

**Proposition 3.17.** *Pour tous  $x, y \in ]0, \infty[$  et  $n \in \mathbb{N}$  on a*

1.

$$\ln(xy) = \ln(x) + \ln(y),$$

2.

$$\ln\left(\frac{x}{y}\right) = \ln(x) - \ln(y),$$

3.

$$\ln(x^n) = n \ln(x).$$

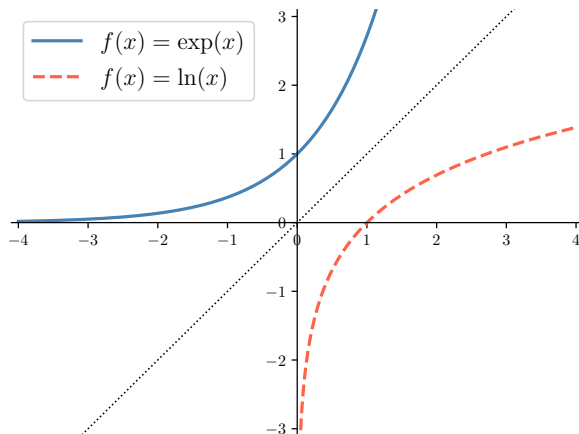


FIGURE 3.5 – Graphes des fonctions exp et ln.

**Proposition 3.18.** *On a les limites suivantes :*

$$\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ x > 0}} \ln(x) = -\infty \quad \text{et} \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \ln(x) = +\infty.$$

**Remarque 3.19.** *Si  $I$  est un intervalle,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction et  $x_0$  un bord de  $I$ ,  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f(x) = -\infty$  signifie*

$$\forall M \in \mathbb{R}, \exists \delta > 0, \forall x \in I, \quad x_0 < x < x_0 + \delta \Rightarrow f(x) \leq M.$$

**Proposition 3.20.** *La fonction ln est dérivable et strictement croissante sur  $]0, +\infty[$ , avec pour tout  $x \in ]0, +\infty[$*

$$\ln'(x) = \frac{1}{x}.$$

*Démonstration.* Comme pour les fonction trigonométriques réciproques on admet que ln est dérivable. Calculons sa dérivée. Pour tout  $x \in ]0, +\infty[$  on a  $\exp(\ln(x)) = x$ , et donc en dérivant on obtient

$$\ln'(x) \exp(\ln(x)) = 1,$$

ce qui implique le résultat puisque  $\exp(\ln(x)) = x > 0$ . □

### 3.6 Fonctions hyperboliques

**Définition 3.21.** *On définit sur  $\mathbb{R}$  les fonctions **cosinus hyperbolique** (notée cosh), **sinus hyperbolique** (notée sinh) et **tangent hyperbolique** (notée tanh) comme suit : pour tout  $x \in \mathbb{R}$*

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}, \quad \sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, \quad \tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}.$$

**Proposition 3.22.** *Les fonctions cosh, sinh et tanh ont les propriétés suivantes.*

	cosh	sinh	tanh
<i>Domaine de définition :</i>	$\mathbb{R}$	$\mathbb{R}$	$\mathbb{R}$
<i>Parité :</i>	<i>paire</i>	<i>impaire</i>	<i>impaire</i>
<i>Dérivée :</i>	sinh	cosh	$1 - \tanh^2$
<i>Limite en <math>+\infty</math> :</i>	$+\infty$	$+\infty$	1
<i>Limite en <math>-\infty</math> :</i>	$+\infty$	$-\infty$	-1



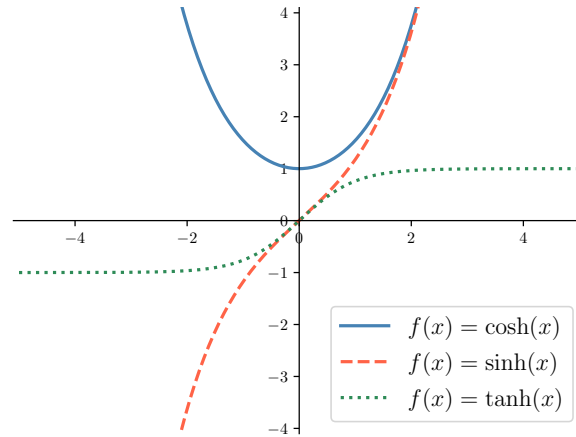


FIGURE 3.6 – Graphes des fonctions cosh, sinh et tanh.

**Proposition 3.23.** *Pour tous  $x, y \in \mathbb{R}$  on a*

$$\begin{aligned} \cosh^2(x) - \sinh^2(x) &= 1, \\ \cosh(x) + \sinh(x) &= e^x \quad \text{et} \quad \cosh(x) - \sinh(x) = e^{-x}, \\ \cosh(x + y) &= \cosh(x) \cosh(y) + \sinh(x) \sinh(y), \\ \sinh(x + y) &= \cosh(x) \sinh(y) + \sinh(x) \cosh(y), \\ \cosh(2x) &= \cosh^2(x) + \sinh^2(x) = 1 + 2 \sinh^2(x) = 2 \cosh^2(x) - 1, \\ \sinh(2x) &= 2 \cosh(x) \sinh(x). \end{aligned}$$

*Démonstration.* Pour la première égalité il suffit de voir que pour  $x, y \in \mathbb{R}$  on a

$$\cosh^2(x) - \sinh^2(x) = \frac{e^{2x} + e^{-2x} + 2e^x e^{-x}}{4} - \frac{e^{2x} + e^{-2x} - 2e^x e^{-x}}{4} = 1.$$

La deuxième ligne est obtenue par un calcul immédiat. Pour la troisième on a pour  $x, y \in \mathbb{R}$

$$\begin{aligned} \cosh(x) \cosh(y) &= \frac{e^{x+y} + e^{x-y} + e^{-x+y} + e^{-x-y}}{4}, \\ \sinh(x) \sinh(y) &= \frac{e^{x+y} - e^{x-y} - e^{-x+y} + e^{-x-y}}{4}, \end{aligned}$$

et donc

$$\cosh(x) \cosh(y) + \sinh(x) \sinh(y) = \frac{e^{x+y} + e^{-(x+y)}}{2} = \cosh(x+y).$$

Le reste est obtenu à l'aide de calculs similaires. □

### 3.7 Fonctions puissance

**Définition 3.24.**

1. Pour  $a \in \mathbb{N}$  on définit

$$x^a = \underbrace{x \cdot x \cdot \dots \cdot x}_{a \text{ fois}} \quad \forall x \in \mathbb{R},$$

avec la convention  $x^0 = 1$ . La fonction  $x \mapsto x^a$  est polynomiale, elle est paire si  $a$  est pair, impaire si  $a$  est impair.

2. Pour  $a \in \mathbb{Z} \setminus \mathbb{N}$  on définit

$$x^a = \frac{1}{x^{-a}} \quad \forall x \in \mathbb{R}^*.$$

3. Si  $a = 1/n$  avec  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $x^a$  est la racine  $n$ -ième de  $x$  (l'unique  $y$  tel que  $y^n = x$ ). Si  $n$  est pair elle est définie pour tout  $x \geq 0$ , si  $n$  est impair elle est définie pour tout  $x \in \mathbb{R}$ .

4. Si  $a \in \mathbb{R}$  on définit

$$x^a = \exp(a \ln(x)) \quad \forall x \in \mathbb{R}_+^*.$$

**Remarque 3.25.** La définition du point 4. généralise les définitions des points précédents lorsque  $x \in \mathbb{R}_+^*$ . En effet on a par exemple, pour  $x \in \mathbb{R}_+^*$  et  $a \in \mathbb{N}$ ,

$$\exp(a \ln(x)) = (\exp(\ln(x)))^a = x \cdot x \cdot \dots \cdot x.$$

**Proposition 3.26.** Les propriétés suivantes sont vraies dans tous les cas, pour  $x, y, a, b \in \mathbb{R}$  tels que  $x^a, x^b, x^{ab}$  et  $y^a$  existent (et  $x \neq 0$  pour le dernier point) :

$$(1)^a = 1, \quad x^a \cdot x^b = x^{a+b}, \quad (x^a)^b = x^{ab}, \quad (xy)^a = x^a y^a, \quad x^{-a} = \frac{1}{x^a}.$$

**Proposition 3.27.** Pour tout  $a \in \mathbb{R}$ , la fonction  $x \mapsto x^a$  est dérivable sur  $\mathbb{R}_+^*$ , de dérivée  $x \mapsto ax^{a-1}$ .

**Remarque 3.28.** Il faut faire attention à ne pas confondre les fonctions puissances définies sur  $]0, \infty[$  par  $f(x) = x^a = \exp(a \ln(x))$  avec  $a \in \mathbb{R}$ , et les fonctions  $g$ , variantes de la fonction exponentielle, définies sur  $\mathbb{R}$  par  $g(x) = b^x = \exp(\ln(b)x)$ , pour  $b > 0$ .

### 3.8 Croissance comparée

La résultat suivant sera démontré dans le cadre des suites dans le chapitre 4.

**Théorème 3.29.** Pour tous  $a, b, c \in \mathbb{R}_+^*$ ,

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\exp(ax)}{x^b} = +\infty,$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\exp(ax)}{(\ln(x))^c} = +\infty,$$

et

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^b}{(\ln(x))^c} = +\infty.$$

# Chapitre 4

## Suites réelles

### 4.1 Définitions

**Définition 4.1.** On appelle suite réelle une application de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{R}$ . On note  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  la fonction qui associe à tout  $n \in \mathbb{N}$  le réel  $u_n$ .

**Exemple 4.2.** On définit la suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  par

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n = 2n + 1.$$

**Définition 4.3.** Pour deux suites  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et un réel  $\lambda$  on peut définir

1. la **somme**  $(u_n + v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ,
2. le **produit**  $(u_n v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ,
3. la **multiplication par un réel**  $(\lambda u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ .

**Remarque 4.4.** On peut ne pas définir une suite sur  $\mathbb{N}$  mais sur  $\mathbb{N}^*$ , ou sur l'ensemble des entiers supérieurs ou égaux à 2... On note alors  $(u_n)_{n \geq 1}$ ,  $(u_n)_{n \geq 2}$ ...

**Définition 4.5.** On dit qu'une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est

1. **croissante** si

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+1} \geq u_n,$$

2. **décroissante** si

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+1} \leq u_n,$$

3. **monotone** si elle est croissante ou décroissante,

4. **majorée** si

$$\exists M \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n \leq M,$$

5. **minorée** si

$$\exists m \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n \geq m,$$

6. **bornée** si elle est majorée et minorée.

**Remarque 4.6.** Si une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est croissante et si  $m \geq n$  on a  $u_m \geq u_n$ . À l'inverse si elle est décroissante et si  $m \geq n$  on a  $u_m \leq u_n$ .

**Définition 4.7.** Une propriété  $P(n)$  dépendant de  $n \in \mathbb{N}$  est dite vraie à partir d'un certain rang si

$$\exists N \in \mathbb{N}, \forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \Rightarrow P(n) \text{ est vraie.}$$

**Exemple 4.8.** On considère la suite  $(u_n)_{n \geq 1}$  définie par

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n = 2^n - 10n.$$

On a  $u_0 = 1$ ,  $u_1 = -8$ ,  $u_2 = -16$ , donc cette suite n'est pas croissante. Mais pour  $n \in \mathbb{N}$  on a

$$u_{n+1} - u_n = 2 \cdot 2^n - 10n - 10 - (2^n - 10n) = 2^n - 10,$$

et comme  $2^n - 10 \geq 0$  dès que  $n \geq 4$ , cette suite est croissante à partir d'un certain rang.

## 4.2 Suites classiques

**Définition 4.9.** Une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est dite **arithmétique de progression**  $r \in \mathbb{R}$  si elle est définie par la relation de récurrence

$$u_{n+1} = u_n + r, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

**Remarque 4.10.** Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite arithmétique de progression  $r \in \mathbb{R}$  on a, pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$u_n = u_0 + nr, \quad \text{et} \quad \sum_{k=0}^n u_k = (n+1)u_0 + \frac{n(n+1)}{2}r.$$

**Définition 4.11.** Une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est dite **géométrique de raison**  $q \in \mathbb{R}^*$  si elle est définie par la relation de récurrence

$$u_{n+1} = qu_n, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

**Remarque 4.12.** Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite géométrique  $q \in \mathbb{R}$  on a, pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$u_n = q^n u_0, \quad \text{et} \quad \sum_{k=0}^n u_k = \begin{cases} (n+1)u_0 & \text{si } q = 1 \\ \frac{q^{n+1}-1}{q-1}u_0 & \text{sinon} \end{cases}.$$

**Définition 4.13.** Une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est dite **arithmético-géométrique de paramètres**  $q \in \mathbb{R}^*$  et  $r \in \mathbb{R}$  si elle est définie par la relation de récurrence

$$u_{n+1} = qu_n + r, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

**Remarque 4.14.** Soit  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite arithmético-géométrique de paramètres  $q \in \mathbb{R}^*$  et  $r \in \mathbb{R}$ .

1. Si  $q = 1$   $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite arithmétique.
2. Si  $q \neq 1$ , l'équation d'inconnue  $a \in \mathbb{R}$

$$a = qa + r$$

a comme unique solution

$$a = \frac{r}{1-q},$$

et on a

$$u_{n+1} - a = qu_n + r - (qa + r) = q(u_n - a),$$

donc la suite  $(u_n - a)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite géométrique de raison  $q$ . Ainsi pour tout  $n \in \mathbb{N}$

$$u_n = a + u_n - a = a + q^n(u_0 - a),$$

et

$$\sum_{k=0}^n u_k = \sum_{k=0}^n (a + (u_k - a)) = (n+1)a + \frac{q^{n+1}-1}{q-1}(u_0 - a).$$

**Remarque 4.15.** Les suites classiques présentées dans cette section sont des exemples simples de suites dites récurrentes d'ordre 1,  $u_{n+1}$  étant défini comme une fonction de  $u_n$ . Les suites récurrentes apparaissent naturellement dans le calcul de complexité d'algorithmes définis eux-mêmes par récurrence, la complexité d'un algorithme correspondant au nombre d'opérations élémentaires nécessaires à sa mise en œuvre.

Par exemple, pour calculer  $n!$ , on peut calculer  $(n-1)!$ , et le multiplier par  $n$ . Mais pour calculer  $(n-1)!$  on peut calculer  $(n-2)!$  et le multiplier par  $n-1$ , etc... Il s'agit d'un algorithme récursif. Si l'on note  $u_n$  le nombre d'opérations (ici multiplications) nécessaires pour calculer  $n!$ , on a simplement  $u_{n+1} = u_n + 1$  et  $u_1 = 0$ ,  $(u_n)_{n \geq 1}$  est une suite arithmétique.

Pour l'exemple classique des tours de Hanoï (voir la page Wikipedia dédiée), la complexité est arithmético-géométrique,  $u_{n+1} = 2u_n + 1$ .

### 4.3 Convergence de suite

**Définition 4.16.** Soit  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite et  $\ell \in \mathbb{R}$ . On dit que la suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  **tend vers**  $\ell$  (ou a pour limite  $\ell$ ) si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \Rightarrow |u_n - \ell| \leq \varepsilon.$$

On note alors  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$  ou  $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \ell$ .

**Remarque 4.17.**

1. L'ordre est important dans les quantificateurs, dans la définition précédente  $N$  dépend de  $\varepsilon$ .
2. Comme  $|u_n - \ell| \leq \varepsilon$  équivaut à  $u_n \in [\ell - \varepsilon, \ell + \varepsilon]$ , dire que la suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  tend vers  $\ell$  revient à dire que pour tout  $\varepsilon > 0$  l'intervalle  $[\ell - \varepsilon, \ell + \varepsilon]$  contient les termes de  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  à partir d'un certain rang.
3. Pour une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $\ell \in \mathbb{R}$ ,  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  ne tend pas vers  $\ell$  si

$$\exists \varepsilon > 0, \forall N \in \mathbb{N}, \exists n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \text{ et } |u_n - \ell| > \varepsilon.$$

**Exemple 4.18.** La suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  définie pour  $n \in \mathbb{N}$  par  $u_n = \frac{1}{n+1}$  tend vers 0. En effet, pour  $\varepsilon > 0$  on a  $|u_n - 0| = \frac{1}{n+1} \leq \varepsilon$  dès que  $n \geq \frac{1}{\varepsilon} - 1$ , on peut donc prendre  $N = E\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)$ .

**Définition 4.19.**

1. On dit qu'une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  **converge** (ou est convergente) s'il existe  $\ell \in \mathbb{R}$  tel que  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  tend vers  $\ell$ . Ainsi une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge si et seulement si

$$\exists \ell \in \mathbb{R}, \forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \Rightarrow |u_n - \ell| \leq \varepsilon,$$

ce qui équivaut à

$$\exists \ell \in \mathbb{R}, \forall \varepsilon > 0, \quad \{n \in \mathbb{N} : |u_n - \ell| > \varepsilon\} \text{ est de cardinal fini.}$$

2. On dit qu'une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  **diverge** (ou est divergente) si elle n'est pas convergente. Ainsi une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  diverge si et seulement si

$$\forall \ell \in \mathbb{R}, \exists \varepsilon > 0, \forall N \in \mathbb{N}, \exists n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \text{ et } |u_n - \ell| > \varepsilon,$$

ce qui équivaut à

$$\forall \ell \in \mathbb{R}, \exists \varepsilon > 0, \quad \{n \in \mathbb{N} : |u_n - \ell| > \varepsilon\} \text{ est de cardinal infini.}$$

**Exemple 4.20.** La suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  définie pour tout  $n \in \mathbb{N}$  par  $u_n = (-1)^n$  diverge. En effet, pour tout  $\ell \geq 0$  on a pour tout  $k \in \mathbb{N}$

$$|u_{2k+1} - \ell| = |-1 - \ell| = 1 + \ell > \frac{1}{2},$$

donc l'ensemble  $\{n \in \mathbb{N} : |u_n - \ell| > 1/2\}$  est de cardinal infini. De même, pour  $\ell \leq 0$  on a pour tout  $k \in \mathbb{N}$

$$|u_{2k} - \ell| = |1 - \ell| = 1 - \ell > \frac{1}{2},$$

et donc l'ensemble  $\{n \in \mathbb{N} : |u_n - \ell| > 1/2\}$  est de cardinal infini.

**Théorème 4.21** (Unicité de la limite). La limite d'une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ , si elle existe, est unique. Autrement dit si pour  $\ell_1, \ell_2 \in \mathbb{R}$  on a  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_1$  et  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_2$ , alors  $\ell_1 = \ell_2$ .

*Démonstration.* Soient  $\ell_1, \ell_2 \in \mathbb{R}$  et une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  qui tend vers  $\ell_1$  et  $\ell_2$ . Il suffit de montrer que pour tout  $\varepsilon > 0$  on a  $|\ell_1 - \ell_2| \leq \varepsilon$ , puisque que cela implique bien que  $\ell_1 = \ell_2$ .

Soit  $\varepsilon > 0$ . Comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_1$  il existe  $N_1$  tel que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_1 \Rightarrow |u_n - \ell_1| \leq \frac{\varepsilon}{2}.$$

De même, comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_2$  il existe  $N_2$  tel que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_2 \Rightarrow |u_n - \ell_2| \leq \frac{\varepsilon}{2}.$$

Définissons  $N = \max(N_1, N_2)$ . Comme  $N \geq N_1$  et  $N \geq N_2$  on en déduit bien, en utilisant l'inégalité triangulaire, que

$$\begin{aligned} |\ell_1 - \ell_2| &= |\ell_1 - u_N - (\ell_2 - u_N)| \\ &\leq |\ell_1 - u_N| + |\ell_2 - u_N| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} \\ &\leq \varepsilon. \end{aligned}$$

□

**Théorème 4.22.** *Toute suite convergente est bornée.*

*Démonstration.* Soit  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite qui converge vers  $\ell \in \mathbb{R}$ . On veut montrer que l'ensemble  $\{|u_n| : n \in \mathbb{N}\}$  est majoré. Puisque  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers  $\ell$  il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$  on a

$$n \geq N \Rightarrow |u_n - \ell| \leq 1.$$

Donc, par inégalité triangulaire inversée, pour tout  $n \geq N$  on a

$$|u_n| - |\ell| \leq ||u_n| - |\ell|| \leq |u_n - \ell| \leq 1,$$

et ainsi, pour tout  $n \geq N$  on a  $|u_n| \leq |\ell| + 1$ . De plus l'ensemble  $\{|u_n| : n \in \{0, \dots, N-1\}\}$  est de cardinal fini et est donc majoré par  $M = \max(|u_0|, \dots, |u_{N-1}|)$ . Au final on a bien montré que pour tout  $n \in \mathbb{N}$  on a

$$|u_n| \leq \max(M, |\ell| + 1).$$

□

## 4.4 Opérations sur les limites

**Théorème 4.23.** *Soient deux suites  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ , deux réels  $\ell_1$  et  $\ell_2$  tels que  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_1$  et  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_2$  et deux réels  $a$  et  $b$ . Alors*

$$au_n + bv_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} a\ell_1 + b\ell_2.$$

*Démonstration.* Ce résultat est évident si  $a = b = 0$ . Supposons maintenant que  $|a| + |b| > 0$  et considérons  $\varepsilon > 0$ . Comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_1$  il existe  $N_1 \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$n \geq N_1 \Rightarrow |u_n - \ell_1| \leq \frac{\varepsilon}{|a| + |b|}.$$

De même, comme  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_2$  il existe  $N_2 \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$n \geq N_2 \Rightarrow |v_n - \ell_2| \leq \frac{\varepsilon}{|a| + |b|}.$$

Mais alors, en définissant  $N = \max(N_1, N_2)$ , pour tout  $n \geq N$  on obtient, en utilisant l'inégalité triangulaire,

$$\begin{aligned} |au_n + bv_n - (a\ell_1 + b\ell_2)| &= |a(u_n - \ell_1) + b(v_n - \ell_2)| \\ &\leq |a||u_n - \ell_1| + |b||v_n - \ell_2| \\ &\leq |a| \frac{\varepsilon}{|a| + |b|} + |b| \frac{\varepsilon}{|a| + |b|} \\ &\leq \varepsilon. \end{aligned}$$

□

**Théorème 4.24.** Soient deux suites  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et deux réels  $\ell_1$  et  $\ell_2$  tels que  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_1$  et  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_2$ . Alors

$$u_n v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_1 \ell_2.$$

*Démonstration.* Comme la suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge elle est bornée et il existe donc  $M > 0$  tel que  $|u_n| \leq M$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ . De plus comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_1$  il existe  $N_1 \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$n \geq N_1 \Rightarrow |u_n - \ell_1| \leq \frac{\varepsilon}{|l_2| + M},$$

et de même, comme  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell_2$ , il existe  $N_2 \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$n \geq N_2 \Rightarrow |v_n - \ell_2| \leq \frac{\varepsilon}{M + |l_2|}.$$

En définissant  $N = \max(N_1, N_2)$ , pour tout  $n \geq N$  on obtient

$$\begin{aligned} |u_n v_n - \ell_1 \ell_2| &= |u_n(v_n - \ell_2) + \ell_2(u_n - \ell_1)| \\ &\leq |u_n| |v_n - \ell_2| + |\ell_2| |u_n - \ell_1| \\ &\leq M \frac{\varepsilon}{M + |l_2|} + |\ell_2| \frac{\varepsilon}{|l_2| + M} \\ &\leq \varepsilon. \end{aligned}$$

□

**Théorème 4.25.** Soit une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et un réel  $\ell \neq 0$  tel que  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$ . Alors  $u_n$  est non nul à partir d'un certain rang et on a de plus

$$\frac{1}{u_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \frac{1}{\ell}.$$

*Démonstration.* Commençons par montrer que  $u_n$  est non nul à partir d'un certain rang. Comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$  il existe  $N_1 \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$n \geq N_1 \Rightarrow |u_n - \ell| \leq \frac{|\ell|}{2}.$$

Mais alors, pour tout  $n \geq N_1$  on a

$$|\ell| - |u_n| \leq ||\ell| - |u_n|| \leq |\ell - u_n| \leq \frac{|\ell|}{2},$$

et donc  $|u_n| \geq \frac{|\ell|}{2}$  pour tout  $n \geq N_1$ . On a donc bien montré que  $u_n$  est non nul à partir d'un certain rang.

Montrons maintenant que  $\frac{1}{u_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \frac{1}{\ell}$ . Considérons  $\varepsilon > 0$ . Comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$  il existe  $N_2 \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$n \geq N_2 \Rightarrow |u_n - \ell| \leq \frac{\ell^2 \varepsilon}{2}.$$

En définissant  $N = \max(N_1, N_2)$  on obtient alors, pour tout  $n \geq N$ ,

$$\left| \frac{1}{u_n} - \frac{1}{\ell} \right| = \frac{|u_n - \ell|}{|u_n| \cdot |\ell|} \leq \frac{\frac{\ell^2 \varepsilon}{2}}{\frac{|\ell|}{2} \cdot |\ell|} \leq \varepsilon.$$

□

**Remarque 4.26.** Si une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers un réel  $\ell$  alors  $(|u_n|)_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers  $|\ell|$  (c'est une conséquence directe de l'inégalité triangulaire inverse).

## 4.5 Limites de suites et inégalités

**Théorème 4.27.** Soient  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  deux suites vérifiant  $u_n \leq v_n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , et  $l_1, l_2$  des réels tels que  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l_1$  et  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l_2$ . Alors  $l_1 \leq l_2$ .

*Démonstration.* Il suffit de montrer que  $l_2 - l_1 \geq -\varepsilon$  pour tout  $\varepsilon > 0$ .

Soit  $\varepsilon > 0$ . Comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l_1$  et  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l_2$  il existe  $N_1, N_2 \in \mathbb{N}$  tels que pour tout  $n \in \mathbb{N}$  on a

$$n \geq N_1 \Rightarrow u_n - l_1 \geq -\frac{\varepsilon}{2},$$

et

$$n \geq N_2 \Rightarrow v_n - l_2 \leq \frac{\varepsilon}{2}.$$

Mais alors, en définissant  $N = \max(N_1, N_2)$ , on a  $l_2 \geq -\frac{\varepsilon}{2} + v_N$  et  $-l_1 \geq -\frac{\varepsilon}{2} - v_N$ , ce qui implique, comme  $v_N - u_N \geq 0$ ,

$$l_2 - l_1 \geq -\varepsilon + v_N - u_N \geq -\varepsilon.$$

□

**Remarque 4.28.** Attention ce résultat n'est pas vrai pour des inégalités strictes, par exemple  $u_n = -\frac{1}{n+1}$  et  $v_n = \frac{1}{n+1}$  vérifient  $u_n < v_n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  et  $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = 0$ .

**Corollaire 4.29.** Soient  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite et  $l \in \mathbb{R}$  tel que  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l$ .

1. S'il existe  $M \in \mathbb{R}$  tel que  $u_n \leq M$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , alors  $l \leq M$ .
2. S'il existe  $m \in \mathbb{R}$  tel que  $u_n \geq m$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , alors  $l \geq m$ .

*Démonstration.* Il suffit d'appliquer le théorème précédent en prenant une des deux suites constante. □

**Théorème 4.30** (Théorème dit « des gendarmes »). Soient  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ,  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(w_n)_{n \in \mathbb{N}}$  trois suites vérifiant pour tout  $n \in \mathbb{N}$

$$u_n \leq v_n \leq w_n.$$

On suppose qu'il existe  $l \in \mathbb{R}$  tel que  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l$  et  $w_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l$ . Alors on a

$$v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l.$$

**Exemple 4.31.** Soit  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  la suite définie pour tout  $n \in \mathbb{N}$  par  $v_n = \frac{\sin(n)}{n+1}$ . Alors en définissant les suites  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(w_n)_{n \in \mathbb{N}}$  par  $v_n = -\frac{1}{n+1}$  et  $w_n = \frac{1}{n+1}$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , on a  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ ,  $w_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$  et  $u_n \leq v_n \leq w_n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ . On en déduit que  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ .

*Démonstration.* Soit  $\varepsilon > 0$ . Comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l$  et  $w_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l$ , il existe  $N_1, N_2 \in \mathbb{N}$  tels que pour tout  $n \in \mathbb{N}$  on a

$$n \geq N_1 \Rightarrow u_n - l \geq -\varepsilon,$$

et

$$n \geq N_2 \Rightarrow w_n - l \leq \varepsilon.$$

Mais alors, pour tout  $n \geq \max(N_1, N_2)$  on a

$$l - \varepsilon \leq u_n \leq v_n \leq w_n \leq l + \varepsilon,$$

et donc pour tout  $n \geq \max(N_1, N_2)$  on a  $|v_n - l| \leq \varepsilon$ . □



## 4.6 Convergence et monotonie

**Théorème 4.32.** *Toute suite croissante et majorée est convergente. Toute suite décroissante et minorée est convergente.*

*Idée de preuve.* La preuve de ce résultat est admise. L'idée, par exemple dans le cas d'une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  croissante et majorée, est de montrer que  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers la borne supérieure de l'ensemble  $\{u_n : n \in \mathbb{N}\}$ , qui admet bien une borne supérieure puisqu'il est non vide et majoré (pour plus de détails, voir par exemple [2]).  $\square$

**Remarque 4.33.** *Attention, il existe des suite croissantes non convergentes (par exemple  $u_n = n$ ) et des suite convergentes non monotones (par exemple  $u_n = \frac{(-1)^n}{n+1}$ ).*

**Définition 4.34.** *On dit que deux suites  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  sont **adjacentes** si*

1.  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est croissante,
2.  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est décroissante,
3.  $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .

**Théorème 4.35.** *Deux suites adjacentes convergent et ont la même limite.*

*Démonstration.* Soient  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  deux suites adjacentes. Alors la suite  $(w_n)_{n \in \mathbb{N}}$  définie par  $w_n = v_n - u_n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  est décroissante. En effet, pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$w_{n+1} - w_n = v_{n+1} - u_{n+1} - (v_n - u_n) = v_{n+1} - v_n - (u_{n+1} - u_n) \leq 0,$$

puisque  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est croissante alors que  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est décroissante. Ainsi, comme de plus  $w_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ , on a  $w_n \geq 0$ , c'est-à-dire  $u_n \leq v_n$ , pour tout  $n \in \mathbb{N}$ . Mais donc  $u_n \leq v_0$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , la suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est donc croissante et majorée, elle converge donc vers un  $\ell_1 \in \mathbb{R}$ . De même,  $v_n \geq u_0$ , la suite  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est donc décroissante et minorée, elle converge donc vers un  $\ell_2 \in \mathbb{R}$ . Finalement,

$$0 = \lim_{n \rightarrow +\infty} w_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n - \lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = \ell_1 - \ell_2,$$

et donc  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  convergent vers la même limite.  $\square$

**Exemple 4.36.** *Soit  $x \in \mathbb{R}$ . On définit l'approximation décimale par défaut de  $x$  à  $10^{-n}$  près par*

$$u_n = \frac{E(10^n x)}{10^n},$$

*et l'approximation décimale par excès de  $x$  à  $10^{-n}$  près par*

$$v_n = \frac{E(10^n x)}{10^n} + \frac{1}{10^n},$$

*(par exemple l'approximation décimale par défaut de 3.17641 à  $10^{-2}$  près est 3.17, alors que son approximation décimale par excès à  $10^{-2}$  près est 3.18).*

*On a bien  $u_n - v_n = -\frac{1}{10^n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$  (il s'agit en fait d'une conséquence du corollaire 4.48). De plus, pour  $n \in \mathbb{N}$ , comme  $10 E(10^n x)$  est un entier inférieur ou égal à  $10 \cdot 10^n x = 10^{n+1}x$ , on a*

$$10 E(10^n x) \leq E(10^{n+1}x),$$

*et donc, en divisant par  $10^{n+1}$ ,*

$$u_n \leq u_{n+1}.$$

*La suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est donc croissante. Enfin, pour  $n \in \mathbb{N}$ , comme  $10(E(10^n x) + 1)$  est un entier strictement supérieur à  $10 \cdot 10^n x = 10^{n+1}x$ , on a*

$$10(E(10^n x) + 1) \geq E(10^{n+1}x) + 1,$$

*et donc, en divisant par  $10^{n+1}$ ,*

$$v_n \geq v_{n+1}.$$

*La suite  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est donc décroissante. Ces deux suite sont adjacentes et convergent donc vers une même limite. Comme  $u_n \leq x \leq v_n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  cette limite est  $x$ .*

## 4.7 Suites extraites

L'idée est, étant donnée une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ , de sélectionner certains termes de cette suite pour définir une nouvelle suite, appelée suite extraite ou sous-suite.

**Définition 4.37.** On appelle une **extraction** une fonction  $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  strictement croissante. Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite, une **sous-suite** ou **suite extraite** de  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite de la forme  $(u_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$  où  $\varphi$  est une extraction.

**Exemples 4.38.** Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite,  $(u_{2n})_{n \in \mathbb{N}}$ ,  $(u_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}}$ ,  $(u_{2^n})_{n \in \mathbb{N}}$  sont des sous-suites de  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ .

La démonstration de la propriété suivante est immédiate.

**Proposition 4.39.** Soit  $(u_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$  une sous-suite de  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ .

1. Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est croissante,  $(u_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$  l'est également.
2. Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est décroissante,  $(u_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$  l'est également.
3. Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est majorée,  $(u_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$  l'est également.
4. Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est minorée,  $(u_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$  l'est également.
5. Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers un réel  $\ell$ ,  $(u_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$  converge également vers  $\ell$ .

**Remarque 4.40.** Une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  peut avoir une sous-suite qui converge même si elle-même ne converge pas. Par exemple, si  $u_n = (-1)^n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , alors la suite  $(u_{2n})_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers 1 et la suite  $(u_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers  $-1$ .

**Théorème 4.41** (Bolzano Weierstrass). Toute suite bornée admet une sous-suite convergente.

*Idée de preuve.* La preuve de ce résultat est admise. Une preuve possible, pour une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  bornée, est de construire une suite de segments emboîtés les uns dans les autres, de largeur tendant vers 0, et contenant chacun une infinité de termes de  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ . Pour plus de détails voir [2].  $\square$

**Exemple 4.42.** La suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  définie par  $u_n = \sin(n)$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  admet une sous-suite convergente.

## 4.8 Limites infinies

**Définition 4.43.** Soit  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite.

1. On dit que  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  tend vers  $+\infty$  (ou diverge vers  $+\infty$ ) si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \Rightarrow u_n \geq A.$$

On note alors  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$  ou  $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = +\infty$ .

2. On dit que  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  tend vers  $-\infty$  (ou diverge vers  $-\infty$ ) si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \Rightarrow u_n \leq A.$$

On note alors  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$  ou  $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = -\infty$ .

**Exemple 4.44.** La suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  définie par  $u_n = n^2$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  tend vers  $+\infty$ . En effet si  $A \in \mathbb{R}_-$  on a  $u_n \geq A$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ , alors que si  $A \geq 0$  on a  $u_n \geq A$  dès que  $n \geq \sqrt{A}$ .

**Théorème 4.45.** Soit  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite croissante. Alors il y a deux possibilités :

1. soit  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers une limite  $\ell \in \mathbb{R}$ ,
2. soit  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  diverge vers  $+\infty$ .

*Démonstration.* Il y a deux cas possibles :  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  peut être bornée ou non. Si elle est bornée, comme elle croissante par hypothèse elle converge, d'après le théorème 4.32. Montrons que si elle n'est pas bornée elle tend vers  $+\infty$ . Considérons  $A \in \mathbb{R}$ . Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  n'est pas bornée il existe un  $n \in \mathbb{N}$  tel que  $u_N \geq A$ . Mais comme  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est croissante pour tout  $n \geq N$  on a  $u_n \geq u_N \geq A$ .  $\square$

**Remarque 4.46.** Attention une suite qui ne converge pas ne diverge pas forcément vers  $+\infty$  ou  $-\infty$  (considérer par exemple  $u_n = (-1)^n$ ).

**Théorème 4.47.** Soient  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  deux suites.

1. Si  $u_n \leq v_n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  et  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ , alors  $v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ .
2. Si  $u_n \leq v_n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  et  $v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$ , alors  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$ .

*Démonstration.* La preuve est immédiate, en utilisant la définition de divergence vers  $+\infty$  ou  $-\infty$ .  $\square$

**Corollaire 4.48.** Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite géométrique de raison  $r > 1$  et de terme initial  $u_0 > 0$ , alors  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ .

*Démonstration.* D'après le binôme de Newton (voir le cours d'Algèbre 1), en notant  $\alpha = r - 1 > 0$ , on a pour tout  $n \in \mathbb{N}$

$$u_n = u_0(1 + \alpha)^n = u_0 \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \alpha^k \geq u_0(1 + n\alpha).$$

En posant  $v_n = u_0(1 + n\alpha)$  on a  $u_n \geq v_n$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  et  $v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$  puisque  $\alpha > 0$  et  $u_0 > 0$ . On en déduit d'après le théorème précédent que  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ .  $\square$

**Théorème 4.49.** Soient  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  deux suites. On a les résultats d'addition suivants pour les limites infinies (les ? ? correspondent aux formes indéterminées «  $\infty - \infty$  »).

	$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$	$(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ bornée	$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$
$v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$	$u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$ $u_n - v_n$ ? ?	$u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$ $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$	$u_n + v_n$ ? ? $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$
$(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ bornée	$u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$ $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$	$u_n + v_n$ bornée $u_n - v_n$ bornée	$u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$
$v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$	$u_n + v_n$ ? ? $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$	$u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$	$u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ $u_n - v_n$ ? ?

*Démonstration.* Considérons le cas où  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est bornée et  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ , les autres pouvant être traités de manière similaire. Comme  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est bornée il existe  $M \geq 0$  tel que  $|v_n| \leq M$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$ . Considérons  $A \in \mathbb{R}$ . Comme  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$  il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$  on a

$$n \geq N \Rightarrow u_n \geq A + M.$$

Mais alors pour tout  $n \geq N$  on a

$$u_n + v_n \geq u_n - |v_n| \geq A + M - M \geq A, \quad \text{et} \quad u_n - v_n \geq u_n - |v_n| \geq A + M - M \geq A.$$

$\square$

**Remarque 4.50.**

1. On rappelle que si une suite  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  converge vers un réel  $\ell$ , alors elle est bornée. Ainsi par exemple lorsque  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$  et  $v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell \in \mathbb{R}$  on a  $u_n + v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$

2. Dans les cas de forme indéterminée, le résultat dépend de la situation. Par exemple si  $u_n = n^2 + n$  et  $v_n = n^2$  on a  $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ , alors que si  $u_n = n^2 + \frac{1}{n+1}$  et  $v_n = n^2$  on a  $u_n - v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .

Concernant les multiplications de limites infinies il faut faire attention aux signes.

**Théorème 4.51.** Soient  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  deux suites. On a les résultats suivants concernant la limite de  $(u_n v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  (les ?? correspondent aux formes indéterminées «  $0 \times \infty$  »).

$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n v_n$	$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$	$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} a < 0$	$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$	$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} a > 0$	$u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$
$v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$	$+\infty$	$+\infty$	??	$-\infty$	$-\infty$
$v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} b < 0$	$+\infty$	$ab$	$0$	$ab$	$-\infty$
$v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$	??	$0$	$0$	$0$	??
$v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} b > 0$	$-\infty$	$ab$	$0$	$ab$	$+\infty$
$v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$	$-\infty$	$-\infty$	??	$+\infty$	$+\infty$

*Démonstration.* Traitons le cas  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} a > 0$  et  $v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ , les autres cas pouvant être traités de manière similaire. On veut montrer que dans cette situation  $u_n v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ .

Soit  $A \in \mathbb{R}$ . Comme  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} a > 0$  il existe  $N_1 \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$  on a

$$n \geq N_1 \Rightarrow u_n - \ell \geq -\frac{a}{2},$$

et comme  $v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$  il existe  $N_2 \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \in \mathbb{N}$  on a

$$n \geq N_2 \Rightarrow v_n \geq \frac{2A}{a}.$$

Mais alors, pour tout  $n \geq \max(N_1, N_2)$  on a (remarquons que  $u_n \geq \frac{\ell}{2} \geq 0$  et donc que multiplier chaque membre de l'inégalité  $v_n \geq \frac{2A}{\ell}$  par  $u_n$  ne change pas les sens de l'inégalité)

$$u_n v_n \geq \frac{a}{2} \frac{2A}{a} = A.$$

□

**Théorème 4.52.** Soit  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  une suite.

1. Si  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$  alors  $\frac{1}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .
2. Si  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$  alors  $\frac{1}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .
3. Si  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$  et  $u_n > 0$  à partir d'un certain rang alors  $\frac{1}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$ .
4. Si  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$  et  $u_n < 0$  à partir d'un certain rang alors  $\frac{1}{u_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty$ .

*Démonstration.* Montrons le troisième point, les autres peuvent être démontré de manière similaire. Soit  $A > 0$ . Comme  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$  et  $u_n > 0$  à partir d'un certain rang il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $n \geq N$  on a  $0 \leq u_n \leq 1/A$ , et donc  $u_n \geq A$ . □

**Corollaire 4.53.** Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite géométrique de raison  $|r| < 1$  alors  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ .

*Démonstration.* Si  $u_0 = 0$  il n'y a rien à montrer. Si  $|u_0| > 0$  alors la suite  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  définie par  $v_n = \frac{1}{|u_n|}$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  est géométrique de raison  $1/|r| > 1$  et de terme initial strictement positif, et donc diverge vers  $+\infty$ . On en déduit d'après le théorème précédent que  $|u_n| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$  et donc que  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ . □

**Remarque 4.54.**

1. L'hypothèse de ne pas changer de signe à partir d'un certain rang les points 3. et 4. du théorème 4.52 est cruciale. Par exemple si  $u_n = (-1)^n/(n+1)$ , alors  $\frac{1}{u_{2n}} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$  et  $\frac{1}{u_{2n+1}} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} -\infty$ .
2. Avec les deux théorèmes précédents on peut traiter la limite de  $\left(\frac{u_n}{v_n}\right)_{n \in \mathbb{N}}$ . Par exemple si  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$  alors que  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$  et  $v_n > 0$  à partir d'un certain rang, on a  $\frac{1}{v_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$  et donc  $\frac{u_n}{v_n} = u_n \cdot \frac{1}{v_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ .  
Les formes indéterminées de  $\frac{u_n}{v_n}$  sont «  $\frac{\infty}{\infty}$  », «  $\frac{0}{0}$  », et «  $\frac{\infty}{0}$  » lorsque l'on n'a pas d'information sur le signe du dénominateur.

**Remarque 4.55.** Si  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  sont deux suites avec  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  à valeurs strictement positives on peut s'intéresser à la limite de  $(u_n^{v_n})_{n \in \mathbb{N}}$ . Dans ce cas on peut écrire

$$u_n^{v_n} = \exp(v_n \ln(u_n)),$$

et on se retrouve alors à étudier la limite de  $v_n \ln(u_n)$ . Par exemple si  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$  et  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$  alors  $v_n \ln(u_n) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$  et donc  $u_n^{v_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ .

Les formes indéterminées de  $u_n^{v_n}$  sont donc

1. «  $1^\infty$  » : lorsque  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \pm\infty$  et  $\ln(u_n) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ , c'est-à-dire  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 1$ .
2. «  $0^0$  » : lorsque  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$  et  $\ln(u_n) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} -\infty$ , c'est-à-dire  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ .
3. «  $\infty^0$  » : lorsque  $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$  et  $\ln(u_n) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ , c'est-à-dire  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ .

## 4.9 Comparaison de suites

**Définition 4.56.** Soient  $(u_n)_{n \geq 0}$  et  $(v_n)_{n \geq 0}$  deux suites, avec  $v_n \neq 0$  à partir d'un certain rang  $n_0$ .

1. On dit que  $(u_n)_{n \geq 0}$  est **dominée** par  $(v_n)_{n \geq 0}$ , et on note  $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(v_n)$  (le symbole  $O$  se lit « grand  $O$  ») si la suite  $(u_n/v_n)_{n \geq n_0}$  est bornée, c'est-à-dire

$$\exists M \in \mathbb{R}, \forall n \geq n_0, |u_n| \leq M|v_n|.$$

2. On dit que  $(u_n)_{n \geq 0}$  est **négligeable** devant  $(v_n)_{n \geq 0}$ , et on note  $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}(v_n)$  (le symbole  $o$  se lit « petit  $o$  ») si

$$\frac{u_n}{v_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0.$$

3. On dit que  $(u_n)_{n \geq 0}$  est **équivalente** à  $(v_n)_{n \geq 0}$ , et on note  $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} v_n$  si

$$\frac{u_n}{v_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 1.$$

**Exemples 4.57.** On a

$$4n + 1 = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(n), \quad n = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}(n^2), \quad n^2 + n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n^2.$$

**Remarque 4.58.** 1. Si  $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}(v_n)$ , alors  $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(v_n)$ .

2.  $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{o}(1)$  signifie que  $(u_n)_{n \geq 0}$  tend vers 0.

3. Si  $(u_n)_{n \geq 0}$  et  $(v_n)_{n \geq 0}$  sont deux suites non nulles à partir d'un certain rang, alors  $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} v_n$  si et seulement si  $v_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} u_n$ .

4. Si  $u_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(w_n)$  et  $v_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(w_n)$ , alors  $u_n + v_n = \underset{n \rightarrow +\infty}{O}(w_n)$ .

5. Si  $u_n = o_{n \rightarrow +\infty}(w_n)$  et  $v_n = o_{n \rightarrow +\infty}(w_n)$ , alors  $u_n + v_n = o_{n \rightarrow +\infty}(w_n)$ .
6. Attention on n'a pas le droit de sommer les équivalents : si  $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} v_n$  et  $a_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} b_n$ ,  $(u_n + a_n)_{n \geq 0}$  n'est pas forcément équivalente à  $(v_n + b_n)_{n \geq 0}$ . Par exemple  $n + (-1)^n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n$  et  $-n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -n + 1$ , mais  $((-1)^n)_{n \geq 0}$  n'est pas équivalente à la suite constante égale à 1.
7. Si  $u_n = o_{n \rightarrow +\infty}(v_n)$ , alors  $u_n + v_n = O_{n \rightarrow +\infty}(v_n)$ .

**Proposition 4.59.** Soient  $a$  un réel strictement positif et  $r$  un réel strictement supérieur à 1. On a

1.  $n! = o_{n \rightarrow +\infty}(n^n)$ ,
2.  $r^n = o_{n \rightarrow +\infty}(n!)$ ,
3.  $n^a = o_{n \rightarrow +\infty}(r^n)$ ,
4.  $\ln(n) = o_{n \rightarrow +\infty}(n^a)$ .

*Démonstration.* Pour la preuve de 1., on a

$$\frac{n!}{n^n} = \prod_{k=1}^n \frac{k}{n},$$

et donc

$$0 \leq \frac{n!}{n^n} \leq \frac{1}{n} \cdot 1 \cdot 1 \cdots 1 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

La suite  $(n!/n^n)_{n \geq 1}$  tend bien vers 0.

Pour la preuve de 2., on a

$$\frac{r^n}{n!} = \prod_{k=1}^n \frac{r}{k},$$

et comme la suite  $(r/k)_{k \geq 1}$  tend vers 0 il existe  $K \in \mathbb{N}$  tel que pour tout  $k \geq K$  on a  $0 \leq r/k \leq 1/2$ . Mais alors, pour  $n \geq K$ , on a

$$0 \leq \frac{r^n}{n!} \leq \left( \prod_{k=K}^n \frac{r}{k} \right) \left( \frac{1}{2} \right)^{n-K} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

La suite  $(r^n/n!)_{n \geq 1}$  tend bien vers 0.

Pour la preuve de 3., en notant  $h = r - 1 > 0$  et en utilisant le binôme de Newton, on obtient

$$\frac{n^a}{r^n} = \frac{n^a}{(1+h)^n} = \frac{n^a}{\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} h^k}.$$

En fixant  $k_0 = E(a) + 1$  (où  $E$  désigne la partie entière) et en supposant  $n \geq k_0$ , on déduit

$$0 \leq \frac{n^a}{r^n} \leq \frac{n^a}{\binom{n}{k_0} h^{k_0}}.$$

Il reste à minorer  $\binom{n}{k_0}$ . Supposons  $n \geq 2k_0$ . Alors pour  $0 \leq i \leq k_0$  on a

$$n - i \geq n - k_0 \geq n - \frac{n}{2} = \frac{n}{2},$$

et donc

$$\binom{n}{k_0} = \frac{n!}{k_0!(n-k_0)!} = \frac{n(n-1) \cdots (n-k_0+1)}{k_0!} \geq \frac{1}{2^{k_0} k_0!} n^{k_0}.$$

On en déduit, puisque  $k_0 > a$ ,

$$0 \leq \frac{n^a}{r^n} \leq \frac{2^{k_0} k_0!}{h^{k_0}} \frac{1}{n^{k_0-a}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

La suite  $(n^a/r^n)_{n \geq 1}$  tend bien vers 0.

Pour la preuve de 4., on a

$$\frac{\ln(n)}{n^a} = \frac{\ln(n)}{e^{a \ln(n)}}.$$

Posons  $\alpha_n = E(\ln(n))$ . Comme

$$\ln(n) \leq \alpha_n + 1 \quad \text{et} \quad e^{a \ln(n)} \geq e^{a \alpha_n},$$

on obtient

$$0 \leq \frac{\ln(n)}{n^a} \leq \frac{\alpha_n}{(e^a)^{\alpha_n}} + \frac{1}{n^a}.$$

Or  $(1/n^a)_{n \geq 1}$  tend vers 0 et comme  $(\alpha_n)_{n \geq 1}$  tend vers  $+\infty$  la suite  $(\alpha_n/(e^a)^{\alpha_n})_{n \geq 1}$  tend également vers 0 d'après le point 3. démontré au-dessus. La suite  $(\ln(n)/n^a)_{n \geq 1}$  tend donc bien vers 0.  $\square$

**Remarque 4.60.** On a les comparaisons suivantes (on utilise ici la notation  $u_n \ll v_n$  lorsque  $u_n = o_{n \rightarrow +\infty}(v_n)$  pour présenter ces comparaisons de manière synthétique) :

$$1 \ll \ln(\ln(n)) \ll \ln(n) \ll \sqrt{n} \ll n \ll n^2 \ll 2^n \ll e^n \ll 10^n \ll n! \ll n^n.$$

**Remarque 4.61.** Les notations  $o$  et  $O$  sont très utiles en informatique, en particulier lorsque l'on calcule la complexité d'un algorithme. Par exemple, il est plus intéressant d'avoir un algorithme de complexité  $O_{n \rightarrow +\infty}(n^2)$  qu'un algorithme de complexité  $O_{n \rightarrow +\infty}(2^n)$ .

## 4.10 Suites de Cauchy

**Définition 4.62.** On dit qu'une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est de Cauchy si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, \forall m_1 \geq N, \forall m_2 \geq N, |u_{m_1} - u_{m_2}| \leq \varepsilon.$$

On admet le Théorème suivant.

**Théorème 4.63.** Une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est de Cauchy si et seulement si il existe  $\ell \in \mathbb{R}$  tel que  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \ell$ .

# Chapitre 5

## Continuité des fonctions réelles

### 5.1 Limite de fonction

Définissons la notion de limite de fonction, finie ou infinie, en un point ou à l'infini.

**Définition 5.1.** Soient  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f$  une fonction définie sur  $I$ ,  $x_0 \in \mathbb{R}$  un élément de  $I$  ou du bord de  $I$  et  $\ell \in \mathbb{R}$ . On dit que  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$  si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, \forall x \in I, \quad |x - x_0| \leq \delta \Rightarrow |f(x) - \ell| \leq \varepsilon.$$

**Définition 5.2.** Soient  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f$  une fonction définie sur  $I$  et  $x_0 \in \mathbb{R}$  un élément du bord de  $I$ .

1. On dit que  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = +\infty$  si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \exists \delta > 0, \forall x \in I, \quad |x - x_0| \leq \delta \Rightarrow f(x) \geq A.$$

2. On dit que  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$  si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \exists \delta > 0, \forall x \in I, \quad |x - x_0| \leq \delta \Rightarrow f(x) \leq A.$$

**Définition 5.3.** Soient  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f$  une fonction définie sur  $I$  et  $\ell \in \mathbb{R}$ .

1. On dit que  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \ell$  si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists B \in \mathbb{R}, \forall x \in I, \quad x \geq B \Rightarrow |f(x) - \ell| \leq \varepsilon.$$

2. On dit que  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \ell$  si

$$\forall \varepsilon > 0, \exists B \in \mathbb{R}, \forall x \in I, \quad x \leq B \Rightarrow |f(x) - \ell| \leq \varepsilon.$$

**Définition 5.4.** Soient  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  et  $f$  une fonction définie sur  $I$ .

1. On dit que  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$  si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \exists B \in \mathbb{R}, \forall x \in I, \quad x \geq B \Rightarrow f(x) \geq A.$$

2. On dit que  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty$  si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \exists B \in \mathbb{R}, \forall x \in I, \quad x \geq B \Rightarrow f(x) \leq A.$$

3. On dit que  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = +\infty$  si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \exists B \in \mathbb{R}, \forall x \in I, \quad x \leq B \Rightarrow f(x) \geq A.$$



4. On dit que  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = -\infty$  si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \exists B \in \mathbb{R}, \forall x \in I, \quad x \leq B \Rightarrow f(x) \leq A.$$

**Remarque 5.5.**

1. Lorsque  $x_0 \in \mathbb{R}$  et  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = +\infty$  ou  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$ , la droite verticale d'équation  $x = x_0$  est une asymptote verticale au graphe de  $f$ .
2. Lorsque  $\ell \in \mathbb{R}$  et  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \ell$  ou  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \ell$ , la droite horizontale d'équation  $y = \ell$  est asymptote horizontale au graphe de  $f$ .

**Exemples 5.6.** On a  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \ln(x) = +\infty$  et  $\lim_{x \rightarrow -\infty} \exp(x) = 0$ .

On a la caractérisation suivante des limites de fonction.

**Théorème 5.7** (Caractérisation séquentielle des limites). *Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $x_0$  un élément de  $I$  ou une borne de  $I$  (avec possiblement  $x_0 = +\infty$  ou  $x_0 = -\infty$ ), et  $\ell$  un réel ou  $\ell = +\infty$  ou  $\ell = -\infty$ . Alors  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$  si et seulement si pour toute suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  d'éléments de  $I$  satisfaisant  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} x_0$  on a  $f(u_n) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$ .*

*Démonstration.* Démontrons ce résultat dans le cas où  $x_0 \in \mathbb{R}$  et  $\ell \in \mathbb{R}$ , les autres cas pouvant être démontrés de manière similaire.

Supposons tout d'abord que  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$  et considérons une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  d'éléments de  $I$  satisfaisant  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} x_0$ . Soit  $\varepsilon > 0$ . Comme  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$  il existe  $\delta > 0$  tel que

$$\forall x \in I, \quad |x - x_0| \leq \delta \Rightarrow |f(x) - \ell| \leq \varepsilon.$$

Mais comme  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} x_0$  il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \Rightarrow |u_n - x_0| \leq \delta.$$

On en déduit

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \Rightarrow |f(u_n) - \ell| \leq \varepsilon.$$

On a bien  $f(u_n) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$ .

Montrons maintenant que si  $f(x)$  ne converge pas vers  $\ell$  lorsque  $x$  tend vers  $x_0$ , alors il existe une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  d'éléments de  $I$  satisfaisant  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} x_0$  mais telle que  $(f(u_n))_{n \in \mathbb{N}}$  ne converge pas vers  $\ell$ . Par contraposée, montrer ce résultat revient à conclure la démonstration du théorème.

On suppose donc que  $f(x)$  ne converge pas vers  $\ell$  lorsque  $x$  tend vers  $x_0$ , c'est-à-dire

$$\exists \varepsilon > 0, \forall \delta > 0, \exists x \in \mathbb{R}, |x - x_0| \leq \delta \text{ et } |f(x) - \ell| > \varepsilon.$$

Pour ce  $\varepsilon$ , en considérant  $\delta_n = \frac{1}{n+1}$ , on en déduit l'existence d'une suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  vérifiant  $|u_n - x_0| \leq \frac{1}{n+1}$  et  $|f(u_n) - \ell| > \varepsilon$ . Cette suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est bien une suite d'éléments de  $I$  satisfaisant  $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} x_0$  mais telle que  $(f(u_n))_{n \in \mathbb{N}}$  ne converge pas vers  $\ell$ . □

Une conséquence directe du théorème précédent est que les propriétés des limites de suites sont satisfaites par les limites de fonction.

**Théorème 5.8.** *Soient  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  et  $f, g$  et  $h$  des fonctions définies sur  $I$  et  $x_0$  un élément de  $I$  ou du bord de  $I$  (avec possiblement  $x_0 = +\infty$  ou  $x_0 = -\infty$ ).*

1. Soient  $\ell_1, \ell_2$  des réels tels que  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell_1$  et  $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \ell_2$  et  $a, b \in \mathbb{R}$ . Alors

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (af + bg)(x) = a\ell_1 + b\ell_2, \quad \text{et} \quad \lim_{x \rightarrow x_0} (fg)(x) = \ell_1\ell_2.$$

Si de plus  $g$  ne s'annule pas et  $\ell \neq 0$  alors

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f}{g}(x) = \frac{\ell_1}{\ell_2}.$$

2. Soient  $\ell_1, \ell_2$  des réels tels que  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell_1$  et  $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \ell_2$ . Si  $f(x) \leq g(x)$  pour tout  $x \in I$ , alors  $\ell_1 \leq \ell_2$ .
3. Soit  $\ell \in \mathbb{R}$  tel que  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = \ell$ . Si  $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$  pour tout  $x \in I$ , alors  $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \ell$ .
4. Si  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = +\infty$  et  $f(x) \leq g(x)$  pour tout  $x \in I$ , alors  $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = +\infty$ .
5. Si  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$  et  $f(x) \geq g(x)$  pour tout  $x \in I$ , alors  $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = -\infty$ .

**Exemple 5.9.** Considérons les fonctions  $f, g$  et  $h$  définies sur  $I = ]0, +\infty[$  par  $g(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ ,  $f(x) = \frac{1}{x}$  et  $h(x) = -\frac{1}{x}$  pour tout  $x \in I$ . Alors comme  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ ,  $\lim_{x \rightarrow +\infty} h(x) = 0$  et  $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$  pour tout  $x \in I$  on a  $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$ .

**Théorème 5.10** (Composition de limites). Soient  $I$  et  $J$  deux intervalles de  $\mathbb{R}$  et deux fonctions  $f : I \rightarrow J$  et  $g : J \rightarrow \mathbb{R}$ . On suppose qu'il existe  $x_0$  un élément de  $I$  ou du bord de  $I$  (possiblement  $x = +\infty$  ou  $x = -\infty$ ),  $y_0$  un élément de  $J$  ou du bord de  $J$  (possiblement  $y_0 = +\infty$  ou  $y_0 = -\infty$ ) et  $\ell \in \mathbb{R}$  ou  $\ell = +\infty$  ou  $\ell = -\infty$  tels que

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y_0, \quad \text{et} \quad \lim_{y \rightarrow y_0} g(y) = \ell.$$

Alors

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (g \circ f)(x) = \ell.$$

*Démonstration.* On démontre ce résultat dans le cas  $x_0 \in I$  et  $\ell \in \mathbb{R}$ , les autres cas pouvant être démontrés de manière similaire. Soit  $\varepsilon > 0$ . Comme  $\lim_{y \rightarrow y_0} g(y) = \ell$  il existe  $\delta > 0$  tel que pour tout  $y \in J$  on a

$$|y - y_0| \leq \delta \Rightarrow |g(y) - \ell| \leq \varepsilon.$$

Mais comme  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y_0$  il existe  $\gamma > 0$  tel que pour tout  $x \in I$ ,

$$|x - x_0| \leq \gamma \Rightarrow |f(x) - y_0| \leq \delta.$$

Ainsi on a montré le résultat suivant :

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \gamma > 0, \forall x \in I, \quad |x - x_0| \leq \gamma \Rightarrow |g(f(x)) - \ell| \leq \varepsilon,$$

ce qui signifie que  $\lim_{x \rightarrow x_0} (g \circ f)(x) = \ell$ . □

**Exemple 5.11.** Considérons  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  et  $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définies pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $g(x) = \exp(x)$  et  $f(x) = -x^3 + 2$ . Ainsi  $g \circ f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est défini pour tout  $x \in \mathbb{R}$  par  $g \circ f(x) = \exp(-x^3 + 2)$ . Comme

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty, \quad \text{et} \quad \lim_{y \rightarrow -\infty} g(y) = 0,$$

on a

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} (g \circ f)(x) = 0.$$

**Définition 5.12.** Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in I$  et  $\ell$  un élément de  $\mathbb{R}$  ou  $\ell = +\infty$  ou  $\ell = -\infty$ .

1. On dit que  $\ell$  est la limite à gauche de  $f$  (on note  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f(x) = \ell$  ou  $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \ell$ ) si la restriction de  $f$  à  $I \cap ]-\infty, x_0[$  admet  $\ell$  pour limite en  $x_0$ .
2. On dit que  $\ell$  est la limite à droite de  $f$  (on note  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f(x) = \ell$  ou  $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \ell$ ) si la restriction de  $f$  à  $I \cap ]x_0, +\infty[$  admet  $\ell$  pour limite en  $x_0$ .

**Exemple 5.13.** Si  $E$  est la fonction partie entière, pour tout  $k \in \mathbb{N}$  on a  $\lim_{\substack{x \rightarrow k \\ x > k}} E(x) = k$  et  $\lim_{\substack{x \rightarrow k \\ x < k}} E(x) = k - 1$ .

**Remarque 5.14.** Si  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0$  est un élément  $I$  qui n'est pas un bord de  $I$  et  $\ell$  un élément de  $\mathbb{R}$ , alors  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$  si et seulement si  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f(x) = \ell$ .

## 5.2 Continuité

**Définition 5.15.** Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  et  $x_0 \in I$ . On dit que  $f$  est continue en  $x_0$  si  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$ .

**Définition 5.16.** Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ . On dit que  $f$  est continue sur  $I$  si  $f$  est continue en tout  $x_0 \in I$ .

**Exemples 5.17.** Les fonctions polynomiales, les fonctions  $\cos$ ,  $\sin$ ,  $\tan$ ,  $\arccos$ ,  $\arcsin$ ,  $\arctan$ ,  $\exp$ ,  $\ln$ ,  $\cosh$ ,  $\sinh$ ,  $\tan$  sont continues sur leur ensemble de définition.

**Théorème 5.18.** Soient  $I$  et  $J$  deux intervalles de  $\mathbb{R}$ , et  $f : I \rightarrow J, g : J \rightarrow J$  et  $h : J \rightarrow \mathbb{R}$  des fonction continues.

1. Les fonctions  $f + g : I \rightarrow \mathbb{R}$  et  $f \cdot g : I \rightarrow \mathbb{R}$  sont continues.
2. Si la fonction  $g$  ne s'annule pas, alors la fonction  $\frac{f}{g} : I \rightarrow \mathbb{R}$  est continue.
3. La fonction  $h \circ f : I \rightarrow \mathbb{R}$  est continue.

*Démonstration.* Démontrons ce résultat dans le cas de la somme, les autres résultats pouvant être démontrés de manière similaire en utilisant les propriétés des limites de fonction. Soit  $x_0 \in I$ . Comme  $f$  et  $g$  sont continues en  $x_0$ , on a  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$  et  $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = g(x_0)$ . Mais alors, par propriété d'opération sur les limites, on en déduit que  $\lim_{x \rightarrow x_0} (f + g)(x) = (f + g)(x_0)$ , et donc que  $f + g$  est continue en  $x_0$ . Comme ce résultat est vrai pour tout  $x_0 \in I$ ,  $f + g$  est continue sur  $I$ .  $\square$

**Exemple 5.19.** La fonction  $x \mapsto \sqrt{\frac{2+x^4}{1+x^2}}$  est continue sur  $\mathbb{R}$ .

**Définition 5.20.** Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  et  $x_0$  un élément de  $I$  ou du bord de  $I$ .

1. On dit que  $f$  est continue à gauche en  $x_0$  si  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f(x) = f(x_0)$ .
2. On dit que  $f$  est continue à droite en  $x_0$  si  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f(x) = f(x_0)$ .

**Exemple 5.21.** La fonction partie entière  $E$  est continue en tout point de  $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Z}$ , et continue à droite en tout point de  $\mathbb{R}$ .

**Remarque 5.22.** Si  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  et  $x_0$  est un point de  $I$  qui n'est pas un bord de  $I$ , alors  $f$  est continue en  $x_0$  si et seulement si  $f$  est continue à droite et continue à gauche en  $x_0$ .

**Définition 5.23.** Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ ,  $x_0 \in I$  et  $f : I \setminus \{x_0\} \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue. On suppose qu'il existe  $\ell \in \mathbb{R}$  tel que  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f(x) = \ell$ . Alors la fonction  $\tilde{f} : I \rightarrow \mathbb{R}$  définie par

$\tilde{f}(x) = f(x)$  pour  $x \in I \setminus \{x_0\}$  et  $\tilde{f}(x_0) = \ell$  est continue sur  $I$  et est appelée le prolongement par continuité de  $f$  en  $x_0$ .

**Exemples 5.24.**

1. La fonction  $f : \mathbb{R}^* \rightarrow \mathbb{R}$  définie par  $f(x) = x^3$  pour tout  $x < 0$  et  $f(x) = x^2$  pour tout  $x > 0$  peut prolongée par continuité en 0 (en définissant  $\tilde{f}(x) = f(x)$  pour tout  $x \in \mathbb{R}^*$  et  $\tilde{f}(0) = 0$ ).
2. La fonction  $g : \mathbb{R}^* \rightarrow \mathbb{R}$  définie par  $g(x) = \frac{\sin(x)}{x}$  pour tout  $x \in \mathbb{R}^*$  peut être prolongée par continuité en 0, en définissant  $\tilde{g}(x) = g(x)$  pour tout  $x \in \mathbb{R}^*$  et  $\tilde{g}(0) = 1$ . En effet,  $\lim_{x \rightarrow 0} g(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x) - \sin(0)}{x - 0} = \sin'(0) = \cos(0) = 1$ .

### 5.3 Théorème des valeurs intermédiaires et image continue d'un intervalle

**Théorème 5.25** (Théorème des valeurs intermédiaires). *Soit  $I = [a, b]$  un intervalle de  $\mathbb{R}$  avec  $a < b$ , et  $f; [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue. Soit  $y \in \mathbb{R}$  tel que  $f(a) \leq y \leq f(b)$  ou  $f(b) \leq y \leq f(a)$ . Alors il existe  $x \in [a, b]$  tel que  $f(x) = y$ .*

*Démonstration.* Si  $y = f(a)$  ou  $y = f(b)$  il n'y a rien à démontrer. Supposons que  $f(a) < y < f(b)$  (le cas  $f(a) > y > f(b)$  pouvant être démontré de manière similaire). Définissons  $a_0 = a$ ,  $b_0 = b$ , et procédons par dichotomie, en définissant une des suites  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$  par récurrence.

Il y a à chaque fois deux cas possibles. A la première étape, soit  $f(a_0) \leq y \leq f\left(\frac{a_0+b_0}{2}\right)$ , et dans ce cas on définit  $a_1 = a_0$  et  $b_1 = \frac{a_0+b_0}{2}$ , soit  $f\left(\frac{a_0+b_0}{2}\right) < y \leq f(b_0)$ , et dans ce cas on définit  $a_1 = \frac{a_0+b_0}{2}$  et  $b_1 = b_0$ . Dans les deux cas on remarque que  $f(a_1) \leq y \leq f(b_1)$ . On procède de manière similaire pour les étapes suivantes : pour  $n \geq 1$  on définit  $a_{n+1} = a_n$  et  $b_{n+1} = \frac{a_n+b_n}{2}$  si  $f(a_n) \leq y \leq f\left(\frac{a_n+b_n}{2}\right)$ , et  $a_{n+1} = \frac{a_n+b_n}{2}$  et  $b_{n+1} = b_n$  si  $f\left(\frac{a_n+b_n}{2}\right) < y \leq f(b_n)$ .

Démontrons par récurrence que la propriété  $H_n : b_n - a_n = \frac{b-a}{2^n}$  est vraie pour tout  $n \in \mathbb{N}$ .  $H_0$  est vraie, puisque  $a_0 = a$  et  $b_0 = b$ . Soit maintenant  $n \in \mathbb{N}$ . Supposons que  $H_n$  est vraie. Il y a deux cas possibles : soit  $f(a_n) \leq y \leq f\left(\frac{a_n+b_n}{2}\right)$ , mais alors  $b_{n+1} - a_{n+1} = \frac{a_n+b_n}{2} - a_n = \frac{b_n - a_n}{2}$ , soit  $f\left(\frac{a_n+b_n}{2}\right) < y \leq f(b_n)$ , mais alors  $b_{n+1} - a_{n+1} = b_n - \frac{a_n+b_n}{2} = \frac{b_n - a_n}{2}$ . Dans les deux cas, puisque  $H_n$  est supposée vraie, on a  $b_{n+1} - a_{n+1} = \frac{b_n - a_n}{2} = \frac{1}{2} \frac{b-a}{2^n} = \frac{b-a}{2^{n+1}}$ , et donc  $H_{n+1}$  est vraie. On en déduit que  $H_n$  est bien vraie pour tout  $n \in \mathbb{N}$ . En particulier  $b_n - a_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$ .

Il est de plus facile de voir que la suite  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  ainsi définie est croissante. En effet, pour  $n \in \mathbb{N}$ , soit  $a_{n+1} = a_n$ , mais alors en particulier  $a_n \geq a_{n+1}$ , soit  $a_{n+1} = \frac{a_n+b_n}{2}$ , mais comme  $b_n - a_n = \frac{b-a}{2^n}$  on a  $b_n \geq a_n$  et on en déduit que dans ce cas on a également  $a_{n+1} \geq a_n$ .

En utilisant des arguments similaires on peut voir que la suite  $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est décroissante. Les suites  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  et  $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$  sont donc adjacentes, et convergent donc vers une même limite  $x \in [a, b]$ . Comme  $f(a_n) \leq y \leq f(b_n)$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  et  $\lim_{n \rightarrow +\infty} f(a_n) = f(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f(b_n)$  par continuité de  $f$ , on en déduit  $f(x) \leq y \leq f(x)$ , c'est-à-dire  $y = f(x)$ .  $\square$

**Exemple 5.26.** *Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie par  $f(x) = x^2 + \cos(x) - 3$  s'annule sur l'intervalle  $[0, 4]$ . En effet  $f$  est continue sur  $[0, 4]$ , et vérifie  $f(0) = -2 < 0$  et  $f(4) = 13 + \cos(4) > 0$ , on peut appliquer le théorème des valeurs intermédiaires.*

**Remarque 5.27.** *Il est important que  $I$  soit un intervalle pour pouvoir appliquer le théorème de valeurs intermédiaires. Par exemple la fonction  $f; \mathbb{R}^* \rightarrow \mathbb{R}$  définie par  $f(x) = \frac{1}{x}$  pour tout  $x \in \mathbb{R}^*$  vérifie  $f(1) > 0$  et  $f(-1) < 0$  mais il n'existe pas de  $x \in [-1, 1]$  tel que  $f(x) = 0$  ( $f$  n'est pas définie sur  $[-1, 1]$ ).*

**Proposition 5.28.** *L'image d'un intervalle par une fonction continue est un intervalle.*

*Démonstration.* On considère  $I$  un intervalle et  $f$  une fonction continue définie sur cet intervalle. Soient  $y_1$  et  $y_2$  deux éléments distincts de  $f(I)$ , avec  $y_1 < y_2$ . Il existe  $x_1, x_2 \in I$  tels que  $y_1 = f(x_1)$  et  $y_2 = f(x_2)$ . Supposons sans perte de généralité que  $x_1 < x_2$ . D'après le théorème des valeurs intermédiaires, pour tout  $y \in [y_1, y_2]$  il existe  $x \in [x_1, x_2] \subset I$  tel que  $y = f(x)$ .  $f(I)$  est donc bien un intervalle.  $\square$

**Exemple 5.29.** *Si  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est définie par  $f(x) = x^2 + 1$  pour tout  $x \in \mathbb{R}$ , alors  $f([-1, 4]) = [1, 17]$ .*

**Remarque 5.30.** *Si  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  est une fonction continue strictement croissante,  $f([a, b]) = [f(a), f(b)]$ . A l'inverse, si  $f$  est strictement décroissante,  $f([a, b]) = [f(b), f(a)]$ .*

On admet le théorème suivant, dont la preuve repose sur le théorème de Bolzano-Weierstrass. On rappelle qu'un segment est un intervalle du type  $[a, b]$ .

**Théorème 5.31.** *Soit  $I$  un segment et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue. Alors  $f$  est bornée et atteint ses bornes. De plus  $f(I)$  est un segment.*

**Remarque 5.32.** Le résultat précédent est faux en général si  $I$  n'est pas un segment, par exemple  $\exp(\mathbb{R}) = \mathbb{R}_+^*$ ,  $\exp(\mathbb{R}_-) = ]0, 1]$  et  $f(]0, 1]) = [1, +\infty[$  lorsque  $f(x) = 1/x$ .

## 5.4 Limite, continuité et monotonie

Les fonctions monotones ont des propriétés particulières.

**Théorème 5.33** (Théorème de la limite monotone). Soit  $I$  un intervalle et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction monotone sur  $I$ . Alors  $f$  admet une limite (finie ou infinie) aux bords de  $I$ . De plus  $f$  admet en tout point  $x_0$  de  $I$  une limite à gauche et à droite avec, dans le cas où  $f$  est croissante,

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f(x) \leq f(x_0) \leq \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f(x),$$

et dans le cas où  $f$  est décroissante,

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f(x) \geq f(x_0) \geq \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f(x).$$

*Démonstration.* La preuve de ce Théorème est admise. L'idée, par exemple pour une fonction croissante, est de montrer que  $f$  a pour limite  $\sup(f(I))$  au bord droit de  $I$  (qui peut être  $+\infty$ ) et a pour limite  $\inf(f(I))$  au bord gauche de  $I$  (qui peut être  $-\infty$ ).  $\square$

**Théorème 5.34.** Soit  $I$  un intervalle et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue strictement monotone. Alors  $f$  induit une bijection de  $I$  sur  $J = f(I)$  et sa réciproque est strictement monotone et continue.

*Démonstration.* On suppose sans perte de généralité que  $f$  est strictement croissante. On remarque d'abord que  $f$  est injective, puisque si  $x, y \in I$  avec  $x < y$  alors  $f(x) < f(y)$ . Il s'agit donc d'une bijection de  $I$  vers  $J = f(I)$ , qui est un intervalle d'après la Proposition 5.28.

De plus sa réciproque est strictement monotone. En effet, pour  $u, v \in J$  avec  $u < v$ , on a  $u = f(f^{-1}(u)) < f(f^{-1}(v)) = v$  et donc  $f^{-1}(u) < f^{-1}(v)$ ,  $f^{-1}$  est strictement croissante.

Enfin, d'après le théorème précédent,  $f^{-1}$  admet des limites à gauche et à droite en tout point  $x_0 \in J$ , et

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f^{-1}(x) \leq f^{-1}(x_0) \leq \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f^{-1}(x).$$

Mais si  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f^{-1}(x) < f^{-1}(x_0)$ , comme  $f^{-1}$  est strictement croissante, elle ne peut pas prendre les

valeurs comprises entre  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f^{-1}(x)$  et  $f^{-1}(x_0)$ , ce qui contredit le fait que  $f^{-1}(J) = I$  est un intervalle.

Le raisonnement est similaire pour  $\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f^{-1}(x)$ , et on a donc

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x < x_0}} f^{-1}(x) = f^{-1}(x_0) = \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x > x_0}} f^{-1}(x),$$

ce qui veut dire que  $f^{-1}$  est continue en  $x_0$ .  $\square$

**Remarque 5.35.** Ce théorème a par exemple été utilisé pour définir les fonction trigonométriques réciproques : la fonction sin est strictement croissante sur  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ , avec  $\sin([-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]) = [-1, 1]$ , et sa restriction à  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$  définit donc une bijection de  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$  sur  $[-1, 1]$ , de bijection réciproque arcsin.

**Exemple 5.36.** La fonction  $f : ]0, \infty[ \rightarrow \mathbb{R}$  définie par  $f(x) = \frac{1}{x(x+1)}$  pour tout  $x > 0$  est strictement décroissante, et vérifie  $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = +\infty$  et  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ . Il s'agit donc d'une bijection de  $]0, +\infty[$  sur  $]0, +\infty[$ .

**Théorème 5.37.** Soit  $I$  un intervalle et  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue et injective. Alors  $f$  est strictement monotone et induit une bijection de  $I$  sur  $J = f(I)$ , de réciproque strictement monotone et continue.

# Bibliographie

- [1] Cours de première année disponible en ligne sur le site [https://les-mathematiques.net/serveur\\_cours/section/2/](https://les-mathematiques.net/serveur_cours/section/2/)
- [2] J.P. Ramis, A Warusfel, X. Buff, J Garnier, E. Halberstadt, F. Moulin, M. Ramis, J. Sauloy, *Mathématiques Tout-en-un pour la Licence 1*, Dunod, 3ème édition, 2018.
- [3] Notes de cours d'analyse 1 pour Informaticiens de Guillaume Aubrun.