

Chapitre 15

Limites et continuité

| | |
|--|----------|
| 15 Limites et continuité | 1 |
| 15.6 Limite en un point du domaine | 2 |
| 15.15 Comparaison des limites de deux fonctions coïncidant au voisinage de a | 2 |
| 15.17 Unicité de la limite, cas réel | 2 |
| 15.23 Proposition | 2 |
| 15.30 Composition de limites | 3 |
| 15.32 Limites et inégalités strictes | 3 |
| 15.33 Limite et inégalités larges | 4 |
| 15.34 Caractérisations séquentielle de la limite d'une fonction | 4 |
| 15.39 Théorème de la limite monotone | 5 |
| 15.59 Théorème des valeurs intermédiaires : version 1 | 5 |
| 15.60 Théorème des valeurs intermédiaires : version 2 | 6 |
| 15.61 Théorème des valeurs intermédiaires : version 3 | 6 |
| 15.65 Théorème de Heine | 6 |
| 15.67 Caractérisation des intervalles compacts | 7 |
| 15.68 Image d'un compact par une fonction continue | 7 |
| 15.72 Théorème 15.72 | 7 |

15.6 Limite en un point du domaine

Proposition 15.6

Si $a \in X$ et si $f(x)$ admet une limite finie en a , alors cette limite est nécessairement égale à $f(a)$.

Comme $f(x)$ admet une limite finie b quand $x \rightarrow a$:

$$\forall \epsilon, \exists \nu > 0, \forall x \in X, |x - a| \leq \nu \Rightarrow |f(x) - b| \leq \epsilon$$

Or pour tout $\epsilon > 0$:

$$|a - a| \leq \nu \text{ (quelque soit } \nu)$$

Donc :

$$\forall \epsilon, |f(a) - b| \leq \epsilon$$

Donc $\boxed{f(a) = b}$.

15.15 Comparaison des limites de deux fonctions coïncidant au voisinage de a

Proposition 15.15

Soit f et g deux fonctions coïncidant au voisinage d'un point a . Alors, si f admet une limite (finie ou infinie) en a , alors g aussi et

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \lim_{x \rightarrow a} g(x)$$

On choisit $W \in \mathcal{V}(a)$ tel que $W \cap X = W \cap Y$ et $f|_{W \cap X} = g|_{W \cap Y}$.

Soit $b \in \mathbb{R}$ tel que $f(x)$ tend vers b quand $x \rightarrow a$.

Soit $V \in \mathcal{V}(b)$. On choisit $U \in \mathcal{V}(a)$ tel que :

$$f(U \cap X) \subset V$$

Or

$$W \cap U \in \mathcal{V}(a) \text{ et } \subset f(W \cap U \cap X)_{g(W \cap U \cap Y)} \subset V$$

Donc g admet une limite en a égale à b

15.17 Unicité de la limite, cas réel

Théorème 15.17

Soit $a \in \overline{X}$ et f une fonction réelle. Sous réserve d'existence, la limite de $f(x)$, lorsque x tend vers a est unique.

Par l'absurde. On suppose que f possède deux limites $l \neq l'$ en a .

On choisit $u \in \mathcal{V}(l)$ et $u' \in \mathcal{V}(l')$ tels que $u \cap u' = \emptyset$.

Par définition, on choisit $(W, W') \in \mathcal{V}(a)^2$ tels que $f(W \cap X) \subset U$ et $f(W' \cap X) \subset U'$.

Or $\underbrace{W \cap W'}_{\neq \emptyset} \notin \mathcal{V}(a)$ et $f(\underbrace{W \cap W' \cap X}_{\neq \emptyset}) \subset U \cap U' = \emptyset$.

Absurde.

15.23 Proposition

Proposition 15.23

Soit $a \in \overline{X}$. Soit $(Z_i)_{i \in I}$ une famille **finie** de sous-ensembles de \mathbb{R} tels que $X \in \bigcup_{i \in I} Z_i$ (on dit que (Z_i) est un **recouvrement** de X). La fonction f admet au point a une limite ℓ (finie ou infinie) si et seulement si pour tout i tel que la limite de f en a sur Z_i est envisageable, cette limite existe et vaut ℓ .

\Rightarrow

On suppose que $\lim_a f = \ell$.

Soit $i \in I$ tel que $a \in \overline{X \cap Z_i}$.

Soit $V \in \mathcal{V}(\ell)$. On choisit $U \in \mathcal{V}(a)$ tel que $f(U \cap X) \subset V$.

EN particulier $f(\underbrace{U \cap X \cap Z_i}_{\subset U \cap X}) \subset V = f|_{X \cap Z_i}(U \cap X \cap Z_i)$.

 \Leftarrow

Notons $J \subset I$ l'ensemble des indices pour lesquels la limite est envisageable en Z_i .

Soit $V \in \mathcal{V}(\ell)$. Pour tout $i \in J$, comme $\lim_{x \rightarrow a, x \in Z_i} f = \ell$ on choisit $U_i \in \mathcal{V}(a)$ tel que $f|_{Z_i \cap X}(U_i \cap Z_i \cap X) \subset V$.

On pose $U = \bigcap_{i \in J} U_i \in \mathcal{V}(a)$ car J est fini.

On choisit $U' \in \mathcal{V}(a)$ tel que $U' \cap \left(\bigcup_{i \in I \setminus J} Z_i \right) = \emptyset$.

$f(U \cap U' \cap X) \subset V$

Donc $\boxed{\lim_a f = \ell}$.

15.30 Composition de limites

Proposition 15.30

Soit $f : X \rightarrow \mathbb{R}$, $g : Y \rightarrow \mathbb{R}$ deux fonctions avec $f(X) \subset Y$. Soit $a \in \overline{X}$, $b \in \overline{Y}$ et $c \in \overline{\mathbb{R}}$. Si $\lim_a f = b$ et si $\lim_b g = c$, alors $\lim_a g \circ f = c$.

Soit $W \in \mathcal{V}(c)$. On choisit $V \in \mathcal{V}(b)$ tel que :

$$g(V \cap Y) \subset W$$

On choisit $U \in \mathcal{V}(a)$ tel que :

$$f(U \cap X) \subset V \cap Y \quad (\lim_a f = b)$$

On a alors :

$$\boxed{g \circ f(U \cap X) \subset W}$$

15.32 Limites et inégalités strictes

Proposition 15.32

Soit $f : X \rightarrow \mathbb{R}$, $a \in \overline{X}$, $m \in \mathbb{R}$ et $M \in \mathbb{R}$.

1. Si $\lim_a f < M$ alors $f(x) < M$ au voisinage de a
2. Si $\lim_a f > m$ alors $f(x) > m$ au voisinage de a .

1. Notons $b = \lim_a f \in \overline{\mathbb{R}}$. Si $b < M$, on choisit $U \in \mathcal{V}(b)$ et $U' \in \mathcal{V}(M)$ avec $U < U'$.

Comme $\lim_a f = b$, on choisit $W \in \mathcal{V}(a)$ tel que :

$$f(W \cap X) \subset U$$

15.33 Limite et inégalités larges

Proposition 15.33

Soit $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ et $g : X \rightarrow \mathbb{R}$ deux fonctions et $a \in \overline{X}$. On suppose que f et g possèdent des limites finies en a .

Si $f(x) \leq g(x)$ au voisinage de a , alors $\lim_a f \leq \lim_a g$.

Ce résultat est le plus souvent utilisé lorsqu'une des deux fonctions est constante.

RAF : absurde + (15.32)

15.34 Caractérisations séquentielle de la limite d'une fonction

Théorème 15.34

Soit $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction et $a \in \overline{X}$ et $\ell \in \overline{\mathbb{R}}$. Sont équivalentes :

1. $\lim_a f = \ell \Leftrightarrow \forall u_n \rightarrow a, \lim f(u_n) = \ell (= f(\lim u_n))$
2. Pour toute suite (u_n) de limite a à valeurs dans X , la suite $(f(u_n))$ a pour limite ℓ .

$1 \Rightarrow 2$

On suppose que $\lim_a f = \ell$.

Soit $(u_n) \in X^{\mathbb{N}}$ avec $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} a$.

Soit $V \in \mathcal{V}(\ell)$. On choisit $U \in \mathcal{V}(a)$ tel que :

$$f(U \cap X) \subset V \quad (\lim_a f = \ell)$$

Comme $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} a$, on choisit $N \in \mathbb{N}$ tel que :

$$\forall n \geq N, u_n \in U \cap X$$

Donc :

$$\forall n \geq N, f(u_n) \in V$$

Donc :

$$f(u_n) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell$$

$1 \Leftarrow 2$

Par contraposée. On suppose que f n'admet pas ℓ comme limite en a . Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on note :

$$V_n = \begin{cases}]a - \frac{1}{n+1}, a + \frac{1}{n+1}[& \text{si } a \in \mathbb{R} \\ [n, +\infty[& \text{si } a = +\infty \\]-\infty, -n] & \text{si } a = -\infty \end{cases}$$

Par définition, il existe $W \in \mathcal{V}(\ell)$ tel que pour tout $V \in \mathcal{V}(a)$, il existe $x \in V \cap X$ et $f(x) \notin W$.

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on choisit $x_n \in V_n \cap X$ tel que $f(x_n) \notin W$.

Par construction :

$$(x_n) \in X^{\mathbb{N}}, x_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} a \text{ et } f(x_n) \not\xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell$$

15.39 Théorème de la limite monotone

Théorème 15.39

Soit $a \in \mathbb{R}$ et $b \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ avec $a < b$ et $f : [a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ une fonction croissante.

1. La limite $\lim_{a^+} f$ existe et est finie. Plus précisément, on a $f(a) \leq \lim_{a^+} f$.
2. Pour tout $c \in]a, b[$, $\lim_{c^-} f$ et $\lim_{c^+} f$ existent et sont finies. Plus précisément : $\lim_{c^-} f \leq f(c) \leq \lim_{c^+} f$.
3. La limite $\lim_b f$ existe et est soit finie, soit égale à $+\infty$.

1. On note $F = f(]a, b[)$. Comme f est définie au voisinage de a , $]a, b[\neq \emptyset$ et $F \neq \emptyset$.
Par ailleurs, comme f est croissante sur $]a, b[$, F est minorée par $f(a)$.
D'après la propriété fondamentale de \mathbb{R} , F possède une borne inférieure notée α , avec $f(a) \leq \alpha$.
Montrons par définition que $\lim_{a^+} f = \alpha$.

Soit $\epsilon > 0$, $\alpha + \epsilon$ n'est pas un minorant de F par définition de α . On choisit :

$$\alpha \leq f(x_0) < \alpha + \epsilon$$

Par croissance de f sur $]a, b[$:

$$\forall x \in]a, x_0[, \alpha \leq f(x) \leq f(x_0) < \alpha + \epsilon$$

On pose $\eta = x_0 - a > 0$, on a montré que :

$$\boxed{\forall x \in]a - \eta[, a, b[, |f(x) - \alpha| < \epsilon}$$

2. Pour $c \in]a, b[$, en appliquant (15.39.1) à $f|_{[a, b]}$, on montre que $\lim_{c^+} f$ existe et $f(c) \leq \lim_{c^+} f$.
On adapte ensuite la preuve de (15.39.1) :

$$F = f(]a, c]), \alpha = \sup(F)$$

pour montrer que $\lim_{c^-} f$ existe et

3. Par disjonction de cas.

- Si f est majorée : on adapte la 2ème partie de (15.39.2).
- Si f n'est pas majorée. Soit $A \in \mathbb{R}$. Comme f n'est pas majorée, on choisit $x_0 \in]a, b[$ tel que $f(x_0) > A$.
Comme f est croissante :

$$\forall x \geq x_0, f(x) > A$$

Donc $\lim_b f = +\infty$.

15.59 Théorème des valeurs intermédiaires : version 1

Théorème 15.59

Soit f une fonction continue sur un intervalle I d'extrémité a et b dans $\overline{\mathbb{R}}$ (avec existence des limites dans le cas des bornes infinies). Alors si $f(a) > 0$ et $f(b) < 0$ (ou l'inverse), il existe $c \in]a, b[$, tel que $f(c) = 0$.

On note $A = \{x \in I, f(x) > 0\}$.

- $A \neq \emptyset$ car f est définie et strictement positive au voisinage de a (15.32).
- A est majoré car f est strictement négative au voisinage de b (et tout élément dans ce voisinage est un majorant).

D'après la propriété fondamentale de \mathbb{R} , A possède une borne supérieure notée $c \in]a, b[$.

- On a $c \notin A$. En effet, si $f(x) > 0$, alors f est strictement positive sur un voisinage de c , et comme f est définie à droite de c , cela contredirait que c est un majorant de A .
Donc $f(c) \leq 0$.

- Si $f(c) < 0$, alors f est strictement négative au voisinage à gauche de c .
Absurde car c est le plus petit des majorants.

Conclusion, $\boxed{f(c) = 0}$.

15.60 Théorème des valeurs intermédiaires : version 2

Théorème 15.60

Soit f une fonction continue sur un intervalle I et soit $M = \sup_I f(x)$ et $m = \inf_I f(x)$ (éventuellement infinies).

Alors f prend toutes les valeurs de l'intervalle $]m; M[$:

$$\forall x_0 \in]m; M[, \exists c \in I, f(c) = x_0.$$

RAF : (15.59) à $f - x_0$.

15.61 Théorème des valeurs intermédiaires : version 3

Théorème 15.61

L'image d'un intervalle quelconque par une fonction continue est un intervalle.

Définition d'un intervalle par connexité.

15.65 Théorème de Heine

Théorème 15.65

Une fonction continue sur un segment est uniformément continue sur ce segment.

Rappel :

$$C^0(I) : \forall x \in I, \forall \epsilon > 0, \exists \eta > 0, \forall y \in I, |x - y| < \eta \Rightarrow |f(x) - f(y)| < \epsilon$$

$$Cu(I) : \forall \epsilon > 0, \exists \eta > 0, \forall (x, y) \in I^2, |x - y| < \eta \Rightarrow |f(x) - f(y)| < \epsilon$$

On raisonne par l'absurde. Soit f continue sur $[a, b]$ mais non uniformément continue sur $[a, b]$.

On choisit ϵ tel que :

$$\forall \eta > 0, \exists (x, y) \in [a, b]^2, |x - y| < \eta \text{ et } |f(x) - f(y)| \geq \epsilon$$

Ainsi, pour tout $b \in \mathbb{N}^*$, on choisit un couple $(x_n, y_n) \in [a, b]^2$ tel que :

$$|x_n - y_n| < \frac{1}{n} \text{ et } \underbrace{|f(x_n) - f(y_n)|}_{(*)} \geq \epsilon$$

En particulier (x_n) est bornée donc d'après le théorème de Bolzano-Weierstrass, on en extrait $(x_{\varphi(n)})$ suite convergente vers ℓ .

D'après le TCILPPL, $\ell \in [a, b]$.

Comme :

$$\forall n \in \mathbb{N}, |x_{\varphi(n)} - y_{\varphi(n)}| < \frac{1}{\varphi(n)} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

Alors :

$$y_{\varphi(n)} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell$$

Par continuité :

$$f(x_{\varphi(n)}) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} f(\ell) \text{ et } f(y_{\varphi(n)}) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} f(\ell)$$

Donc par opération :

$$|f(x_{\varphi(n)}) - f(y_{\varphi(n)})| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

Absurde d'après (*).

15.67 Caractérisation des intervalles compacts

Lemme 15.67

Les intervalles compacts de \mathbb{R} sont exactement les segments, c'est-à-dire les intervalles fermés bornés $[a, b]$.

Les segments sont bien compacts (BW et TCILPPL).

— Si $I =]-\infty, a[$,

$$u_n = a - n - 1 \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} -\infty \notin I$$

$$u_n = a - \frac{1}{n+1} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} a \notin I$$

15.68 Image d'un compact par une fonction continue

Lemme 15.68

L'image continue d'un compact est compact.

Soit I un segment, donc un intervalle.

Comme f est continue sur I , $f(I)$ est un intervalle (TVI v3).

Montrons que $f(I)$ est compact.

Soit $(y_n) \in f(I)^{\mathbb{N}}$. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, soit $x_n \in I$ tel que :

$$y_n = f(x_n)$$

Or I est compact (15.67), on choisit :

$$x_{\varphi(n)} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell \in I$$

$$y_{\varphi(n)} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} f(\ell) \text{ car } f \text{ est continue sur } I.$$

15.72 Théorème 15.72

Théorème 15.72

Soit I un intervalle et f une fonction continue sur I . Alors f est injective si et seulement si f est strictement monotone.



RAS



Supposons f non strictement monotone.

On peut supposer qu'il existe alors :

$$x < y < z$$

tels que $f(x) < f(y)$ et $f(z) < f(y)$.

Soit :

$$\lambda = \frac{f(y) + \max(f(y), f(z))}{2} \in]f(x), f(y)[$$

$$\in]f(z), f(y)[$$

Par continuité de f sur les intervalles $]x, y[$ et $]y, z[$, il existe $\alpha \in]x, y[$ et $\beta \in]y, z[$ tels que :

$$f(\alpha) = \lambda = f(\beta)$$

Donc f n'est pas injective.