

Table des matières

I Sur les fonctions	1
I.1 Relations de comparaisons	1
I.2 Les outils de calcul	1
I.3 Les outils de calcul	1
I.4 Croissances comparées	2
II Sur les suites	3
II.1 Rappels sur les suites géométriques	3
II.2 Comparaison des suites	4

I Sur les fonctions

I.1 Relations de comparaisons

I.1.1 Définition

Soit I un intervalle, $a \in \bar{I}$ et $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ (a est dans I ou est une borne de I , éventuellement infinie)

- On dit que $f \sim_a g$ ssi $\frac{f}{g} \xrightarrow{a} 1$ et $\frac{g}{f} \xrightarrow{a} 1$. (f et g sont équivalentes)
Cette définition n'a du sens que lorsque le calcul de ces limites en a un.
- On dit que $f = o_a(g)$ ou $f = o_a(g)$ ssi $\frac{f}{g} \xrightarrow{a} 0$. (f est négligeable devant g)

En particulier les fonctions f et g ne peuvent pas être la fonction nulle

I.1.2 Remarque

On ne peut donc pas écrire $f \sim_a 0$ avec notre définition...

I.1.3 Piège

Ce n'est pas parce que $f_1 \sim_a g_1$ et $f_2 \sim_a g_2$ que $f_1 + f_2 \sim_a g_1 + g_2$ (dans le cas général)
De même, on a pas forcément $\exp(f_1) \sim_a \exp(g_1)$

I.2 Les outils de calcul

I.2.1 Proposition

Avec les notations de la définition précédente, on a $f \sim_a g \iff f = g + o_a(g) \iff g = f + o_a(f)$.

Il s'agit de l'outil le plus pratique pour passer d'un équivalent à un "développement", et réciproquement. On retrouve ici que l'équivalent en a d'une fonction est le premier terme non nul dans un développement limité en a .

I.3 Les outils de calcul

I.3.1 Théorème (Taylor-Young)

Soit f une fonction de classe $\mathcal{C}^n$ sur un intervalle I et $a \in I$. Alors f possède un développement limité à l'ordre n en a sous la forme

$$\begin{aligned} f(x) &= f(a) + f'(a)(x-a) + f''(a)\frac{(x-a)^2}{2!} + f^{(3)}(a)\frac{(x-a)^3}{3!} + \\ &\quad \dots + f^{(n)}(a)\frac{(x-a)^n}{n!} + o_a((x-a)^n) \\ &= \sum_{k=0}^n f^{(k)}(a)\frac{(x-a)^k}{k!} + o_a((x-a)^n) \end{aligned}$$

I.3.2 Ecriture en 0

Dans le cas des formules usuelles, a est pris égal à 0 et on obtient

$$f(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n + o_0(x^n)$$

I.3.3 Les développements usuels

Soient $\alpha \in \mathbb{R}$ et $n \in \mathbb{N}$. On a au voisinage de 0 les développements limités usuels suivant (à connaître!)

- Exponentielle, logarithme, puissances

$$e^x =$$

$$\ln(1+x) =$$

$$-\ln(1-x) =$$

$$\frac{1}{1-x} =$$

$$(1+x)^\alpha =$$

2. Trigonométrie circulaire

$$\sin x =$$

$$\cos x =$$

3. Trigonométrie hyperbolique.

$$\operatorname{sh} x =$$

$$\operatorname{ch} x =$$

I.3.4 Proposition (Méthode d'intégration terme à terme)

Soit $f : I \subset \mathbb{R}$ une fonction dérivable sur l'intervalle I et $a \in I$.

Si f' admet un développement limité à l'ordre n en a alors f admet un développement limité à l'ordre $n+1$ en a qui s'obtient en calculant terme à terme une primitive du développement de f' et en choisissant comme constante la valeur $f(a)$.

I.3.6 Règles de calcul

Rappel :

- On peut multiplier, diviser ou mettre à une puissance fixe une relation d'équivalence, mais pas sommer ni soustraire terme à terme. On ne peut **pas** composer de chaque côté une relation d'équivalence par une fonction (en particulier, par $\exp$ ou $\ln$).
- Les développements sont des égalités qui se manipulent donc comme telles, avec les règles de calculs connues sur les o_a :
 - $o_a(f) \pm o_a(f) = o_a(f)$: quand plusieurs o_a identiques apparaissent, on en conserve un seul
 - Si λ est une constante non nulle, $o_a(\lambda f) = o_a(f)$.
 - Dans le cas d'une forme $o_a(f) + o_a(g)$ on conserve un seul "petit o" : on retire celui qui est négligeable devant l'autre.
 - $o_a(f) \pm o_a(f) = o_a(f)$: rien ne sert de faire apparaître un signe moins devant un o_a , ni d'avoir deux fois le même o_a dans une somme.
 - $f \times o_a(g) = o_a(fg)$. **à lire dans les deux sens !**
 - A l'intérieur d'un "petit o" ou d'un "grand o", on peut remplacer une expression par son équivalent.
 - On peut effectuer des changements de variables dans les développements usuels en 0, à condition que la nouvelle expression tende bien vers 0.

Conclusion : à par pour une multiplication ou division (ou mise à une puissance fixe) terme à terme, on passera systématiquement par un développement en utilisant la règle $f \underset{a}{\sim} g \iff f = g + o_a(g) \iff g = f + o_a(f)$.

I.3.7 Proposition (Équivalent par encadrement)

Soient $f, g, h : I \rightarrow \mathbb{R}$ et $a \in \bar{I}$ ($a \in I$ ou a est une borne de I , éventuellement ouverte).

Si on a $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$ pour x au voisinage de a , et $f(x) \underset{a}{\sim} h(x)$ alors $g(x) \underset{a}{\sim} f(x) \underset{a}{\sim} h(x)$.

I.3.5 A savoir retrouver

En utilisant la méthode d'intégration terme à terme (sans oublier de rajouter la bonne constante d'intégration, à savoir le terme $f(0)$ dans Taylor-Young)

1. Le développement à tout ordre de $\arctan$
2. Les développements à un ordre donné de $\arcsin$, $\arccos$

I.4 Croissances comparées

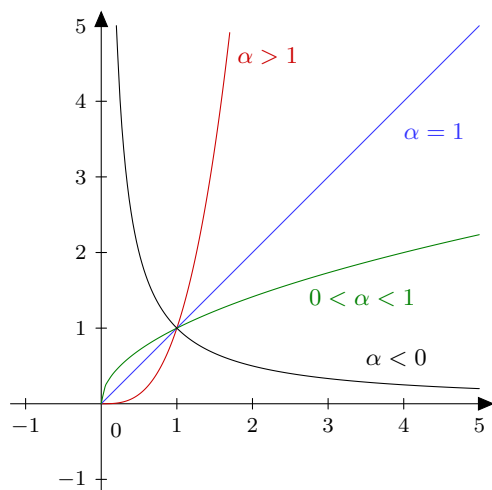
I.4.1 Sur les puissances

Soient $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ avec $\alpha < \beta$. Les comportements en 0 et $+\infty$ sont opposés :

$$x^\alpha = o_{+\infty}(x^\beta) \text{ et } x^\beta = o_0(x^\alpha)$$

I.4.2 Rappel

On peut se souvenir du résultat précédent grâce à un autre résultat important du cours : les positions relatives des fonctions puissances.



I.4.3 Théorème (Retour en terminale)

$$\lim_{x \rightarrow 0} x \ln(x) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln(x)}{x} = 0, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{e^x} = 0$$

Ces résultats nous permettent de démontrer la version suivante, vue en 1ère année

I.4.4 Théorème (Comparaison en $+\infty$)

Soient $\alpha, \beta \in]0, +\infty[$. Ces nombres sont **strictement positifs**.

1. $(\ln(x))^\alpha = o_{+\infty}(x^\beta)$.
2. $x^\beta = o_{+\infty}(e^x)$.

I.4.5 Théorème (Comparaison en 0)

Soient $\alpha, \beta \in]0, +\infty[$. $|\ln(x)|^\alpha = o_0\left(\frac{1}{x^\beta}\right)$ ou encore $x^\beta |\ln(x)|^\alpha \xrightarrow{0^+} 0$.

II Sur les suites

Ici la situation est plus simple, car les seules limites que l'on peut étudier sont quand l'indice (souvent noté n) tend vers $+\infty$

Rappel

Pour une suite $(u_n) \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ on a

$$u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0 \iff |u_n| \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$$

II.1 Rappels sur les suites géométriques

II.1.1 Forme des suites géométriques

Ce sont les suites $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ qui vérifient une relation de récurrence de la forme $u_{n+1} = qu_n$ où $q \in \mathbb{C}$ est fixé (comprendre, ne dépend pas de l'indice n).

On a alors, par une récurrence facile, $\forall n \in \mathbb{N} \quad u_n = u_0 q^n$.

II.1.2 Lemme

Soit $q \in \mathbb{C} \setminus \{1\}$. Si $(q^n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge alors sa limite est 0.

Preuve.

Notons $\forall n \in \mathbb{N} \quad u_n = q^n$ et supposons que $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l \in \mathbb{C}$.

Alors $u_{n+1} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} l$. Mais pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a $u_{n+1} = q^{n+1} = qu_n$ et donc par produit de limites finies $u_{n+1} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} ql$. Par unicité de la limite, $l = ql$ et donc $l(q - 1) = 0$. Comme $q - 1 \neq 0$ on a alors $l = 0$ ■

II.1.3 Théorème (Limites des suites géométriques)

Soit $q \in \mathbb{C} \setminus \{1\}$.

1. $q^n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ ssi $|q| < 1$. C'est le seul cas de suite géométrique convergente.

2. Dans le cas où $q \in \mathbb{R}$ on peut ajouter que $q^n \xrightarrow{+\infty} +\infty$ ssi $q > 1$.

II.2 Comparaison des suites

II.2.1 Proposition

Soient $(u_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ une suite **bornée** et $(v_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ une suite.

1. Si $v_n \xrightarrow{+\infty} 0$ alors $u_n v_n \xrightarrow{+\infty} 0$.
2. Si $v_n \xrightarrow{+\infty} +\infty$ alors $\frac{u_n}{v_n} \xrightarrow{+\infty} 0$ ou encore $u_n = o_{+\infty}(v_n)$.

II.2.2 Définition

Soient $(u_n), (v_n) \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}}$ deux suites avec (v_n) qui ne s'annule pas à partir d'un certain rang.

On dit que (u_n) est **dominée** par (v_n) ssi la suite $\left(\left|\frac{u_n}{v_n}\right|\right)_{n \in \mathbb{N}}$ est majorée.

On note alors $u_n = O_{+\infty}(v_n)$ (grand o).

II.2.3 Règles de calcul

Elles sont les mêmes que pour les petits o. En particulier on pourra écrire

1. $O_{+\infty}(u_n) = u_n O_{+\infty}(1)$
2. $O_{+\infty}(u_n) \pm O_{+\infty}(u_n) = O_{+\infty}(u_n)$

avec, comme d'habitude, la précaution élémentaire de se souvenir que chaque O représente une suite, et que ces suites ne sont pas égales même si elles s'écrivent sous la même forme.

II.2.4 Proposition (Comparaison à une suite géométrique)

Soit (u_n) une suite à valeurs **strictement positive**. On suppose que $\frac{u_{n+1}}{u_n} \xrightarrow{+\infty} \ell \in \mathbb{R}^+$ (ou $\ell = +\infty$).

1. Si $\ell < 1$, alors pour tout $q \in]\ell, 1[$, $u_n = o_{+\infty}(q^n)$.
2. Si $\ell > 1$, alors pour tout $q >]1, \ell[$, $q^n = o_{+\infty}(u_n)$.

Dans le cas $\ell = 1$, on ne peut pas comparer (u_n) à une suite géométrique.

II.2.5 Corollaire

Avec les mêmes notations, et toujours pour (u_n) **strictement positive**

1. Si $\ell < 1$, alors $u_n \xrightarrow{+\infty} 0$.
2. Si $\ell > 1$ alors $u_n \xrightarrow{+\infty} +\infty$.

Le résultat de la proposition est plus précis, car il indique que (u_n) tend “plus vite” que certaines suites géométriques.

II.2.6 Théorème

Soient $\alpha, \beta \in]0, +\infty[$. Soit $q > 1$.

1. $\ln(n)^\alpha = o_{+\infty}(n^\beta)$.
2. $n^\beta = o_{+\infty}(q^n)$.
3. $q^n = o_{+\infty}(n!)$.
4. $n! = o_{+\infty}(n^n)$.