Table des matières

I Sur les fonctions

I.1 Relations de comparaisons

I.1.1 Définition

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

1. On dit que $f \underset{a}{\sim} g$ ssi $\frac{f}{g} \underset{a}{\to} 1$ et $\frac{g}{f} \underset{a}{\to} 1$. (f et g sont équivalentes)

   Cette définition n'a du sens que lorsque le calcul de ces limites en a un.
2. On dit que $f \underset{a}{=} o(g)$ ou $f = o_a(g)$ ssi $\frac{f}{g} \underset{a}{\to} 0$. (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 $f \underset{a}{\sim} 0$ avec notre définition...

I.1.3 Piège

Ce n'est pas parce que $f_1 \underset{a}{\sim} g_1$ et $f_2 \underset{a}{\sim} g_2$ que $f_1 + f_2 \underset{a}{\sim} g_1 + g_2$.

I.2 Les outils de calcul

I.2.1 Proposition
Avec les notations de la définition précédente, on a $f \underset{a}{\sim} g \iff f = g + o_a(g) \iff g = f + o_a(f)$.

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

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

I.3.2 Ecriture en 0

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

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

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 !)

1. 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
Soit $f : I \in \mathbb{R}$ 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.3.5 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.3.6 Règles de calcul

Rappel :

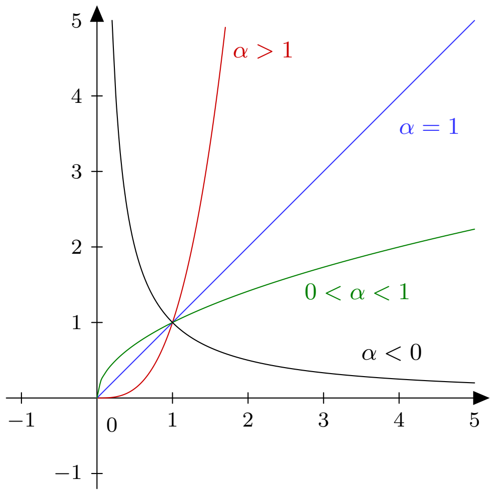
- On peut multiplier, diviser ou mettre à une puissance fixe une relation d'équivalence, mais pas sommer ni soustraire terme à terme. On ne peut **pas** composer de chaque côté une relation d'équivalence par une fonction (en particulier, par exp ou ln).
- Les développements sont des égalités qui se manipulent donc comme telles, avec les règles de calculs connues sur les o_a :
  - 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.
  - $f \times o_a(g) = o_a(fg)$.
  - 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 développement usuels en 0, à condition que la nouvelle variable 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.4 Croissances comparées

I.4.1 Rappel

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



I.4.2 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.4.3 Théorème (Retour en terminale)

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

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 $x^\beta|\ln(x)|^\alpha \underset{0^+}{\to} 0$.

II Sur les suites

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

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, $\forall n \in \mathbb{N}\ u_n = u_0 q^n$.

II.1.2 Lemme
Soit $q \in \mathbb{C}\backslash\{1\}$. Si $(q^n)_{n\in\mathbb{N}}$ converge alors sa limite est 0.

Preuve.
Notons $\forall n \in \mathbb{N}\ u_n = q^n$ et supposons que $u_n \underset{+\infty}{\to} l \in \mathbb{C}$.

Alors $u_{n+1} \underset{+\infty}{\to} l$. Mais pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a $u_{n+1} = q^{n+1} = qu_n$ et donc par produit de limites finies $u_{n+1} \underset{+\infty}{\to} ql$. 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 $q \in \mathbb{C}\backslash\{1\}$.

1. $q^n \underset{+\infty}{\to} 0$ 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 $q^n \underset{+\infty}{\to} +\infty$ 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 $v_n \underset{+\infty}{\to} 0$ alors $u_n v_n \underset{+\infty}{\to} 0$.
2. Si $v_n \underset{+\infty}{\to} +\infty$ alors $\frac{u_n}{v_n} \underset{+\infty}{\to} 0$ 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 $\frac{u_{n+1}}{u_n} \underset{+\infty}{\to} \ell \in \mathbb{R}^+$ (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.

Preuve.
Correction On traite le cas $0 \leqslant \ell < 1$. Le cas $\ell > 1$ est une conséquence directe en passant à l'inverse.

Soit $q \in]\ell, 1[$. On pose $a = \frac{q+\ell}{2}$ (le milieu de q et ℓ, sur la droite réelle). Alors on a $\ell < a < q < 1$.

A partir d'un certain rang n_0, $\frac{u_{n+1}}{u_n} \in [\ell, a]$. Ainsi pour $n > n_0$, on peut écrire

$$u_n = \frac{u_n}{u_{n-1}} \times \frac{u_{n-1}}{u_{n-2}} \times \cdots \times \frac{u_{n_0+1}}{u_{n_0}} \times u_{n_0}$$

Par multiplications d'inégalités entre nombres positifs, on a donc $u_n \leqslant a^{n-n_0} u_{n_0} = a^n K$ où $K = \frac{u_{n_0}}{a^{n_0}}$ est une constante (on a fixé q).

Toujours par multiplication d'inégalités entre nombres positifs, $0 \leqslant \frac{u_n}{q^n} \leqslant K\left(\frac{a}{q}\right)^n$. or $\frac{a}{q} \in [0, 1[$ et donc par le théorème d'encadrement, $u_n = o_{+\infty}(q^n)$.

II.2.5 Corollaire
Avec les mêmes notations, et toujours pour (u_n) **strictement positive**

1. Si $l < 1$, alors $u_n \underset{+\infty}{\to} 0$.
2. Si $l > 1$ alors $u_n \underset{+\infty}{\to} +\infty$.

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. $n! = o_{+\infty}(n^n)$.