

TD n° 1 : Suites numériques, comparaisons de suites, développements asymptotiques

Rappel important : il existe un cours de L1 en ligne, intitulé “M@ths en L1gne”, à l’adresse : <http://ljk.imag.fr/membres/Bernard.Ycart/mel/> Plusieurs des exercices ci-dessous en sont d’ailleurs tirés. Il est crucial, pour toute la partie du cours sur les séries numériques, d’être à l’aise avec les suites numériques, les notions de limite et de continuité et les développements limités. Vérifiez donc cette aisance à l’aide des QCM, exercices, cours et compléments du site.

Organisation : les exercices sont divisés en trois catégories : * correspond aux exercices de base, à maîtriser impérativement, ** correspond aux exercices de difficulté moyenne, c’est en gros le niveau requis pour valider l’UE, *** correspond aux exercices plus avancés.

* Définitions à connaître par cœur

- suite (réelle ou complexe) convergente, suite divergente, limite d’une suite,
- développement limité d’une fonction f en un point x_0 à l’ordre k ,
- relations de comparaison de suites : négligeabilité $u_n = o(v_n)$, domination $u_n = O(v_n)$, équivalence $u_n \sim v_n$,
- développement asymptotique d’une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ avec reste en $o(1/n^k)$.

Exercice 1. * Existence et calcul de limites

Calculer la limite, si elle existe, des suites $(u_n)_n$ suivantes :

1. $u_n = \frac{1}{2n+1}$,

2. $u_n = \frac{n+2}{2n+3}$,

3. $u_n = \frac{n^2}{n+1}$,

4. $u_n = \frac{10n^2+1}{n^3-1}$,

5. $u_n = \frac{1}{\sqrt{n+1}-\sqrt{n}}$,

6. $u_n = \frac{(n+1)^2}{(n+1)^3-n^3}$,

7. $u_n = \frac{n^{10}}{1,01^n}$.

Exercice 2. * Équivalence, domination et négligeabilité

Pour chaque couple (u_n, v_n) suivant, identifier quelle relation est vraie parmi $u_n \sim v_n$, $u_n = O(v_n)$, $u_n = o(v_n)$, $v_n = O(u_n)$, et $v_n = o(u_n)$:

1. $u_n = 2^{-n}$, $v_n = \frac{1}{3^n}$,

2. $u_n = \frac{1}{n}$, $v_n = \frac{1}{\sqrt{n}}$,

3. $u_n = n^2$, $v_n = 2^n$,

4. $u_n = \cos(1/n)$, $v_n = e^{1/n}$.

5. $u_n = \cos(n)$, $v_n = 1$,

6. $u_n = \ln(n)$, $v_n = \sqrt{n}$,

7. $u_n = \sin(1/n)$, $v_n = 1/n$.

Exercice 3. * Une échelle de domination

1. Montrer que l’ensemble des suites suivantes est strictement ordonné par la relation d’ordre strict o et ordonner ces suites :

$$2^{-n}, \frac{\ln(n)^2}{n}, \frac{1}{n \ln(n)}, \frac{n}{e^n}, \frac{1}{n\sqrt{n}}, e^{-\frac{n}{2}}, \frac{1}{n^2}.$$

2.** Ajouter les suites suivantes à l'ensemble précédent et les classer : $\frac{1}{n^2}2^{-n}, \frac{1}{\sqrt{n}}, \frac{\ln n}{n} (1, 5)^{-n}, \sqrt{n} e^{-\frac{n}{2}}, (1, 1)^{-n\sqrt{n}}, \left(\frac{2}{3}\right)^n, (0, 9)^n, \frac{(\ln n)^5}{n^{1,1}}, \frac{1}{n^2} \left(\frac{5}{4}\right)^{-\sqrt{n}}, n^{-2} \ln n.$

Exercice 4. * Développements asymptotiques

Donner un développement asymptotique pour $(u_n)_n$ (lorsque n tend vers l'infini) avec un reste en $o(1/n^2)$, dans chacun des cas suivants :

$$1. u_n = \frac{1}{2n+1},$$

$$2. u_n = \frac{n+1}{3+2n},$$

$$3. u_n = \frac{\ln\left(1 - \frac{1}{n} + \frac{1}{n^2}\right)}{\sqrt{1 - \frac{1}{n}}},$$

$$4. u_n = \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{n}}}{\sqrt{n} + 2},$$

$$5.** u_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+2}.$$

Exercice 5. * Quelques exemples

Donner des exemples des situations suivantes :

1. une suite décroissante positive ne tendant pas vers 0 ;
2. une suite bornée non convergente ;
3. une suite positive non bornée ne tendant pas vers $+\infty$;
4. une suite non monotone qui tend vers 0 ;
5. deux suites divergentes $(u_n)_n$ et $(v_n)_n$ telles que $(u_n v_n)_n$ soit convergente.

Exercice 6. ** Limite d'un produit

Rappeler la démonstration du résultat suivant : Soient $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ des suites de complexes. Si $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ convergent, alors la suite $(u_n v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge et on a

$$\lim_{n \rightarrow \infty} u_n v_n = \left(\lim_{n \rightarrow \infty} u_n\right) \times \left(\lim_{n \rightarrow \infty} v_n\right).$$

Exercice 7. ** Suites extraites

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

1. Montrer que si les suites extraites $(u_{2n})_{n \in \mathbb{N}}$ et $(u_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}}$ convergent vers la même limite, alors $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge.
2. Montrer que si les suites extraites $(u_{2n})_{n \in \mathbb{N}}$, $(u_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}}$ et $(u_{3n})_{n \in \mathbb{N}}$ convergent, alors $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge aussi.

Exercice 8. ** Calcul de limites à l'aide des fonctions usuelles

Calculer la limite, si elle existe, des suites $(u_n)_n$ suivantes :

$$1. u_n = n^4 \left(\ln \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) + \frac{1}{n^2} \right)$$

$$2. u_n = n(e^{\frac{2}{n}} - 1)$$

$$3. u_n = \frac{n!}{n^n}$$

$$4. u_n = \tan(1/n) \cos(2n + 1)$$

$$5. u_n = \frac{\sqrt{n-3} + i \ln(2n)}{\ln n}$$

$$6. u_n = \frac{\ln(n^2 + 3n - 2)}{\ln(n^{1/3})}.$$

Exercice 9. ** Domination par $(\frac{1}{n^s})$

Trouver $s > 0$ tel que $n^s u_n \rightarrow_{n \rightarrow \infty} 0$.

1. $u_n = \frac{1}{n^2 - n}$

3. $u_n = \frac{1}{2^n}$

5. $u_n = \frac{\ln n}{n}$.

2. $u_n = \frac{\cos n}{\sqrt{n+3}}$

4. $u_n = \frac{e^{\frac{2}{n}} - 1}{\sqrt{n}}$

Exercice 10. ** Suites adjacentes

1. Pour chacun des couples suivants, montrer que les suites $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ sont adjacentes :

(a) $u_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2}$ et $v_n = u_n + \frac{1}{n}$

(b) $u_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^3}$ et $v_n = u_n + \frac{1}{n^2}$

(c) $u_0 = a > 0, v_0 = b > a, v_{n+1} = \frac{u_n + v_n}{2}$ et $u_{n+1} = \sqrt{u_n v_n}$.

2. On définit à présent les suites $(u_n)_n$ et $(v_n)_n$ par $u_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!}$ et $v_n = u_n + \frac{1}{n!n}$.

(a) Montrer que ces suites sont adjacentes. Leur limite commune est notée e . (C'est une définition possible du nombre e . Il n'est alors pas évident qu'il correspond bien à $\exp(1)$. Ce sera vu dans ce cours, en complément, et au second semestre.)

(b) Montrer que e n'est pas rationnel. Pour cela on pourra raisonner par l'absurde : en supposant que $e = p/q$, on peut noter que, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, on a $n!u_n < n!p/q < n!v_n$; choisir n tel que $n!p/q$ soit entier permet alors de conclure).

Exercice 11. ** Suites définies par récurrence

Soit f une fonction continue de $[0, 1]$ dans $[0, 1]$ telle que $f(0) = 0, f(1) = 1$ et

$$\forall x \in]0, 1[, \quad f(x) < x.$$

1. On définit par récurrence une suite $(u_n)_{n \geq 0}$:

$$\begin{cases} u_0 \in [0, 1], \\ \forall n \geq 0, u_{n+1} = f(u_n). \end{cases}$$

Montrer que la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ converge et donner sa limite.

2. On définit par récurrence une suite $(v_n)_{n \geq 0}$:

$$\begin{cases} v_0 = 1/2, \\ \forall n \geq 0, v_{n+1} = \frac{v_n}{2 - \sqrt{v_n}}. \end{cases}$$

Montrer que la suite $(v_n)_{n \geq 0}$ converge et donner sa limite.

Exercice 12. ** Moyennes de Césaro

Soit $(u_n)_{n \geq 1}$ une suite de nombres complexes. On note :

$$\forall n \geq 1, \quad S_n = \frac{1}{n}(u_1 + \dots + u_n).$$

1. Montrer que si $(u_n)_n$ converge dans \mathbb{C} , alors $(S_n)_n$ converge vers la même limite.
2. Exhiber une suite $(u_n)_n$ divergente telle que $(S_n)_n$ converge.
3. Soit $(u_n)_n$ une suite de nombres réels strictement positifs telle que $\left(\frac{u_{n+1}}{u_n}\right)_n$ converge.
Montrer que $(u_n^{1/n})_n$ converge vers la même limite.

Exercice 13. ** Limite supérieure et limite inférieure

Soit $(u_n)_{n \geq 0}$ une suite bornée de nombres réels. On définit les suites $(i_n)_n$ et $(s_n)_n$ par :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad i_n = \inf\{u_k \text{ t.q. } k \geq n\} \quad \text{et} \quad s_n = \sup\{u_k \text{ t.q. } k \geq n\}.$$

1. Montrer que $(i_n)_n$ et $(s_n)_n$ convergent. La limite de i_n est appelée *limite inférieure de la suite* $(u_n)_n$ et est notée $\liminf_n u_n$. Celle de s_n est appelée *limite supérieure de la suite* $(u_n)_n$ et est notée $\limsup_n u_n$.
2. Montrer qu'il existe une sous-suite de $(u_n)_n$ convergeant vers $\liminf_n u_n$ et une autre convergeant vers $\limsup_n u_n$. Cela donne donc une autre démonstration du théorème de Bolzano-Weierstrass.
3. Montrer que $(u_n)_n$ converge si et seulement si $(i_n)_n$ et $(s_n)_n$ convergent dans \mathbb{R} vers la même limite.
4. *** Montrer que toute suite de Cauchy de nombres réels est bornée. Dédurre ce qui précède que toute suite de Cauchy de nombres réels converge.