

SUITES NUMÉRIQUES

Suites récurrentes d'ordre deux

Solution 1

1. Les racines de l'équation caractéristique

$$z^2 - z - 1 = 0,$$

sont

$$\frac{1 \pm \sqrt{5}}{2},$$

il existe donc $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ tels que $\forall n \geq 0$,

$$u_n = \lambda \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n + \mu \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n.$$

$$u_0 = 0 = \lambda + \mu, \quad u_1 = 1 = -\sqrt{5}\lambda,$$

on aboutit à

$$\lambda = -\mu = -\frac{1}{\sqrt{5}}.$$

On a donc, $\forall n \geq 0$,

$$u_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n - \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n \right].$$

2. Posons pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\alpha_n = \phi_{n+1}^2 - \phi_n \phi_{n+2}.$$

On a alors,

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \phi_{n+1}^2 - \phi_n(\phi_{n+1} + \phi_n) \\ &= \phi_{n+1}^2 - \phi_n^2 - \phi_n \phi_{n+1} \\ &= \phi_{n+1}(\phi_{n+1} - \phi_n) - \phi_n^2 \\ &= \phi_{n+1} \phi_{n-1} - \phi_n^2 \\ &= -\alpha_{n-1} \end{aligned}$$

La suite $(\alpha_n)_{n \geq 0}$ est donc géométrique de raison -1 et de premier terme $\alpha_0 = 1$, on a donc pour tout $n \geq 0$,

$$\phi_{n+1}^2 = \phi_n \phi_{n+2} + (-1)^n.$$

3. On prouve par une récurrence sans difficulté que

$$\forall n \geq 1, \quad u_n > 0,$$

ce qui justifie l'existence de la somme étudiée que nous noterons σ_n . D'après la formule démontré à la question 2., pour tout $k \geq 1$,

$$\phi_{k+1}^2 = \phi_k \phi_{k+2} + (-1)^k,$$

d'où en divisant par $\phi_k \phi_{k+1} > 0$,

$$\frac{\phi_{k+1}}{\phi_k} = \frac{\phi_{k+2}}{\phi_{k+1}} + \frac{(-1)^k}{\phi_k \phi_{k+1}},$$

et donc

$$\alpha_k = \frac{(-1)^k}{\phi_k \phi_{k+1}} = \beta_k - \beta_{k+1}$$

où

$$\beta_k = \frac{\phi_k}{\phi_{k+1}}.$$

Après telescopage , il reste donc

$$\sigma_n = \beta_1 - \beta_{n+1}.$$

Or ,

$$\phi_n \sim \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n,$$

d'où

$$\beta_{n+1} \sim \frac{1+\sqrt{5}}{2},$$

et puisque $\beta_1 = 1$,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 1 - \frac{1+\sqrt{5}}{2} = \frac{1-\sqrt{5}}{2}.$$

Solution 2

On prouve par une récurrence sans difficulté que

$$\forall n \geq 0, u_n > 0.$$

Posons alors

$$v_n = \frac{1}{u_n}.$$

Pour tout $n \geq 0$,

$$v_{n+2} = \frac{1}{2}(v_{n+1} + v_n).$$

On reconnaît une récurrence linéaire d'ordre deux d'équation caractéristique

$$2r^2 - r - 1 = (2r + 1)(r - 1) = 0$$

Il existe donc $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ tels que

$$\forall n \geq 0, v_n = \lambda + \mu \left(-\frac{1}{2} \right)^n,$$

et plus précisément,

$$\lambda = \frac{v_0 + 2v_1}{3} = \frac{u_1 + 2u_0}{3u_0u_1} > 0$$

et

$$\mu = \frac{2v_0 - 2v_1}{3}.$$

On a donc

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = \lambda,$$

et

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \frac{3u_0u_1}{2u_0 + u_1}.$$

Solution 3

On prouve par une récurrence sans difficulté que

$$\forall n \geq 0, u_n > 0.$$

Posons alors

$$v_n = \ln(u_n).$$

Pour tout $n \geq 0$,

$$v_{n+2} = \frac{1}{3}v_{n+1} + \frac{2}{3}v_n.$$

Les racines de l'équation caractéristique

$$z^2 - \frac{z+2}{3} = 0,$$

sont 1 et $-\frac{2}{3}$, il existe donc λ et μ dans \mathbb{R} tels que $\forall n \geq 0$,

$$v_n = \lambda + \mu \left(-\frac{2}{3}\right)^n.$$

On a donc

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = \lambda.$$

Puisque

$$v_0 = \lambda + \mu, \quad v_1 = \lambda - \frac{2\mu}{3},$$

on aboutit à

$$\lambda = \frac{2v_0 + 3v_1}{5} = \frac{\ln(u_0^2 u_1^3)}{5},$$

et par continuité de l'exponentielle,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = (u_0^2 u_1^3)^{\frac{1}{5}}.$$

Solution 4

1. L'équation caractéristique

$$2x^2 = 3x - 1$$

admet pour solutions 1 et $\frac{1}{2}$. Il existe donc $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ tels que,

$$\forall n \geq 0, \quad u_n = \lambda + \mu \frac{1}{2^n}.$$

On calcule μ et λ grâce aux deux premiers termes de la suite,

$$\lambda + \mu = -1, \quad \lambda + \mu \frac{1}{2} = 1,$$

ainsi $\lambda = 3$ et $\mu = -4$ et

$$\forall n \geq 0, \quad u_n = 3 - \frac{4}{2^n}.$$

2. L'équation caractéristique

$$4x^2 = 4x - 1$$

admet la racine double $\frac{1}{2}$. Il existe donc $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ tels que,

$$\forall n \geq 0, \quad u_n = \frac{\lambda + \mu n}{2^n}.$$

On calcule μ et λ grâce aux deux premiers termes de la suite,

$$\lambda = 1, \quad \frac{\lambda + \mu}{2} = 9,$$

ainsi $\lambda = 1$ et $\mu = 17$ et

$$\forall n \geq 0, \quad u_n = \frac{17n + 1}{2^n}.$$

3. L'équation caractéristique

$$x^2 = x + 1$$

admet pour solutions

$$\frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}.$$

Il existe donc $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ tels que ,

$$\forall n \geq 0, \quad v_n = \lambda \frac{1 - \sqrt{5}}{2} + \mu \frac{1 + \sqrt{5}}{2}.$$

On calcule μ et λ grâce aux deux premiers termes de la suite ,

$$\lambda + \mu = 0, \quad \lambda \frac{1 - \sqrt{5}}{2} + \mu \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,$$

ainsi $\lambda = -\mu = -\frac{1}{\sqrt{5}}$ et $\forall n \geq 0$,

$$v_n = -\frac{1}{\sqrt{5}} \left(\left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n - \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n \right).$$

4. L'équation caractéristique

$$x^2 - 6x + 8 = (x - 2)(x - 4) = 0$$

admettant 2 et 4 pour racines, il existe deux nombres réels λ et μ tels que pour tout $n \geq 0$,

$$u_n = \lambda 2^n + \mu 4^n.$$

En particulier, pour $n = 0$ et $n = 1$, on a les équations suivantes,

$$u_0 = 1 = \lambda + \mu, \quad u_1 = 1 = 2\lambda + 4\mu.$$

On trouve alors que $\lambda = \frac{3}{2}$ et $\mu = -\frac{1}{2}$ et donc

$$\forall n \geq 0, \quad u_n = 3 \times 2^{n-1} - 2^{2n-1}.$$

Solution 5

1. Soit HR(n) l'hypothèse de récurrence $u_0 \leq u_1 \leq \dots \leq u_n$.

On a $u_2 = \sqrt{u_1} \geq u_1$ car $u_1 \in]0, 1[$. Ainsi HR(2) est vérifiée.

Supposons HR(n) vraie pour un certain $n \geq 2$. Alors $u_{n+1} - u_n = \sqrt{u_n} - \sqrt{u_{n-2}} \geq 0$ d'après notre hypothèse de récurrence. Donc HR($n + 1$) est vraie.

On en déduit que (u_n) est croissante.

REMARQUE. On est obligé d'initialiser au rang 2 car l'étape d'hérédité HR(n) \Rightarrow HR($n + 1$) fait intervenir u_{n-2} .

2. Montrons par récurrence double que (u_n) est majorée par 4. On a bien $u_0 \leq 4$ et $u_1 \leq 4$. Supposons que $u_n \leq 4$ et $u_{n+1} \leq 4$ pour un certain $n \in \mathbb{N}$. Alors $u_{n+2} \leq \sqrt{4} + \sqrt{4} = 4$.

REMARQUE. Comment trouver le majorant ? On choisit un majorant M qui nous arrange i.e. tel que $\sqrt{M} + \sqrt{M} \leq M$. On vérifie ensuite qu'il convient.

(u_n) est croissante et majorée donc elle converge. Par continuité de la racine carrée, sa limite l vérifie $l = \sqrt{l} + \sqrt{l}$ donc $l = 4$.

Solution 6

1. On raisonne par récurrence double. Tout d'abord, $u_0, u_1 \in]0, 1[$. On suppose alors que $u_n, u_{n+1} \in]0, 1[$ pour un certain $n \in \mathbb{N}$. Alors $\sqrt{u_n}, \sqrt{u_{n+1}} \in]0, 1[$ puis $u_{n+2} \in]0, 1[$. On conclut que $u_n \in]0, 1[$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

2. Soit $n \in \mathbb{N}$.

- Si $u_n \leq u_{n+1}$, alors $v_n = u_n$. De plus, $u_{n+2} \geq \sqrt{u_n} \geq u_n$ puisque $u_n \in]0, 1[$. On a donc $v_{n+1} = \min(u_{n+1}, u_{n+2}) \geq u_n = v_n$.
- Si $u_n \geq u_{n+1}$, alors $v_n = u_{n+1}$. De plus, $u_{n+2} \geq \sqrt{u_{n+1}} \geq u_{n+1}$ puisque $u_{n+1} \in]0, 1[$. On a donc $v_{n+1} = \min(u_{n+1}, u_{n+2}) = u_{n+1} = v_n$.

Dans les deux cas, $v_{n+1} \geq v_n$. Ainsi (v_n) est croissante.

3. Soit $n \in \mathbb{N}$.

- Si $u_n \leq u_{n+1}$, alors $v_n = u_n$. De plus, $u_{n+2} \geq \sqrt{u_n} \geq u_n$ puisque $u_n \in]0, 1[$. Donc $\sqrt{u_{n+2}} \geq \sqrt{u_n}$. On a également $u_{n+3} \geq \sqrt{u_n}$ puisque $\sqrt{u_{n+1}} \geq \sqrt{u_n}$ et $\sqrt{u_{n+2}} \geq \sqrt{u_n}$. On a montré que $u_{n+2} \geq \sqrt{u_n}$ et $u_{n+3} \geq \sqrt{u_n}$ donc $v_{n+2} \geq \sqrt{u_n} = \sqrt{v_n}$.
- Si $u_n \geq u_{n+1}$, alors $v_n = u_{n+1}$. De plus, $u_{n+2} \geq \sqrt{u_{n+1}} = \sqrt{v_n} \geq v_n$ puisque $v_n = u_{n+1} \in]0, 1[$. On a également $u_{n+3} \geq \sqrt{v_n}$ puisque $u_{n+2} \geq v_n$ et $u_{n+1} = v_n$. On a alors $u_{n+2} \geq \sqrt{v_n}$ et $u_{n+3} \geq \sqrt{v_n}$ donc $v_{n+2} \geq \sqrt{v_n}$.

Dans les deux cas, $v_{n+2} \geq \sqrt{v_n}$.

4. On a $v_n \in]0, 1[$ pour tout $n \in \mathbb{N}$ donc (v_n) est bornée et croissante; elle converge. Notons l sa limite. On a bien entendu $l \in [0, 1]$. De plus, $v_{n+2} \geq \sqrt{v_n}$ donc par passage à la limite (la fonction racine carrée est continue), $l \geq \sqrt{l}$ et donc $l \geq 1$. Ainsi $l = 1$. De plus $v_n \leq u_n < 1$ pour tout $n \in \mathbb{N}$ donc, d'après le théorème des gendarmes, (u_n) converge vers 1.

Solution 7

L'équation caractéristique associée à cette suite récurrente est $X^2 - (3 - 2i)X + 5 - 5i = 0$. Son discriminant est $\Delta = -15 + 8i$. Soit

$$\delta = x + iy \text{ une racine carrée de } \Delta. \text{ On a donc } \begin{cases} x^2 + y^2 = 17 \\ x^2 - y^2 = -15 \\ 2xy = 8 \end{cases}. \text{ On en déduit } \delta = \pm(1 + 4i). \text{ Les racines de l'équation caractéristique sont}$$

donc $\frac{3-2i+1+4i}{2} = 2 + i$ et $\frac{3-2i-1-4i}{2} = 1 - 3i$. On en déduit que le terme général u_n est de la forme $\lambda(2 + i)^n + \mu(1 - 3i)^n$ avec $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$. Les

conditions $u_0 = 1$ et $u_1 = 1 + 4i$ donnent $\begin{cases} \lambda + \mu = 0 \\ \lambda(2 + i) + \mu(1 - 3i) = 1 + 4i \end{cases}$. On trouve $\lambda = 1$ et $\mu = -1$. Ainsi $u_n = (2 + i)^n - (1 - 3i)^n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

Solution 8

Tout d'abord, une récurrence simple montre que (u_n) est bien définie et positive.

Supposons que $u_n \geq 1$ pour tout $n \geq 1$. Alors pour tout $n \geq 2$, $1 + u_n u_{n-1} \geq u_n$ et donc $u_{n+1} \leq u_n$. La suite (u_n) est donc décroissante et minorée par 1 à partir du rang 2 : elle converge vers une certaine limite l vérifiant $l = \frac{l^2}{1+l^2}$, ce qui équivaut à $l(1 - l + l^2) = 0$. Or $1 - l + l^2 \neq 0$ (considérer le discriminant du trinôme) donc $l = 0$, ce qui est absurde puisque (u_n) est minorée par 1.

On en déduit qu'il existe $n_0 \in \mathbb{N}^*$ tel que $u_{n_0} < 1$. De plus, $u_{n+1} \leq u_n^2 \leq u_n$ pour tout $n \geq n_0$. La suite (u_n) est décroissante à partir du rang n_0 et minorée par 0. On en déduit qu'elle converge mais ce qui précède montre que (u_n) ne peut converger que vers 0.

Gendarmes

Solution 9

Remarquons que la suite $\left(\left|\frac{u_{n+1}}{u_n}\right|\right)$ converge vers $|\ell| \in [0, 1[$. Soit alors $q \in]|\ell|, 1[$. Alors $\varepsilon = q - |\ell| > 0$. Par définition de la limite, il existe un entier N tel que pour tout entier $n \geq N$, $\left|\left|\frac{u_{n+1}}{u_n}\right| - |\ell|\right| \leq \varepsilon$. En particulier, pour $n \geq N$, $\left|\frac{u_{n+1}}{u_n}\right| \leq \varepsilon + |\ell| = q$. Par télescopage, pour tout entier $n \geq N$,

$$\frac{|u_n|}{|u_N|} = \prod_{k=N}^{n-1} \left|\frac{u_{k+1}}{u_k}\right| \leq q^{n-N}$$

et donc

$$|u_n| \leq \frac{|u_N|}{q^N} q^n$$

Or $q \in [0, 1[$ donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} q^n = 0$ puis $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 0$.

Solution 10

Remarquons que pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$u_n^2 + u_n v_n + v_n^2 = \left(u_n + \frac{v_n}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}v_n^2 \geq \frac{3}{4}v_n^2 \geq 0$$

Le théorème des gendarmes permet d'affirmer que $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{3}{4}v_n^2 = 0$. On en déduit ensuite que (v_n) converge vers 0. Quitte à échanger (u_n) et (v_n) , le raisonnement précédent montre que (u_n) converge vers 0.

Convergence monotone

Solution 11

1. Nous avons

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

En ajoutant u_{n-1} à chaque membre et en prenant la racine carrée, on en déduit que

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

En procédant ainsi, on obtient $v_n \leq v_{n+1}$; la suite $(v_n)_{n \geq 1}$ est donc croissante.

2. Si a est la valeur de la suite constante $(u_n)_{n \geq 1}$, notons $(a_n)_{n \geq 1}$ sa suite associée, c'est-à-dire celle qui vérifie, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $a_{n+1} = \sqrt{a + a_n}$. Montrons par récurrence sur n , que si $\ell = \sqrt{a + \ell}$, alors il majore $(a_n)_{n \geq 1}$. Nous avons $a_1 = \sqrt{a} \leq \ell$; supposons que $a_n \leq \ell$; en ajoutant a à chaque membre et en prenant la racine, on obtient

$$a_{n+1} = \sqrt{a + a_n} \leq \sqrt{a + \ell} = \ell.$$

La suite $(a_n)_{n \geq 1}$ est majorée et croissante, donc convergente.

3. Si a est un majorant de la suite $(u_n)_{n \geq 1}$, nous avons, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $v_n \leq a_n$; comme $(a_n)_{n \geq 1}$ est majorée, $(v_n)_{n \geq 1}$ est donc convergente, car croissante et majorée.

Solution 12

1. Soit $n \in \mathbb{N}$. Notons $E_n = \{u_p, p \geq n\}$. $E_{n+1} \subset E_n$ donc $\sup E_{n+1} \leq \sup E_n$ et $\inf E_{n+1} \geq \inf E_n$ i.e. $v_{n+1} \leq v_n$ et $w_{n+1} \geq w_n$. Ainsi (v_n) est décroissante et (w_n) est croissante.

2. On a $E_n \subset E_0$ donc $\sup E_n \geq \inf E_0$ et $\inf E_n \leq \sup E_0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Ceci signifie que (v_n) est minorée et que (w_n) est majorée. Ainsi (v_n) et (w_n) convergent.

3. Comme $u_n \in E_n$, on a $w_n \leq u_n \leq v_n$. Si $\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n - w_n = 0$, alors $\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} w_n$. (u_n) converge d'après le théorème des gendarmes.

Si (u_n) converge, notons l sa limite. Soit $\varepsilon > 0$. Comme (u_n) converge vers l , il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $E_N \subset [l - \varepsilon, l + \varepsilon]$. Donc $0 \leq v_N - w_N \leq 2\varepsilon$. Comme $(v_n - w_n)$ est décroissante, on a $0 \leq v_n - w_n \leq 2\varepsilon$ pour tout $n \geq N$. Ceci prouve que $(v_n - w_n)$ tend vers 0.

Solution 13

Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $u_n - u_{n-1} = a_{n+1} + a_{n-1} - 2a_n \geq 0$ donc (u_n) est croissante à partir du rang 1. Puisque (a_n) est bornée, (u_n) l'est également. Ainsi (u_n) converge vers $\ell \in \mathbb{R}$.

Supposons $\ell > 0$. Alors il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $u_n \geq \ell/2$ pour tout entier $n \geq N$. Donc pour tout entier $n \geq N$, $a_n - a_N = \sum_{k=N}^{n-1} u_k \geq (n - N)\ell/2$. On en déduit que (a_n) diverge vers $+\infty$ ce qui contredit son caractère bornée.

De même, si $\ell < 0$, il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que $u_n \leq \ell/2$ pour tout entier $n \geq N$. Donc pour tout entier $n \geq N$, $a_n - a_N = \sum_{k=N}^{n-1} u_k \leq (n - N)\ell/2$. On en déduit cette fois-ci que (a_n) diverge vers $-\infty$, ce qui contredit à nouveau son caractère borné.

Finalement $\ell = 0$.

La suite (u_n) est croissante à partir du rang 1 et converge vers 0. Elle est donc négative à partir du rang 1. On en déduit que la suite (a_n) est décroissante à partir du rang 1. Comme elle est bornée, elle converge.

Suites divergentes

Solution 14

1. Puisque $\forall n \geq 0$, on a $a_{5n} = 0$ et $a_{5n+1} = -1/5$, la suite (a_n) n'a pas de limite lorsque n tend $+\infty$.

2. Puisque $\forall n \geq 2$, on a

$$b_n - b_{n-1} = \cos\left(\frac{n\pi}{5}\right),$$

cette suite est donc périodique non constante et ne converge donc pas vers 0; la suite $(b_n)_{n \geq 1}$ n'est donc pas convergente.

3. Puisque $\forall n \geq 0$, on a

$$\frac{n^2 - 3n + 1}{n + 2} = n - 5 \frac{11}{n + 2},$$

on a

$$c_n = (-1)^{n+1} \cos\left(\frac{11\pi}{n + 2}\right),$$

et donc, par continuité de la fonction cosinus,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} c_{2n} = -1$$

et

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} c_{2n+1} = 1.$$

La suite (a_n) n'a donc pas de limite lorsque n tend $+\infty$.

Solution 15

1. Pour tout $n \geq 1$,

$$H_{n+1} - H_n = \frac{1}{n+1} > 0,$$

la suite $(H_n)_{n \geq 1}$ est donc croissante. On en déduit, d'après le théorème des suites monotones, qu'elle est soit majorée et convergente, soit non majorée et tend vers $+\infty$ avec n .

2. Pour tout $n \geq 1$,

$$H_{2n} - H_n = \sum_{k=n+1}^{2n} \frac{1}{k},$$

or $\forall n + 1 \leq k \leq 2n$,

$$\frac{1}{k} \geq \frac{1}{2n},$$

d'où

$$H_{2n} - H_n \geq \sum_{k=n+1}^{2n} \frac{1}{2n} = \frac{n}{2n} = \frac{1}{2}$$

On montre que H_n tend vers $+\infty$ par l'absurde : supposons le contraire, d'après le résultat de la question 1., $(H_n)_{n \geq 1}$ est donc convergente de limite $\ell \in \mathbb{R}$. La suite extraite $(H_{2n})_{n \geq 1}$ converge aussi vers ℓ , d'où par passage à la limite dans l'inégalité obtenue à la question 2. :

$$0 \geq \frac{1}{2},$$

ce qui est absurde. Ainsi,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} H_n = +\infty.$$

Solution 16

1. On a bien-sûr que la suite (α_n) est nulle donc elle converge vers 0.

2. Etude de $(\beta_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$.

a. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On a

$$n^2 + 3n - (n+1)^2 = n - 1 \geq 0 \text{ et } (n+2)^2 - n^2 - 3n = n + 4 > 0$$

ainsi

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, (n+1)^2 \leq n^2 + 3n < (n+2)^2.$$

b. On a

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, n+1 \leq \sqrt{n^2 + 3n} < n+2,$$

et donc $\lfloor \sqrt{n^2 + 3n} \rfloor = n+1$ puis $\beta_n = \sqrt{n^2 + 3n} - (n+1)$.

c. Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, on a

$$\beta_n = \sqrt{n^2 + 3n} - \sqrt{(n+1)^2} = \frac{n^2 + 3n - (n+1)^2}{\sqrt{n^2 + 3n} + n+1} = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 + 3n} + n+1}$$

Ainsi,

$$\beta_n = \frac{n-1}{n(\sqrt{1+3/n} + 1 + 1/n)} \sim \frac{n}{2n} = \frac{1}{2}$$

et la suite (β_n) est convergente de limite $1/2$.

3. La suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ne converge pas car admet deux sous-suites (α_n) et (β_n) convergente mais de limites différentes.

Solution 17

1. En utilisant les formules d'addition on a pour tout n :

$$\begin{cases} u_{n+1} = \sin(n\alpha + \alpha) = \sin(\alpha) \cos(n\alpha) + \cos(\alpha) \sin(n\alpha) = \sin(\alpha)v_n + \cos(\alpha)u_n \\ v_{n+1} = \cos(n\alpha + \alpha) = \cos(\alpha) \cos(n\alpha) - \sin(\alpha) \sin(n\alpha) = \cos(\alpha)v_n - \sin(\alpha)u_n \end{cases}$$

Puisque $\sin(\alpha) \neq 0$ grâce à l'hypothèse sur α , on en déduit les relations

$$v_n = \frac{1}{\sin(\alpha)}(u_{n+1} - \cos(\alpha)u_n). \quad (1)$$

et

$$u_n = \frac{1}{\sin(\alpha)}(\cos(\alpha)v_n - v_{n+1}). \quad (2)$$

Si $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge vers un réel ℓ , la relation (1) entraîne que $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \frac{\ell(1 - \cos(\alpha))}{\sin(\alpha)}$. De même, si $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge vers un réel ℓ' , la relation (2) entraîne que $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \frac{\ell'(\cos(\alpha) - 1)}{\sin(\alpha)}$.

2. Si les deux suites sont convergentes de limites respectives ℓ et ℓ' , on a alors d'après la question précédente le système suivant :

$$\begin{cases} \ell' = \frac{\ell(1 - \cos(\alpha))}{\sin(\alpha)} \\ \ell = \frac{\ell'(\cos(\alpha) - 1)}{\sin(\alpha)} \end{cases}$$

Il en découle que $\ell = -\frac{(1 - \cos \alpha)^2}{\sin^2 \alpha} \ell'$, ce qui implique $\ell = 0$, car $\frac{(1 - \cos \alpha)^2}{\sin^2 \alpha} \geq 0 > -1$. Comme $\ell = 0$, on a donc aussi $\ell' = 0$.

Par ailleurs, puisque pour tout $n \geq 0$, on a la relation $u_n^2 + v_n^2 = \sin^2(n\alpha) + \cos^2(n\alpha) = 1$, en passant à la limite on obtient $\ell^2 + \ell'^2 = 1$, ce qui est impossible si $\ell = \ell' = 0$.

L'hypothèse de départ que les suites convergent **toutes les deux** était donc fausse. **De plus**, on a vu à la question précédente, que si l'une des deux converge, alors l'autre converge aussi : on en conclut qu'aucune des deux suites ne peut converger.

Suites adjacentes

Solution 18

Une récurrence double montre facilement que (u_n) est à termes strictement positifs.

De plus, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$u_{n+2} - u_{n+1} = \frac{u_n(u_n - u_{n+1})}{u_{n+1} + u_n}$$

Ainsi $u_{n+2} - u_{n+1}$ et $u_{n+1} - u_n$ sont de signe opposé pour tout $n \in \mathbb{N}$. Par conséquent, les suites (u_{2n}) et (u_{2n+1}) sont monotones et de sens de variation contraires.

En distinguant les cas $u_{n+1} \leq u_n$ et $u_{n+1} \geq u_n$, on montre que u_{n+2} est compris entre u_n et u_{n+1} . Une récurrence double montre alors que u_n est compris entre u_0 et u_1 pour tout $n \in \mathbb{N}$.

Le théorème de la limite monotone nous apprend donc que les suites (u_{2n}) et (u_{2n+1}) convergent vers des limites strictement positives l_1 et l_2 . En passant à la limite dans la relation de récurrence, on obtient $l_1 = \frac{l_2^2 + l_1^2}{l_2 + l_1}$. On en déduit que $l_1 = l_2$. Ainsi (u_n) converge vers $l_1 = l_2$.

Solution 19

1. Tout d'abord, une récurrence évidente montre que $u_n > 0$ et $v_n > 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

Ensuite, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $v_{n+1} - u_{n+1} = \frac{1}{2}(v_n - u_n)$. Puisque $v_0 - u_0 > 0$, on en déduit par une récurrence évidente que $v_n - u_n > 0$ i.e. $u_n < v_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. On en déduit également que la suite de terme général $v_n - u_n$ est géométrique de raison $\frac{1}{2}$ et donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n - u_n = 0$.

Pour tout $n \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} u_{n+1} - u_n &= \frac{1}{2}(\sqrt{u_n v_n} - u_n) = \frac{\sqrt{u_n}}{2}(\sqrt{v_n} - \sqrt{u_n}) \geq 0 \\ v_{n+1} - v_n &= \frac{1}{2}(\sqrt{u_n v_n} - v_n) = \frac{\sqrt{v_n}}{2}(\sqrt{u_n} - \sqrt{v_n}) \leq 0 \end{aligned}$$

Ainsi (u_n) est croissante tandis que (v_n) est décroissante.

Les suites (u_n) et (v_n) sont donc adjacentes : elles convergent donc vers une limite commune l .

2. On rappelle l'inégalité classique $\ln(1+u) \leq u$ pour tout $u \in]-1, +\infty[$.

Il s'ensuit que

$$\begin{aligned} \ln y - \ln x &= \ln \frac{y}{x} = \ln \left(1 + \frac{y-x}{x} \right) \leq \frac{y-x}{x} \\ \ln x - \ln y &= \ln \frac{x}{y} = \ln \left(1 + \frac{x-y}{y} \right) \leq \frac{x-y}{y} \end{aligned}$$

On en déduit alors facilement l'inégalité voulue en tenant compte du fait que $y-x > 0$ et $x-y < 0$.

3. On a vu à la question 1 que $0 < u_n < v_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$, ce qui justifie que (c_n) est bien définie.

Pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\begin{aligned} c_{n+1} &= \frac{v_{n+1} - u_{n+1}}{\ln v_{n+1} - \ln u_{n+1}} \\ &= \frac{v_n - u_n}{\ln(v_n + \sqrt{u_n v_n}) - \ln(u_n + \sqrt{u_n v_n})} \\ &= \frac{v_n - u_n}{\ln(\sqrt{v_n}(\sqrt{u_n} + \sqrt{v_n})) - \ln(\sqrt{u_n}(\sqrt{u_n} + \sqrt{v_n}))} \\ &= \frac{v_n - u_n}{\ln v_n - \ln u_n} = c_n \end{aligned}$$

Ainsi la suite (c_n) est bien constante.

4. D'après la question 2 et le fait que $0 < u_n < v_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a $\frac{1}{v_n} \leq \frac{\ln v_n - \ln u_n}{v_n - u_n} \leq \frac{1}{u_n}$ i.e. $u_n \leq c_n \leq v_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Le théorème des gendarmes assure que (c_n) converge vers l . Mais comme (c_n) est constante,

$$l = c_0 = \frac{b-a}{\ln b - \ln a}$$

Solution 20

1. Posons pour tout $n \geq 0$,

$$\beta_n = u_n - v_n.$$

On a alors $\forall n \geq 0$,

$$\beta_{n+1} = (p - q)\beta_n,$$

ainsi $\forall n \geq 0$,

$$\beta_n = (p - q)^n(u_0 - v_0).$$

Puisque $p + q = 1$ et $0 < q < p$, on a

$$0 < p - q < 1$$

et donc

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (u_n - v_n) = 0.$$

De plus, $\forall n \geq 0$,

$$\begin{aligned} u_{n+1} - u_n &= -(v_{n+1} - v_n) \\ &= -q\beta_n \end{aligned}$$

Lorsque $u_0 = v_0$, les deux suites sont constantes. Dans le cas contraire, les calculs précédents prouvent que les deux suites sont monotones de sens de variation contraires : elles sont donc adjacentes.

2. On remarque que la suite de terme général

$$\alpha_n = u_n + v_n$$

est constante. Si on note ℓ la limite commune des deux suites, on a donc par passage à la limite

$$2\ell = u_0 + v_0$$

d'où

$$\ell = \frac{u_0 + v_0}{2}.$$

Solution 21

Puisque $u_0 \leq v_0$ et $\forall n \geq 0$,

$$v_{n+1} - u_{n+1} = \frac{(\sqrt{u_n} - \sqrt{v_n})^2}{2} \geq 0,$$

$v_n \geq u_n$ pour tout $n \geq 0$. De plus

$$v_{n+1} - v_n = \frac{u_n - v_n}{2} \leq 0,$$

et $(v_n)_{n \geq 0}$ est décroissante minorée par u_0 donc converge vers ℓ_1 . De même,

$$u_{n+1} - u_n = \sqrt{u_n}[\sqrt{v_n} - \sqrt{u_n}] \geq 0,$$

et $(u_n)_{n \geq 0}$ est croissante majorée par v_0 donc converge vers ℓ_2 . Et puisque $\forall n \geq 0$,

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

par passage à la limite,

$$\ell_2 = \frac{\ell_1 + \ell_2}{2},$$

et donc $\ell_1 = \ell_2$: les deux suites sont adjacentes.

Solution 22

1. Soient a et b strictement positifs, on remarque que

$$\frac{2}{a+b} \leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$$

si et seulement si

$$\frac{2}{a+b} \leq \frac{a+b}{2ab}$$

ie

$$4ab \leq (a+b)^2$$

soit encore

$$0 \leq (a-b)^2.$$

La dernière inégalité étant acquise, le résultat est démontré.

2. Par une récurrence immédiate, on a $\forall n \in \mathbb{N}$,

$$a_n > 0 \text{ et } b_n > 0.$$

Les deux suites sont donc bien définies. On remarque que, pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a

$$a_{n+1} \leq a_n$$

si et seulement si

$$b_n \leq b_{n+1}$$

si et seulement si

$$b_n \leq a_n.$$

Il suffit donc de démontrer les inégalités

$$\forall n \in \mathbb{N}, b_n \leq a_n.$$

- Montrons le cas $n = 0$: c'est l'hypothèse $b_0 \leq a_0$ de l'énoncé.
- Montrons les cas $n \geq 1$; on a alors $n-1 \geq 0$, d'où, en appliquant le résultat de la question **a.** pour $a = a_{n-1}$ et $b = b_{n-1}$,

$$\frac{2}{a_{n-1} + b_{n-1}} \leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{a_{n-1}} + \frac{1}{b_{n-1}} \right)$$

soit encore

$$\frac{1}{a_n} \leq \frac{1}{b_n},$$

c'est-à-dire

$$b_n \leq a_n$$

puisque $a_n > 0$.

3. Démontrons l'inégalité par récurrence sur n . Notons, pour tout $n \in \mathbb{N}$, J_n la proposition :

$$0 \leq a_n - b_n \leq \frac{a_0 - b_0}{2^n}.$$

- J_0 est vérifiée puisque $0 \leq a_0 - b_0 \leq a_0 - b_0$.
- Montrons que la propriété J_n est héréditaire. Supposons J_n vérifiée. On a alors

$$\begin{aligned} a_{n+1} - b_{n+1} &= \frac{a_n + b_n}{2} - \frac{2a_n b_n}{a_n + b_n} \\ &= \frac{(a_n - b_n)^2}{2(a_n + b_n)} \\ &= \frac{a_n - b_n}{2} \times \frac{a_n - b_n}{a_n + b_n} \end{aligned}$$

Or, on a démontré à la question **c.** que

$$a_n - b_n \geq 0,$$

d'où

$$0 \leq \frac{a_n - b_n}{a_n + b_n} \leq \frac{a_n}{a_n + b_n} \leq 1$$

puisque $a_n > 0$ et $b_n > 0$ ainsi

$$0 \leq a_{n+1} - b_{n+1} \leq \frac{1}{2}(a_n - b_n)$$

J_{n+1} est donc vérifiée.

- D'après le principe de récurrence, l'inégalité J_n est vraie pour tout $n \in \mathbb{N}$.

4. D'après le résultat de la question **b.**, $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est décroissante et $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est croissante, de plus, on déduit de l'inégalité établie à la question **c.** et du théorème d'encadrement que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n - b_n) = 0.$$

Les suites $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ sont donc adjacentes.

5. Pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$a_{n+1}b_{n+1} = \frac{a_n + b_n}{2} \frac{2a_nb_n}{a_n + b_n} = a_nb_n.$$

la suite $(a_nb_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est donc constante. Soit ℓ la limite commune de $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$, puisque

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad a_nb_n = a_0b_0,$$

$\ell^2 = a_0b_0$, et par passage à la limite dans l'inégalité

$$a_n \geq 0,$$

on a $\ell \geq 0$ et donc

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = \sqrt{a_0b_0}.$$

Suites définies par des sommes

Solution 23

1. Soit $k \in \mathbb{N}^*$. Puisque $\forall t \in [k, k+1]$,

$$\frac{1}{k+1} \leq \frac{1}{t} \leq \frac{1}{k},$$

on obtient après intégration sur $[k, k+1]$,

$$\frac{1}{k+1} \leq \int_k^{k+1} \frac{dt}{t} \leq \frac{1}{1+k}.$$

2. Étudions le sens de variation de la suite $(u_n)_{n \geq 0}$. $\forall n \geq 0$,

$$u_{n+1} - u_n = \frac{1}{n+1} - \ln(n+1) + \ln(n)$$

En appliquant le résultat de la question **1.** à $k = n$, on obtient

$$u_{n+1} - u_n \leq 0$$

ainsi $(u_n)_{n \geq 1}$ est-elle croissante.

Posons

$$S_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$$

et

$$u_n = S_n - \ln(n).$$

En additionnant les $n - 1$ inégalités de la question 1. correspondant aux valeurs entières k comprises entre 1 et $n - 1$, on obtient :

$$S_n - 1 \leq \ln(n) \leq S_n - \frac{1}{n},$$

et donc

$$\frac{1}{n} \leq u_n \leq 1.$$

la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ est croissante majorée par 1, elle est donc convergente.

Solution 24

Puisque la fonction $t \mapsto \frac{1}{t}$ est décroissante sur \mathbb{R}_+^* , pour tout entier naturel k non nul, on a

$$\forall k \leq t \leq k+1, \quad \frac{1}{k+1} \leq \frac{1}{t} \leq \frac{1}{k},$$

ce qui entraîne par positivité de l'intégrale,

$$\frac{1}{k+1} = \int_k^{k+1} \frac{dt}{k+1} \leq \int_k^{k+1} \frac{dt}{t} \leq \int_k^{k+1} \frac{dt}{k} = \frac{1}{k}.$$

Soit $n \geq 1$. En additionnant les inégalités précédentes pour k variant de n à $2n$, on obtient en appliquant la relation de Chasles pour les intégrales,

$$\sum_{k=n}^{2n} \frac{1}{k+1} \leq \int_n^{2n+1} \frac{dt}{t} \leq \sum_{k=n}^{2n} \frac{1}{k},$$

c'est-à-dire,

$$\sum_{k=n+1}^{2n+1} \frac{1}{k} \leq \ln(2n+1) - \ln(n) \leq u_n,$$

ie

$$u_n - \frac{1}{n} + \frac{1}{2n+1} \leq \ln\left(2 + \frac{1}{n}\right) \leq u_n,$$

et finalement,

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

La fonction \ln étant continue en 2, le théorème d'encadrement permet de conclure que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \ln(2).$$

Solution 25

Les suites (a_n) et (b_n) sont convergentes donc bornées. Soit $\varepsilon > 0$. Il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que

$$n \geq N \Rightarrow |a_n - a| < \varepsilon \text{ ET } |b_n - b| < \varepsilon$$

Soit maintenant $n \geq 2N$. On va couper la somme suivante en 3 parties :

$$\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} = \sum_{k=0}^{N-1} a_k b_{n-k} + \sum_{k=N}^{n-N} a_k b_{n-k} + \sum_{k=n-N+1}^n a_k b_{n-k}$$

(ceci est valide car on a bien $N \leq n - N$). Par conséquent,

$$\begin{aligned} \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} - ab &= \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^{N-1} (a_k b_{n-k} - ab) \\ &+ \frac{1}{n+1} \sum_{k=N}^{n-N} (a_k b_{n-k} - ab) \\ &+ \frac{1}{n+1} \sum_{k=n-N+1}^n (a_k b_{n-k} - ab) \end{aligned}$$

Par inégalité triangulaire, on a donc :

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} - ab \right| &\leq \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^{N-1} |a_k b_{n-k} - ab| \\ &\quad + \frac{1}{n+1} \sum_{k=N}^{n-N} |a_k b_{n-k} - ab| \\ &\quad + \frac{1}{n+1} \sum_{k=n-N+1}^n |a_k b_{n-k} - ab| \end{aligned}$$

Pour $0 \leq k \leq N-1$, on a par une majoration brutale :

$$|a_k b_{n-k} - ab| \leq |a_k b_{n-k}| + |ab| \leq 2M^2$$

De même, pour $n-N+1 \leq k \leq n$, on a

$$|a_k b_{n-k} - ab| \leq 2M^2$$

Enfin, pour $N \leq k \leq n-N$, on a à la fois $k \geq N$ et $n-k \geq N$. Donc $|a_k - a| < \varepsilon$ et $|b_{n-k} - b| < \varepsilon$. De manière classique :

$$\begin{aligned} |a_k b_{n-k} - ab| &= |a_k b_{n-k} - a_k b + a_k b - ab| \\ &\leq |a_k| |b_{n-k} - b| + |b| |a - a_k| \leq 2M\varepsilon \end{aligned}$$

Par conséquent,

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} - ab \right| &\leq \frac{4NM^2}{n+1} + \frac{2M(n-2N)\varepsilon}{n+1} \\ &\leq \frac{4NM^2}{n+1} + 2M\varepsilon \end{aligned}$$

Or $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{4NM^2}{n+1} = 0$ donc il existe N' tel que

$$n \geq N' \Rightarrow \frac{4NM^2}{n+1} < \varepsilon$$

Pour $n \geq \max(N, N')$, on a donc :

$$\left| \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} - ab \right| \leq (1 + 2M)\varepsilon$$

Quitte à changer ε en $\frac{\varepsilon}{1+2M}$, on a le résultat voulu.

Solution 26

1. On sait (ou on redémontre) que pour $m, k \in \mathbb{N}^*$, $k \binom{m}{k} = m \binom{m-1}{k-1}$. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Il suffit alors de prendre $m = n + p + 1$ et $k = n + 1$.
2. On utilise le principe de la sommation d'Abel :

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=1}^n (k+1-k)u_k = \sum_{k=1}^n (k+1)u_k - \sum_{k=1}^n k u_k \\ &= (n+1)u_{n+1} - u_1 + \sum_{k=1}^n (k+1)u_k - \sum_{k=1}^n (k+1)u_{k+1} = (n+1)u_{n+1} - u_1 + \sum_{k=1}^n (k+1)(u_k - u_{k+1}) \end{aligned}$$

Or d'après la question précédente, $(k+1)(u_{k+1} - u_k) = p u_{k+1}$, d'où :

$$S_n = (n+1)u_{n+1} - u_1 + p \sum_{k=1}^n u_{k+1} = (n+1)u_{n+1} - u_1 + p(S_n - u_1 + u_{n+1}) = (n+p+1)u_{n+1} - (p+1)u_1 + pS_n$$

Or $u_1 = \frac{1}{p+1}$ donc $S_n = \frac{1}{p-1} (1 - (n+p+1)u_{n+1})$.

3. On majore brutalement :

$$0 \leq (n+p)u_n = \frac{n!p!}{(n+p-1)!} = \frac{p!}{\prod_{k=n+1}^{n+p-1} k} \leq \frac{p!}{\prod_{k=n+1}^{n+p-1} n} = \frac{p!}{n^{p-1}}$$

Comme $p \geq 2$, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n^{p-1}} = 0$ et donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = 0$.

4. On a $S_n = \frac{1}{p-1}(1 - v_{n+1})$. On en déduit que (S_n) converge vers $\frac{1}{p-1}$.

Solution 27

Montrons que la suite (u_n) est croissante. Soit $n \in \mathbb{N}^*$ et étudions $f : x \in [1, n] \mapsto (n+1) \ln \frac{x+1}{n+1} - n \ln \frac{x}{n}$. f est clairement dérivable sur $[1, n]$ et pour tout $x \in [1, n]$, $f'(x) = \frac{n+1}{x+1} - \frac{n}{x} = \frac{x-n}{x(x+1)} \leq 0$. Comme $f(n) = 0$, on en déduit que f est positive sur $[1, n]$. En particulier, pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $n \ln \frac{k}{n} \leq (n+1) \ln \frac{k+1}{n+1}$, ce qui équivaut à $\left(\frac{k}{n}\right)^n \leq \left(\frac{k+1}{n+1}\right)^{n+1}$. On en déduit que

$$u_{n+1} = \sum_{k=1}^{n+1} \left(\frac{k}{n+1}\right)^{n+1} = \left(\frac{1}{n+1}\right)^{n+1} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{k+1}{n+1}\right)^{n+1} \geq \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n = u_n$$

La suite (u_n) est donc bien croissante.

Montrons que la suite (u_n) est majorée. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On a classiquement $\ln x \leq x - 1$ pour tout $x \in \mathbb{R}_+^*$. On a donc notamment $\ln \frac{k}{n} \leq \frac{k}{n} - 1$ puis $n \ln \frac{k}{n} \leq k - n$ et finalement $\left(\frac{k}{n}\right)^n \leq e^{k-n}$ pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$. En utilisant la formule de la série géométrique

$$u_n = \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n \leq \sum_{k=1}^n e^{k-n} = e^{1-n} \frac{e^n - 1}{e - 1} = \frac{e - e^{1-n}}{e - 1} \leq \frac{e}{e - 1}$$

La suite (u_n) est donc bien majorée.

Elle converge d'après le théorème de la limite monotone.

Solution 28

1. Il suffit d'étudier $x \mapsto \ln(1+x) - x$ sur $] -1, +\infty[$.

2. Soit $p \in \mathbb{N}^*$. D'après la question précédente

$$\ln\left(1 + \frac{1}{p}\right) \leq \frac{1}{p}$$

ce qui équivaut à

$$\ln\left(\frac{p+1}{p}\right) \leq \frac{1}{p}$$

ou encore

$$\ln(p+1) - \ln(p) \leq \frac{1}{p}$$

Toujours d'après la question précédente,

$$\ln\left(1 - \frac{1}{p+1}\right) \leq -\frac{1}{p+1}$$

ce qui équivaut à

$$\ln\left(\frac{p}{p+1}\right) \leq -\frac{1}{p+1}$$

ou encore

$$\ln(p) - \ln(p+1) \leq -\frac{1}{p+1}$$

et finalement à

$$\ln(p+1) - \ln(p) \leq \frac{1}{p+1}$$

3. Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$,

$$u_{n+1} - u_n = \frac{1}{n+1} + \ln(n) - \ln(n+1) \leq 0$$

d'après la question précédente. Ainsi (u_n) est-elle décroissante.

4. Puisque pour tout $k \in \mathbb{N}^*$,

$$\frac{1}{k+1} \leq \ln(k+1) - \ln(k)$$

on obtient pour tout $n \geq 2$

$$\sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k+1} \leq \sum_{k=1}^{n-1} \ln(k+1) - \ln(k)$$

autrement dit

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - 1 \leq \ln(n)$$

via un changement d'indice et un télescopage. Ceci équivaut encore à $u_n \leq 1$.

De même, puisque pour tout $k \in \mathbb{N}^*$,

$$\ln(k+1) - \ln(k) \leq \frac{1}{k}$$

on obtient pour tout $n \geq 2$

$$\sum_{k=1}^{n-1} \ln(k+1) - \ln(k) \leq \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k}$$

autrement dit

$$\ln(n) \leq u_n - \frac{1}{n}$$

via un changement d'indice et un télescopage. Ceci équivaut encore à $u_n \geq \frac{1}{n}$. A fortiori, $u_n \geq 0$.

La suite (u_n) étant décroissante et minorée par 0, elle converge vers un réel γ . Mais puisque $0 \leq u_n \leq 1$ pour tout $n \geq 2$, $\gamma \in [0, 1]$.

REMARQUE. La majoration par 1 pouvait également être obtenue en utilisant le fait que (u_n) est décroissante et que $u_1 = 1$.

Solution 29

Il s'agit de prouver que la suite de terme général

$$\alpha_n = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{k!}{n!}$$

converge vers 0. Or,

$$\alpha_n = \frac{1}{n} + \sum_{k=0}^{n-2} \frac{k!}{n!}.$$

Le plus grand terme de la somme correspondant à l'indice $n-2$ on a l'encadrement suivant,

$$0 \leq \sum_{k=0}^{n-2} \frac{k!}{n!} \leq (n-1) \times \frac{(n-2)!}{n!},$$

ainsi,

$$0 \leq \sum_{k=0}^{n-2} \frac{k!}{n!} \leq \frac{1}{n},$$

et par encadrement

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \alpha_n = 0.$$

Solution 30

Soit $f : [1, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ définie par

$$x \mapsto \sqrt{x}.$$

La fonction f est donc strictement croissante sur $[1, +\infty[$. Ainsi, $\forall k \geq 1, \forall x \in [k, k+1]$,

$$f(k) \leq f(x) \leq f(k+1)$$

d'où, $\forall k \geq 1$,

$$f(k) \leq \int_k^{k+1} f(x) dx \leq f(k+1),$$

et en sommant de $k = 1$ à $k = n - 1$, pour $n \geq 2$,

$$\sum_{k=1}^n f(k) \leq \int_1^n f(x) dx \leq \sum_{k=2}^{n+1} f(k),$$

c'est-à-dire

$$S_n \leq \int_1^n f(x) dx \leq S_n + f(n+1) - 1.$$

Or, une primitive de f sur $[1, +\infty[$ est donnée par

$$x \mapsto F(x) = \frac{2}{3}x^{3/2}$$

d'où $\forall n \geq 2$,

$$\frac{2}{3}n^{3/2} - \sqrt{n+1} + \frac{1}{3} \leq S_n \leq \frac{2}{3}n^{3/2} - \frac{2}{3},$$

Et par croissances comparées,

$$S_n \sim \frac{2}{3}n^{3/2}.$$

Suites définies par des produits

Solution 31

1. Soit $u \geq 0$. On a $\forall t \in [0, u]$,

$$1 - t \leq \frac{1}{1+t} \leq 1,$$

d'où, après intégration sur $[0, u]$,

$$\int_0^u (1-t) dt \leq \int_0^u \frac{dt}{1+t} \leq \int_0^u dt,$$

c'est-à-dire

$$u - \frac{u^2}{2} \leq \ln(1+u) \leq u.$$

2. On a

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

Or, d'après le résultat de la question 1., $\forall k \leq n$,

$$\frac{k}{n^2} \leq \ln\left(1 + \frac{k}{n^2}\right) \leq \frac{k}{n^2} + \frac{k^2}{n^4},$$

et en additionnant ces n inégalités membre à membre,

$$\frac{n(n+1)}{2n^2} \leq \ln(u_n) \leq \frac{n(n+1)}{n^2} + \frac{v_n}{n^4},$$

où

$$v_n = \sum_{k=1}^n k^2.$$

Or, par un encadrement grossier,

$$0 \leq v_n \leq n \times n^2 = n^3.$$

et puisque

$$\frac{n(n+1)}{2n^2} \sim \frac{1}{2},$$

d'après le théorème d'encadrement,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \ln(u_n) = \frac{1}{2}.$$

Par continuité de l'exponentielle en $1/2$,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = \sqrt{e}.$$

Solution 32

1. Soit $x \in \mathbb{R}$. Si $x = 1$, on a $P_n(x) = 2^{n+1}$. Soit $x \neq 1$. Raisonnons par récurrence sur n . Pour tout n dans \mathbb{N} , notons HR(n) l'hypothèse suivante

$$P_n(x) = \frac{x^{2^{n+1}} - 1}{x - 1}.$$

- HR(0) est vraie puisque $P_0(x) = x + 1 = \frac{x^2 - 1}{x - 1}$.
- Soit $n \geq 0$. Supposons HR(n) vraie. On a

$$\begin{aligned} P_{n+1}(x) &= P_n(x) \times (x^{2^{n+1}} + 1) \\ &= \frac{x^{2^{n+1}} - 1}{x - 1} \times (x^{2^{n+1}} + 1) \\ &= \frac{x^{2 \times 2^{n+1}} - 1}{x - 1} = \frac{x^{2^{n+2}} - 1}{x - 1} \end{aligned}$$

d'où HR($n + 1$).

2. Distinguons trois cas.

- Si $|x| > 1$ ou $x = 1$, la suite $(P_n(x))_{n \geq 0}$ diverge (vers $+\infty$ si $x \geq 1$ et vers $-\infty$ si $x < -1$).
- Si $x = -1$, la suite est constante égale à 0.
- Si $|x| < 1$, la suite $(P_n(x))_{n \geq 0}$ converge vers $\frac{1}{1-x}$.

Solution 33

1. Le résultat découle immédiatement de l'inégalité suivante :

$$(2x + 1)^2 = 4x^2 + 4x + 1 \geq 4x(x + 1).$$

2. D'après le résultat de la question 1., $\forall n \geq 0$,

$$0 \leq u_n \leq \left(\frac{1}{4}\right)^n,$$

et d'après le théorème d'encadrement,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 0.$$

Solution 34

Puisque $\forall n \geq 0$,

$$1 \leq \binom{n}{k} \leq 2^n,$$

on a l'encadrement suivant :

$$1 \leq u_n \leq 2^{n(n+1)/n^3}.$$

Et puisque $x \mapsto 2^x$ est continue en 0,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} 2^{n(n+1)/n^3} = 1$$

ainsi

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 1.$$

Solution 35

1. On multiplie au numérateur et au dénominateur par $2 \times 4 \times 6 \times \dots \times (2n) = 2^n n!$ et on trouve $u_n = \frac{(2n)!}{2^{2n}(n!)^2} = \frac{1}{2^{2n}} \binom{2n}{n}$.
2. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, $u_{n+1} = \frac{2n+1}{2n+2} u_n \leq u_n$. La suite (u_n) est donc décroissante et minorée par 0 : elle converge.
3. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, $v_{n+1} = (n+2)u_{n+1}^2 = (n+2) \left(\frac{2n+1}{2n+2} \right)^2 u_n^2 = \frac{n+2}{n+1} \left(\frac{2n+1}{2n+2} \right)^2 v_n$. Or $(n+2)(2n+1)^2 - (n+1)(2n+2)^2 = -3n-2 < 0$ donc $v_{n+1} \leq v_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. Ainsi (v_n) est décroissante minorée par 0 : elle converge. On a $u_n = \sqrt{\frac{v_n}{n+1}}$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. On en déduit que (u_n) converge vers 0.

Solution 36

On prouve aisément par récurrence que pour tout $n \in \mathbb{N}$.

$$(1-z) \prod_{k=0}^n (1+z^{2^k}) = 1 - z^{2^{n+1}}$$

Puisque $|z| < 1$, $z \neq 1$ et donc

$$\prod_{k=0}^n (1+z^{2^k}) = \frac{1-z^{2^{n+1}}}{1-z}$$

pour tout $n \in \mathbb{N}$.

Enfin $\lim_{n \rightarrow +\infty} |z|^{2^{n+1}} = 0$ car $|z| < 1$ d'où le résultat demandé.

Solution 37

1. On utilise l'expression factorielle des coefficients binomiaux :

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{(2n+2)!}{((n+1)!)^2} \frac{(n!)^2}{(2n)!} = \frac{(2n+2)(2n+1)}{(n+1)^2} = \frac{2(2n+1)}{n+1}$$

2. Remarquons que les termes de (u_n) sont strictement positifs. De plus, pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = \frac{\sqrt{n+1}}{4^{n+1}} \frac{4^n}{\sqrt{n}} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{1}{4} \frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n}} \frac{2(2n+1)}{n+1} = \frac{2n+1}{2\sqrt{n(n+1)}}$$

Or $(2n+1)^2 = 4n^2 + 4n + 1 > 4n^2 + 4n = (2\sqrt{n(n+1)})^2$. On en déduit que $\frac{u_{n+1}}{u_n} > 1$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. La suite (u_n) est donc (strictement) croissante.

3. On procède par récurrence comme indiqué dans l'énoncé. Notre hypothèse de récurrence est donc

$$\text{HR}(n) : u_n \leq \sqrt{\frac{n}{2n+1}}$$

Initialisation On a $u_0 = 0$ donc $\text{HR}(0)$ est vraie.

Hérédité On suppose HR(n) pour un certain $n \in \mathbb{N}$. D'après la question précédente, $u_{n+1} = \frac{2n+1}{2\sqrt{n(n+1)}}$ donc en utilisant HR(n) :

$$u_{n+1} \leq \frac{2n+1}{2\sqrt{n(n+1)}} \sqrt{\frac{n}{2n+1}} = \frac{\sqrt{2n+1}}{2\sqrt{n+1}}$$

Or on a les équivalences suivantes

$$\frac{\sqrt{2n+1}}{2\sqrt{n+1}} \leq \sqrt{\frac{n+1}{2n+3}} \iff \sqrt{(2n+1)(2n+3)} \leq 2(n+1) \iff (2n+1)(2n+3) \leq 4(n+1)^2 \iff 4n^2+8n+3 \leq 4n^2+8n+4$$

La dernière égalité est toujours vraie : on en déduit que $u_{n+1} \leq \sqrt{\frac{n+1}{2n+3}}$ i.e. HR($n+1$) est vraie.

Conclusion Par récurrence, HR(n) est vraie pour tout $n \in \mathbb{N}$.

4. D'après la question précédente, $u_n \leq \sqrt{\frac{n}{2n+1}} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$. La suite (u_n) est croissante et majorée, elle converge vers un réel $K \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$.

De plus, $u_1 = \frac{1}{2}$ et donc $u_n \geq \frac{1}{2}$ pour $n \geq 1$. Ainsi $K \geq \frac{1}{2}$. On a donc $\frac{a_n \sqrt{n}}{4^n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} K$ i.e. $\binom{2n}{n} \sim K \frac{4^n}{\sqrt{n}}$.

Suites récurrentes d'ordre un

Solution 38

1. Récurrence évidente.

2. Si $u_n \geq 1$, alors $u_n \leq u_n^2$. De plus, $n \geq 1$ donc $1 + u_n \leq n + u_n^2$. Par conséquent, $u_{n+1} \leq 1$.
Si $u_n \leq 1$, alors $1 + u_n \leq 2$. On a aussi $n + u_n^2 \geq n$ de manière évidente. Donc $u_{n+1} \leq \frac{2}{n}$.

3. Si $u_2 \geq 1$, alors $u_3 \leq 1$.
Si $u_2 \leq 1$, alors $u_3 \leq \frac{2}{2} = 1$.

Montrons par récurrence que pour $n \geq 3$, $u_n \leq \frac{2}{n-1}$.

Initialisation : On a vu que $u_3 \leq 1$ donc l'hypothèse de récurrence est vraie au rang 3.

Hérédité : Supposons que $u_n \leq \frac{2}{n-1}$ pour un certain $n \geq 3$. On a donc $u_n \leq 1$ et donc $u_{n+1} \leq \frac{2}{n}$ et l'hypothèse de récurrence est vraie au rang $n+1$.

Conclusion : L'hypothèse de récurrence est vraie pour tout $n \geq 3$.

4. Par le théorème des gendarmes, on conclut que (u_n) converge vers 0.

5. Pour $n \geq 2$, on a : $u_n = \frac{1 + u_{n-1}}{n + u_{n-1}^2}$. Or $u_{n-1} = o(1)$ d'après la question précédente. Donc $1 + u_{n-1} \sim 1$ et $n + u_{n-1}^2 \sim n$. On en déduit que $u_n \sim \frac{1}{n}$.

6. Après un calcul laborieux, on trouve :

$$v_{n+1} = \frac{2n^2 + n^2 v_n + n + n v_n - v_n^2 - 2v_n - 1}{n^3 + v_n^2 + 2v_n + 1}$$

7. On a $v_n = o(1)$. Par conséquent

$$\begin{aligned} 2n^2 + n^2 v_n + n + n v_n - v_n^2 - 2v_n - 1 &\sim 2n^2 \\ n^3 + v_n^2 + 2v_n + 1 &\sim n^3 \end{aligned}$$

Ainsi $v_{n+1} \sim \frac{2}{n}$ et $v_n \sim \frac{2}{n-1} \sim \frac{2}{n}$.

8. Comme $v_n = \frac{2}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$, on a :

$$u_n = \frac{1}{n} + \frac{v_n}{n} = \frac{1}{n} + \frac{2}{n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

Solution 39

- *Commençons par une figure.*

On conjecture que la suite converge vers 0.

- *La suite est définie* : notons f l'application de \mathbb{R} dans \mathbb{R} définie par

$$x \mapsto \frac{x}{1+x^2}.$$

Puisque f est définie sur \mathbb{R} , la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ est définie $\forall u_0 \in \mathbb{R}$.

- *Point(s) fixe(s) de f* : Un réel x est point fixe de f si et seulement si

$$\frac{x}{1+x^2} = x \iff x^3 = 0,$$

ie $x = 0$.

- *Etude de la convergence* : supposons $u_0 \geq 0$. Posons $I = [0, +\infty[$. Puisque I est stable par f , on prouve par une récurrence sans difficulté que

$$\forall n \geq 0, u_n \in I.$$

On a alors, pour tout $n \geq 0$,

$$u_{n+1} = \frac{u_n}{u_n^2 + 1} \leq u_n.$$

La suite $(u_n)_{n \geq 0}$ est décroissante minorée par 0 donc convergente. Puisque sa limite est un point fixe de f qui n'en admet qu'un, 0, on a

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 0.$$

Puisque la fonction f est impaire, pour tout u_0 négatif, la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ croît vers 0.

Solution 40

- *Commençons par une figure.*

On conjecture la convergence de la suite vers 2 pour tout condition initiale $0 \leq u_0 < 4$, vers 4 pour pour $u_0 = 4$ (plus précisément : la suite est constante dans ce cas) et la divergence de la suite pour tout $u_0 > 4$.

- *Définition et points fixes* : notons f l'application de \mathbb{R} dans \mathbb{R} définie par

$$x \mapsto \frac{x^2 + 8}{6}.$$

Puisque f est définie sur \mathbb{R} , la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ est définie $\forall u_0 \in \mathbb{R}$. On a, pour tout $x \in \mathbb{R}$,

$$f(x) - x = \frac{x^2 - 6x + 8}{6} = \frac{(x-2)(x-4)}{6}.$$

Si $u_0 = 2$ ou 4, la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ est constante. Notons

$$I_1 = [0, 2[, \quad I_2 =]2, 4[, \quad I_3 =]4, +\infty[.$$

La fonction f est croissante sur \mathbb{R}_+ , les réels 2 et 4 sont des points fixes de f et $f(0) > 0$, donc les trois intervalles I_k sont stables par f .

- *Etude de la convergence* : puisque $\forall x \in I_1, f(x) \geq x$, pour tout $u_0 \in I_1, (u_n)_{n \geq 0}$ est croissante majorée par 2 donc converge vers l'unique point fixe de f appartenant à $[0, 2]$ ie 2. puisque $\forall x \in I_2, f(x) \leq x$, pour tout $u_0 \in I_2, (u_n)_{n \geq 0}$ est décroissante minorée par 2 donc converge vers l'unique point fixe de f appartenant à $[2, 4[$ ie 2. Puisque $\forall x \in I_3, f(x) \geq x$, pour tout $u_0 \in I_3, (u_n)_{n \geq 0}$ est croissante non convergente car

$$[u_0, +\infty[$$

ne contient aucun point fixe de f . La suite diverge donc vers $+\infty$. On en déduit l'étude de la convergence pour toute condition initiale négative : si $u_0 = -2$ ou -4 , on a $u_1 = 2$ ou 4 et la suite est constante à partir du rang 1. Si $u_0 \in]-4, 0]$, on a $u_1 \in [0, 4[$ et la suite converge vers 2. Si $u_0 \in]-\infty, -4[$, on a $u_1 \in]4, +\infty[$ et la suite diverge vers $+\infty$.

Solution 41

- *Figure.*

On conjecture que, pour $u_0 > 1$, la suite diverge vers $+\infty$ et, pour $u_0 \leq 1$, la suite converge vers 1.

- *Définition de la suite* : comme f est définie sur \mathbb{R} , la suite est définie pour toute condition initiale $u_0 \in \mathbb{R}$.
- *Monotonie de la suite* : soit δ la fonction définie sur \mathbb{R} par $\delta(x) = e^{x-1} - x$. Cette fonction est dérivable sur \mathbb{R} et, pour tout réel x , $\delta'(x) = e^{x-1} - 1$. La fonction δ est donc strictement décroissante sur $] -\infty, 1]$ et strictement croissante sur $[1, +\infty[$. Puisque $\delta(0) = 0$, δ est positive sur \mathbb{R} . La fonction f admet donc un unique point fixe valant 0 et, $\forall u_0 \in \mathbb{R}$, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\delta(u_n) \geq 0$ ie $u_{n+1} \geq u_n$. La suite est donc croissante.
- *Convergence de la suite* : supposons que $u_0 \leq 1$. Puisque $I =] -\infty, 1]$ est stable par f , on prouve par une récurrence immédiate que $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_n \in I$. La suite est croissante majorée par 1 donc convergente. Sa limite est un point fixe de f , elle vaut donc 1. Supposons $u_0 > 1$. Puisque $I =]1, +\infty[$ est stable par f , on prouve par une récurrence immédiate que $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_n \in I$. La suite est croissante minorée par $u_0 > 1$, elle ne peut converger car $[u_0, +\infty[$ ne contient aucun point fixe de f . La suite diverge donc vers $+\infty$ d'après le théorème des suites monotones.

Solution 42

- *Figure.*

On conjecture que la suite converge toujours vers 0.

- *Définition de la suite* : puisque que \arctan est définie sur \mathbb{R} , la suite est définie pour toute condition initiale $u_0 \in \mathbb{R}$.
- *Monotonie de la suite* : soit δ la fonction définie sur \mathbb{R} par $\delta(x) = \arctan(x) - x$. Cette fonction est dérivable sur \mathbb{R} et, pour tout réel x ,

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

La fonction δ est donc strictement décroissante sur \mathbb{R} . Puisque $\delta(0) = 0$, δ est négative sur \mathbb{R}_+ et positive sur \mathbb{R}_- . La fonction f admet donc un unique point fixe valant 0.

- *Convergence de la suite* : si $u_0 \leq 0$. Puisque $I =]-\infty, 0]$ est stable par f , on prouve par une récurrence immédiate que $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_n \in I$. Ainsi, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\delta(u_n) \geq 0$ ie $u_{n+1} \geq u_n$. La suite est donc croissante. Puisqu'elle est majorée par 0, elle converge. Sa limite est un point fixe de f , elle vaut donc 0. Si $u_0 \leq 0$. Puisque $I = [0, +\infty[$ est stable par f , on prouve par une récurrence immédiate que $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_n \in I$. Ainsi, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\delta(u_n) \leq 0$ ie $u_{n+1} \leq u_n$. La suite est donc décroissante. Puisqu'elle est minorée par 0, elle converge. Sa limite est un point fixe de f , elle vaut donc 0.

Solution 43

- *Figure.*

On conjecture que la suite converge vers 0.

- *Définition de la suite* : comme $f(\mathbb{R}_+) \subset \mathbb{R}_+$, la suite est définie pour toute condition initiale $u_0 \in \mathbb{R}_+$.
- *Convergence de la suite* : soit δ la fonction définie sur \mathbb{R}_+ par $\delta(x) = \ln(1+x) - x$. Cette fonction est dérivable sur \mathbb{R}_+ et, pour tout réel x strictement positif,

$$\delta'(x) = \frac{1}{1+x} - 1 = -\frac{x}{1+x} < 0.$$

La fonction δ est donc strictement décroissante sur \mathbb{R}_+ . Puisque $\delta(0) = 0$, δ est négative sur \mathbb{R}_+ . La fonction f admet donc un unique point fixe valant 0. Puisque $I = [0, +\infty[$ est stable par f , on prouve par une récurrence immédiate que $\forall n \in \mathbb{N}$, u_n appartient à I . Ainsi, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\delta(u_n) \leq 0$ ie $u_{n+1} \leq u_n$. La suite est donc décroissante. Puisqu'elle est minorée par 0, elle converge. Sa limite est un point fixe de f , elle vaut donc 0.

Solution 44

- *Figure.*

On conjecture que la suite converge vers 0.

- *Définition de la suite* : comme th est définie sur \mathbb{R} , la suite est bien définie pour toute condition initiale $u_0 \in \mathbb{R}$.
- *Convergence de la suite* : soit δ la fonction définie sur \mathbb{R} par $\delta(x) = \text{th}(x) - x$. Cette fonction est dérivable sur \mathbb{R} et, pour tout réel x non nul,

$$\delta'(x) = 1 - \text{th}^2(x) - 1 = -\text{th}^2(x) < 0.$$

La fonction δ est donc strictement décroissante sur \mathbb{R} . Puisque $\delta(0) = 0$, δ est négative sur \mathbb{R}_+ et positive sur \mathbb{R}_- . La fonction f admet donc un unique point fixe valant 0.

- *Cas 1* : $u_0 \leq 0$. Puisque $I =]-\infty, 0]$ est stable par f , on prouve par une récurrence immédiate que $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_n \in I$. Ainsi, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\delta(u_n) \geq 0$ ie $u_{n+1} \geq u_n$. La suite est donc croissante. Puisqu'elle est majorée par 0, elle converge. Sa limite est un point fixe de f , elle vaut donc 0.
- *Cas 2* : $u_0 \leq 0$. Puisque $I = [0, +\infty[$ est stable par f , on prouve par une récurrence immédiate que $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_n \in I$. Ainsi, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\delta(u_n) \leq 0$ ie $u_{n+1} \leq u_n$. La suite est donc décroissante. Puisqu'elle est minorée par 0, elle converge. Sa limite est un point fixe de f , elle vaut donc 0.

Suites pseudo-récurrentes

Solution 45

1. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on pose $v_n = a^{-n^2+n}u_n$.

- a. Soit $n \in \mathbb{N}$. Comme $a^{-(n+1)^2+n+1} = a^{-n(n+1)}$, on a

$$\begin{aligned} v_{n+1} - v_n &= a^{-n(n+1)}(a^{2n}u_n + a^{n^2}) - a^{-n^2+n}u_n \\ &= a^{-n} \end{aligned}$$

b. Après telescopage et puisque $v_0 = 1$, on a pour tout entier naturel n non nul,

$$v_n - v_0 = \sum_{k=0}^{n-1} (v_{k+1} - v_k) = \sum_{k=0}^{n-1} a^{-k},$$

d'après la question précédente. Ainsi,

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, v_n = 1 + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{a^k}.$$

c. Il y a deux cas à considérer...

- Si $a = 1$, on a

$$\forall n \in \mathbb{N}, v_n = n + 1,$$

et donc

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, u_n = n + 1.$$

- Si $a \neq 1$, on peut appliquer la formule de la série géométrique : pour tout entier naturel n non nul,

$$v_n = 1 + \frac{1 - 1/a^n}{1 - 1/a}$$

et donc, $\forall n \in \mathbb{N}^*$,

$$\begin{aligned} u_n &= a^{n^2-n} + a^{n^2-n} \frac{1 - 1/a^n}{1 - 1/a} \\ &= \frac{2a^{n^2-n} - a^{n^2-n-1} - a^{n^2-n}}{a^n - a^{n-1}} \\ &= a^{n^2-n} \frac{2 - 1/a - a^{-n}}{1 - 1/a} \end{aligned}$$

2. D'après ce qui précède,

- Si $a = 1$, $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = +\infty$.
- Si $a = -1$, on a

$$\forall n \geq 1, u_n = 1 + \frac{1 - (-1)^n}{2}$$

et $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ diverge.

- Si $|a| > 1$, on a

$$u_n \sim a^{n^2-n} \frac{2 - 1/a}{1 - 1/a}$$

et la suite diverge vers $+\infty$.

- Si $|a| < 1$, on a

$$u_n \sim -\frac{a^{n^2-2n}}{1 - 1/a}$$

et la suite tend vers 0.

Solution 46

1. On prouve par une récurrence forte immédiate que $\forall n \geq 0, u_n \geq 0$. Ainsi, pour tout $n \geq 0$,

$$u_{n+1} - u_n \geq 0$$

et la suite $(u_{n \geq 0})$ est croissante.

2. Prouvons le résultat par récurrence. L'hypothèse au rang n étant que la formule est vraie pour tous les entiers $k \leq n$.

- Le cas $n = 1$ est banal. Pour $n = 2$, le résultat est acquis car $u_2 = u_1 + \alpha u_0 < 2u_1$.

- Supposons l'hypothèse au rang $n \geq 2$. On a alors,

$$\begin{aligned} u_{n+1} &\leq u_1 \prod_{k=0}^{n-1} (1 + \alpha^k) \\ &\quad + \alpha^n u_1 \prod_{k=0}^{n-2} (1 + \alpha^k) \\ &\leq \alpha^n u_1 \prod_{k=0}^{n-2} (1 + \alpha^k) \\ &\quad \times [\alpha^n + \alpha^{n-1} + 1] \end{aligned}$$

or,

$$\alpha^n + \alpha^{n-1} + 1 \leq (1 + \alpha^{n-1})(1 + \alpha^n),$$

donc

$$u_{n+1} \leq u_1 \prod_{k=0}^n (1 + \alpha^k)$$

et l'hypothèse au rang $n + 1$ est vérifiée.

- L'inégalité est acquise pour tout rang $n \geq 1$ d'après le principe de récurrence.

Soit $u \geq 0$, puisque

$$\forall t \in [0, u], \quad \frac{1}{1+t} \leq 1,$$

on obtient après intégration sur $[0, u]$,

$$\ln(1+u) \leq u.$$

Ainsi, $\forall n \geq 1$,

$$\ln \left(\prod_{k=0}^{n-1} (1 + \alpha^k) \right) \leq \sum_{k=0}^{n-1} u^{\alpha^k}.$$

Or, $\forall n \geq 1$,

$$\sum_{k=0}^{n-1} u^{\alpha^k} = \frac{\alpha^n - 1}{\alpha - 1} \leq \frac{1}{1 - \alpha}.$$

D'après le résultat de la question 2., la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ est donc majorée. Puisqu'elle est croissante, elle converge.

Solution 47

1. Par une récurrence immédiate, on prouve que $\forall n \geq 1, x_n > 0$. On a donc, $\forall n \geq 1$,

$$x_{n+1} = \frac{x_n}{1 + nx_n^2} \leq x_n.$$

La suite $(x_n)_{n \geq 1}$ est décroissante et minorée par 0, elle converge donc vers un réel $\ell \geq 0$. Raisonnons par l'absurde en supposant $\ell > 0$. Alors, $\forall n \geq 1$,

$$0 \leq x_{n+1} \leq \frac{x_1}{1 + n\ell^2},$$

et d'après le théorème d'encadrement,

$$\ell = 0,$$

ce qui est absurde. Ainsi,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = 0.$$

2. Prouvons la propriété par récurrence sur $n \geq 2$. Puisque $\forall x \in \mathbb{R}, x(1-x) \leq 1/4$, on a

$$x_2 \leq \frac{1}{4}.$$

Supposons l'inégalité vérifiée au rang $n \geq 2$. Alors $1 - x_n \geq 0$ et donc

$$nx_n(1 - x_n) \leq (1 - x_n),$$

ainsi

$$(n + 1)x_{n+1} \leq 1,$$

et la propriété est acquise au rang $n + 1$.

3. On remarque que $\forall n \geq 1$,

$$\frac{(n + 1)x_{n+1}}{nx_n} = \frac{n + 1}{n} \times \frac{1}{1 + nx_n^2} \geq 1$$

si et seulement si

$$n^2x_n^2 \leq 1,$$

ce qui est vrai d'après la question 2. Puisque $\forall n \geq 1$, on en déduit que la suite de terme général nx_n est croissante.

4. On remarque que $\forall n \geq 2$ et $\forall k \leq n$,

$$1 \geq (k - 1)x_{k-1} = \frac{1}{x_k} - \frac{1}{x_{k-1}}.$$

D'où, en additionnant membre à membre ces $n - 1$ inégalités et après telescopage,

$$\frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_1} \leq n - 1,$$

puis,

$$n \leq \frac{1}{x_n} \leq n - 1 + \frac{1}{x_1},$$

donc

$$\frac{1}{x_n} \sim n,$$

et ainsi

$$x_n \sim \frac{1}{n}.$$

Solution 48

1. La minoration par 0 est évidente. Prouvons la majoration par 2 par récurrence. On a $u_1 = 1$ donc l'inégalité est vraie au rang 1. Supposons que $\frac{u_{n-1}}{\sqrt{n-1}} \leq 2$ pour un certain $n \geq 2$. Alors

$$\frac{u_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{1 + \frac{u_{n-1}}{n}} \leq \sqrt{1 + \frac{u_{n-1}}{\sqrt{n-1}}} \leq \sqrt{3} \leq 2$$

L'inégalité est donc établie pour tout $n \geq 1$.

2. Comme pour tout entier $n \geq 2$, $\frac{u_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{1 + \frac{u_{n-1}}{n}} = \sqrt{1 + \frac{u_{n-1}}{\sqrt{n-1}} \frac{\sqrt{n-1}}{n}}$, on a en utilisant l'inégalité de la question précédente :

$$1 \leq \frac{u_n}{\sqrt{n}} \leq \sqrt{1 + 2 \frac{\sqrt{n-1}}{n}}$$

D'après le théorème des gendarmes, $\left(\frac{u_n}{\sqrt{n}}\right)_{n \geq 1}$ converge vers 1.

3. $u_n - \sqrt{n} = \sqrt{n + u_{n-1}} - \sqrt{n} = \frac{u_{n-1}}{\sqrt{n + u_{n-1}} + \sqrt{n}}$. Or d'après la première question $u_{n-1} = \mathcal{O}(\sqrt{n}) = o(n)$ donc $\sqrt{n + u_{n-1}} \sim \sqrt{n}$.

Ainsi $\frac{u_{n-1}}{\sqrt{n + u_{n-1}} + \sqrt{n}} \sim \frac{u_{n-1}}{2\sqrt{n}} \sim \frac{u_{n-1}}{2\sqrt{n-1}}$. Or $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{u_{n-1}}{2\sqrt{n-1}} = \frac{1}{2}$ d'après la deuxième question. On en déduit que $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n - \sqrt{n} = \frac{1}{2}$.

Suites à valeurs complexes

Solution 49

1. a. Comme $|z_n| \in \mathbb{R}$, $y_{n+1} = \frac{y_n}{2}$. On en déduit que (y_n) converge vers 0.
 b. Par inégalité triangulaire, pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$|z_{n+1}| \leq \frac{|\operatorname{Re}(z_n)| + |z_n|}{2} \leq |z_n|$$

puisque pour tout complexe z , $|\operatorname{Re}(z)| \leq |z|$.

- c. On a pour tout $n \in \mathbb{N}$:

$$\operatorname{Re}(z_{n+1}) = \frac{\operatorname{Re}(z_n) + |z_n|}{2} \geq \operatorname{Re}(z_n)$$

puisque pour tout complexe z , $\operatorname{Re}(z) \leq |z|$. Ainsi (x_n) est croissante.

- d. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\operatorname{Re}(z_n) \leq |z_n| \leq |z_0|$ par décroissance de $(|z_n|)$. Ainsi (x_n) est croissante et majorée ; elle converge.
 e. Comme (x_n) et (y_n) convergent, (z_n) converge. Puisque (y_n) converge vers 0, la limite de (z_n) est réelle.
 f. Si $z_0 \in \mathbb{R}_+$, on montre par récurrence que $z_n = z_0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. Donc (z_n) converge vers z_0 .
 Si $z_0 \in \mathbb{R}_-$, alors $z_1 = 0$ et on montre par récurrence que $z_n = 0$ pour tout $n \geq 1$. Donc (z_n) converge vers 0.
2. a. En appliquant la méthode de l'arc-moitié, on a :

$$z_{n+1} = r_n \cos \frac{\theta_n}{2} e^{i \frac{\theta_n}{2}}$$

Puisque $\theta_n \in]-\pi, \pi]$, $\frac{\theta_n}{2} \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ et donc $r_n \cos \frac{\theta_n}{2} \geq 0$. On en déduit que $r_{n+1} = r_n \cos \frac{\theta_n}{2}$.

Comme $\frac{\theta_n}{2} \in]-\pi, \pi]$, $\theta_{n+1} = \frac{\theta_n}{2}$.

- b. On en déduit immédiatement que (θ_n) converge vers 0.
 c. Comme $\alpha \in]-\pi, 0[\cup]0, \pi[$, $\frac{\alpha}{2^k} \neq 0[\pi]$ pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$. On utilise alors l'indication de l'énoncé :

$$S_n = \prod_{k=1}^n \frac{\sin \frac{\alpha}{2^{k-1}}}{2 \sin \frac{\alpha}{2^k}}$$

Par télescopage, on a $S_n = \frac{\sin \alpha}{2^n \sin \frac{\alpha}{2^n}}$.

Comme $\frac{\alpha}{2^n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$, $\sin \frac{\alpha}{2^n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\alpha}{2^n}$. Par conséquent, $2^n \sin \frac{\alpha}{2^n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \alpha$ puis $S_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \frac{\sin \alpha}{\alpha}$.

- d. Par une récurrence facile, $\theta_n = \frac{\theta_0}{2^n}$. On montre aussi facilement que pour $n \geq 1$:

$$r_n = r_0 \prod_{k=0}^{n-1} \cos \frac{\theta_k}{2} = r_0 \prod_{k=0}^{n-1} \cos \frac{\theta_0}{2^{k+1}} = r_0 \prod_{k=1}^n \cos \frac{\theta_0}{2^k}$$

Si $\theta_0 = 0$, $z_0 \in \mathbb{R}_+$ et on a vu que (z_n) est constante égale à z_0 . Ainsi (z_n) converge vers z_0 .

Si $\theta_0 = \pi$, $z_0 \in \mathbb{R}_-$ et on a vu que (z_n) est nulle à partir du rang 1. Ainsi (z_n) converge vers 0.

Si $\theta_0 \in]-\pi, 0[\cup]0, \pi[$, la question précédente montre que (r_n) converge vers $r_0 \frac{\sin \theta_0}{\theta_0}$. Comme (θ_n) converge vers 0, (z_n) converge également vers $r_0 \frac{\sin \theta_0}{\theta_0}$.

Solution 50

Supposons que (z_n) converge vers une limite $\ell \in \mathbb{C}$. Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a $z_{2n} = \exp(i \ln 2) z_n$ et par passage à la limite, $\ell = \exp(i \ln 2) \ell$. Puisque $\frac{\ln 2}{2\pi}$ n'est pas entier (on a $0 < \frac{\ln 2}{2\pi} < 1$), $\exp(i \ln 2) \neq 1$ et donc $\ell = 0$. Mais pour tout $n \in \mathbb{N}$, $|z_n| = 1$ et donc $|\ell| = 1$, ce qui est absurde. Ainsi (z_n) ne converge pas.

Suites extraites

Solution 51

Notons ℓ_1, ℓ_2 et ℓ_3 les limites respectives des suites :

$$(u_{2n})_{n \in \mathbb{N}}, (u_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}} \text{ et } (u_{3n})_{n \in \mathbb{N}}.$$

La suite de terme générale u_{6n} étant extraite de $(u_{3n})_{n \geq 0}$ mais également de $(u_{2n})_{n \geq 0}$, elle converge vers ℓ_3 et ℓ_1 , d'où $\ell_3 = \ell_1$ par unicité de la limite. De même, la suite de terme générale u_{6n+3} étant extraite de $(u_{3n})_{n \geq 0}$ mais également de $(u_{2n+1})_{n \geq 0}$, elle converge vers ℓ_3 et ℓ_2 , d'où $\ell_3 = \ell_2$ par unicité de la limite. Ainsi $\ell_1 = \ell_2$ et, d'après le cours, $(u_n)_{n \geq 0}$ converge.

Solution 52

Posons $u_n = \{\sqrt{n}\}$. Alors $u_{n^2} = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. De plus, $n - 1 \leq \sqrt{n^2 - 1} < n$ pour $n \geq 1$ donc $\{\sqrt{n^2 - 1}\} = n$. Enfin

$$\{\sqrt{n^2 - 1}\} = \sqrt{n^2 - 1} - (n - 1) = 1 + \sqrt{n^2 - 1} - n = 1 - \frac{1}{n + \sqrt{n^2 - 1}}$$

Les suites $(u_{n^2})_{n \in \mathbb{N}}$ et $(u_{n^2-1})_{n \geq 1}$ sont des suites extraites de la suite (u_n) de limites respectives 0 et 1. La suite (u_n) n'admet donc pas de limite.

Solution 53

Première méthode

Supposons qu'une des suites ne soit pas majorée – la suite (a_n) pour fixer les idées. Alors on peut extraire une suite $(a_{\varphi(n)})$ qui diverge vers $+\infty$. Puisque $e^{a_{\varphi(n)}} + e^{b_{\varphi(n)}} + e^{c_{\varphi(n)}} \geq e^{a_{\varphi(n)}}$, $e^{a_{\varphi(n)}} + e^{b_{\varphi(n)}} + e^{c_{\varphi(n)}}$ tend vers $+\infty$, ce qui contredit le fait que $e^{a_n} + e^{b_n} + e^{c_n}$ tend vers 3. Supposons maintenant qu'une des suites ne soit pas minorée – la suite (a_n) pour fixer les idées. Alors on peut extraire une suite $(a_{\varphi(n)})$ qui diverge vers $-\infty$. Les deux autres suites ne peuvent pas être majorées sinon $a_{\varphi(n)} + b_{\varphi(n)} + c_{\varphi(n)}$ tendrait vers $-\infty$. Ainsi une des suites n'est pas majorée et on est ramené au cas précédent dont on a vu qu'il était impossible.

Par conséquent, les trois suites sont bornées.

La suite (a_n) est bornée donc, d'après le théorème de Bolzano-Weierstrass, il existe donc une suite extraite $(a_{\varphi_1(n)})$ convergente. La suite $(b_{\varphi_1(n)})$ est également bornée donc il existe une suite extraite $(b_{\varphi_1 \circ \varphi_2(n)})$ convergente. Enfin, la suite $(c_{\varphi_1 \circ \varphi_2(n)})$ est bornée donc il existe une suite extraite $(c_{\varphi_1 \circ \varphi_2 \circ \varphi_3(n)})$ convergente. Pour simplifier les notations, posons $\varphi = \varphi_1 \circ \varphi_2 \circ \varphi_3$. Ainsi les suites $(a_{\varphi(n)})$, $(b_{\varphi(n)})$, $(c_{\varphi(n)})$ convergent. Notons a, b, c leurs limites. On a donc $a + b + c = 0$ et $e^a + e^b + e^c = 3$. Pour tout $x \in \mathbb{R}$, on a $e^x \geq 1 + x$ avec inégalité stricte lorsque $x \neq 0$. Supposons que l'un des réels a, b, c soit non nul – a pour fixer les idées. Alors $e^a > 1 + a$, $e^b \geq 1 + b$ et $e^c \geq 1 + c$ donc $e^a + e^b + e^c > 3 + a + b + c$ i.e. $3 > 3$ ce qui est absurde. Ainsi $a = b = c = 0$.

Ce qui précède montre que 0 est la seule valeur d'adhérence des suites (a_n) , (b_n) , (c_n) . Il est classique de montrer que 0 est la limite de ces trois suites.

Seconde méthode

Posons $f(x) = e^x - 1 - x$. On montre facilement que f est positive et ne s'annule qu'en 0. D'après l'énoncé $u_n = f(a_n) + f(b_n) + f(c_n)$ tend vers 0 lorsque n tend vers $+\infty$. De plus, $0 \leq f(a_n) \leq u_n$ donc, par encadrement, $(f(a_n))$ converge vers 0. La représentation graphique de f montre bien que (a_n) doit converger vers 0. Soit $\varepsilon > 0$. Posons $m = \min(f(\varepsilon), f(-\varepsilon))$. Il existe $N \in \mathbb{N}$ tel que pour tout $n \geq N$, $|f(a_n)| < m$. Les variations de f montrent alors que pour $n \geq N$, $|a_n| < \varepsilon$. Ainsi (a_n) converge vers 0. On raisonne de la même manière pour (b_n) et (c_n) .

Solution 54

Supposons (u_n) non majorée. Alors on peut en extraire une sous-suite $(u_{\varphi(n)})$ divergeant vers $+\infty$. Puisque $v_n = (u_n + v_n) - u_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$ et que $u_n + v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$, $(v_{\varphi(n)})$ diverge vers $-\infty$. Mais alors $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_{\varphi(n)}^p = +\infty$ et, q étant impair, $\lim_{n \rightarrow +\infty} v_{\varphi(n)}^q = -\infty$. Ainsi

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_{\varphi(n)}^p - v_{\varphi(n)}^q = +\infty, \text{ ce qui contredit l'énoncé.}$$

Supposons (u_n) non minorée. Alors on peut en extraire une sous-suite $(u_{\varphi(n)})$ divergeant vers $-\infty$. Puisque $v_n = (u_n + v_n) - u_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$ et que $u_n + v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$, $(v_{\varphi(n)})$ diverge vers $+\infty$. Mais alors, p étant impair, $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_{\varphi(n)}^p = -\infty$ et $\lim_{n \rightarrow +\infty} v_{\varphi(n)}^q = +\infty$. Ainsi

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_{\varphi(n)}^p - v_{\varphi(n)}^q = -\infty, \text{ ce qui contredit l'énoncé.}$$

La suite (u_n) est donc bornée. D'après le théorème de Bolzano-Weierstrass, elle admet une valeur d'adhérence $l \in \mathbb{R}$. Soit $(u_{\varphi(n)})$ une sous-suite convergeant vers l . Puisque $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n + v_n = 0$, $(v_{\varphi(n)})$ converge vers $-l$. Enfin, puisque $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_{\varphi(n)}^p - v_{\varphi(n)}^q = 0$, $l^p - (-l)^q = 0$. p et q étant impairs, ceci équivaut à $l^p + l^q = 0$. La fonction $x \mapsto x^p + x^q$ étant strictement croissante (encore une fois, on utilise le fait que p et q sont impairs) et s'annulant en 0, on a donc $l = 0$. 0 est l'unique valeur d'adhérence de la suite (u_n) : on démontre alors classiquement que (u_n) converge vers 0. Puisque $v_n = (u_n + v_n) - u_n$, on en déduit que (v_n) converge vers 0.

Solution 55

1. Il suffit par exemple de remarquer que $[0, 7]^2$ est stable par l'application $f : (x, y) \mapsto (\sqrt{7-y}, \sqrt{7+y})$. Soit en effet $(x, y) \in [0, 7]^2$. Alors

$$\sqrt{7-y} \leq \sqrt{7} \leq 7 \quad \text{et} \quad \sqrt{7+x} \leq \sqrt{17} \leq 7$$

2. Supposons que (x_n) et (y_n) convergent respectivement vers ℓ et ℓ' . Alors $\ell = \sqrt{7-\ell'}$ et $\ell' = \sqrt{7+\ell}$. En particulier,

$$\ell^2 = 7 - \ell' \quad \text{et} \quad \ell'^2 = 7 + \ell$$

En soustrayant membre à membre ces deux égalités, on obtient

$$\ell'^2 - \ell^2 = \ell + \ell'$$

ou encore

$$(\ell' + \ell)(\ell' - \ell - 1) = 0$$

On ne peut avoir $\ell + \ell' = 0$. En effet, (x_n) et (y_n) sont clairement positives donc leurs limites ℓ et ℓ' également. Si on avait $\ell + \ell' = 0$, on aurait donc $\ell = \ell' = 0$, ce qui est impossible puisque $\ell^2 = 7 - \ell'$ par exemple.

On en déduit que $\ell' - \ell - 1 = 0$ i.e. $\ell' = \ell + 1$. Ainsi

$$\ell^2 = 7 - \ell' = 6 - \ell$$

Il en résulte que $\ell = 2$ ou $\ell = -3$. Puisque $\ell \geq 0$, $\ell = 2$ puis $\ell' = 3$.

3. Posons $u_n = x_n - 2$ et $v_n = y_n - 3$ pour $n \in \mathbb{N}$. Remarquons que pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$u_{n+1} = \sqrt{4 - v_n} - 2 = -\frac{v_n}{\sqrt{4 - v_n} + 2}$$

$$v_{n+1} = \sqrt{9 + u_n} - 3 = \frac{u_n}{\sqrt{9 + u_n} + 3}$$

On en déduit que pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$|u_{n+1}| = \frac{|v_n|}{\sqrt{4 - v_n} + 2} \leq \frac{|v_n|}{2}$$

$$|v_{n+1}| = \frac{|u_n|}{\sqrt{9 + u_n} + 3} \leq \frac{|u_n|}{3}$$

Par conséquent, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$|u_{n+2}| \leq \frac{|v_{n+1}|}{2} \leq \frac{|u_n|}{6}$$

On en déduit sans peine que pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$|u_{2n}| \leq \frac{1}{6^n} |u_0| \quad \text{et} \quad |u_{2n+1}| \leq \frac{1}{6^n} |u_1|$$

Les suites (u_{2n}) et (u_{2n+1}) convergent donc vers 0 : il en est donc de même de la suite (u_n) . On en déduit alors que (v_n) converge également vers 0. Finalement, les suites (x_n) et (y_n) convergent respectivement vers 2 et 3.

Suites définies implicitement**Solution 56**

1. Etudions les variations de P_n sur $[0, 1]$. La fonction polynôme P_n est continue sur $[0, 1]$ or $P_n(0) = 1$ et $P_n(1) = 2 - n \leq 0$, le théorème des valeurs intermédiaires permet donc de conclure qu'il existe $c \in [0, 1]$ tel que $P_n(c) = 0$. P_n est dérivable sur $[0, 1]$ et $\forall x \in [0, 1]$,

$$P'_n(x) = n(x^{n-1} - 1) < 0.$$

La fonction polynôme P_n est donc strictement décroissante sur $[0, 1]$, il existe donc une unique racine u_n de P_n sur $[0, 1]$.

2. Pour tout $n \geq 2$, $P_n(u_{n+1}) = u_{n+1}^n - nu_{n+1} + 1$. Or $P_{n+1}(u_{n+1}) = 0$ i.e. $u_{n+1}^{n+1} - (n+1)u_{n+1} + 1 = 0$ et donc $nu_{n+1} = u_{n+1}^{n+1} - u_{n+1} + 1$. On en déduit que

$$P_n(u_{n+1}) = u_{n+1}^n - u_{n+1}^{n+1} + u_{n+1} = u_{n+1}^n(1 - u_{n+1}) + u_{n+1}$$

Puisque $u_{n+1} \in [0, 1]$, $P_n(u_{n+1}) \geq 0$. Or P_n est strictement décroissante sur $[0, 1]$ et $P_n(u_n) = 0$ donc $u_{n+1} \leq u_n$.

3. Pour tout $n \geq 2$,

$$nu_n - 1 = u_n^n \leq 1,$$

d'où

$$0 \leq u_n \leq \frac{2}{n}$$

ainsi, d'après le théorème d'encadrement,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 0.$$

4. On reprend l'encadrement de la question précédente,

$$0 \leq nu_n - 1 \leq \left(\frac{2}{n}\right)^n,$$

on a donc d'après le théorème d'encadrement,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (nu_n - 1) = 0$$

et ainsi

$$u_n \sim \frac{1}{n}.$$

Solution 57

On a $g_n(0) = -1$ et $g_n(1) = 1$ donc d'après le théorème des valeurs intermédiaires g_n s'annule sur $[0, -1]$. La fonction g_n étant strictement croissante sur \mathbb{R}_+ en tant que somme de fonctions strictement croissantes sur cet intervalle, elle ne prend qu'une seule fois la valeur 0, d'où l'existence et l'unicité de a_n . Remarquons que

$$\begin{aligned} g_{n+1}(a_n) &= a_n^{n+1} + a_n - 1 \\ &= a_n^{n+1} - a_n^n \\ &= a_n^n(a_n - 1) < 0 \end{aligned}$$

Ainsi $a_n \leq a_{n+1}$ d'après les variations de g_{n+1} . La suite $(a_n)_{n \geq 1}$ étant positive, croissante et majorée par 1, elle converge vers une limite $0 \leq \ell \leq 1$. Prouvons que $\ell = 1$ par l'absurde en supposant $\ell < 1$. Dans ce cas, $\forall n \geq 1$,

$$0 \leq a_n \leq \ell^n,$$

et donc

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n^n = 0,$$

et donc, puisque $1 - a_n = a_n^n$,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1 \neq \ell,$$

ce qui absurde. Ainsi

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1.$$

Solution 58

1. Posons pour tout $x > 0$,

$$f(x) = x - n \ln(x).$$

La fonction f est dérivable sur \mathbb{R}_+ et sur cet intervalle,

$$f'(x) = \frac{x-n}{x}.$$

La fonction f est donc strictement décroissante sur $]0, n]$ et strictement croissante sur $[n, +\infty[$. On a de plus

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = +\infty$$

et d'après les croissances comparées,

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

Puisque $n \geq 3 \geq e$, on a

$$f(n) = n - n \ln(n) < 0.$$

L'équation $f(x) = 0$ admet donc exactement deux solutions $u_n < n < v_n$.

2. Puisque $v_n > n$, on a

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = +\infty.$$

Puisque $f(2) = 2 - n \ln(2) < 0$, on a

$$0 < u_n < 2,$$

d'où

$$0 < \ln(u_n) = \frac{u_n}{n} < \frac{2}{n}$$

et d'après le théorème d'encadrement,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \ln(u_n) = 0,$$

et par continuité de l'exponentielle,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = 1.$$

Solution 59

1. Notons f_n l'application suivante :

$$f_n : \mathbb{R}_+ \longrightarrow \mathbb{R} \\ x \longmapsto x^n + x^{n-1} + \dots + x - 1$$

L'application f_n est clairement continue et même dérivable et

$$\forall x \in \mathbb{R}_+, f'_n(x) = nx^{n-1} + \dots + 1 > 0.$$

f_n est donc strictement croissante. De plus, $f_n(0) = -1$ et $\lim_{x \rightarrow +\infty} f_n(x) = +\infty$. L'application f_n induit donc une bijection de \mathbb{R}_+ dans $[-1; +\infty[$. L'équation $f_n(x) = 0$ admet donc une unique solution strictement positive a_n .

2. On constate que pour tout $n \in \mathbb{N}^*$

$$f_n(a_{n+1}) = -a_{n+1}^{n+1} < 0 = f_n(a_n).$$

La stricte croissance de f_n permet donc de conclure que $a_{n+1} < a_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$.

3. La suite (a_n) est décroissante et minorée par 0 donc elle converge. Remarquons que

$$a_n^{n+1} - 1 = (a_n - 1)(a_n^n + a_n^{n-1} + \dots + a_n + 1) = 2(a_n - 1)$$

Comme (a_n) est strictement décroissante et positive,

$$0 \leq a_n < a_2 < a_1 = 1 \text{ pour } n \geq 3.$$

On en déduit donc que $0 \leq a_n^{n+1} \leq a_2^{n+1}$ pour $n \geq 3$. De plus, $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_2^{n+1} = 0$ car $0 \leq a_2 < 1$. Donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n^{n+1} = 0$. Ainsi

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} 2(a_n - 1) = \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n^{n+1} - 1 = -1$$

Par conséquent, $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \frac{1}{2}$.

Solution 60

1. Il suffit d'étudier la fonction $x \mapsto \tan x - x$ sur l'intervalle $\left] -\frac{\pi}{2} + n\pi, \frac{\pi}{2} + n\pi \right[$.

2. On a $-\frac{\pi}{2} + n\pi \leq u_n \leq \frac{\pi}{2} + n\pi$. On en déduit

$$1 - \frac{2}{n} \leq \frac{u_n}{n\pi} \leq 1 + \frac{2}{n}$$

Le théorème des gendarmes nous dit que $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{u_n}{n\pi} = 1$ i.e. $u_n \sim n\pi$.

3. Par π -périodicité de \tan , on a $\tan v_n = u_n$. Remarquons que $-\frac{\pi}{2} < v_n < \frac{\pi}{2}$. On a donc

$$v_n = \arctan(\tan v_n) = \arctan(u_n)$$

Or $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = +\infty$. Donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} v_n = \frac{\pi}{2}$.

4. Posons $w_n = v_n - \frac{\pi}{2}$. On a donc $u_n = w_n + \frac{\pi}{2} + n\pi$. Et donc $-\frac{1}{\tan v_n} = u_n$. D'après la question précédente, $w_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ donc $\tan w_n \sim w_n$. De plus, $u_n \sim n\pi$. Donc $w_n \sim -\frac{1}{n\pi}$. Un développement asymptotiques à 3 termes de (u_n) est donc :

$$u_n = n\pi + \frac{\pi}{2} - \frac{1}{n\pi} + o\left(\frac{1}{n}\right)$$

Solution 61

1. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Posons $f_n : x \mapsto \cos x - nx$. f_n est dérivable et $f_n'(x) = -\sin x - n < 0$ pour tout $x \in [0, 1]$. f_n est continue et strictement décroissante sur $[0, 1]$. De plus, $f_n(0) = 1 > 0$ et $f_n(1) = \cos(1) - n < 0$. On en déduit que f_n s'annule une unique fois sur $[0, 1]$. D'où l'existence et l'unicité de x_n .

2. On a $\cos x_n = nx_n$ et donc $x_n = \frac{\cos x_n}{n}$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. On en déduit que $|x_n| \leq \frac{1}{n}$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$ puis que (x_n) converge vers 0.

3. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. Remarquons que $f_n \geq f_{n+1}$ sur $[0, 1]$. Donc $f_n(x_{n+1}) \geq f_{n+1}(x_{n+1}) = 0 = f_n(x_n)$. La stricte décroissance de f_n implique que $x_{n+1} \leq x_n$. Par conséquent la suite (x_n) est décroissante.

4. Comme $x_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ et que \cos est continue en 0, $\cos x_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \cos 0 = 1$. Donc $x_n = \frac{\cos x_n}{n} \sim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n}$.

5. Comme $x_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$, $\cos x_n = 1 - \frac{x_n^2}{2} + o(x_n^2)$. Or $x_n \sim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n}$ donc $\cos x_n = 1 - \frac{1}{2n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$. Ainsi $x_n = \frac{\cos x_n}{n} = \frac{1}{n} - \frac{1}{2n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right)$. On en déduit que $x_n - \frac{1}{n} \sim_{n \rightarrow +\infty} -\frac{1}{2n^3}$.

Solution 62

1. Soit $n \geq 2$. On étudie la fonction f_n définie par $f_n(x) = x - \ln x - n$ pour $x > 0$. f_n est dérivable sur \mathbb{R}_+^* et pour tout $x > 0$, $f_n'(x) = 1 - \frac{1}{x}$. f_n est donc strictement croissante sur $]0, 1]$ et strictement décroissante sur $[1, +\infty[$. De plus, $\lim_{n \rightarrow 0^+} f_n(x) = +\infty$, $f_n(1) = 1 - n < 0$ car $n \geq 2$ et $\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) = +\infty$ par croissances comparées. Comme f_n est continue sur \mathbb{R}_+^* , le théorème de la bijection appliqué à f_n sur les intervalles $]0, 1[$ et $[1, +\infty[$ assure qu'il existe une unique solution à l'équation $f_n(x) = 0$ sur chacun des intervalles $]0, 1[$ et $[1, +\infty[$. Comme 1 n'est évidemment pas solution, l'équation $f_n(x) = 0$ admet exactement deux solutions.

2. a. Comme x_n est la plus petite des deux solutions, $x_n \in]0, 1[$ pour tout $n \geq 2$. Or $\ln x_n = x_n - n$ pour tout $n \geq 2$. Donc $\lim_{n \rightarrow +\infty} \ln x_n = -\infty$. Par conséquent, $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = 0$.

b. Puisque pour $n \geq 2$, $\ln x_n = -n + x_n$, $x_n = e^{-n}e^{x_n}$. Or $x_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$ donc $e^{x_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 1$. Ceci prouve que $x_n \sim_{n \rightarrow +\infty} e^{-n}$.

c. Remarquons déjà que $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(e^{-n})$. On a pour tout $n \geq 2$, $x_n = \ln(e^{-n} + u_n) + n = \ln(1 + e^n u_n)$. Or $e^n u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(1)$ donc $\ln(1 + e^n u_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} e^n u_n$. Ainsi $e^n u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} x_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} e^{-n}$. D'où $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} e^{-2n}$.

d. Posons $s_n = u_n - e^{-2n}$ pour $n \geq 2$ de sorte que $s_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(e^{-2n})$. On rappelle que

$$x_n = \ln(1 + e^n u_n) = \ln(1 + e^{-n} + e^n s_n)$$

D'une part,

$$x_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} e^{-n} + e^{-2n} + o(e^{-2n})$$

et d'autre part, en posant $\alpha_n = e^{-n} + e^n s_n$,

$$\ln(1 + \alpha_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \alpha_n - \frac{\alpha_n^2}{2} + o(\alpha_n^2)$$

Or $\alpha_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} e^{-n}$ donc

$$\ln(1 + \alpha_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} e^{-n} + e^n s_n - \frac{e^{-2n}}{2} + o(e^{-2n})$$

On en déduit que $e^n s_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} \frac{3}{2}e^{-2n} + o(e^{-2n})$ ou encore $s_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{3}{2}e^{-3n}$.

3. a. Pour tout $n \geq 2$, $y_n \geq 1$ donc $y_n = \ln y_n + n \geq n$. En particulier, $\lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = +\infty$.

b. Comme $y_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$, $\ln y_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(y_n)$. Donc $n = y_n - \ln y_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} y_n$.

c. Remarquons tout d'abord que $v_n \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(n)$. On a pour tout $n \geq 2$,

$$v_n = y_n - n = \ln y_n = \ln(n + v_n) = \ln n + \ln\left(1 + \frac{v_n}{n}\right)$$

Comme $\frac{v_n}{n} \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(1)$, $\ln\left(1 + \frac{v_n}{n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{v_n}{n}$. A fortiori, $\ln\left(1 + \frac{v_n}{n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{=} o(v_n)$. Ceci prouve que $v_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \ln n$.

d. Posons $t_n = v_n - \ln n$ pour $n \geq 2$. On rappelle que pour $n \geq 2$, $v_n = \ln n + \ln\left(1 + \frac{v_n}{n}\right)$. Ainsi

$$t_n = \ln\left(1 + \frac{v_n}{n}\right) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{v_n}{n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\ln n}{n}$$