



Chapitre 9. Comportement asymptotique des suites

1 Suites convergentes et divergentes

1.1 Observation introductive

Commençons par regarder la suite (u_n) définie par son premier terme et la relation de récurrence

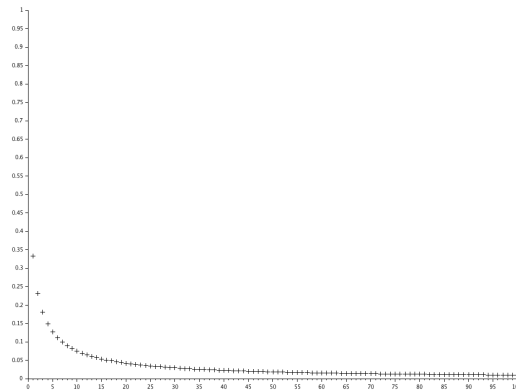
$$u_0 = 1, \quad \text{et} \quad u_{n+1} = \frac{u_n}{u_n^2 + u_n + 1}.$$

Il est facile de programmer, sous SciLab, le calcul des termes successifs de la suite et de les représenter graphiquement

```
function u=suite(n)
u=1;
for k=1:n
    u=u/(u^2+u+1);
end
endfunction
```

```
N=[0:100];
U=feval(N, suite)
```

```
plot2d(N, U, -1)
```



On remarque alors que les valeurs de (u_n) semblent se rapprocher de 0 lorsque l'indice n devient grand. On peut même voir, à l'aide du programme suivant, que l'écart à 0 devient *aussi petit que l'on veut* sous réserve de calculer u_n pour un n assez grand.

```
function n=rang_u(eps)
n=0;
while suite(n)>=eps
    n=n+1;
end
endfunction
```

```
for j=1:6
    disp(rang_u(10^(-j)))
end
```

7.
95.
993.
9991.
99988.
999986.

On voit que u_n est inférieur à $1/10$, à partir de $n = 7$. Pour que $u_n < 1/10000$, il faut par contre attendre le 991^{ème} rang. Mais on peut voir que si on "attend suffisamment longtemps", u_n deviendra aussi petit qu'on veut. C'est cette notion qui définit celle de *convergence* (ici vers 0).

1.2 Suites convergentes

On dira d'une suite qu'elle est **convergente** (ou qu'elle converge), si ses termes se "rapprochent" de plus en plus d'une certaine valeur *limite* l . Ceci s'écrit naturellement rigoureusement à l'aide de quantificateurs.

Définition 1. Soient (u_n) une suite numérique et $l \in \mathbb{R}$. On dit que (u_n) converge vers l (ou que la suite (u_n) a pour limite l) si

$$\forall \epsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \geq N, |u_n - l| < \epsilon.$$

Il est important de bien comprendre ce que cela signifie. Cette définition veut dire que, pour un écart aussi petit que l'on veut ($\forall \epsilon > 0$), on va pouvoir trouver un rang N ($\exists N \in \mathbb{N}$) à partir duquel tous les termes de la suite ($\forall n \geq N$) seront distants de l d'au plus l'écart choisi ($|u_n - l| < \epsilon$).

Une autre façon est aussi de formuler les choses comme ceci: la suite converge vers l tout intervalle (ouvert) centré en l contient tous les termes de la suite à partir d'un certain rang N (ou encore tous les termes sauf un nombre fini - ceux dont le rang est inférieur à N). En effet,

$$|u_n - l| < \epsilon \iff l - \epsilon < u_n < l + \epsilon.$$

Exercice 1. Soit (u_n) la suite définie pour $n \in \mathbb{N}$ par $u_n = 1 + \left(\frac{-1}{2}\right)^n$.

- (1) Représenter graphiquement les sept premiers termes de la suite.
- (2) Conjecturer, sans démontrer, sur la nature de (u_n) .
- (3) Déterminer graphiquement, pour $\epsilon = 0.15$ puis pour $\epsilon = 0.0625$, le plus petit N tel que

$$\forall n \geq N, |u_n - 1| < \epsilon.$$

Exemple. Regardons la suite (u_n) définie pour $n \in \mathbb{N}$ par $u_n = \frac{1}{n^2+1}$. En regardant le terme général, ou en calculant éventuellement les premiers termes, on peut penser que la suite est décroissante et qu'on se rapproche de plus en plus de 0. On va montrer que c'est le cas, en vérifiant que la définition de convergence est satisfaite.

La distance de u_n à 0, qu'on va chercher à estimer, est exactement $|u_n|$. Comme la suite est ici à termes positifs, on doit donc estimer u_n . Soit alors $\epsilon > 0$ arbitrairement choisi et fixé (on garde en tête qu'il s'agit d'un nombre très petit). Peut-on alors trouver un rang à partir duquel tous les termes de la suite seront plus petits que ϵ ? Ceci revient à trouver le plus petit entier n (qui dépendra naturellement de ϵ) tel que

$$u_n = \frac{1}{n^2 + 1} < \epsilon.$$

Cette inéquation est facile à résoudre; on doit avoir $n > \sqrt{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}}$. Il suffit donc de prendre

$$N = \left\lceil \sqrt{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}} \right\rceil + 1$$

pour que tous les termes de la suite dont l'indice est plus grand que N soient plus petits que ϵ .

L'exemple précédent démontre rigoureusement la convergence de la suite vers 0. Il est important de l'avoir compris et de savoir le faire. Cela dit, en pratique on fera souvent appel à des suites dites *de référence* et à des règles de calcul pour déterminer la limite. Ces outils seront présentés dans la section suivante. Dans certains cas plus complexes, une étude plus précise et qualitative de la suite (à l'aide d'encadrements par exemple) peut s'avérer nécessaire pour appliquer des critères de convergence, comme on le verra dans la dernière section de ce chapitre.

Exercice 2. Montrer, à l'aide de la définition, que la suite (v_n) , définie pour $n \in \mathbb{N}$ par $v_n = \frac{2n-3}{n}$ converge vers 2.

Les démonstrations des deux propositions suivantes ne sont pas exigibles. Néanmoins, elles sont instructives et se permettent donc de figurer à la suite de leurs énoncés.

Proposition 1. Si la limite d'une suite existe, elle est unique.

Preuve. Supposons qu'une suite (u_n) converge vers deux limites ℓ_1 et ℓ_2 . On va alors appliquer la définition de la limite. Soit $\epsilon > 0$. La convergence de (u_n) vers ℓ_1 assure l'existence d'un rang N_1 à partir duquel $|u_n - \ell_1| < \epsilon$. Comme (u_n) converge également vers ℓ_2 , la définition nous garantit qu'à partir d'un certain rang N_2 , on a $|u_n - \ell_2| < \epsilon$. A priori, ces rangs ne sont pas les mêmes. Si on veut être sûr de vérifier les deux inégalités, il faut prendre un indice qui soit supérieur à N_1 et N_2 . En étant supérieur au maximum des deux, on est bien supérieur aux deux. Soit donc $n \geq \max(N_1, N_2)$. On a, grâce à l'inégalité triangulaire,

$$|\ell_1 - \ell_2| = |\ell_1 - u_n + u_n - \ell_2| \leq |u_n - \ell_1| + |u_n - \ell_2| \leq \epsilon + \epsilon \leq 2\epsilon.$$

Mais ϵ a été arbitrairement choisi et peut être aussi petit qu'on veut. Mais la différence entre deux nombres réels ne peut être arbitrairement petite que si ces deux nombres sont égaux:

$$(\forall \epsilon > 0, \quad |\ell_1 - \ell_2| \leq \epsilon) \iff \ell_1 = \ell_2.$$

Il n'y a donc qu'une seule limite possible. □

Proposition 2. Si une suite (u_n) est convergente, alors elle est bornée. La réciproque est fausse.

Preuve. Supposons en effet que la suite (u_n) converge vers $\ell \in \mathbb{R}$. Alors, par définition de la limite (pour par exemple $\epsilon = 1$), il existe un rang N à partir duquel

$$|u_n - \ell| \leq 1 \iff \ell - 1 \leq u_n \leq \ell + 1 \implies -|\ell| - 1 \leq u_n \leq |\ell| + 1.$$

Cet encadrement est vrai pour tous les termes sauf un nombre fini (ceux avant u_N). Mais, dans le pire des cas, ces termes ont un *maximum* (le plus grand d'entre eux, qui existe bien puisqu'on en a un nombre fini). Dans tous les cas, on a, pour **tout** $n \geq 0$,

$$|u_n| \leq \max(|\ell| + 1, \max(|u_0|, |u_1|, \dots, |u_{N-1}|))$$

et la suite est bien bornée. Il est très facile de voir que la réciproque est fausse en exhibant un contre-exemple, comme $((-1)^n)$ qui est bien bornée mais ne converge pas (voir ci-après). □

1.3 Suites divergentes

Une suite qui ne converge pas est dite **divergente**. Il faut cependant faire attention à ce que veut dire la négation de la convergence; une suite divergente ne le fait pas nécessairement vers l'infini. Il n'y a juste pas de valeur limite dont on se rapproche.

En effet, la suite (u_n) définie par $u_n = (-1)^n$ alterne indéfiniment entre 1 et -1 . Elle ne converge pas mais ne tend pas non plus vers l'infini. On dira dans ce cas que la suite est **divergente sans limite**. La définition suivante permet de préciser un autre cas.

Définition 2. On dit qu'une suite (u_n) **diverge vers** $+\infty$ lorsqu'elle prend des valeurs arbitrairement grandes. C'est à dire si

$$\forall A \geq 0, \exists N \in \mathbb{N}, \forall n \geq N, u_n \geq A.$$

Cela veut dire qu'on peut toujours trouver un rang N à partir duquel tous les termes seront plus grands qu'une valeur arbitraire A ou encore que, pour chaque valeur $A \geq 0$, l'intervalle $[A; +\infty[$ contient tous les termes à partir d'un certain rang.

Exercice 3. Montrer à partir de la définition que la suite (u_n) , définie pour $n \geq 1$ par $u_n = \sqrt{n-1}$, diverge vers $+\infty$.

Exercice 4. Adapter la définition précédente à la divergence vers $-\infty$ pour une suite (u_n) .

2 Limites des suites de référence

On dispose de tout un panel de suites dont on connaît la nature (et la valeur de la limite). Naturellement la preuve des résultats suivants se fait *via* la définition précédente mais, fort heureusement, on peut les utiliser tels quels sans avoir à tout re-démontrer à chaque fois.

Proposition 3. (Limites de référence)

• **Suites géométriques:** $u_n = q^n$. Alors,

- (i) Si $|q| < 1$, la suite converge vers 0;
- (ii) Si $q = 1$, la suite est constante et converge donc vers 1;
- (iii) Si $q > 1$, la suite diverge vers $+\infty$;
- (iv) Si $q \leq -1$, la suite n'a pas de limite.

• **Puissances:**

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} n^\alpha = \begin{cases} +\infty, & \text{si } \alpha > 0 \\ 0, & \text{si } \alpha < 0 \end{cases}$$

• **Logarithme:**

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

☞ En prenant par exemple $q = e > 1$ dans le cadre des suites géométriques, on en déduit que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} e^n = +\infty.$$

Exercice 5. À partir des limites de référence, déterminer les limites éventuelles des suites suivantes:

$$(i) n^3 \quad (ii) n\sqrt{n} \quad (iii) \frac{n^2}{\sqrt{n}} \quad (iv) \frac{1}{n^{-0.001}} \quad (v) -3 \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^n \quad (vi) \frac{1}{10} \left(\frac{\ln(3)}{\ln(2)}\right)^n \quad (vii) \frac{1}{n}.$$

3 Opérations sur les limites

Connaissant la limite de deux suites, on peut parfois en déduire la limite de la suite obtenue par opérations sur les deux suites. Voici donc une série de tableaux qui donnent les résultats de ces opérations. Dans le cas où il n'est pas possible de conclure en toute généralité, c'est à dire dans le cas d'une **forme indéterminée**, on notera "?" (et il faudra travailler un peu plus...)

Multiplication par un réel: Soit (u_n) une suite ayant une limite et λ un réel non nul.

Le tableau suivant donne la limite éventuelle de (λu_n) selon les limites de (u_n) .

Exemple. $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{-3}{n^2} = 0.$

	λ	$\lambda > 0$	$\lambda < 0$
$\lim u_n$		$\lambda > 0$	$\lambda < 0$
$\ell \in \mathbb{R}$		$\lambda \ell$	$\lambda \ell$
$+\infty$		$+\infty$	$-\infty$
$-\infty$		$-\infty$	$+\infty$

Somme: Soient (u_n) et (v_n) deux suites ayant des limites (finies ou infinies).

Le tableau suivant donne la limite éventuelle de $(u_n + v_n)$ selon les limites de (u_n) et (v_n) .

Exemple. $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} + \frac{2}{n^2} + n^2 = +\infty.$

	$\lim v_n$	$\ell' \in \mathbb{R}$	$+\infty$	$-\infty$
$\lim u_n$		$\ell' \in \mathbb{R}$	$+\infty$	$-\infty$
$\ell \in \mathbb{R}$		$\ell + \ell'$	$+\infty$	$-\infty$
$+\infty$			$+\infty$?
$-\infty$				$-\infty$

☞ En combinant la multiplication par -1 et la somme on peut aisément déduire les limites obtenues par **soustraction**.

Produit: Soient (u_n) et (v_n) deux suites ayant des limites (finies ou infinies).

$\lim u_n \backslash \lim v_n$	$\ell' > 0$	$\ell' < 0$	$\ell' = 0$	$+\infty$	$-\infty$
$\ell > 0$	$\ell \cdot \ell'$			$+\infty$	$-\infty$
$\ell < 0$				$-\infty$	$+\infty$
$\ell = 0$?	
$+\infty$				$+\infty$	$-\infty$
$-\infty$					$+\infty$

Le tableau ci-dessus donne la limite éventuelle de $(u_n v_n)$ selon les limites de (u_n) et (v_n) .

Exemple. $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1 \right) \left(\left(\frac{-1}{3} \right)^n + 2 \right) = -2.$

Inverse: Soit (u_n) une suite ayant une limite.

$\lim u_n$	$\ell \in \mathbb{R}^*$	$\pm\infty$
$\lim \frac{1}{u_n}$	$\frac{1}{\ell}$	0

\triangle Lorsque $\lim u_n = 0$, il y a trois cas:

Si $u_n > 0$: $\lim \frac{1}{u_n} = +\infty$

Si $u_n < 0$: $\lim \frac{1}{u_n} = -\infty$

Sinon : $\frac{1}{u_n}$ n'a pas de limite

Exemple. $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\ln \left(1 - \frac{1}{n} \right)} = -\infty.$

\Rightarrow En combinant la multiplication et le passage à l'inverse, on peut également déduire les limites obtenues par passage au **quotient**.

Exemple. $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^2 + 1}{\left(\frac{1}{2} \right)^n - 1} = -\infty.$

Composition avec une fonction continue:

Soient (u_n) une suite qui converge vers $\ell \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ et f une fonction **continue** dont la limite en ℓ vaut a (avec également $a \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$). Alors,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} f(u_n) = a.$$

Exemple. $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{1}{n^3} + 4} = 2.$

4 Formes indéterminées. Croissances comparées

On peut, dans certains cas, lever l'indétermination d'une limite par des méthodes que l'on présente dans cette section.


Proposition 4. (Croissances comparées) Soient $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ et $q > 0$.

- (i) La suite $(n!)$ l'emporte sur les suites (q^n) , (n^α) et $(\ln(n)^\beta)$.
- (ii) La suite (q^n) l'emporte sur les suites (n^α) et $(\ln(n)^\beta)$.
- (iii) La suite (n^α) l'emporte sur les suites $(\ln(n)^\beta)$.

Cela signifie que si l'on effectue un **produit** ou un **quotient** de ces familles de suites, la limite est celle de la suite qui l'emporte, en tenant compte des opérations sur les limites.

Exemple.

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{e^n}{n!} = 0, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n(-1)^n}{2^n} = 0, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^{0.001}}{\ln(n)^{1000}} = +\infty$$

 **Méthode.** (Lever une forme indéterminée.) Une fois qu'on est bien sûr d'être face à une forme indéterminée on peut:

- (1) Conclure directement "*Par croissance comparée...*" si l'expression que l'on étudie est déjà sous une forme qui le permet.
- (2) Essayer de se ramener au cas précédent, la plupart du temps en factorisant par le terme prépondérant, ou éventuellement via la méthode de la quantité conjuguée et parfois en appliquant les deux!

Exemple.

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

En effet,

$$\frac{1}{n(\sqrt{n^2 + 1} - n)} = \frac{\sqrt{n^2 + 1} + n}{n(n^2 + 1 - n^2)} = \frac{n\left(\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} + 1\right)}{n} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 2$$

5 Théorèmes de convergence

Les méthodes de calcul des parties précédentes permettent, parfois, de déterminer la nature de suites explicites dont l'expression du terme général permet leur application.


Cela ne représente pas tous les cas de figure que l'on rencontrera. Parfois, une étude plus théorique est qualitative sur le comportement de la suite sera nécessaire. Nous en présentons des méthodes ici.

5.1 Limites & Inégalités

Proposition 5. (Passage à la limite dans une inégalité.)

Soient (u_n) et (v_n) deux suite **qui convergent** et telles que $u_n \leq v_n$ (ou $u_n < v_n$) à partir d'un certain rang. Alors,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} v_n.$$

 **Attention.** Le passage à la limite transforme **toutes les inégalités** (y compris les strictes) en **inégalités larges**.

Remarque 1. On constate que la condition de majoration doit être vérifiée *à partir d'un certain rang*. En effet, comme on s'intéresse à ce qui se passe *à l'infini*, on ne fait que peu de cas de ce qui se passe au niveau des premiers termes de la suite.

Proposition 6. (Passage à la limite dans une égalité.)

Si une suite (u_n) a une limite (finie ou infinie) alors toutes les *sous-suites* (u_{n+1}) , (u_{n+2}) , (u_{2n}) , (u_{2n+1}) , ... ont la même limite que la suite (u_n) dont elles sont extraites.

Exemple. On sait (justifier) que $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{n}\right)^n = 0$. Il suit, par exemple, que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{n+1}\right)^{n+1} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{2n}\right)^{2n} = 0.$$

Exemple. Regardons la suite (u_n) qui vérifiait

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

On pourrait justifier, avec des arguments qui seront présentés un peu après, et les inégalités montrées, que la suite (u_n) est convergente, vers une limite ℓ . Mais alors, (u_{n+1}) aussi. On a donc, par composition

des limites et continuité de la fonction $x \mapsto \sqrt{1+x}$ sur $] -1; +\infty[$.

$$\begin{array}{rcl} u_{n+1} & = & \sqrt{u_n + 1} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \ell & = & \sqrt{\ell + 1} \end{array}$$


et ℓ vérifie l'équation $\ell = \sqrt{\ell + 1}$ dont la seule solution est $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$.

Exercice 6. La suite (v_n) , définie par $v_0 = 1$ et $v_{n+1} = -\frac{1}{v_n}$ peut-elle être convergente? Divergente vers l'infini?

Les deux exemples précédents se généralisent comme suit:

 **Méthode.** (Méthode du point fixe pour les suites du type $u_{n+1} = f(u_n)$.)

Soit (u_n) une suite vérifiant, pour tout $n \geq 0$, $u_{n+1} = f(u_n)$, où f est une fonction **continue** sur un intervalle I - fermé ou semi-fermé - contenant tous les termes de la suite. Alors, **si** (u_n) converge vers une limite ℓ , cette limite est solution de l'équation $f(\ell) = \ell$ (on dit que c'est un *point fixe* de f).

 **Attention.** Cette méthode permet de trouver des limites **potentielles** mais ne prouve **en aucun cas** la convergence de la suite.

Par exemple, si la suite définie par $u_{n+1} = -u_n$ et $u_0 = 1$ avait une limite l , cette limite vaudrait 0 (c'est le seul point fixe de $f : x \rightarrow -x$), mais on voit tout de suite que $u_n = (-1)^n$ ne converge pas.

Proposition 7. (Comparaison à une suite divergente vers l'infini)

Soient (u_n) et (v_n) deux suites telles que $u_n \leq v_n$ à partir d'un certain rang. Alors,

- (i) Si (u_n) diverge vers $+\infty$, il en est de même pour (v_n) ;
- (ii) Si (v_n) diverge vers $-\infty$, il en est de même pour (u_n) .

Exercice 7.

- (1) Montrer que, pour tout $n \geq 0$,

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

- (2) En déduire le comportement asymptotique de la suite (u_n) définie par

$$u_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{k}}.$$

Proposition 8. (Théorème d'encadrement dit *des gendarmes*.)

Soient (u_n) , (v_n) et (w_n) trois suites telles que les deux conditions suivantes sont vérifiées:

- $u_n \leq v_n \leq w_n$ à partir d'un certain rang;
- (u_n) et (w_n) convergent vers une même limite ℓ .

Alors, (v_n) converge également vers ℓ .

Exemple.

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{3n + 5(-1)^n}{2n} = \frac{3}{2}$$

En effet,

$$\frac{3n-5}{2n} \leq \frac{3n+5(-1)^n}{2n} \leq \frac{3n+5}{2n},$$

et il est facile de voir que les deux suites qui encadrent le terme qui nous intéresse tendent toutes les deux vers $\frac{3}{2}$. Il suffit alors d'appliquer le résultat précédent.

Exercice 8. Soient (v_n) une suite qui converge vers 0 et (u_n) une suite telle que $|u_n| \leq v_n$, à partir d'un certain rang. Montrer que (u_n) converge vers 0.

Application: Soit $\alpha > 0$. Montrer que $\left(\frac{(-1)^n}{n^\alpha}\right)$ converge vers 0.

5.2 Critère de convergence monotone

Comme on l'a vu dans la section précédente, on peut souvent avoir des informations sur une limite si on sait **déjà** que la suite converge. Le théorème suivant donne un critère d'**existence**. Il ne donne en aucun cas la valeur de la limite. Il est constamment utilisé.

Théorème 1. (*Convergence monotone.*)

Toute suite croissante **et** majorée est convergente.

Toute suite décroissante **et** minorée est convergente.

Toute suite croissante **et** non majorée diverge vers $+\infty$.

Toute suite décroissante **et** non minorée diverge vers $-\infty$.

Exemple. (reprenant quelques questions du sujet de **EDHEC 2012**.)

On veut étudier la nature (et déterminer la limite éventuelle) de la suite (u_n) définie par

$$\begin{cases} u_0 &= 0 \\ u_{n+1} &= \frac{u_n^2 + 1}{2} \end{cases}$$

La fonction $f : x \mapsto \frac{x^2 + 1}{2}$ étant définie sur \mathbb{R} , la suite est bien définie pour tout entier $n \in \mathbb{N}$. Il est facile de voir que la suite est croissante: en effet

$$u_{n+1} - u_n = \frac{u_n^2 + 1}{2} - u_n = \frac{u_n^2 - 2u_n + 1}{2} = \frac{(u_n - 1)^2}{2} \geq 0.$$

De plus, une récurrence immédiate permet de voir que, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $0 \leq u_n < 1$: c'est en effet vrai pour u_0 , et si c'est vrai pour un certain $n \geq 0$, alors

$$0 \leq \frac{1}{2} \leq \frac{u_n^2 + 1}{2} < \frac{1^2 + 1}{2} \leq 1.$$

La suite étant croissante et majorée (par 1), elle est donc convergente. Notons alors l sa limite. Par passage à la limite dans les égalités, cette limite est un *point fixe* de f , i.e. l est solution de l'équation

$$\frac{l^2 + 1}{2} = l$$

dont la seule solution est 1. Ainsi, on peut conclure que (u_n) converge vers 1.

Parfois, connaître explicitement la limite est difficile et doit se contenter de son existence voire éventuellement d'un encadrement de celle-ci. C'est le cas dans l'exercice suivant.

Exercice 9. Soit (u_n) , la suite définie pour $n \geq 1$ par

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

(1) Montrer que (u_n) est croissante.

(2) (a) Montrer que,

$$\forall k \geq 2, \quad \frac{1}{k^2} \leq \frac{1}{k-1} - \frac{1}{k}.$$

(b) En déduire que,

$$\forall n \geq 1, \quad 1 \leq u_n \leq 2 - \frac{1}{n} \leq 2.$$

(3) Conclure quant à la convergence de (u_n) et donner un encadrement de sa limite éventuelle.

Remarque 2. Il est possible de montrer, avec de très jolis outils qui ne sont pas au programme de la classe préparatoire ECE, que

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6}.$$

5.3 Suites adjacentes

Définition 3. (*Suites adjacentes.*)

Deux suites (u_n) et (v_n) sont dites **adjacentes** si les quatre conditions suivantes sont **toutes** vérifiées:

- La suite (u_n) est croissante;
- La suite (v_n) est décroissante;
- Pour tout n , $u_n \leq v_n$;
- La différence $v_n - u_n$ tend vers 0, lorsque $n \rightarrow +\infty$.

Théorème 2. (*Suites adjacentes.*) Deux suites adjacentes convergent vers une même limite.

⚠ Attention. Comme dans d'autres résultats, le théorème précédent garantit l'existence de la limite ℓ mais ne donne pas sa valeur. Cependant, on peut déduire des propriétés de monotonie des deux suites adjacentes que

$$\forall n, m, \quad u_0 \leq u_n \leq \ell \leq v_m \leq v_0.$$

Exercice 10. À l'aide du Théorème des suites adjacentes, proposer une démonstration alternative à l'Exercice 9 pour montrer que la suite (u_n) définie pour $n \geq 1$ par

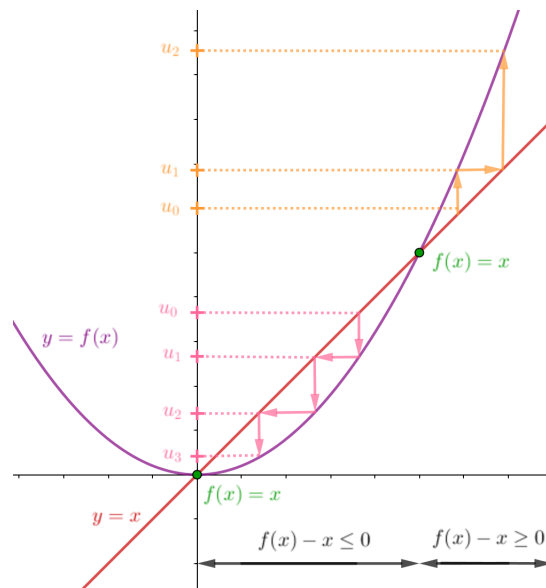
$$u_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2}$$

converge, et encadrer sa limite (indication: on introduira $v_n = u_n + \frac{1}{n}$).

6 Appendice: suites récurrentes $u_{n+1} = f(u_n)$

Lorsque la suite (u_n) est définie par son premier terme (u_0 ou u_1) et une relation de récurrence $u_{n+1} = f(u_n)$, on en synthétise l'étude avec les étapes classiques suites:

- (1) On commence par une étude (plus ou moins rapide) de la fonction f (domaine de définition, continuité, variations);
- (2) On vérifie que la suite (u_n) est bien définie et on *localise* les termes de la suite, à l'aide d'un intervalle *stable* sous l'action de f dans lequel se trouve le premier terme (récurrence);
- (3) On étudie les variations de (u_n) . Une fonction f croissante donne une suite **monotone** mais pas forcément croissante! On peut procéder par deux méthodes:
 - Ou bien avec une comparaison des deux premiers termes et une récurrence utilisant les variations de f ;
 - Ou bien avec l'étude du signe de $f(x) - x$
- (4) On utilise la convergence monotone pour conclure à la *nature* de la suite;
- (5) On détermine la valeur de la limite éventuelle ℓ *via* résolution de l'équation de point fixe $f(\ell) = \ell$.



7 Autres exercices

Exercice 11. (Vrai ou Faux?)

Soient (u_n) et (v_n) deux suites. Les assertions suivantes sont-elles vraies ou fausses?

- (1) Si (u_n) et (v_n) divergent, alors $(u_n + v_n)$ diverge.
- (2) Si (u_n) et (v_n) divergent, alors $(u_n v_n)$ diverge.
- (3) Si (u_n) converge et que (v_n) diverge, alors $(u_n + v_n)$ diverge.
- (4) Si (u_n) converge et que (v_n) diverge, alors $(u_n v_n)$ diverge.

Exercice 12. Donner la limite éventuelle des suites de terme général:

- | | | | |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1) $-3n^2$ | 2) e^{-n} | 3) $-3n^2 + e^{-n}$ | 4) $n^{0.0001} - 1000000000$ |
| 5) $\left(n^2 + \frac{1}{n}\right)(e^{-n} + 2)$ | 6) $\frac{e^{-n}}{-3n^2}$ | 7) $\frac{-3n^2}{e^{-n}}$ | 8) $\left(\frac{1}{n^3} + 0.5\right)^n$ |
| 9) $\ln\left(\left(\frac{1}{2}\right)^n\right)$ | 10) $\ln\left(1 + \frac{1}{n}\right)$ | 11) $e^{(2 - (\frac{1}{3})^n) \cdot \frac{1}{2n-1}}$ | 12) $\frac{1}{\ln\left(1 + \frac{1}{n}\right)}$ |
| 13) $\frac{1}{\ln\left(1 - \frac{1}{n}\right)}$ | 14) $\frac{1}{\ln\left(1 + \left(-\frac{1}{4}\right)^n\right)}$ | 15) $n^{\frac{1}{\ln(n)}}$ | 16) $\left(\frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{\ln(n)^2}}$ |

Exercice 13. On considère la suite (u_n) définie, pour $n \geq 0$ par

$$u_n = \frac{\left\lfloor \left(n + \frac{1}{3}\right)^2 \right\rfloor}{\left\lfloor \left(2n - \frac{1}{6}\right)^2 \right\rfloor}.$$

- (1) En utilisant la définition de la partie entière, donner un encadrement de u_n .
- (2) En déduire la limite de (u_n) .

Exercice 14. Dans chacun des cas suivants, donner l'éventuelle limite, après avoir levé l'indétermination:

- | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1) $n^5 - n^2 + 3$ | 2) $e^n - n^{100} - \ln(n)^{10000}$ | 3) $\frac{-2n^3 + 2n}{n^2}$ | 4) $\frac{-2n^3 + 2n}{n^3}$ |
| 5) $\frac{-2n^3 + 2n}{n^4}$ | 6) $\sqrt{4n^2 + n} - n$ | 7) $\sqrt{4n^2 + n} - 2n$ | 8) $\left(\frac{1}{n}\right)^n$ |
| 9) $n^{\frac{1}{n}}$ | | | |

Exercice 15. Quelles sont les limites (finies ou infinies) possibles des suites vérifiant les relations de récurrence suivantes ?

- (1) $u_{n+1} = 2u_n - \frac{1}{n}$
- (2) $v_{n+1} = -2v_n - \frac{1}{n} + 1$
- (3) $2(w_{n+2})^2 = w_{n+1} + w_n$
- (4) $f_{n+2} = f_n + f_{n+1}$

Exercice 16. Soient $a, b \in \mathbb{R}$ tels que $0 < a < b$ et $(u_n), (v_n)$ deux suites définies par

$$u_0 = a, \quad v_0 = b, \quad u_{n+1} = \frac{2u_n v_n}{u_n + v_n} \quad \text{et} \quad v_{n+1} = \frac{u_n + v_n}{2}.$$

- (1) Montrer que, pour tout $n \geq 0$, $0 < u_n < v_n$.
- (2) Montrer que (u_n) est croissante et (v_n) décroissante.

(3) Montrer que, pour tout $n \geq 0$,

$$v_{n+1} - u_{n+1} \leq \frac{1}{2}(v_n - u_n).$$

(4) Dédire des questions précédentes que les deux suites convergent vers une même limite l .

(5) En considérant la suite $(u_n v_n)$, déterminer l .

Exercice 17. Soit (u_n) la suite définie par $u_{n+1} = f(u_n)$, avec $f(x) = x^2 + \frac{3}{16}$ et $u_0 \geq 0$.

(1) Étudier le signe de $f(x) - x$. Quelles sont les limites possibles pour (u_n) ?

(2) On suppose que $u_0 \in [0; \frac{1}{4}]$.

(a) Montrer que (u_n) est croissante.

(b) La suite est-elle convergente? Divergente? Préciser sa limite éventuelle.

(3) On suppose que $u_0 \in [\frac{1}{4}; \frac{3}{4}]$.

(a) Montrer que (u_n) est décroissante et minorée.

(b) La suite est-elle convergente? Divergente? Préciser sa limite éventuelle.

(4) On suppose que $u_0 > \frac{3}{4}$.

(a) Montrer que (u_n) est croissante.

(b) La suite est-elle convergente? Divergente? Préciser sa limite éventuelle.

Exercice 18. (D'après **EDHEC 2010**) Pour tout entier naturel n , on pose

$$u_n = \prod_{k=0}^n \left(1 + \frac{1}{2^k}\right).$$

(1) Donner, sous forme d'entiers ou de fractions simplifiées, les valeurs de u_0 , u_1 et u_2 .

(2) Montrer que, pour tout entier n , on a $u_n \geq 2$.

(3) Exprimer u_{n+1} en fonction de u_n puis en déduire les variations de la suite (u_n) .

(4) Établir que, pour tout réel x strictement supérieur à -1 , on a $\ln(1+x) \leq x$.

(5) Montrer que la suite (u_n) converge vers un élément ℓ de $[2; e^2]$.

Exercice 19. Soit (u_n) la suite définie pour $n \geq 1$ par

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

(1) Calculer u_1 , u_2 et u_3 .

(2) On pose $v_n = \ln(u_n)$. Justifier que la suite (v_n) est bien définie.

(3) (a) Montrer que, pour tout $x > -1$,

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

(b) En déduire que, pour tout $n \geq 1$,

$$\frac{n+1}{2n} - \frac{(n+1)(2n+1)}{12n^3} \leq v_n \leq \frac{n+1}{2n}.$$

(4) Montrer que (v_n) converge et déterminer sa limite. Même question pour (u_n) .

Exercice 20. Soit (u_n) une suite telle que les deux sous-suites (u_{2n}) et (u_{2n+1}) convergent vers une même limite. Montrer qu'alors (u_n) converge également vers cette limite.

Exercice 21. Soit (u_n) la suite définie par $u_{n+1} = f(u_n)$, avec $f :]0; +\infty[\rightarrow]0; +\infty[$, $x \mapsto 1 + \frac{2}{x}$ et $u_0 = 1$.

(1) Étudier le sens de variations de f sur $[1; 3]$. Montrer que, pour tout $x \in [1; 3]$, $f(x) \in [1; 3]$. Que peut-on en déduire sur (u_n) ?

(2) Soit $g = f \circ f$. Montrer que g est croissante.

(3) En déduire, à l'aide d'un raisonnement par récurrence, que la suite (v_n) définie par $v_n = u_{2n}$ est croissante.

- (4) Montrer ensuite que la suite (w_n) définie par $w_n = u_{2n+1}$ est décroissante.
 (5) Montrer que (v_n) et (w_n) convergent vers une même limite, à déterminer (indication: on cherchera les points fixes de g).
 (6) À l'aide de l'exercice précédent, que peut-on conclure à propos de (u_n) ?

Exercice 22. Soient $(u_n)_{n \geq 1}$ et $(v_n)_{n \geq 0}$ les suites définies par

$$u_n = \sum_{k=1}^n \frac{n}{n+k} \quad \text{et} \quad v_n = \sum_{k=0}^{2n+1} \frac{n}{n^2+k}.$$

- (1) Pour $n \geq 1$ fixé et $1 \leq k \leq n+1$, donner un minorant de $\frac{n}{n+k}$ et en déduire la nature de (u_n) .
 (2) Pour $n \geq 0$ fixé et $1 \leq k \leq 2n+1$, donner un encadrement de $\frac{n}{n^2+k}$ et en déduire la nature de (v_n) .

Exercice 23.

- (1) Montrer que les suites

$$\left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k+n} \right)_{n \geq 1} \quad \text{et} \quad \left(\sum_{k=n}^{2n} \frac{1}{k} \right)_{n \geq 1}$$

sont adjacentes. En déduire qu'elles convergent vers une même limite ℓ .

- (2) Montrer que, pour tout $x \in [0; 1[$,

$$\ln(1+x) \leq x \leq -\ln(1-x).$$

- (3) En déduire que, pour tout $n \geq 1$,

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

- (4) En conclure que $\ell = \ln(2)$.

Exercice 24. (D'après **EML 2010**) On note $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ la fonction définie, pour tout $x \in \mathbb{R}$, par

$$f(x) = x - \ln(1+x^2).$$

On considère la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ définie par

$$u_0 = 1, \quad \text{et} \quad u_{n+1} = f(u_n).$$

- (1) (a) Montrer que f est de classe \mathcal{C}^2 sur \mathbb{R} et montrer que pour tout $x \in \mathbb{R}$, on a :

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

- (b) Dresser le tableau de variation de la fonction f , limites comprises.
 (c) Montrer que la courbe représentative \mathcal{C} de f admet deux points d'inflexion dont on déterminera les coordonnées.
 (d) Tracer \mathcal{C} dans un repère orthonormé. On précisera la tangente à \mathcal{C} en l'origine et en chacun des points d'inflexion.
 (e) Résoudre l'équation $f(x) = x$ sur \mathbb{R} .
- (2) (a) Montrer que pour tout $n \geq 0$, on a : $0 \leq u_n \leq 1$.
 (b) Montrer que la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ est décroissante.
 (c) Établir que la suite $(u_n)_{n \geq 0}$ converge et déterminer sa limite.
 (d) Écrire un programme en **SciLab** qui calcule et affiche le plus petit entier n tel que $u_n \leq 10^{-3}$.