

Suites numériques

BCPST I — 27 février 2017

I — Généralités

I.1 — Définition d'une suite

Définition 1.1 — Suite numérique

On appelle *suite numérique* toute fonction de \mathbb{N} dans \mathbb{R} .

Notations Soit $u : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$. On parle de la suite u . On note usuellement la suite u par $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et le réel $u(n)$ par u_n .

L'ensemble des suites numériques se note $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$.

Une suite peut-être définie à partir d'un certain rang, auquel cas on note $(u_n)_{n \geq N}$.

Une suite peut-être définie de plusieurs manières différentes :

1. explicitement : $u_n = f(n)$. Dans ce cas les propriétés de la fonction f fournissent les propriétés de u . On dit que $f(n)$ est le **terme général** de la suite. Ex. : $(2^n)_{n \in \mathbb{N}}$, etc.
2. par récurrence : u_n est définie en fonction des termes précédents. Exemple : $\forall n \in \mathbb{N}, u_n = qu_{n-1}$, $\forall n \in \mathbb{N}, u_n = u_{n-1} + r$, etc. On parle de **relation de récurrence** liant u_{n+1} à u_n . Dans ce cas, il faut donner les premiers termes de la suite.
3. implicitement : u_n est défini par un propriété dépendant de n . Par exemple u_n est la plus petite valeur de x pour laquelle la fonction définie par $f(x) = x^n + nx + 1$ s'annule. Ou encore u_n est le périmètre de polygone régulier à 2^n cotés inscrit dans le cercle unité.

On aimerait plutôt avoir la forme 1. Dans certains cas la forme 2 permet d'avoir la forme 1. Avec la forme 3, il faut ferrailler un peu plus. Il n'est pas du tout indispensable d'avoir la forme 1 pour pouvoir étudier une suite.

II — Suites et ordre

Définition 2.1 — Suite majorée, minorée, bornée

Soit u une suite numérique. La suite u est

- 1) *majorée* si et seulement si $\exists M \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N}, u_n \leq M$;
- 2) *minorée* si et seulement si $\exists m \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N}, u_n \geq m$;
- 3) *bornée* si et seulement si

$$\begin{aligned} & \exists (m, M) \in \mathbb{R}^2, \forall n \in \mathbb{N}, m \leq u_n \leq M \\ \iff & \exists M \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N}, |u_n| \leq M \end{aligned}$$

Notez que ses majorants et minorants ne dépendent pas de n .

Définition 2.2 — Monotonie d'une suite

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite numérique. La suite u est

- 1) *croissante* si et seulement si

$$\forall (n, m) \in \mathbb{N}^2, m \geq n \implies u_m \geq u_n$$

- 2) *strictement croissante* si et seulement si

$$\forall (n, m) \in \mathbb{N}^2, m > n \implies u_m > u_n$$

- 3) *décroissante* si et seulement si

$$\forall (n, m) \in \mathbb{N}^2, m \geq n \implies u_m \leq u_n$$

- 4) *strictement décroissante* si et seulement si

$$\forall (n, m) \in \mathbb{N}^2, m > n \implies u_m < u_n$$

Une suite est *monotone* si elle est soit croissante, soit décroissante.

Une suite peut également être croissante, décroissante, etc. à partir d'un certain rang (on remplace \mathbb{N} par un ensemble de la forme $\llbracket N ; +\infty \llbracket$ dans les définitions précédentes).

Propriété 2.3 — Caractérisation des suites croissantes

Soit $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$. La suite u est croissante si et seulement si

$$\forall n \in \mathbb{N}, u_{n+1} \geq u_n$$

Dém. Remarquer que cette propriété est propre aux suites (elle n'est pas valable pour les fonctions).

Sens direct : supposons u croissante

$$\forall (n, m) \in \mathbb{N}^2, \quad n \leq m \implies u_n \leq u_m$$

Soit $n \in \mathbb{N}$. En appliquant le résultat précédent en n et $n + 1$ on a bien la propriété.

Sens réciproque : supposons que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+1} \geq u_n$$

Soit m et n deux entiers, tel que $m \geq n$. On peut supposer que $m > n$. Introduisons une somme télescopique

$$u_m - u_n = \sum_{k=n}^{m-1} u_{k+1} - u_k$$

La somme est bien définie, car $m - 1 \geq n$. Par hypothèse, chaque terme de cette somme est positif. La somme l'est donc également, et donc $u_m \geq u_n$. \square

Corollaire 2.4 — Caractérisation des suites décroissantes.

Soit $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$. La suite u est décroissante si et seulement si

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n \geq u_{n+1}$$

Dém. On applique le théorème précédent à la suite $-u$. \square

Définition 2.5 — Suites constantes

Une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est *constante* si et seulement si

$$\exists a \in \mathbb{R}, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n = a$$

Une suite constante à partir d'un certain rang est dite *stationnaire*.

Propriété 2.6 — Une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est constante si et seulement si

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+1} = u_n$$

Exemple

- Les suites constantes $(a)_{n \in \mathbb{N}}$ sont les seules qui soient à la fois croissantes et décroissantes.
- La suite $(n)_{n \in \mathbb{N}}$ est croissante, $(E(n/2))_{n \in \mathbb{N}}$ est croissante mais pas strictement croissante.
- Les suites $((-1)^n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $((-1)^n/n)_{n \in \mathbb{N}}$ ne sont pas monotones.

III — Suites convergentes

III.1 — Limite finie

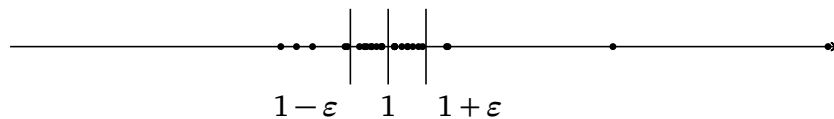
Définition 3.1 — Convergence d’une suite

Soit $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$. On dit que u converge si il existe un réel ℓ tel que

$$\forall \varepsilon > 0, \quad \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}, \quad n \in \llbracket N_\varepsilon ; +\infty \llbracket \implies |u_n - \ell| \leq \varepsilon$$

Pour comprendre cette définition, il faut garder à l’esprit que $|a - b|$ peut s’interpréter comme la distance entre les deux réels a et b .

Que signifie intuitivement « u_n tend vers ℓ » ? Représentons par exemple une suite convergent vers 1



Dire que $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ tend vers ℓ s’interprète par « la suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est aussi proche que l’on veut de ℓ à partir d’un certain rang ». Cette proximité est mesurée par ε , et le rang associé est N_ε .

Ces définitions restent d’ailleurs pertinentes pour des suites définies à partir d’un certain rang. En fait la notion de convergence est asymptotique : en modifiant quelques termes de u , on ne modifie pas son caractère de convergence.

Exemple

- la suite $\left(\frac{1}{n}\right)_{n \in \mathbb{N}^*}$ converge vers 0 ;
- une suite constante qui converge vers 0 est une suite nulle.

Théorème 3.2 — Unicité de la limite

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite convergente. Alors il existe une unique réel ℓ telle que $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge vers ℓ . On l’appelle limite de u et on note $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \ell$ ou encore $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$.

Dém. Soit ℓ et ℓ' deux réels tels que

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0, \quad \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_\varepsilon &\implies |u_n - \ell| \leq \varepsilon \\ \forall \varepsilon > 0, \quad \exists N'_\varepsilon \in \mathbb{N}, \quad n \geq N'_\varepsilon &\implies |u_n - \ell'| \leq \varepsilon \end{aligned}$$

On va voir que la distance entre ℓ et ℓ' est aussi petite que l'on veut, ce qui signifie que $\ell = \ell'$.

Soit n quelconque plus grand que N_ε et N'_ε . D'après l'inégalité triangulaire

$$|\ell - \ell'| = |\ell - u_n - (\ell' - u_n)| \leq |\ell - u_n| + |\ell' - u_n| \leq 2\varepsilon$$

Si on résume

$$\forall \varepsilon > 0, \quad |\ell - \ell'| \leq 2\varepsilon$$

Montrons par l'absurde que $\ell = \ell'$. Si $\ell \neq \ell'$ alors en prenant $\varepsilon = |\ell - \ell'|/4 > 0$ dans la relation précédente, on aurait

$$|\ell - \ell'| \leq |\ell - \ell'|/2$$

ce qui est absurde. Ainsi $\ell - \ell' = 0$. □

III.2 — Limite infinie

Définition 3.3 — Suite tendant vers $\pm\infty$

Soit $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$.

La suite u *diverge vers* $+\infty$ si et seulement si

$$\forall A \in \mathbb{R}, \quad \exists N_A \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_A \implies u_n \geq A$$

La suite u *diverge vers* $-\infty$ ssi $-u$ *diverge vers* $+\infty$.

On note $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ ou $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = +\infty$.

| **Exemple** La suite $(n)_{n \in \mathbb{N}}$ diverge vers $+\infty$.

Remarque I.0

- Si $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ alors u n'est pas majorée, elle est minorée, et elle est strictement positive à partir d'un certain rang.
- Une suite de limite infinie n'est pas nécessairement croissante. Par exemple $n + (-1)^n$
- Une suite qui ne converge pas vers un réel est dite *divergente*. Elle peut alors tendre vers $+\infty$ ou $-\infty$ ou ne pas admettre de limite du tout.

III.3 — Suites extraites

Si la suite u converge vers ℓ , alors les suites $(u_{n+1})_{n \in \mathbb{N}}$, $(u_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}}$ et $(u_{2n})_{n \in \mathbb{N}}$ convergent vers ℓ .

Théorème 3.4 — Suites extraites

Soit u une suite numérique. Si les suites $(u_{2n})_{n \in \mathbb{N}}$ et $(u_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}}$ convergent vers une limite commune ℓ alors la suite u est convergente et $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$.

Dém. avec des ε . □

Exemple la suite $((-1)^n)_{n \in \mathbb{N}}$ n'est pas convergente et la suite $\left(\cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right)_{n \in \mathbb{N}}$ n'est pas convergente.

IV — Convergence et ordre

IV.1 — Inégalités et convergence

Théorème 4.1 — Soit u une suite convergente. Alors u est bornée.

Dém. Appliquons la définition de la limite avec $\varepsilon = 1$. On obtient

$$\exists N_1 \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_1 \implies |u_n - \ell| \leq 1$$

Donc la suite $(u_n)_{n \geq N_1}$ est bornée entre $\ell - 1$ et $\ell + 1$.

Comme la suite $(u_n)_{0 \leq n \leq N_1}$ ne compte qu'un nombre fini de termes, elle est également bornée entre son minimum m et son maximum M . Ainsi, globalement, la suite u est bornée entre $\min(\ell - 1, m)$ et $\max(\ell + 1, M)$. □

Remarque I.0 La réciproque est fautive : la suite $((-1)^n)_{n \in \mathbb{N}}$ est bornée mais n'est pas convergente.

Propriété 4.2 — Soit u une suite convergente, de limite $\ell > 0$.

La suite u est strictement positive à partir d'un certain rang.

Propriété 4.3 — Soit u une suite convergente, de limite $\ell < 0$.

La suite u est strictement négative à partir d'un certain rang.

Théorème 4.4 — Passage à la limite dans une inégalité

Soit u une suite convergente de limite ℓ .

On suppose que $\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n > 0$.

Alors $\ell \geq 0$.

Remarque I.0 L'inégalité stricte est devenue large. Par exemple $1/n > 0$ mais sa limite est nulle.

Corollaire 4.5 — Soit u une suite convergente de limite ℓ . On suppose qu'il existe deux réels a et b tels que $\forall n \in \mathbb{N}, \quad a < u_n < b$.

Alors $a \leq \ell \leq b$.

Corollaire 4.6 — Si u et v sont deux suites convergentes de limites respectives ℓ et ℓ' et si $\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n < v_n$.

Alors $\ell \leq \ell'$.

IV.2 — Théorème d'encadrement

La définition de la convergence est motivée presque entièrement par la possibilité d'utiliser le théorème d'encadrement suivant.

Théorème 4.7 — Théorème d'encadrement

Soit u, v et w trois suites telles que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad v_n \leq u_n \leq w_n$$

Si v et w sont convergentes et de même limite ℓ alors u est convergente de limite ℓ .

Dém. Traitons d'abord le cas où $\ell = 0$. Revenons à la définition de la limite

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0, \quad \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_\varepsilon &\implies |v_n - \ell| \leq \varepsilon \\ \exists N'_\varepsilon \in \mathbb{N}, \quad n \geq N'_\varepsilon &\implies |w_n - \ell| \leq \varepsilon \end{aligned}$$

Prenons alors $\varepsilon > 0$, posons $N''_\varepsilon = \max(N_\varepsilon, N'_\varepsilon)$. Si $n > N''_\varepsilon$ on a

$$\ell - \varepsilon \leq v_n \quad \text{et} \quad w_n \leq \ell + \varepsilon$$

Donc en fait

$$\ell - \varepsilon \leq u_n \leq \ell + \varepsilon$$

Soit $\forall \varepsilon > 0, \quad \exists N''_\varepsilon \in \mathbb{N}, \quad n \geq N''_\varepsilon \implies |u_n - \ell| \leq \varepsilon \quad \square$

Corollaire 4.8 — Soit u et v deux suites réelles.

Si v converge vers 0 et si $\forall n \in \mathbb{N}, |u_n| \leq v_n$ alors u converge vers 0.

Dém. Si $\forall n \in \mathbb{N}, |u_n| \leq v_n$ alors $\forall n \in \mathbb{N}, -v_n \leq u_n \leq v_n$ avec v et $-v$ de même limite 0. \square

Exemple Il est fréquent d'obtenir dans les exercices une inégalité de cette forme. Par exemple

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad |u_n - 1| \leq C \times \frac{1}{2^n}$$

On en déduit *directement* la convergence et la limite de $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ qui ici est 1.

Théorème 4.9 — Théorème de comparaison

Soit u et v deux suites réelles telles que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n \leq v_n$$

1) Si $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$, alors $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$.

2) Si $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} -\infty$, alors $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} -\infty$.

Dém. Démontrons la première proposition. Puisque $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ on a

$$\forall A \in \mathbb{R}, \quad \exists N_A \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_A \implies u_n \geq A$$

Mais puisque $u \leq v$, cela implique

$$\forall A \in \mathbb{R}, \quad \exists N_A \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_A \implies v_n \geq A$$

d'où $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$.

La seconde proposition s'obtient en appliquant la première à $-u$ et $-v$. \square

IV.3 — Convergence des suites monotones

Rappelons tout d'abord que par construction de l'ensemble des réels,

Théorème 4.10 — Propriété fondamentale de \mathbb{R}

Toute suite croissante et majorée converge.

Attention ! Un majorant quelconque de u n'est pas nécessairement la limite de u , comme on peut le voir avec la suite $(1 - 1/n)_{n \in \mathbb{N}^*}$, majorée par 2 et convergente vers 1.

Corollaire 4.11 — Toute suite décroissante et minorée converge.

De plus $\forall n \in \mathbb{N}, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n \leq u_n \leq u_0$

Propriété 4.12 — Soit u est une suite croissante et majorée.

On a $\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_0 \leq u_n \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} u_n$

Théorème 4.13 — Toute suite croissante et non majorée diverge vers $+\infty$.

Dém. Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite croissante non majorée. La non-majoration de $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ s'écrit

$$\forall M \in \mathbb{R}, \quad \exists N \in \mathbb{R}, \quad u_N > M$$

Mais par croissance de u on a alors

$$\forall M \in \mathbb{R}, \quad \exists N \in \mathbb{R}, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad n > N \implies u_n > M$$

ce qui prouve la divergence de u vers $+\infty$. □

Attention ! Une suite peut tendre vers $+\infty$ sans être croissante. Par exemple la suite

$$1 \ 0 \ 2 \ 1 \ 3 \ 2 \ 4 \ 3 \dots$$

(qui vaut $n/2 + 1$ si n est pair et $(n - 1)/2$ sinon).

Corollaire 4.14 — Toute suite décroissante et non minorée diverge vers $-\infty$.

Pouvez-vous donner l'exemple d'une suite tendant vers $-\infty$ sans être décroissante ?

Exemple — Convergence des suites géométriques

Soit $u = (q^n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite géométrique de raison $q \in \mathbb{R}$.

- Si $|q| < 1$, la suite est convergente, de limite 0.
- Si $q \leq -1$, la suite est divergente.
- Si $q = 1$, la suite est constante.
- Si $q > 1$ la suite diverge vers $+\infty$.

Traitons quelques cas :

- Si $0 < q < 1$ alors la suite $u_n = q^n$ est décroissante et minorée. Elle est donc convergente.

Pour trouver sa limite, utilisons la relation de récurrence

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+1} = qu_n$$

Comme u_{n+1} et u_n tendent vers la même limite ℓ , on a $\ell = q\ell$, donc $(1-q)\ell = 0$ soit $\ell = 0$ puisque $q \neq 1$.

- $-1 < q < 0$ alors la suite $u_n = q^n$ est encadrée de la façon suivante

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad -|q|^n \leq q^n \leq |q|^n$$

D'après le théorème d'encadrement, elle tend donc vers 0.

- si $q = 1$, la suite est constante.
- Dans tous les autres cas, elle est divergente.

IV.4 — Suites adjacentes

Définition 4.15 — Suites adjacentes

On dit que deux suites u et v sont *adjacentes* si elles sont monotones, de monotonies contraires et si $u - v$ converge vers 0.

Théorème 4.16 — Convergence des suites adjacentes

Soit u et v sont deux suites adjacentes.

Elles sont convergentes et de même limite ℓ . De plus, si u est croissante et v décroissante, alors

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n \leq u_{n+1} \leq \ell \leq v_{n+1} \leq v_n$$

Dém. $u - v$ est décroissante et de limite nulle. u est croissante et majorée par v_0 , idem pour v avec u_0 , elles sont donc cv de même limite. \square

Exemple La suite $u_n = \sum_{p=0}^n \frac{1}{p!}$ et $v_n = u_n + \frac{1}{n!}$. Nous prouverons que leur limite commune est e.

V — Opérations usuelles

V.1 — Opérations arithmétiques

Étant des fonctions d'une partie de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , on peut additionner, multiplier, etc. des suites entre elles. Ces opérations donnent encore des suites.

Définition 5.1 — Opérations algébriques sur les suites

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ deux suites numériques et λ un réel.

- 1) Si $\lambda \in \mathbb{R}$, le **produit** de u par λ est la suite $\lambda u \stackrel{\text{déf.}}{=} (\lambda u_n)_{n \in \mathbb{N}}$
- 2) La **somme** de u et de v est la suite $u + v \stackrel{\text{déf.}}{=} (u_n + v_n)_{n \in \mathbb{N}}$
- 3) Le **produit** de u et de v est la suite $u \times v \stackrel{\text{déf.}}{=} (u_n \times v_n)_{n \in \mathbb{N}}$
- 4) Si $\forall n \in \mathbb{N}, u_n \neq 0$, alors l'**inverse** de u est la suite $(1/u_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Une propriété sur une suite peut être vérifiée **à partir d'un certain rang**. Par exemple une suite u peut être non nulle à partir d'un certain rang, ce qui signifie

$$\exists N \in \mathbb{N}, \quad n \geq N \implies u_n \neq 0$$

Dans ce cas la suite $1/u$ est définie « à partir d'un certain rang ».

Par définition, $u - v = u + (-1) \times v$ et $u/v = u \times (1/v)$ si $1/v$ est correctement définie.

Proposition 5.2 — L'ensemble $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ muni du produit par un scalaire et de la somme de deux suites est un espace vectoriel sur \mathbb{R} .

V.2 — Convergence et opérations usuelles

À partir de la définition, on démontre le résultat suivant, essentiel.

Théorème 5.3 — Linéarité de la convergence
 Soit u une suite convergeant vers ℓ et v une suite convergeant vers ℓ' .
 Alors la suite $u + v$ est convergente et $u_n + v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell + \ell'$.
 De plus, si $\lambda \in \mathbb{R}$ alors la suite λu est convergente et $\lambda u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \lambda \times \ell$.

Dém. Démontrons le résultat d'addition. Puisque u tend vers ℓ et v vers ℓ' , on a

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0, \quad \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}, \quad n \geq N_\varepsilon \implies |u_n - \ell| \leq \varepsilon \\ \exists N'_\varepsilon \in \mathbb{N}, \quad n \geq N'_\varepsilon \implies |v_n - \ell'| \leq \varepsilon \end{aligned}$$

Prenons ε dans \mathbb{R} et posons $N''_\varepsilon = \max(N_{\varepsilon/2}, N'_{\varepsilon/2})$. Pour $n \geq N''_\varepsilon$ on trouve, d'après l'inégalité triangulaire,

$$|u_n + v_n - (\ell + \ell')| \leq |u_n - \ell| + |v_n - \ell'| \leq 2 \times \varepsilon / 2$$

d'où le résultat. □

Théorème 5.4 — Produit de deux suites convergentes
 Soit u une suite convergeant vers ℓ et v une suite convergeant vers ℓ' .

La suite $u \times v$ est convergente et $u \times v \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell \times \ell'$.

Dém. On utilise le théorème d'encadrement

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N}, \quad |u_n v_n - \ell \ell'| &= |u_n v_n - v_n \ell + v_n \ell - \ell \ell'| \\ &\leq |v_n| |u_n - \ell| + |\ell| |v_n - \ell'| \\ &\leq |M| |u_n - \ell| + |\ell| |v_n - \ell'| \end{aligned}$$

où M est un majorant de $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ (qui est bornée, puisqu'elle est convergente, d'après le théorème 4.2). Comme le terme de droite tend vers 0, le terme de gauche aussi d'après le corollaire du théorème d'encadrement. \square

Notez que les deux théorèmes précédents prouvent que la suite est convergente et donne sa limite.

Corollaire 5.5 — Soit $p \in \mathbb{N}$ et u une suite de limite finie ℓ .

La suite u^p est convergente de limite ℓ^p .

Théorème 5.6 — Soit $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ telle que $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ et $v \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ telle que $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \ell$ avec $\ell \in \mathbb{R}_+^*$.

Les suites $u + v$ et $u \times v$ divergent vers $+\infty$.

On en déduit facilement le cas où u diverge vers $-\infty$ ou v converge vers $\ell \in \mathbb{R}_*$.

Théorème 5.7 — Soit $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ telle que $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$ et $v \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ telle que $v_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} +\infty$. Alors les suites $u + v$ et $u \times v$ divergent vers $+\infty$.

On en déduit facilement le cas où u diverge vers $-\infty$ ou v diverge vers $-\infty$.

Tous les autres cas relèvent de « formes indéterminées ». Ils se résument en deux cas « $\infty - \infty$ » et « $0 \times \infty$ ».

« Forme indéterminée » signifie qu'il n'y a pas de théorème général permettant de prouver la convergence et donner la limite.

V.3 — Composition

Commençons d'emblée par le théorème le plus général et le plus puissant.

Théorème 5.8 — Composée d'une suite et d'une fonction continue

Soit u une suite convergeant vers ℓ et f une fonction définie sur un voisinage de ℓ et continue en ℓ . Alors la suite $(f(u_n))_{n \in \mathbb{N}}$ est convergente et de limite $f(\ell)$.

Dém. Écrivons les définitions des deux propriétés. D'abord $f(x) \xrightarrow{x \rightarrow \ell} f(\ell)$

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \alpha > 0, x \in]\ell - \alpha ; \ell + \alpha[\implies |f(x) - f(\ell)| \leq \varepsilon \quad (1)$$

Ensuite $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell$:

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}, n \geq N_\varepsilon \implies |u_n - \ell| \leq \varepsilon \quad (2)$$

La démonstration est en fait toute simple. Prenons $\varepsilon > 0$ quelconque et associons lui α selon la ligne (1). Alors d'après la ligne (2), pour $n \geq N_\alpha$, on a

$$|u_n - \ell| \leq \alpha$$

ce qui signifie d'après (1) que

$$|f(u_n) - f(\ell)| \leq \varepsilon$$

Bref

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N'_\varepsilon \in \mathbb{N}, n \geq N'_\varepsilon \implies |f(u_n) - f(\ell)| \leq \varepsilon$$

où on a posé $N'_\varepsilon = N_\alpha$. C'est ce qu'on voulait démontrer. □

Notons que la suite $(f(u_n))_{n \in \mathbb{N}}$ peut n'être définie qu'à partir d'un certain rang.

Corollaire 5.9 — Si u est une suite convergeant vers ℓ avec $\ell \neq 0$.

Alors la suite $1/u$ est convergente et $1/u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 1/\ell$,

Le théorème précédent admet une généralisation commode.

Théorème 5.10 — Cas des limites infinies

Soit u une suite convergeant vers ℓ , avec ℓ finie ou infinie, et f une fonction définie sur un voisinage de ℓ et admettant une limite finie ou infinie ℓ' en ℓ .

Alors la suite $(f(u_n))_{n \in \mathbb{N}}$ est convergente, de limite ℓ' .

Dém. admis □

On a « gagné » le cas des limites infinies.

Corollaire 5.11 — Si u est une suite convergeant vers 0 et positive à partir d'un certain rang alors la suite $1/u$ diverge vers $+\infty$.

Corollaire 5.12 — Soit $u \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ telle que $u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \pm\infty$.

La suite $1/u$ est définie à partir d'un certain rang et $1/u_n \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$.

VI — Suites usuelles

VI.1 — Suite géométrique

Définition 6.1 — Suite géométrique

Une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est *géométrique* si et seulement si il existe un réel q tel que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+1} = qu_n$$

Le réel q est appelé la *raison* de la suite géométrique.

Théorème 6.2 — Expression d'une suite géométrique

Soit une suite géométrique $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de raison q . On a

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

Dém. Par récurrence. □

Si u est géométrique à partir du rang $i \in \mathbb{N}$ alors

$$\forall n \in \llbracket i ; +\infty \llbracket, \quad u_n = q^{n-i} u_i$$

VI.2 — Suite arithmético-géométrique

Définition 6.3 — Suite arithmético-géométrique

Une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est *arithmético-géométrique* si et seulement si il existe deux réels a et b tels que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+1} = au_n + b$$

Le réel a est la *raison* de la suite.

Théorème 6.4 — Expression d'une suite arithmético-géométrique

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite géométrique de raison $a \in \mathbb{R}$, avec $a \neq 1$.

Il existe un réel ℓ tel que la suite $(u_n - \ell)_{n \in \mathbb{N}}$ est géométrique de raison a et donc

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n = a^n(u_0 - \ell) + \ell$$

On a $\ell = b/(1 - a)$, le *point fixe* de la suite.

Dém. Raisonnement par Analyse-Synthèse. □

Lorsqu'une suite arithmético-géométrique est définie à partir du rang $i \in \mathbb{N}$, on a

$$\forall n \in \llbracket i ; +\infty \llbracket, \quad u_n = a^{n-i}(u_i - \ell) + \ell$$

VI.3 — Suite récurrente linéaire d'ordre 2

Définition 6.5 — Suite récurrente linéaire d'ordre 2

Une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est récurrente linéaire d'ordre 2 si et seulement si il existe deux réels a et b tels que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+2} = a u_{n+1} + b u_n$$

Analyse Pour exprimer $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ en fonction de n , l'idée est d'utiliser une suite annexe $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ que l'on saurait exprimer.

Que prendre pour la suite v ? On peut essayer $v_n = u_n - \ell$, $v_n = a \times u_n$, etc. Pour cela cherchons d'abord des suites géométriques vérifiant la relation de récurrence. Soit $v_n = \alpha \lambda^n$.

$$\begin{aligned} v_{n+2} &= \alpha \lambda^{n+2} \\ v_{n+2} &= a v_{n+1} + b v_n = \alpha \lambda^{n+2} \\ 0 &= \alpha \lambda^n (\lambda^2 - a \lambda - b) \end{aligned}$$

Ainsi la raison de v doit vérifier l'équation caractéristique $X^2 - aX - b = 0$.

Énonçons alors le résultat, avant de le démontrer.

Théorème 6.6 — Expression en fonction de n

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite récurrente linéaire d'ordre 2 vérifiant

$$(u_0, u_1) \in \mathbb{R}^2, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+2} = a u_{n+1} + b u_n$$

On pose $X^2 = aX + b$ l'équation caractéristique de la suite et Δ le discriminant de cette équation.

- Si $\Delta > 0$, l'équation admet deux racines réelles λ_1 et λ_2 .

Il existe alors deux réels α et β tels que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n = \alpha \lambda_1^n + \beta \lambda_2^n$$

On détermine α et β à l'aide des valeurs initiales u_0 et u_1 .

- Si $\Delta = 0$, l'équation admet une racine réelle λ unique.

Il existe alors deux réels α et β tels que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n = (\alpha n + \beta) \lambda^n$$

On détermine α et β à l'aide des valeurs initiales u_0 et u_1 .

- Si $\Delta < 0$, l'équation admet deux racines complexes conjuguées $\rho e^{i\theta}$ et $\rho e^{-i\theta}$. Il existe alors deux réels A et B tels que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_n = A \rho^n \cos(n\theta) + B \rho^n \sin(n\theta)$$

On détermine A et B à l'aide des valeurs initiales u_0 et u_1 .

VII — Comparaisons lorsque n tend vers $+\infty$

L'équivalence est moyen simple et rapide de calculer des limites. Il est toutefois souvent « un peu trop simple ». Nous l'approfondirons tout au long de l'année.

L'idée est de calculer grossièrement, c'est-à-dire en simplifiant les sommes de façon à n'en garder que le terme dominant. Par exemple

$$\frac{n^2 + 2^n - n}{e^n + n^3 + 4} \sim \frac{2^n}{e^n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \quad \text{car } |2/e| < 1$$

VII.1 — Négligeabilité

Définition 7.1 — Suite négligeable devant une autre

On dit que la suite u est *négligeable* devant la suite v si et seulement si $\frac{u_n}{v_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$.

On note alors « $u_n = o(v_n)$ ».

Exemple

- On a $n = o(n^2)$
- Au voisinage de $+\infty$, $n/e^n \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0$, donc $n = o(e^n)$. De même $\ln(n) = o(n)$.

Ces résultats se généralisent.

Propriété 7.2 — Prépondérants classiques en $+\infty$, suites de limite infinie

$$\begin{aligned} \alpha > 0 & \text{ alors } \ln(n) = o(n^\alpha) \\ \alpha < \beta & \text{ alors } n^\alpha = o(n^\beta) \\ \beta > 0 \text{ et } q > 1 & \text{ alors } n^\beta = o(q^n) \\ 1 < q_1 < q_2 & \text{ alors } q_1^n = o(q_2^n) \end{aligned}$$

$$q > 1 \quad \text{alors} \quad q^n = o(n!)$$

Propriété 7.3 — Prépondérants classiques en $+\infty$, suites de limite nulle

$$\begin{aligned} q_1 < q_2 < 1 & \text{ alors } q_1^n = o(q_2^n) \\ \alpha > 0 \text{ et } q < 1 & \text{ alors } q^n = o(n^\alpha) \\ \alpha > \beta & \text{ alors } n^\alpha = o(n^\beta) \end{aligned}$$

Propriété 7.4 — Calcul avec des o

- *Transitivité* : si $u_n = o(v_n)$ et $v_n = o(w_n)$ alors $u_n = o(w_n)$;
- *Somme* : si $u_n = o(w_n)$ et $v_n = o(w_n)$ alors $u_n + v_n = o(w_n)$;
- *Produit par un scalaire* : si $u_n = o(v_n)$ et si $\alpha \in \mathbb{R}^*$ alors $\alpha u_n = o(v_n)$;
- *Produit* : si $u_n = o(w_n)$ alors $u_n v_n = o(v_n w_n)$;
- *Produit* : si $u_n = o(w_n)$ et $v_n = o(x_n)$ alors $u_n v_n = o(w_n x_n)$.

VII.2 — Équivalence**Définition 7.5 — Suites équivalentes**

Soit u et v deux suites telles que u/v et v/u soient définies à partir d'un certain rang.

Les suites u et v sont *équivalentes* si et seulement si $\frac{u}{v} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 1$, ce que l'on note « $u_n \sim v_n$ ».

Remarque I.0 En particulier, il est impossible d'avoir $u_n \sim 0$!

On suppose dans la suite du cours que u/v et v/u sont définies à partir d'un certain rang.

Propriété 7.6 — Caractérisation de l'équivalence

$$u_n = v_n + o(v_n) \quad \Longleftrightarrow \quad u_n \sim v_n$$

Dém. Pour le sens direct, si $u_n = v_n + o(v_n)$ alors

$$\frac{u_n}{v_n} = 1 + \frac{o(v_n)}{v_n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 1 \quad \text{donc} \quad u_n \sim v_n$$

Pour le sens réciproque, si $u_n \sim v_n$ alors

$$\frac{u_n - v_n}{v_n} = \frac{u_n}{v_n} - 1 \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

ce qui prouve que $u_n - v_n = o(v_n)$, donc que $u_n = v_n + o(v_n)$. \square

Théorème 7.7 — Convergence de suites équivalentes

Si $u_n \sim v_n$ et si $v_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell$ alors $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \ell$ (la limite ℓ peut éventuellement être infinie).

Dém. Aisée. \square

Attention ! La réciproque est fautive ! Par exemple 2^n et n ont la même limite en $+\infty$ mais ne sont pas équivalentes.

La notion d'équivalents est donc plus fine que la notion de limite. Elle permet de classer les suites ayant la même limite en différentes catégories selon la façon dont elles tendent vers cette limite.

Exemple L'idée générale des équivalents est : dans une somme ne garder que le terme dominant, et pour les autres opérations (produit, quotient, puissance) ne rien changer.

$$\begin{aligned} - \quad \frac{3n^5 + 2n^2 + n}{n^2 - 1} &= \frac{3n^5 + o(n^4)}{n^2 + o(n^2)} \sim \frac{3n^5}{n^2} \sim 3n^3 \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty \\ - \quad \frac{2^n + 2^{-n}}{2^n - 2^{-n}} &= \frac{2^n + o(e^n)}{2^n + o(2^n)} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 1. \end{aligned}$$

Ces deux résultats permettent de calculer des limites, en généralisant la méthode vue en Terminale.

Proposition 7.8 — Calcul avec des équivalents

- 1) *Transitivité* : si $u_n \sim v_n$ et si $v_n \sim w_n$ alors $u_n \sim w_n$;
- 2) *Produit* : si $u_n \sim v_n$ et si $v_n \sim x_n$ alors $u_n v_n \sim w_n x_n$;
- 3) *Inverse* : si $u_n \sim v_n$ alors $1/u_n \sim 1/v_n$ (sous réserve d'existence) ;
- 4) *Puissance* : si $u_n \sim v_n$ alors $u_n^\alpha \sim v_n^\alpha$ (sous réserve d'existence) ;
- 5) *Signe* : si $u_n \sim v_n$ et si u_n est de signe constant à partir d'un certain rang alors u et v sont de même signe à partir d'un certain rang.

Mais les opérations usuelles ne suffisent pas, et on veut pouvoir parfois faire des calculs avec des fonctions classiques. On dispose pour cela d'un petit réservoir de possibilités.

Théorème 7.9 — Composition avec des fonctions usuelles

Soit $(\varepsilon_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de limite nulle. On a

$$\begin{aligned} \sin(\varepsilon_n) &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \varepsilon_n &\iff &\sin(\varepsilon_n) = \varepsilon_n + o(\varepsilon_n) \\ \cos(\varepsilon_n) - 1 &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} -\frac{1}{2}\varepsilon_n^2 &\iff &\cos(\varepsilon_n) - 1 = -\frac{1}{2}\varepsilon_n^2 + o(\varepsilon_n^2) \\ \tan(\varepsilon_n) &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \varepsilon_n &\iff &\tan(\varepsilon_n) = \varepsilon_n + o(\varepsilon_n) \\ \ln(1 + \varepsilon_n) &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \varepsilon_n &\iff &\ln(1 + \varepsilon_n) = \varepsilon_n + o(\varepsilon_n) \\ e^{\varepsilon_n} - 1 &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \varepsilon_n &\iff &e^{\varepsilon_n} - 1 = \varepsilon_n + o(\varepsilon_n) \\ (1 + \varepsilon_n)^\alpha - 1 &\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \alpha\varepsilon_n &\iff &(1 + \varepsilon_n)^\alpha - 1 = \alpha\varepsilon_n + o(\varepsilon_n) \end{aligned}$$

Dém. À partir de limites usuelles en 0. Par ailleurs, de la formule $\cos(2\varepsilon_n) = 1 - 2\sin^2 \varepsilon_n$, on tire $\cos(\varepsilon_n) - 1 = -2\sin^2(\varepsilon_n/2)$ et donc

$$1 - \cos(\varepsilon_n) \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{\varepsilon_n^2}{2} \iff \cos(\varepsilon_n) = 1 - \frac{\varepsilon_n^2}{2} + o(\varepsilon_n^2) \quad \square$$

Ne vous éloignez pas de ce formulaire : ailleurs, c'est un monde cruel où la moindre erreur se paye cash !

Attention ! Le gros point noir est qu'on ne peut pas faire d'addition d'équivalents.

Exemple Par exemple $n + n^2 \sim n^2$ et $\sqrt{n} - n^2 \sim -n^2$ mais la somme est équivalente à n .

L'idée est que lorsqu'on somme deux équivalents, il faut savoir lequel des deux est le plus grand, et ne garder que celui-ci. Mais s'ils sont du même ordre de grandeur et qu'ils s'annulent, que faire ? Et bien la réponse est qu'il nous faut plus de détail sur le reste des deux sommes.

La morale est qu'il faut d'abord faire toute les sommes *puis* les équivalents... mais pas l'inverse !