MATH1400
Calcul à plusieurs variables

Ensemble de théorèmes, lemmes et définitions

Franz Girardin

1er octobre 2024

Table des matières

1

Suites numériques

Définition d'une suite

Fonction $a\colon \mathbb{N}^* \to \mathbb{R}$ qui accepte $n \in \mathbb{N}^*$ et engendre une **séquence ordonnée** de **réels** a_n. L'image de n est donnée par :

$$n \to a(n) = a_n$$

Notations équivalentes :

$$\{a_1, a_2, a_3, \dots\} \leftrightarrow \{a_n\} \leftrightarrow \{a_n\}_{n=1}^{\infty}$$

On dit que $a_n ou \{a_n\}$ est le **terme général** ; c'est la règle qui définit la suite ; *laformule* qui permet de calculer n'importe quel terme de la suite en fonction de n.

Suite par récurrence

Est dite **récurrente** toute suite a_n dont la règle fait appel à des termes antérieurs, après avoir établit certains termes de départ. L'**ordre de récurrence** dépend du nombre de termes auquel la formule du terme général fait appel.

Définition d'une suite arithmétique

$$a_n ::= \begin{cases} a_1 = y & \textbf{1}^{\textbf{er}}\ \textbf{Terme} \\ a_n = a_{n-1} + r & \text{Récurrence} \end{cases}$$

$r = a_n - a_{n-1}$	$\forall n \geqslant 2$	**Raison**
$a_n = a_1 + (n-1) \cdot r$	$\forall n \geqslant 1$	n^{e} terme

Somme n termes d'une arithmétique

$$S_n = a_0 + a_1 + a_2 + \cdots + a_n$$

$$\boxed{S_n = \sum_{n=0}^{n} a_k = \frac{n}{2}(a_1 + a_n)}$$

Définition d'une suite géométrique

$$a_n ::= \begin{cases} a_1 = y & \textbf{1}^{\textbf{er}}\ \textbf{Terme} \\ a_n = a_{n-1} \cdot r & \text{Récurrence} \end{cases}$$

$r = \dfrac{a_n}{a_{n-1}}$	$\forall\ n \geqslant 2$	**Raison**
$a_n = a_1 r^{n-1}$	$\forall\ n \geqslant 1$	n^{e} terme

Somme n termes d'une géométrique

$$S_n = a_0 + a_1 + a_2 + \cdots + a_n$$

$$\boxed{S_n = \sum_{n=0}^{n} a_k = a_0 \frac{r^{n+1} - 1}{r - 1}, \quad r \neq 1}$$

Convergence d'une suite géométrique

$$\Big(-1 < r \leqslant 1\Big) \implies \{r^n\}\ \textbf{conv}.\ \forall r \in \mathbb{R}$$

$$\lim_{n\to+\infty} \{r^n\} = \begin{cases} 0 & \text{si } -1 < r < 1 \\ 1 & \text{si } r = 1 \end{cases}$$

Convergence d'une série géométrique

$$S = \sum_{n=0}^{\infty} ar^n = \lim_{n\to+\infty} S_n = \lim_{n\to+\infty} \sum_{k=0}^{n} ar^k$$

▷ $\Big(|r| < 1\Big) \implies \sum_{n=0}^{\infty} ar^n = \dfrac{a}{1-r}$ (**conv.**)
▷ $\big(|r| \geqslant 1, a \neq 0\big) \implies \sum_{n=0}^{\infty} ar^n = \infty$ (**div.**)

Monotonicité

Soit une suite a_n, on dit que la suite est :

- ▷ **Strictement croissante**
  si $\forall n \geqslant 1, a_{n+1} > a_n$
- ▷ **Croissante**
  si $\forall n \geqslant 1, a_{n+1} \geqslant a_n$
- ▷ **Strictement décroissante**
  si $\forall n \geqslant 1, a_{n+1} < a_n$
- ▷ **Décroissante**
  si $\forall n \geqslant 1, a_{n+1} < a_n$
- ▷ **Stationnaire** ou **constante**
  si elle est telle que $a_{n+1} = a_n = a_{n-1}$

Propriétés limites d'une suite

- ▷ **Unicité.** La limite d'une suite convergente est *unique*.
- ▷ Toute suite convergente est **bornée** ; toute suite non bornée est **divergente**.
- ▷ Toute suite croissante et majorée est convergente. **Exemple** : $a_n = 1 - 1/n$.

$$\lim_{n\to\infty} a_n = 1.$$

- ▷ Toute suite décroissante et minorée est convergente. **Exemple** : $b_n = 1/n$.

$$\lim_{n\to\infty} b_n = 0.$$

- ▷ Toute suite monotone et bornée est convergente.

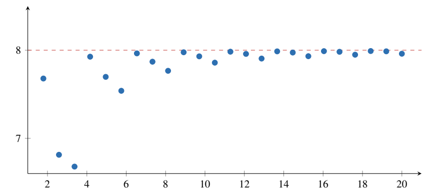
Définitions de bornes d'une suite

Une suite $a_{n=1}^{\infty}$ est **minoriée** ou **majorée** selon les conditions suivantes :
▷ $\forall n \in \mathbb{N}, a_n \leqslant M \implies$ **majorée**
▷ $\forall n \in \mathbb{N}, a_n \geqslant m \implies$ **minorée**

On dit qu'elle est **bornée** si elle est à la fois *majorée et minorée*.

Théorème des suites monotones

Toute suite monotone et bornée est nécessairement **convergente**.



Définition formelle de convergence

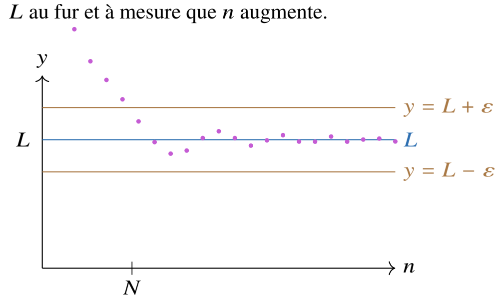
$$\lim_{n\to\infty} a_n = L$$

signifie qu'une suite est **convergente** et tend vers la limite L **si et seulement si** :

$$\boxed{\forall \varepsilon > 0, \exists N(\varepsilon) > 0 : n > N(\varepsilon) \implies |a_n - L| < \varepsilon}$$

Vulgarisation

Soit un nombre positif $\varepsilon > 0$ *aussi petit que l'on souhaite*. Il est toujours possible de trouver un entier $N(\varepsilon)$ tel que, pour tous les termes de la suite dont l'indice n est supérieur à N, c'est-à-dire $n > N(\varepsilon)$, l'image a_n sera suffisamment proche de L. Autrement dit, la distance entre a_n et L sera inférieure à ε et donc négligeable, ce qui signifie que la suite se rapproche indéfiniment de la limite L au fur et à mesure que n augmente.



Définition formelle de la divergence

$$\lim_{n\to\infty} a_n = \pm\infty$$

signifie qu'une suite est **divergente** ne tend vers **aucune valeur particulière** lorsque :

$$\boxed{\forall M > 0, \exists N(M) > 0 : n > N(M) \implies a_n > M}$$

Vulgarisation

Soit un nombre positif aussi grand que l'on souhaite, $M > 0$. Il est toujours possible de trouver un entier $N(M)$ tel que, pour tous les termes de la suite dont l'indice n est supérieur à N, c'est-à-dire $n > N(M)$, l'image a_n sera plus grande que M. Autrement dit, à partir d'un certain rang, les termes de la suite deviennent arbitrairement grands, sans jamais revenir vers des valeurs plus petites.

Corollaire de divergence

Si $\lim_{n\to+\infty} a_n = \infty$, **alors**,

$$\lim_{n\to+\infty} \frac{1}{a_n} = 0$$

Attention

$$\lim_{n\to\infty} \frac{1}{a_n} = 0 \not\Rightarrow \lim_{n\to+\infty} a_n = \infty$$

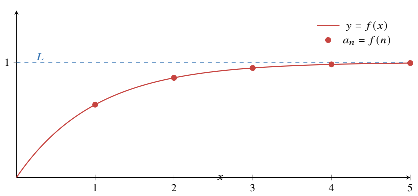
Association d'une fonction à une suite

Soit $f(x)$ une fonction admettant une limite L à $+\infty$, Alors, la suite $\{a_n\} = f(n)$ admet *la même limite* :

$$\lim_{x\to\infty} f(x) = L \implies \lim_{n\to\infty} a_n = L$$

De la même façon :

$$\lim_{x\to\infty} f(x) = \infty \implies \lim_{n\to\infty} a_n = \infty$$



Par ailleurs, si $f(x)$ est **une fonction continue en** L et si la suite $\{a_n\}$ converge vers L, alors la limite suivante **converge** vers $f(L)$:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n) = f(L)$$

$$\lim_{n\to+\infty} f(\lim_{n\to\infty} a_n) = f(L)$$

Exemple

$$\lim_{n\to+\infty} \sin(\pi/2) = \sin(\lim_{n\to+\infty})\pi/2 = 0$$

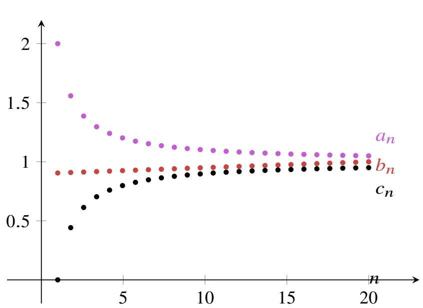
Théorème des gendarmes

Soient $\{a_n\}$, $\{b_n\}$ et $\{c_n\}$ des suites et $n_0 \in \mathbb{N}$ tels que

- $\lim_{n\to+\infty} a_n = \lim_{n\to+\infty} c_n = L \in \mathbb{R} \cup \{\infty\}$;
- $\forall n \geqslant n_0,\ a_n \leqslant b_n \leqslant c_n$

Alors,

$$\lim_{n\to+\infty} b_n = L$$



2

Séries numériques

Définition d'une série numérique

$$s = a_1 + a_2 + \cdots + a_n + \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

est une série numérique de **somme** s. Lorsqu'on additionne une quantité *finie* de termes d'une série, on obtient une **somme partielle** :

$$s_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n = \sum_{k=1}^{n} a_k$$

Propriétés des séries convergentes

On ne change pas **la nature** d'une série en lui enlevant ou en lui ajoutant un nombre **fini** de termes.

Soit $k \geqslant 0 \in \mathbb{N}$, les sommes suivantes ont le même comportement ; l'une converge **uniquement si l'autre converge également** :

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = L\ (\textbf{conv.}) \leftrightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_{n+k}\ \textbf{conv}.$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \pm\infty\ (\textbf{div.}) \leftrightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_{n+k}\ \textbf{div}.$$

Addition et multiplication par un scal.

- Si $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = s$ (**conv.**) et λ est un scalaire, alors la série de terme général $\sum_{n=1}^{\infty} \lambda a_n$ converge et a pour somme :

$$\boxed{\sum_{n=1}^{\infty} \lambda a_n = \lambda \sum_{n=1}^{\infty} a_n = \lambda s}$$

- Si $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = s$ (**conv.**) et $\sum_{n=1}^{\infty} b_n = t$ (**conv.**), alors la série de terme général $a_n + b_n$ converge et a pour somme :

$$\sum_{n=1}^{\infty}(a_n + b_n) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n + \sum_{n=1}^{\infty} b_n = s + t$$

Attention

- $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n \neq (\sum_{n=1}^{\infty} a_n)(\sum_{n=1}^{\infty} b_n)$
- $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{b_n} \neq \frac{\sum_{n=1}^{\infty} a_n}{\sum_{n=1}^{\infty} b_n}$

Théorème de conv. du terme général

Le terme général d'une série convergente **tend vers 0** :

$$\boxed{\sum_{n=1}^{\infty} a_n = s\ (\textbf{conv.}) \implies \lim_{n\to\infty} a_n = 0}$$

► **Implique** qu'il n'est pas nécessaire d'évaluer la série si on sait que a_n **div.**

Corollaire de divergence du terme général

Une suite qui ne converge par à zéro engendre une série qui **diverge**.

$$\boxed{\lim_{n\to\infty} a_n \neq 0 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n = \infty\ (\textbf{div.})}$$

Note:-

La **réciproque** est fausse. Par exemple la série **harmonique** de terme général a_n :

$$\lim_{n\to+\infty} a_n = \lim_{n\to+\infty} \frac{1}{n} \longrightarrow 0$$

/ Mais on a également :

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \longrightarrow +\infty(\textbf{div.})$$

Théorème du reste

Soient la série de terme général a_n, la quantité s_n et le rest R_n, :

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n,\quad \sum_{k=1}^{n} a_k = s_n,\quad \sum_{k=n+1}^{\infty} a_k = R_n$$

On a l'implication suivante :

$$\lim_{n\to\infty} R_n = 0 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n = s\ (\textbf{conv.})$$

$$\implies R_n = s - s_n$$

Cela signifie que, pour des valeurs suffisamment grandes de n, le reste R_n devient arbitrairement petit et la somme totale s est bien approchée par la somme partielle s_n.

3

Série à termes positifs

Définition d'une série à termes positifs

Il s'agit d'une série dont tous les termes a_{n+1} sont au moins aussi grands que leurs prédécessaur a_n :

$$[\forall n \geqslant 1 a_n \geqslant 0] \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n \textbf{à termes positifs.}$$

Théorème de conv. des séries à termes positifs

Une condition **nécessaire et suffisante** pour que la série à termes positifs $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ converge est que la suite des sommes partielles $s_n = \sum_{k=1}^{n} a_k$ soit majorée.

Sommes partielles : La suite des sommes partielles s_n est la somme des premiers termes de la série, jusqu'au n-ième terme. Si cette somme partielle devient **majorée**, cela signifie qu'*il* *existe une limite supérieure que les sommes ne pourront jamais dépasser*, peu importe la valeur de n. En d'autres termes, les termes de la série s'accumulent, mais ils le font de manière contrôlée.

Séries à termes positifs : Puisque les a_n sont positifs, chaque nouveau terme a_n ajouté à la somme partielle rend la somme s_n de plus en plus grande. Si cette accumulation ne finit jamais par dépasser un certain seuil (c'est-à-dire, si elle est majorée), cela signifie que les termes a_n doivent devenir de plus en plus petits et que leur contribution totale ne fait qu'approcher un certain nombre, sans jamais devenir infinie. C'est le signe que la série **converge**.

Test de comparaison

Soient $\sum a_n, \sum b_n$ des séries à **termes positifs** et $n_0 \in \mathbb{R}$, une série **plus petite** qu'une série convergente converge nécessaire ; et une série **plus grande** qu'une série divergente diverge nécessairement :

▷ $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ **conv.**, $a_n \leqslant b_n \forall n \geqslant n_0 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **conv.**

▷ $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ **div.**, $a_n \geqslant b_n \forall n \geqslant n_0 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **div.**

Forme limite du test de comparaison

En évaluant le rapport entre deux suites, ont peut déterminer si leur série correspondente convergent ou divergent tout deux.

$$\left[\lim_{n\to+\infty} \frac{b_n}{a_n} = L \neq 0\right] \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n \textbf{ conv.} \leftrightarrow \sum_{n=1}^{\infty} b_n \textbf{ conv.}$$

Critère de Riemann

Soit $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ une **série à termes positifs**. Supposons qu'il existe un réel $p > 0$ tel que

$$\lim_{n\to\infty} n^p a_n = l.$$

Dans ce cas :
▷ Si $p > 1$ et l est fini, **alors** $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **conv**

▷ Si $p \leqslant 1$ et $l \neq 0$ (ou $l = +\infty$), **alors** $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **div**.

<u>**Exemple**</u> :

Analysons $a_n = \dfrac{n-1}{n^4+1}$.

Tout d'abord, nous cherchons $p > 0$ tel que la limite $\lim_{n\to\infty} n^p a_n$ existe et est finie.

Approximons a_n pour n grand :

$$a_n = \frac{n-1}{n^4+1} \approx \frac{n}{n^4} = \frac{1}{n^3}.$$

Ainsi, pour n grand :

$$n^p a_n \approx n^p \cdot \frac{1}{n^3} = n^{p-3}.$$

Pour que la limite soit finie et non nulle, il faut que $p - 3 = 0$, donc $p = 3$.

Calculons la limite avec $p = 3$:

$$\lim_{n\to\infty} n^3 a_n = \lim_{n\to\infty} n^3 \cdot \frac{n-1}{n^4+1} = \lim_{n\to\infty} \frac{n^3(n-1)}{n^4+1}.$$

Simplifions le numérateur et le dénominateur :

$$\frac{n^3(n-1)}{n^4+1} = \frac{n^4-n^3}{n^4+1}.$$

Divisons le numérateur et le dénominateur par n^4 :

$$\frac{n^4-n^3}{n^4+1} = \frac{1-\frac{1}{n}}{1+\frac{1}{n^4}}.$$

Lorsque $n \to \infty$, $\frac{1}{n} \to 0$ et $\frac{1}{n^4} \to 0$, donc :

$$\lim_{n\to\infty} \frac{1-\frac{1}{n}}{1+\frac{1}{n^4}} = 1.$$

Ainsi :

$$\lim_{n\to\infty} n^3 a_n = 1.$$

Puisque $p = 3 > 1$ et $l = 1$ est fini, le critère de Riemann nous indique que la série $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ converge.

La série $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n-1}{n^4+1}$ converge d'après le critère de Riemann.

Astuce pour le critère de Riemann

Soit k et l, les valeurs de l'exposant de plus petit degré et du plus grand degré du polynôme, il suffit de choisir m tel que $m + k = l$. Dans l'**exemple** précédent, nous avions $k = 1$, $l = 4$ et $m = l - k = 3$ et $n^m = n^3$.

Série de Riemann et série puissance

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p} \text{ converge si } p > 1 \text{, diverge si } p \leqslant 1$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} n^p \text{ converge si } p > 1$$

La première est un **série de Riemann** ; la seconde est une **série puissance**.

Test de l'intégrale

Soit $f : [1, \infty[\to \mathbb{R}$ **continue**, **positive** et **décroissante** et $a_n : f(n) = a_n$, la somme suivante converge ou diverge avec son intégrale correspondante :

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad \textbf{conv.}$$

$$\updownarrow$$

$$\lim_{a\to+\infty} \int_{x=1}^{x=a} f(x)dx = S \quad (\textbf{conv.})$$

► Utile lorsqu'on connait **une intégrale convergente** qui est analogue à la somme qu'on veut calculer.

Approximation de la somme

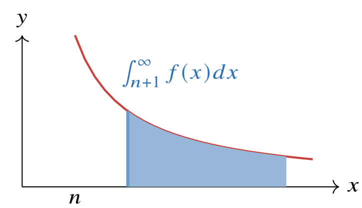
Si f : **positive**, **continue** et **décroissante** après sur son domaine et soit $n \in \mathbb{N}^*$, $a_n = f(n)$, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = s \in \mathbb{R}$, $R_n = s - s_n$, **alors** le reste R_n est borné et peut être estimé :

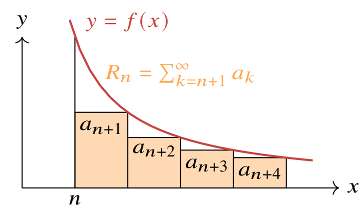
$$\boxed{\int_{n+1}^{\infty} f(x)dx \leqslant R_n = \sum_{k=n+1}^{\infty} a_k \leqslant \int_{n}^{\infty} f(x)dx}$$

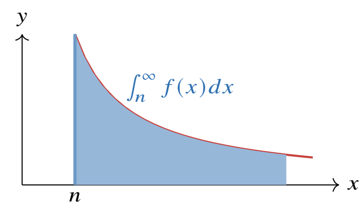
$$s_n + \int_{n+1}^{\infty} f(x)dx \leqslant s \leqslant \int_{n}^{\infty} f(x)dx + s_n$$

Si f : **positive**, **continue**, **décroissante** après un certain range $N \geqslant 0$: $[N, +\infty]$, l'inégalité tient (même si f n'est pas positive décroissante et continue avant N) et on a

$$\sum_{n=N}^{\infty} a_n = s(\textbf{conv.}) \leftrightarrow \int_{n+1}^{\infty} f(x)dx \textbf{ conv.}$$







4

Séries alternées

Définition d'une série alternée

$$s = a_1 - a_2 + \cdots + (-1)^{n-1} a_n + \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} a_n$$

$$s = -a_1 + a_2 + \cdots + (-1)^n a_n + \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_n$$

Test sur séries alternées

Soit un **rang** $N \in \mathbb{N}$ et soit une **série alternée** $\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n b_n$ telle que :

▷ b_n **décroissante** et **positive** $\left(f(n) = b_n, f'(x) \leqslant 0, \ \forall \ \ x > N\right)$

▷ $\lim_{n\to\infty} b_n = 0$

Alors,

▶ $\sum_{n=1}^{\infty}(-1)n$ **conv** vers $s \in \mathbb{R} \ \ \forall m \geqslant N$

- ▶ $0 \leqslant s \leqslant b_1$
- ▶ $R_n = |s - s_n| \leqslant b_{n+1}$

5

Convergence absolue

Définition de convergence absolue

$$\sum_{n=1}^{\infty}|a_n| \text{ conv.} \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ conv. absolument}$$

▷ **Semi-conv.** : $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **conv.** **et** $\sum_{n=1}^{\infty}|a_n|$ **div.**

Exemple

La **série harmonique alternée** converge vers $\ln(2)$, mais la **série harmonique simple** est **divergente** :

$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n}$ **conv.** **mais** $\sum_{n=1}^{\infty}\left|\frac{(-1)^n}{n}\right| = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}$ **div.**

Théorème de convergence absolue

Si une série $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ converge *absolument*, **alors** elle converge simplement.

Test du rapport (d'Alembert)

Soit $\lim_{n\to+\infty}\left|\frac{a_{n+1}}{a_n}\right| = L$ **alors** si :

- ▷ $L = 1 \implies$ *inconclusif*
- ▶ $L > 1 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **div**.
- ▶ $L < 1 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **conv**.

Test de Cauchy

Soit $\lim_{n\to+\infty}\sqrt[n]{|a_n|} = L$ **alors** si :

- ▷ $L = 1 \implies$ *inconclusif*
- ▶ $L > 1 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **div.**
- ▶ $L < 1 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **conv.**

6

Astuces pour Stewart 1.1 - 1.5

Propriétés des limites

Si $\{a_n\}$ et $\{b_n\}$ sont des suites convergentes et si c est une constante, **alors**

$$\lim_{n\to\infty}(a_n + b_n) = \lim_{n\to\infty} a_n + \lim_{n\to\infty} b_n$$

$$\lim_{n\to\infty}(a_n - b_n) = \lim_{n\to\infty} a_n - \lim_{n\to\infty} b_n$$

$$\lim_{n\to\infty} ca_n = c\lim_{n\to\infty} a_n$$

$$\lim_{n\to\infty}(a_n b_n) = \lim_{n\to\infty} a_n \cdot \lim_{n\to\infty} b_n$$

$$\lim_{n\to\infty}\left(\frac{a_n}{b_n}\right) = \frac{\lim_{n\to\infty} a_n}{\lim_{n\to\infty} b_n} \text{ si } \lim_{x\to\infty} b_n \neq 0$$

$$\lim_{n\to\infty} a_n^p = \left[\lim_{n\to\infty} a_n\right]^p \text{ si } p > 0 \text{ et } a_n > 0$$

Limite d'une suite polynomiale

Soit deux polynomes, $\lim_{n\to\infty}\frac{p(n)}{q(n)}$, et $k = \min(\deg(p), \deg(q))$ **Alors,**

$$\lim_{n\to\infty}\frac{p(n)}{q(n)} = \lim_{n\to+\infty}\frac{p(n)/n^k}{q(n)/n^k}$$

Règle de l'Hôpital

Soit une **constante** $c \in \mathbb{R}\cup\{+\infty\}$ et supposon que :

▷ $\lim_{x\to c}\frac{|f(x)|}{|g(x)|}$ est de la forme $\frac{0}{0}$ ou $\frac{\infty}{\infty}$

▷ $\lim_{x\to c}\frac{f'(x)}{|g'(x)|}$ **existe** et $g'(x) \neq 0 \quad \forall x \approx c$

Alors,

$$\boxed{\lim_{x\to c}\frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x\to c}\frac{f'(x)}{g'(x)}}$$

Comparaison des suites

Si $a > 1$ et $k > 0$, on a

$$\ln(n) \ll n^K \ll a^n \ll n! \ll n^n$$

$$c_n \ll d_n \implies \lim_{n\to+\infty}\frac{c_n}{d_n} = 0$$

7

Les séries de fonctions

Définition d'une série de fonction

Soit $u_n(x)$ une suite de fonction définie sur $E \subset \mathbb{R}$ **Alors**, la série

$$\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) = u_1(x) + u_2(x) + \cdots + u_n(x) + \cdots$$

est une série de fonction de **terme général** $u_n(x)$ et on a la somme partielle de range n correspondante :

$$\sum_{k=1}^{n} u_k(x) = u_1(x) + u_2(x) + \cdots + u_n(x)$$

Définition du domaine de convergence

L'ensemble des $x \in E$ qui sont tels que la suite $s_n(x)$ convergent porte le nom de **domaine de convergence** $D \subset E$.

La somme $s_n(x)$ est donc la somme qu'on obtient lorsqu'on ajoute une infinité de termes $u_n(x)$:

$$\boxed{\sum_{k=1}^{\infty} u_n(x) = \lim_{n\to+\infty}\sum_{k=1}^{n} u_k(x) = \lim_{n\to+\infty} s_n(x)}$$

Définition d'une série entière

Soit des coefficients c_n, une **série entière** est une *série de fonction* de la forme

$$\boxed{c_0 + c_1x + c_2x^2 + \cdots + c_nx^n + \cdots = \sum_{k=1}^{\infty} c_nx^n}$$

Lorsqu'elle est **centrée en** a, une série entière prend la forme :

$$c_0 + c_1(x-a) + \cdots + c_n(x-a)^n + \cdots = \sum_{k=1}^{\infty} c_n(x-a)^n$$

Convergence de série entière

Considérons la série entière

$$S = \sum_{n=0}^{\infty} c_n(x-a)^n$$

Alors, on a l'une des trois possibilités :

▷ $R = 0 \implies S$ **conv.** à $x = a$

▷ $R = +\infty \implies S$ **conv.** $\forall x \in \mathbb{R}$

▶ $\exists R > 0 : |x-a| < R \implies S$ **conv.**

▶ $\exists R > 0 : |x-a| > R \implies S$ **div.**

Mais pour les points $x = a$ et $x = -a$, il faut déterminer la convergence cas par cas.

Dérivation et intégration de série entière

Considérons la **série entière**

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n(x-a)^n \text{ avec } R > 0$$

Alors, la fonction $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n(x-a)^n$ est **dérivable** sur l'intervalle ouvert $]a, -R, a+R[$ et on peut **intégrer** *termes à termes* :

$$f'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} nc_n(x-a)^{n+1}$$

$$\int f(x)dx = C + \sum_{n=0}^{\infty} c_n\frac{(x-a)^{n+1}}{n+1}$$

Théorème des série de fonctions

Si une fonction $f(x)$ peut se mettre sous la forme d'une série entière au voisinage de a :

$c_0 + c1(x-a) + \cdots + c_n(x-a)^n + \cdots (*)$

Alors, le **coefficient** c_n est donné par :

$$c_n = \frac{1}{n!}f^n(a)$$

et la fonction $f(x)$ peut s'écrire sous la forme d'une **série de Taylor** :

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{n!}f^n(a)(x-a)^n, \ |x-a| < R$$

Polynôme de Taylor

Si $f(x)$ peut se mettre sous la forme d'une **série entière** au voisinage de a et que $f^n(x)$ existe au voisinage de a $\forall n \geqslant 0$ on a la somme partielle $T_n(x)$ portant le nom de polynôme de Taylor :

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} f^n(a)(x-a)^n, \ |x-a| < R$$

$$\int_{n=1}^{\infty} f(x)dx$$

Théorème de l'inégalité de Taylor

S'il existe une quantité M telle que $\left| f^{n+1}(x) \leqslant M(x) \right|$ pour $|x-a| < R$, c.-à-d. **si** $f^{n+1}(x)$ est bornée sur l'intervalle $]a-R, a+R[$, **alors**, on a :

$$|R_n(x)| \leqslant \frac{M(x)}{(n+1)} |x-a|^{n+1}, \forall\ x \in]a-R, a+R$$

8

Fonctions plusieurs variables

Kamel p.4

$\mathbb{R}^2$ est équivalent à l'ensemble des réels qui comprends les couples (x, y)

Les équations de la forme :

$$x^2 + y^2 = z^2$$

Sont représenté graphiquement par un cercle de rayon z. Lorsqu'on cherche le **domaine**, il est possible de simplifier.

> **Exemple 1**
> $\sqrt{x^2 + y^2 - 9}$ a un domaine dans $\mathbb{R}^2$ pour toutes valeur à l'extérieur du cercle de rayon $r = 3$

Preuve de Théorèmes et formules

Terme général d'une suite arithmétique

Preuve 9.1 Terme général a_n d'une suite arithmétique

Montrons que le terme général a_nd'une suite arithmétique $a_{n=1}^{\infty}$ est donné par

$$a_n = a_1 + (n-1)r$$

Nous savons que les n premiers termes de la suite sont donné par :

$$a_n = \underbrace{a_1}_{n=1;a_1}, \quad \underbrace{(a_1+r)}_{n=1,a_1+r}, \quad \underbrace{\Big((a_1+r)+r\Big)}_{n=3;a_1+2r}, \quad \underbrace{\Big(\Big((a_1+r)+r\Big)+r\Big)}_{n=4,a_1+3r}, \quad \underbrace{\Big(a_1+rn\Big)}_{n=n;a_1+rn}$$

$$a_n = \quad a_1, \; l\; a_1 + (2-1)r, \quad +a_1 + (3-1)r, \quad \cdots \quad a_1 + (n-1)r$$

On constate pour tout $n \geqslant 2$, chaque terme de la suite prend la forme $a_1 + (n-1)r$. Nous avons donc :

$$\boxed{a_n = a_1 + (n-1)r, \quad \forall n \geqslant 2}$$

$\square$

Somme des n premiers terme d'une suite arithmétique

Preuve 9.2 Somme partielle d'une suite arithmétique

Montrons que la formule générale pour la somme s_n des n premiers termes d'une **suite arithmétique** est donnée par :

$$S_n = \frac{n}{2}(a_1 + a_n)$$

Nous savons déjà que le n-ième terme de la suite est :

$$a_n = a_1 + (n-1)r$$

Nous pouvons développer la série des n premiers termes comme suit :

$$\sum_{k=1}^{n} a_k = S_n = a_1 + a_2 + \cdots a_n$$

En **multipliant** la somme partielle par 2, nous obtenons et et en additionnant termes à termes.

$$2S_n = \Big(a_1 + a_2 + \cdots + a_n\Big) + \Big(a_n + a_{n-1} + \cdots + a_1\Big)$$
$$2S_n = (a_1 + a_n) + (a_2 + a_{n-1}) + (a_3 + a_{n-2}) + \cdots + (a_n + a_1)$$

On constate alors que chaque terme entre parenthèse de l'équation se simplifie à $2a_n + (n-1)r$. **Par exemple**,

$$(a_1 + a_n) = a_1 + \Big(a_1 + (n-1)r\Big) = a_1 + a_1 + (n-1)r = 2a_1 + (n-1)r$$

Similairement, on a :

$$(a_2 + a_{n-1}) = a_1 + (2-1)r + \Big(a_1 + (n-1-1)r\Big) = a_1 + r + a_1 + rn - 2r = 2a_1 + -r + rn = 2a_1 + (n-1)r$$

Par ailleurs, nous savons que $2a_1 + (n-1)r$ est simplement équivalent à $a_1 + a_n$:

$$2a_1 + (n-1)r = a_1 + \Big(a_1(n-1)r\Big) = a_1 + a_n$$

Ainsi, puisque nous chaque terme entre parenthèse se simplifie à $2a_n + (n-1)r$ ou $a_1 + a_n$ et qu'il y a n termes entre parenthèse, nous avons

$$2S_n = n\Big(2a_n + (n-1)r\Big)$$
$$2S_n = n(a_1 + a_n)$$

$$\boxed{S_n = \frac{n}{2}(a_1 + a_n)}$$

□

Terme général d'une suite géométrique

Preuve 9.3 Terme général a_n d'une suite géométrique

Montrons que le n-ième terme a_n d'une suite géométrique $a_{n=1}^{\infty}$ est donné par la formule :

$$a_n = a_1 r^{n-1}$$

Nous savons, par la définition d'une suite géométrique, que pour tout terme $n \geqslant 2$, le terme n est obtenu en multipliant son prédécesseur par la raison r. Une suite géométrique a donc les termes suivants :

$$a_n = \underbrace{a_1}_{n=1}, \underbrace{a_1 \cdot r}_{n=2}, \underbrace{a_1 \cdot r \cdot r}_{n=3}, \cdots, \underbrace{a_1 \cdot r^{n-1}}_{n=n}$$

Ainsi, pour chaque terme $n \geqslant 2$, l'image a_n est donnée par $a_1 \cdot r^{n-1}$:

$$\boxed{a_n = a_1 \cdot r^{n-1}, \quad \forall n \geqslant 2}$$

□

Somme des n premiers termes d'une suite géométrique

Preuve 9.4 Somme partielle d'une suite géométrique

Montrons que la somme des n premiers termes d'une suite géométrique est donnée par :

$$S_n = a_0 + a_0 r + \cdots + a_n = \sum_{k=0}^{n} a_0 r^k = \frac{r^{n+1} - 1}{r - 1}$$

Étape 1 : Écriture générale de la somme
La somme des n premiers termes de la suite géométrique est :

$$S_n = a_0 + a_0 r + a_0 r^2 + \cdots + a_0 r^n$$

Factorisons par a_0 :

$$S_n = a_0 \left(1 + r + r^2 + \cdots + r^n\right)$$

Nous devons maintenant trouver la formule de la somme des puissances de r.
Étape 2 : Multiplier par r
Multiplions la somme par r :

$$r \cdot \left(1 + r + r^2 + \cdots + r^n\right) = r + r^2 + \cdots + r^{n+1}$$

Étape 3 : Soustraction des deux équations
Soustrayons la somme obtenue de la somme initiale :

$$\left(1 + r + r^2 + \cdots + r^n\right) - \left(r + r^2 + \cdots + r^{n+1}\right) = 1 - r^{n+1}$$

Simplification :

$$\left(1 + r + r^2 + \cdots + r^n\right)(1 - r) = 1 - r^{n+1}$$

Étape 4 : Isoler la somme
Isolons la somme :

$$1 + r + r^2 + \cdots + r^n = \frac{1 - r^{n+1}}{1 - r}, \quad \text{pour } r \neq 1$$

Étape 5 : Formule finale
Remplaçons cette expression dans la somme S_n :

$$S_n = a_0 \cdot \frac{1 - r^{n+1}}{1 - r}$$

Ce qui nous donne la formule finale :

$$\boxed{S_n = a_0 \frac{1 - r^{n+1}}{1 - r}}$$

□

Convergence d'une suite géométrique

Preuve 9.5

Montrons qu'une suite géométrique converge vers 0 lorsque $-1 < r < 1$ et vers 1 si $r = 1$. Montrons aussi qu'elle diverge pour tout autre valeur.

Cas 1 : Si $-1 < r < 1$, alors $|r| < 1$. Ainsi,

$$\lim_{n \to +\infty} r^n = \lim_{n \to +\infty} \left[\left(\frac{p}{q}\right)^r, p < q \right] \longrightarrow 0$$

car les puissances successives de r tendent vers 0. Cela est dû au fait que tout rationnel $r \in \mathbb{R}$ peut s'écrire sous la forme d'un quotien de naturels $p, q \in \mathbb{N}$ et que le dénominateur, étant plus grand que le numérateur, **croît plus rapidement que le numérateur**. Ainsi, le rapport p^n / q^n tend vers 0 lorsque n tend vers l'infini.
Cas 2 : Si $r = 1$, alors pour tout n,

$$a_n = 1^n = 1$$

donc,

$$\lim_{n\to+\infty} a_n = 1$$

Cas 3 : Si $r = -1$, alors

$$a_n = (-1)^n$$

La suite alterne entre -1 et 1 et n'a pas de limite. Donc, elle ne converge pas.
Cas 4 : Si $|r| > 1$, alors $|r^n|$ tend vers l'infini. Donc,

$$\lim_{n\to+\infty} r^n \text{ n'existe pas (la suite diverge).}$$

Conclusion : La suite converge si et seulement si $-1 < r \leqslant 1$ et $r \neq -1$. Plus spécifiquement, elle converge vers 0 si $-1 < r < 1$ et elle converge vers 1 si $r = 0$. Pour tout autre valeur, hors de l'intervalle $]-1, 1]$, la série diverge.

$$\boxed{-1 < r \leqslant 1 \text{ avec } r \neq -1}$$

Convergence d'un série géométrique

Preuve 9.6

Considérons une suite géométrique de terme initial a et de raison r. Les termes de cette suite sont donnés par $u_n = ar^n$. Nous devons prouver que si $|r| < 1$, la somme de cette suite converge vers $\frac{a}{1-r}$, et qu'elle diverge lorsque $|r| \geqslant 1$.
Cas 1 : $|r| < 1$

Si $|r| < 1$, la somme partielle S_n est donnée par :

$$S_n = a + ar + ar^2 + \cdots + ar^n = a\sum_{k=0}^{n} r^k$$

Nous savons que la somme d'une suite géométrique est :

$$S_n = a\frac{1-r^{n+1}}{1-r}$$

Lorsque $|r| < 1$, $r^{n+1} \to 0$ lorsque $n \to \infty$. Donc, la somme infinie converge vers :

$$\boxed{S = \frac{a}{1-r}}$$

Cas 2 : $|r| \geqslant 1$

Si $|r| \geqslant 1$, alors r^{n+1} ne tend pas vers 0. Ainsi, la série ne converge pas, et la somme diverge.

$$\boxed{\text{La suite diverge pour } |r| \geqslant 1}$$

Preuve 9.7 Coefficient de Taylor

Soit le coefficient de Taylor

$$c_n = \frac{1}{n!} f^n(a)$$

Ce résultat est obenu par la dérivation séquentielle d'une fonction $f(x)$ et l'évaluation de la dévirvée à la valeur $x = a$. Soit une fonction $f(x)$ qui peut s'écrire sous la forme d'une série entière au voisinage de a :

$$f(x) = c_o + c_1(x-a) + c_2(x-a)^2 + \cdots + c_n(x-a)^n + \cdots (*)$$

Les dérivées sont données par :

$$
\begin{aligned}
f(a) &= c_0 + c_1(a-a) + c_2(a-a)^2 + \cdots + c_n(a-a)^{n-1} + \cdots + (*) = c_0 \\
f'(x) &= \cancelto{0}{c_0} + c_1(1) + (2)(1)c_2(x-a) + c_3(3)(2)(1)(x-a)^2 + \cdots + n!(x-a)^{n-1} + \cdots (*) \\
f'(a) &= c_1 + 2!c_2(a-a) + 3!(a-a)^2 + \cdots + n!(a-a)^{n-1} + \cdots (*) = c_1 \\
f''(x) &= \cancelto{0}{c_2} + 2!c_2(1) + c_3 3! \cdot (x-a) + \cdots + (n-1)n!(x-a)^{n-2} + \cdots (*) \\
f''(a) &= 2!c_2(1) + c_3 3! \cdot (a-a) + \cdots + (n-1)n!(a-a)^{n-2} + \cdots (*) = 2!c_2
\end{aligned}
$$

De façon générale, on a :

$$
\boxed{f^n(a) = n!c_n \Leftrightarrow \frac{1}{n!} f^n(a) = c_n}
$$