

## Maths

### Analyse

Recherche d'équivalent d'une suite

#### Complexes

Formule de Moivre

Formules d'addition trigonometrique

Formules de duplication

trigonometrique

Formules de factorisation

trigonometrique

Formules de linéarisation

trigonometrique

Formules de parité et périodicité

trigonometriques

Formules en tangente de theta sur

deux

Inégalité Triangulaire

#### Continuité

Fonctions K-Lipschitziennes

Théorème de Heine

Théorème des bornes atteintes

#### Convexité

Propriétés de convexité

#### Dérivation

Fonctions trigonometriques

réciroques

Inégalité des accroissements finis et

de Taylor-Lagrange

Propriété des extrémum locaux

Taylor-Langrange

Théorème de Rolle, théorème des

accroissements finis

#### Développements Limités

Développements limités

Étude local et asymptotique de

fonctions

#### EDL

EDL d'ordre 1

EDL d'ordre 2

Méthode de séparation des variables

Méthode de variation de la

constante

#### Intégration

Comparaison série intégrale

Critère de convergence d'intégrales

usuelles

Fonction gamma

Hölder

Intégrales de Wallis

Intégration de l'inverse d'un trinôme

Lemme de Riemann-Lebesgue

Taylor reste intégrale

#### Réels

Adhérence

Corps totalement ordonné

Densité

Inégalité Triangulaire

Partie convexe de  $\mathbb{R}$

Propriété de la borne supérieure

Propriété fondamentale des réels

Voisinage

#### Suites Réelles

Caractérisation séquentielle de

l'adhérence

Comparaison asymptotiques usuelles

Manipulations asymptotiques

Moyennes de Cesàro

Suites adjacentes, emboîtées

Suites arithmético-géométriques

Suites récurrentes d'ordre 2

Suites récurrentes

Théorème de Bolzano-Weiestrass

#### Séries

Absolue convergence

Comparaison série intégrale

Exercice : Nature de la série terme

général sur somme partielle

Familles sommables

Propriétés élémentaires sur les séries

Règle de Raabe-Duhamel

Séries de Bertrand

Théorème de comparaison des séries

positives

Théorème de sommation des

relations de comparaison pour les

séries

Théorème de sommation par

paquets

Théorème des séries alternées

Transformation d'Abel

Équivalents de référence : séries de

Riemann

#### Taylor

Taylor reste intégrale

Taylor-Langrange

### Calculs

Formules de somme d'entiers

consécutifs

### Exercice

#### Séries

Exercice : Nature de la série terme

général sur somme partielle

### Trigonométrie

#### Euclidienne

Formules d'addition trigonometrique

Formules de duplication

trigonometrique

Formules de factorisation

trigonometrique

Formules de linéarisation

trigonometrique

Formules de parité et périodicité

trigonometriques

Formules en tangente de theta sur

deux

## Taylor-Lagrange

Théorème de Taylor-Lagrange, et conditions d'application.

---

Soit  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $C^n$  sur  $[a, b]$  et  $D^{n+1}$  sur  $]a, b[$

Il existe  $c \in ]a, b[$  tel que

$$f(b) = \sum_{k=0}^n f^{(k)}(a) \frac{(b-a)^k}{k!} + f^{(n+1)}(c) \frac{(b-a)^{n+1}}{(n+1)!}$$

## Taylor reste intégrale

Théorème de Taylor reste intégrale, et conditions d'application.

---

Soit  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $C^{n+1}$

$$f(b) = \sum_{k=0}^n f^{(k)}(a) \frac{(b-a)^k}{k!} + \int_a^b f^{(n+1)}(t) \frac{(b-t)^n}{n!} dt$$

# Inégalité Triangulaire

Inégalité triangulaire première  
et deuxième forme.

---

Soit  $a, b \in \mathbb{C}$

$$|a + b| \leq |a| + |b|$$

$$||a| - |b|| \leq |a - b| \leq |a| + |b|$$

# Formule de Moivre

Formule de Moivre.

---

Soit  $\theta \in \mathbb{R}$

$$(\cos \theta + i \sin \theta)^n = \cos(n\theta) + i \sin(n\theta)$$

## Formules d'addition trigonometrique

Formules d'additions  
trigonométriques.

---

Soient  $\theta, \varphi \in \mathbb{R}$

$$\cos(\theta + \varphi) = \cos \theta \cos \varphi - \sin \theta \sin \varphi$$

$$\sin(\theta + \varphi) = \cos \theta \sin \varphi + \sin \theta \cos \varphi$$

$$\tan(\theta + \varphi) = \frac{\tan \theta + \tan \varphi}{1 - \tan \theta \tan \varphi}$$

## Formules de duplication trigonométrique

Formules de duplication  
trigonométriques.

---

Soit  $\theta \in \mathbb{R}$

$$\cos(2\theta) = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta$$

$$\sin(2\theta) = 2 \cos \theta \sin \theta$$

$$\tan(2\theta) = \frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta}$$

## Formules de linéarisation trigonométrique

Formules de linéarisation  
trigonométriques.

---

Soient  $a, b \in \mathbb{R}$

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a + b) + \cos(a - b)]$$

$$\sin a \sin b = \frac{1}{2} [\cos(a - b) - \cos(a + b)]$$

$$\cos a \sin b = \frac{1}{2} [\sin(a + b) - \sin(a - b)]$$



## Formules de factorisation trigonométrique

Formules de factorisation  
trigonométriques.

---

Soient  $p, q \in \mathbb{R}$

$$\cos p + \cos q = 2 \cos\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$$

$$\cos p - \cos q = -2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \sin\left(\frac{p-q}{2}\right)$$

$$\sin p + \sin q = 2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$$

## Formules en tangente de theta sur deux

Formules en  $\tan \frac{\theta}{2}$ .

---

Soit  $\theta \in \mathbb{R}$

$$\cos \theta = \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}}$$

$$\sin \theta = \frac{2 \tan \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}}$$

$$\tan \theta = \frac{2 \tan \frac{\theta}{2}}{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}}$$

## Formules de parité et périodicité trigonométriques

Formules de parité et périodicité  
trigonométriques.

---

Soit  $\theta \in \mathbb{R}$

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \cos \theta$$

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \sin \theta$$

$$\cos(\pi + \theta) = -\cos \theta$$

$$\sin(\pi + \theta) = -\sin \theta$$

# Formules de somme d'entiers consécutifs

Forme explicites des sommes suivantes :

$$\sum_{k=1}^n k = ?$$

$$\sum_{k=1}^n k^2 = ?$$

$$\sum_{k=1}^n k^3 = ?$$

---

$$\sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

$$\sum_{k=1}^n k^3 = \left( \frac{n(n+1)}{2} \right)^2 = \frac{n^2(n+1)^2}{4}$$

## EDL d'ordre 1

Soit  $a, b \in \mathbb{C}$ ,  $c(x)$  et  $C(x)$  tel que  $C'(x) = c(x)$ .

$$(E_1) : y' = ay + b$$

$$(E_2) : y' = a(x)y$$

---

Les solutions  $S_1$  et  $S_2$  de  $(E_1)$  et  $(E_2)$  sont

$$S_1 = \left\{ x \mapsto \lambda e^{ax} - \frac{b}{a}, \lambda \in \mathbb{R} \right\}$$

$$S_2 = \{ x \mapsto \lambda e^{A(x)}, \lambda \in \mathbb{R} \}$$

# Méthode de séparation des variables

Soit  $a(x) \in D^1$

$$\frac{dy}{dx} = a(x)y$$

$$y(x) = ?$$

Soient  $a(x) \in D^1$  et  $A(x)$  une primitive de  $a(x)$ .

$$\frac{dy}{dx} = a(x)y$$

$$\frac{dy}{y} = a(x) dx$$

$$\int_{y_0}^y \frac{dy}{y} = \int_{x_0}^x a(x) dx$$

$$\ln y - \ln y_0 = A(x) - A(x_0)$$

$$y = \underbrace{y_0 e^{-A(x_0)}}_{\lambda} e^{A(x)}$$

## Méthode de variation de la constante

Soient  $a(x), b(x) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  et  $A(x)$  une primitive de  $a(x)$ .

$$y' = a(x)y + b(x)$$

$$f_h : y(x) = \lambda e^{A(x)}$$

Trouver  $f_p$  solution particulière par la variation de la constante.

---

Soient  $a(x), b(x) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  et  $A(x)$  une primitive de  $a(x)$ .

$$y' = a(x)y + b(x)$$

$$f_h : y(x) = \lambda e^{A(x)}$$

On fait varier la constante :  $\lambda \rightarrow \lambda(x)$  :

$$f_p(x) = \lambda(x)e^{A(x)}$$

$$\begin{aligned} f_{p'}(x) &= a(x)f_p(x) + b(x) \\ &= \lambda'(x)e^{A(x)} + \lambda(x)a(x)e^{A(x)} \\ &= \lambda(x)a(x)e^{A(x)} + b(x) \end{aligned}$$

$$\lambda'(x) = b(x)e^{-A(x)}$$

$$\lambda(x) = \int b(x)e^{-A(x)} dx$$

## EDL d'ordre 2

Soient  $a, b, c \in \mathbb{C}$ , résolution de l'équation homogène :

$$ay'' + by' + cy = 0$$

---

Soient  $a, b, c \in \mathbb{C}$

$$ay'' + by' + cy = 0$$

On appelle équation caractéristique

$$(EC) : az^2 + bz + c = 0$$

- Si  $\Delta > 0$ , soit  $r_1, r_2$  les racines (réelles) de  $(EC)$

$$f_{h(x)} = \lambda e^{r_1 x} + \mu e^{r_2 x}, \quad \lambda, \mu \in \mathbb{R}$$

- Si  $\Delta = 0$ , soit  $r$  la racine double de  $(EC)$

$$f_{h(x)} = (\lambda + \mu x)e^{rx}, \quad \lambda, \mu \in \mathbb{R}$$

- Si  $\Delta < 0$ , soit  $\alpha + i\beta$  et  $\alpha - i\beta$  les racines complexes de  $(EC)$

$$f_{h(x)} = e^{\alpha x} (\lambda \cos(\beta x) + \mu \sin(\beta x))$$



## Corps totalement ordonné

Définition d'un corps totalement ordonné.

---

Soit  $(K, +, \cdot)$  un corps et un ordre  $\leq$ .

1.  $\forall x, y, z \in K, x \leq y \Rightarrow x + z \leq y + z$
2.  $\forall x, y \in K, x \geq 0 \text{ et } y \geq 0 \Rightarrow xy \geq 0$

$\mathbb{R}$  et  $\mathbb{Q}$  sont ordonnés,  $\mathbb{C}$  ne l'est pas. Mais il existe un seul corps totalement ordonné (à isomorphisme près) :  $\mathbb{R}$ .

## Propriété fondamentale des réels

Propriété fondamentale des réels.

---

Toute partie non vide majoré de  $\mathbb{R}$  admet une borne sup. De même pour minoré.

On en déduit (car  $\mathbb{R}$  est totalement ordonné) que

- $x \geq 0 \Rightarrow -x \leq 0$
- Loi du signe de produit
- $x^2 \geq 0$
- $1 > 0$
- $x > 0 \Rightarrow \frac{1}{x} > 0$
- $0 < x \leq y \Rightarrow \frac{1}{x} \geq \frac{1}{y}$

# Propriété de la borne supérieure

Propriété de la borne supérieure.

---

Soit  $A \subseteq \mathbb{R}$  non vide majoré,  $S = \sup A$  ssi

1.  $\forall x \in A, x \leq S$
2.  $\forall \varepsilon > 0, \exists y \in A, s - \varepsilon < y$

## Partie convexe de $\mathbb{R}$

Définition de partie convexe.

---

Une partie convexe de  $\mathbb{R}$  est un ensemble  $C \subseteq \mathbb{R}$  tel que

$$\forall x \leq y \in C, [x, y] \subseteq C$$

Les parties convexes de  $\mathbb{R}$  sont des intervalles.

## Densité

Définition de densité.

---

Soit  $D \subseteq \mathbb{R}$ ,  $D$  est dense dans  $\mathbb{R}$  si

$$\forall a < b \in \mathbb{R}, ]a, b[ \cap D \neq \emptyset$$

$\mathbb{Q}$  est dense dans  $\mathbb{R}$ , preuve : saut de grenouille.

## Voisinage

Définition de voisinage.

---

Soit  $x \in \overline{\mathbb{R}}$ ,  $V \subseteq \mathbb{R}$  est un voisinage de  $x$  si

$$\exists \varepsilon > 0, ]x - \varepsilon, x + \varepsilon[ \subseteq V$$

On note  $\mathcal{V}(x)$  l'ensemble des voisinages de  $x$ .

## Adhérence

Définition et propriétés de l'adhérence d'un ensemble.

---

Soit  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $x \in \overline{\mathbb{R}}$ ,  $x \in \mathbb{R}$  est adhérent à  $A$  si

$$\forall V \in \mathcal{V}(x), V \cap A \neq \emptyset$$

L'adhérence de  $A$  est alors

$$\begin{aligned} \text{adh}(A) &= \{x \in \mathbb{R} \mid x \text{ adhérent à } A\} \\ &= \{x \in \mathbb{R} \mid \forall \varepsilon > 0, ]x - \varepsilon, x + \varepsilon[ \cap A \neq \emptyset\} \end{aligned}$$

Propriétés :

- $A \subseteq \text{adh}(A)$
- Si  $A$  non vide borné :  
 $\{\inf A, \sup A\} \subseteq A$
- $\text{adh}(]a, b[) = [a, b]$
- $D$  est dense dans  $\mathbb{R}$  ssi  
 $\text{adh}(D) = \mathbb{R}$
- $\text{adh}(\text{adh}(A)) = \text{adh}(A)$

## Suites arithmético-géométriques

Formule explicite d'une suite arithmético-géométrique.

---

Soit  $a, b \in \mathbb{R}$  et  $(u_n)$  une suite tel que

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

On note  $f(x) = ax + b$ , on trouve le point fixe  $w = \frac{b}{1-a}$ . Soit  $v_n = u_n - w$ .

$$v_{n+1} = au_n + b - \underbrace{(aw + b)}_{-w}$$

$$= a(u_n - w) = av_n$$

$$v_n = a^n v_0$$

$$u_n = a^n(v_0 - w) + w$$



## Suites récurrentes d'ordre 2

Formule explicite d'une suite récurrente d'ordre 2.

---

Soit  $a, b \in \mathbb{R}$ ,  $(u_n)$  une suite tel que

$$u_{n+2} = au_{n+1} + bu_n$$

On résout l'équation caractéristique

$$x^2 = ax + b$$

- Deux racines  $r_1, r_2$

$$u_n = \lambda r_1^n + \mu r_2^n$$

- Racine double  $r$

$$u_n = (\lambda + \mu n)r^n$$

Avec  $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$  déterminés par  $u_0$  et  $u_1$ .

## Caractérisation séquentielle de l'adhérence

Caractérisation séquentielle de l'adhérence et la borne supérieure.

---

Soit  $A \subseteq \mathbb{R}$ .

- Si  $(u_n)$  une suite à valeur dans  $A$  et  $u_n \rightarrow l$ , alors  $l \in \text{adh}_{\mathbb{R}}(A)$ .
- Si  $x \in \text{adh}_{\mathbb{R}}$ , alors il existe  $(u_n) \in A^{\mathbb{N}}$  tel que  $u_n \rightarrow x$ .

Ainsi

$$\begin{aligned} & \text{adh}(A) \\ &= \{x \in \mathbb{R} \mid \exists (u_n) \in A^{\mathbb{N}}, u_n \rightarrow x\} \end{aligned}$$

Et  $S = \sup A$  existe si  $A$  non vide majoré par  $S$  et il existe  $(u_n) \in A^{\mathbb{N}}$  tel que  $u_n \rightarrow S$ .

## Suites adjacentes, emboîtées

Définition et théorème des suites adjacentes et emboîtées.

---

- Adjacentes :

Deux suites  $(a_n)$  et  $(b_n)$  sont adjacentes si

$$(a_n) \nearrow, \quad (b_n) \searrow \\ \text{et } \lim_{n \rightarrow \infty} (b_n - a_n) = 0$$

**Théorème :**  $(a_n)$  et  $(b_n)$  et  $\lim a_n = \lim b_n$ .

**Preuve :** Théorème de la limite croissante pour la convergence.

- Emboîtées :

La même chose avec des segments.

**Théorème :**

$$\bigcap_{n=0}^{\infty} [a_n, b_n] = \{x\} \\ \text{avec } x = \lim a_n = \lim b_n$$

# Théorème de Bolzano-Weiestrass

**Théorème de Bolzano-Weiestrass et démonstration.**

Toute suite réelle bornée admet une sous-suite convergente.

Dans  $\mathbb{R}^n$  (et  $\mathbb{C}$ ), il suffit d'être borné en norme ou module.

**Preuve :**

Soit  $(u_n)$  une suite bornée par  $a_0$  et  $b_0$ , notons  $A = \{u_n, n \in \mathbb{N}\}$ . Par récurrence :

- **Ini :**  $|[a_0, b_0] \cap A| = \infty$
- **Héré :** On suppose  $|[a_n, b_n] \cap A| = \infty$ , et on coupe en  $m = \frac{a_n + b_n}{2}$  :
  - Si  $|[a_n, m] \cap A| = \infty$ ,  $\begin{cases} a_{n+1} = a_n \\ b_{n+1} = m \end{cases}$
  - Si  $|[m, b_n] \cap A| = \infty$ ,  $\begin{cases} a_{n+1} = m \\ b_{n+1} = b_n \end{cases}$

Par le théorème des suites emboîtées :

$$\exists l \in [a_0, b_0], \bigcap_{n=0}^{\infty} [a_n, b_n] = \{l\}$$

Soit  $\varphi$  une extractrice, par récurrence :

- **Ini :**  $\varphi(0) = 0$
- **Héré :**  $[a_{n+1}, b_{n+1}]$  est infini, donc il existe  $m > \varphi(n)$  tel que  $u_m \in [a_{n+1}, b_{n+1}]$ . On prend  $\varphi(n+1) = m$ .

**Donc**  $a_n \leq u_{\varphi(n)} \leq b_n$  d'où  $\lim u_{\varphi(n)} = l$ .

## Moyennes de Cesàro

Définition, propriétés des moyennes de Cesàro.

---

Soit  $(u_n)$  une suite. La suite des moyennes de Cesàro de  $u_n$  est

$$\sigma_n = \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n}$$

Si  $u_n \rightarrow l \in \overline{\mathbb{R}}$ , alors  $\sigma_n \rightarrow l$ .

Preuve :

- $l$  fini : Découpage pour  $n < N$  et  $n \geq N$  et inégalité triangulaire.
- $l$  infini : majoration.

# Manipulations asymptotiques

## Manipulations asymptotiques élémentaires.

---

- $\sim$  : relation d'équivalence
  - ▶ produit, quotient, exposant
  - ▶ **pas** de somme, de composition, ...
- $o(1) \Leftrightarrow$  tend vers 0,  $O(1) \Leftrightarrow$  borné
- $O$  et  $o$  transitifs
- $O$  et  $o$  mangent les constantes
- $u_n \sim v_n$  ssi  $u_n = v_n + o(v_n)$
- Si  $u_n \sim v_n$  (ou  $O, o$ ), alors  $u_{\varphi(n)} \sim v_{\varphi(n)}$  (ou  $O, o$ )
- $o$  et  $\sim$  sont des cas particuliers de  $O$ .

# Comparaison asymptotiques usuelles

## Comparaison asymptotiques usuelles, stirling

---

Soit  $k \in \mathbb{R}_+^*$ ,  $q > 1$ , au voisinage de l'infini :

$$n^k = o(q^n)$$

$$q^n = o(n!)$$

$$n! \sim \sqrt{2\pi n} \frac{n^n}{e^n}$$

$$\ln(n!) \sim n \ln n$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{n} = \ln n + \gamma + o(1)$$

## Fonctions $K$ -Lipschitziennes

Qu'est qu'une fonction  $K$ -lipschitzienne

---

Une fonction  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$  est  $K$ -lipschitzienne si

$$\forall x, y \in A, |f(x) - f(y)| \leq K|x - y|$$

Lipschitz sur un segment  
implique uniformément continue.



## **Théorème des bornes atteintes**

**Théorème des bornes atteintes et démonstration.**

---

Si  $f$  est  $C^0([a, b])$ , alors  $f$  est bornée et atteint ses bornes.

**Preuve :**

Notons  $M = \sup f$ , quitte à avoir  $M \in \overline{\mathbb{R}}$ .  $M \in \text{adh}_{\mathbb{R}}(f([a, b]))$ , donc il existe une suite  $(x_n)$  à valeur dans  $[a, b]$  tel que  $f(x_n) \rightarrow M$ .

Par Bolzano-Weiestrass, il existe  $\varphi$  tel que  $x_{\varphi(n)} \rightarrow l$  avec  $l \in [a, b]$  et donc nécessairement  $M \in \mathbb{R}$ .

# Théorème de Heine

Énoncé et démonstration du théorème de Heine.

---

Toute fonction continue sur un segment est uniformément continue.

Preuve :

Soit  $f \in C^0([a, b])$ . Supposons par l'absurde que  $f$  n'est pas uniformément continue.

$$\exists \varepsilon > 0, \forall \delta > 0, \exists x, y \in [a, b] \\ |x - y| < \delta \text{ et } |f(x) - f(y)| \geq \varepsilon$$

On prend  $(x_n), (y_n) \in [a, b]^{\mathbb{N}}$  tel que

$$\forall n \in \mathbb{N}, |x_n - y_n| < \frac{1}{n} \\ |f(x_n) - f(y_n)| \geq \varepsilon$$

Ces suites sont bornées donc par Bolzano-Weiestrass, il existe une extractrice  $\varphi$  tel que  $x_{\varphi(n)} \rightarrow l \in [a, b]$ .

Or  $|x_{\varphi(n)} - y_{\varphi(n)}| \rightarrow 0$  donc  $y_{\varphi(n)} \rightarrow l$ .

Mais par continuité de  $f$ ,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_{\varphi(n)}) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(y_{\varphi(n)}) \\ = f(l)$$

Donc il existe  $N \in \mathbb{N}$  tel que

$$|f(x_{\varphi(n)}) - f(y_{\varphi(n)})| < \varepsilon$$

Qui est absurde.

# Fonctions trigonometriques réciproques

Domaine de définition et  
dérivées des fonctions  
trigonometrique réciproques.

---

$$\begin{aligned} \arccos &: [-1, 1] \rightarrow [0, \pi] \\ \arccos' &: ]-1, 1[ \rightarrow [-1, -\infty[ \\ x &\mapsto -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \arcsin &: [-1, 1] \rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \\ \arcsin' &: ]-1, 1[ \rightarrow [1, +\infty[ \\ x &\mapsto \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \arctan &: \mathbb{R} \rightarrow \left]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right[ \\ \arctan' &: \mathbb{R} \rightarrow ]0, 1] \\ x &\mapsto \frac{1}{1+x^2} \end{aligned}$$

## Propriété des extrémum locaux

Que peut on dire si  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  et dérivable et admet un extrémum local en  $a \in I \setminus \{\inf I, \sup I\}$ .

Soit  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  dérivable qui admet un extrémum local en  $a$ , un point intérieur à  $I$ , alors  $f'(a) = 0$ .

Preuve : par hypothèse, pour un maximum (un minimum se traite de même)

$$\exists V \in \mathcal{V}(a), \forall x \in V, f(x) \leq f(a)$$

Études

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$$

Si  $x < a$  :

Si  $x > a$  :

$$\overbrace{\frac{f(x) - f(a)}{x - a}}^{\leq 0} \geq 0 \quad \overbrace{\frac{f(x) - f(a)}{x - a}}^{\leq 0} \leq 0$$

$\underbrace{x - a}_{< 0}$ 
 $\underbrace{x - a}_{> 0}$

Donc  $f'(a) = 0$  (les deux limites sont égales par la dérivabilité de  $f$  en  $a$ ).

# Théorème de Rolle, théorème des accroissements finis

Énoncé et preuve des théorèmes de Rolle et des accroissements finis.

---

Soit  $f \in C^0([a, b])$  dérivable sur  $]a, b[$

**Rolle** Si  $f(a) = f(b)$ , alors

$$\exists c \in ]a, b[, f'(c) = 0$$

**TAF**

$$\exists c \in ]a, b[, f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

Preuve :

- Rolle : théorème des bornes atteintes, propriétés des extrémum locaux avec une disjonction de cas si les extrémums sont aux bornes.
- TAF : Rolle en pente, on corrige par la pente pour se ramener à Rolle.

# Inégalité des accroissements finis et de Taylor-Lagrange

Inégalité des accroissements finis et de Taylor-Lagrange.

---

## Inégalité des accroissements finis

Soit  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  dérivable et  $a \in I$ , pour tout  $x \in I$

$$|f(x) - f(a)| \leq \sup_{[a,x]} |f'| \cdot |x - a|$$

## Inégalité de Taylor-Lagrange

Soit  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  qui est  $D^{n+1}$  et  $a \in I$ , pour tout  $x \in I$

$$\left| f(x) - \sum_{k=0}^n f^{(k)}(a) \frac{(x-a)^k}{k!} \right| \leq \sup_{[a,x]} |f^{(n+1)}| \cdot \frac{|x-a|^{n+1}}{(n+1)!}$$

Preuve :

On prend les théorème et on majore le paramètre.

# Intégration de l'inverse d'un trinôme

Méthode d'intégration pour l'inverse d'un trinôme du second degré.

On prend  $ax^2 + bx + c$  un trinôme du second degré, on vas intégrer  $\frac{1}{ax^2+bx+c}$ .

- $\Delta > 0$  : décomposition en éléments simples
- $\Delta = 0$  :

$$\begin{aligned}\int \frac{dx}{ax^2 + bx + c} &= \int \frac{dx}{a(x - r)^2} \\ &= -\frac{1}{a(x - r)}\end{aligned}$$

- $\Delta < 0$  : on passe à la forme canonique

$$\begin{aligned}ax^2 + bx + c \\ = a \left[ \left( x + \frac{b}{2a} \right)^2 + \frac{|\Delta|}{4a^2} \right]\end{aligned}$$

Et on se ramène à  $\int \frac{du}{u^2+1} = \arctan u$ .

$$\begin{aligned}\int \frac{1}{ax^2 + bx + c} \\ = \frac{2}{\sqrt{|\Delta|}} \arctan \left( \frac{2ax + b}{\sqrt{|\Delta|}} \right)\end{aligned}$$

# Développements limités

$$\frac{1}{1-x} = ?$$

$$\operatorname{ch}(x) = ?$$

$$\operatorname{sh}(x) = ?$$

$$\frac{1}{1+x} = ?$$

$$(1+x)^\alpha = ?$$

$$\ln(1+x) = ?$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} = ?$$

$$e^x = ?$$

$$\arcsin(x) = ?$$

$$e^{-x} = ?$$

$$\arccos(x) = ?$$

$$\cos(x) = ?$$

$$\arctan(x) = ?$$

$$\sin(x) = ?$$

$$\tan(x) = ?$$

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + o(x^2)$$

$$= \sum_{k=0}^n x^k + o(x^n)$$

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 + o(x^2)$$

$$= \sum_{k=0}^n (-x)^k + o(x^n)$$

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + o(x^3)$$

$$= \sum_{k=0}^n \frac{(-x)^{k+1}}{k+1} + o(x^n)$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + o(x^3)$$

$$= \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} + o(x^n)$$

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} + o(x^3)$$

$$= \sum_{k=0}^n \frac{(-x)^k}{k!} + o(x^n)$$

$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} + o(x^5)$$

$$= \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{x^{2k}}{(2k)!} + o(x^{2k})$$

$$\sin(x) = x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} + o(x^6)$$

$$= \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k x^{2k+1}}{(2k+1)!} + o(x^{2k+1})$$

$$\operatorname{ch}(x) = 1 + \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} + o(x^5)$$

$$= \sum_{k=0}^n \frac{x^{2k}}{(2k)!} + o(x^{2k})$$

$$\operatorname{sh}(x) = x + \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} + o(x^6)$$

$$= \sum_{k=0}^n \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)!} + o(x^{2k+1})$$

$$(1+x)^\alpha = 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} x^2 + o(x^2)$$

$$= \sum_{k=1}^n \frac{x^k}{k!} \prod_{p=0}^{k-1} (\alpha - p) + o(x^n)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} = 1 + \frac{1}{2} x^2 + \frac{3}{8} x^4 + o(x^4)$$

$$= \sum_{k=1}^n \frac{1}{2^{2k}} \binom{2k}{k} x^{2k} + o(x^{2k})$$

$$\arcsin(x) = x + \frac{1}{2} \frac{x^3}{3} + \frac{3}{8} \frac{x^5}{5} + o(x^5)$$

$$= \sum_{k=1}^n \frac{\binom{2k}{k} x^{2k+1}}{2^{2k} (2k+1)} + o(x^{2n+1})$$

$$\arccos(x) = -x - \frac{1}{2} \frac{x^3}{3} - \frac{3}{8} \frac{x^5}{5} + o(x^5)$$

$$= \sum_{k=1}^n -\frac{\binom{2k}{k} x^{2k+1}}{2^{2k} (2k+1)} + o(x^{2n+1})$$

$$\arctan(x) = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + o(x^5)$$

$$= \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^k x^{2k+1}}{2k+1} + o(x^{2n+1})$$

$$\tan(x) = x + \frac{1}{3} x^3 + \frac{2}{15} x^5 + \frac{17}{315} x^7 + o(x^8)$$



## Étude local et asymptotique de fonctions

Méthode pour étudié le  
comportement local et  
asymptotique d'une fonction.

---

**Local** au voisinage de  $a \in \mathbb{R}$

- Équivalent en  $a$  : premier terme
- Tangente en  $a$  :  $DL_1(a)$
- Signe de  $f$  en  $a$  : premier terme non nul.
- Position relative par rapport à la tangente : signe du premier terme non nul après l'ordre 1.

**Asymptotique** au voisinage de  $\pm\infty$

- Asymptote oblique :  $DL_1(\pm\infty)$
- Position relative : signe du terme suivant.

Rappelle :

$f$  admet une asymptote oblique  
d'équation  $ax + b$  si

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) - ax - b = 0$$

# Suites récurrentes

Méthode pour les suites récurrentes de la forme  $u_{n+1} = f(u_n)$ .

---

Soit  $f$  une fonction et  $(u_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$  tel que  $u_{n+1} = f(u_n)$ .

1. Intervalle stable : on cherche  $I$  tel que  $f(I) \subseteq I$ .
2. Variations de  $(u_n)$ 
  - Signe de  $f(x) - x$  sur  $I$ 
    - $+$  :  $(u_n)$  est croissante
    - $-$  :  $(u_n)$  est décroissante
    - Sinon affiner  $I$
  - Monotonie de  $f$ 
    - Si  $f$  est croissante sur  $I$ ,  $(u_n)$  est monotone
    - Si  $f$  est décroissante sur  $I$ ,  $(u_{2n})$  et  $(u_{2n+1})$  sont monotone.
3. On montre l'existence de la limite (limite croissante)
4. On la détermine : il s'agit de l'un des points fixes de  $I$  (idéalement il n'y en a qu'un).

Dans le cas des fonctions décroissantes, on cherche les limites des deux sous-suites, points fixes de  $f \circ f$ .

# Propriétés de convexité

Définition et propriétés de convexité.

Soit  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f$  est dite convexe si

$$\begin{aligned} \forall x, y \in I, \forall \lambda \in [0, 1] \\ f(\lambda x + (1 - \lambda)y) \\ \leq \lambda f(x) + (1 - \lambda)f(y) \end{aligned}$$

Propriétés :

- Soit  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  convexe,

$$\forall x_1, \dots, x_n \in I$$

$$\forall \lambda_1, \dots, \lambda_n \in [0, 1], \lambda_1 + \dots + \lambda_n = 1 \Rightarrow$$

$$f\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^n \lambda_i f(x_i)$$

- Soit  $\Phi$  convexe,  $\forall f \in C^0([a, b])$

$$\begin{aligned} \Phi\left(\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx\right) \\ \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b \Phi(f(x)) dx \end{aligned}$$

- Soit  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $a \in I$ , on note

$$\begin{aligned} \tau_a : I \setminus \{a\} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \end{aligned}$$

les taux d'accroissements en  $a$  de  $f$ .

$f$  est convexe ssi  $\forall a \in I, \tau_a$  est croissante.

- Soit  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ , on appelle droite d'appuis en  $x_0$  de  $f$  une droite  $y = ax + b$  tel que

- $\forall x \in I, ax + b \leq f(x)$
- $f(x_0) = ax_0 + b$

Si  $f$  convexe,  $f$  admet des droites d'appuis en tout points.

# Propriétés élémentaires sur les séries

Propriétés élémentaires sur les séries.

- Soit  $(u_n) \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$  et  $S_n = \sum_{k=0}^n u_k$ , on dit que  $\sum u_n$  converge si  $(S_n)$  converge.
- Si  $\sum u_n$  converge alors

$$(u_n) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

- La suite  $(u_n)$  converge ssi la série  $\sum (u_{n+1} - u_n)$  converge.
- L'ensemble  $\mathcal{S}$  des séries convergentes est un sev de l'espace des suites, et l'application

$$\begin{aligned} \varphi : \mathcal{S} &\rightarrow \mathbb{K} \\ (u_n) &\mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} u_n \end{aligned}$$

est linéaire.

- Si  $(u_n) \in \mathbb{R}_+^{\mathbb{N}}$  alors  $\sum u_n$  converge ssi  $(S_n)$  est majoré (théorème de la limite monotone).

# Théorème de comparaison des séries positives

Énoncé et démonstration du  
théorème de comparaison des  
séries positives.

---

Soient  $(u_n), (v_n) \in \mathbb{R}_+^{\mathbb{N}}$  alors

1. Si  $\forall n \geq n_0, u_n \leq v_n$  et  $\sum v_n$  converge alors  $\sum u_n$  converge.
2. Si  $u_n = O_{n \rightarrow +\infty}(v_n)$  et  $\sum v_n$  converge alors  $\sum u_n$  converge.
3. Si  $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} v_n$  alors  $\sum u_n$  converge ssi  $\sum v_n$  converge.

Démonstration :

1.  $(S_n)$  est majoré par  $(\tilde{S}_n)$  qui est fini.
2.  $(S_n)$  est majoré par  $M \cdot \tilde{S}_n$  qui est fini.
3.  $u_n \sim v_n$  implique  $u_n = O(v_n)$  et  $v_n = O(u_n)$ .

## Comparaison série intégrale

Propriétés et methode de comparaison série intégrale.

Pour  $f \in C_{\text{pm}}^0([a, +\infty[, \mathbb{R}_+)$ ,  
décroissante,  $\forall n \geq [a] + 1 = N_0$

$$\begin{aligned} f(n) &\geq \int_n^{n+1} f(t) dt \\ &\leq \int_{n-1}^n f(t) dt \end{aligned}$$

D'où

$$\begin{aligned} \sum_{n=N_0}^N f(n) &\geq \int_{N_0}^{N+1} f(t) dt \\ &\leq \int_{N_0-1}^N f(t) dt \end{aligned}$$

Ainsi  $\sum f(n)$  converge ssi  $\int_{N_0}^{+\infty} f$  converge.

Et de plus (à redémontrer) :

$$\begin{aligned} \sum \left( \int_{n-1}^n f(t) dt - f(n) \right) \\ \sum \left( f(n) - \int_n^{n+1} f(t) dt \right) \end{aligned}$$

sont à terme général positif et convergent car

$$\begin{aligned} f(n) &\leq \int_{n-1}^n f \leq f(n+1) \\ 0 &\leq \int_{n-1}^n f - f(n) \leq f(n+1) - f(n) \end{aligned}$$

Et  $\sum f(n+1) - f(n)$  est positive et converge (série télescopique) car  $f$  converge (positive et décroissante).

**Dans le cas  $f$  non monotone :**

Si  $f \in C^1$  et  $\int_n^{+\infty} |f'|$  converge

$$\begin{aligned} \int_k^{k+1} f &= \underbrace{[(t-k-1)f(t)]_k^{k+1}}_{f(k)} \\ &\quad - \int_k^{k+1} (t-k-1)f'(t) dt \\ \int_1^{N+1} f &= \sum_{k=1}^N f(k) \\ &\quad + \sum_{k=1}^N \int_k^{k+1} (k+1-t)f'(t) dt \end{aligned}$$

Or pour tout  $k \geq 1$

$$\left| \int_k^{k+1} (k+1-t)f'(t) dt \right| \leq \int_k^{k+1} |f'|$$

Qui est le terme général d'une série convergente d'où

$$\begin{aligned} \sum f(n) &\text{ converge} \\ \text{ssi } \left( \int_1^N f \right)_N &\text{ converge} \\ \text{ssi } \int_1^{+\infty} f &\text{ converge} \end{aligned}$$

## Séries de Bertrand

Définitions et propriétés des séries de Bertrand.

---

Soit  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ , la série  $\sum \frac{1}{n^\alpha (\ln n)^\beta}$  est appelée série de Bertrand.

Cette série converge ssi  $\alpha > 1$  ou  $\alpha = 1$  et  $\beta > 1$ .

Démonstration :

- Cas  $\alpha > 1$  comparaison avec les séries de Riemann, en prenant  $\gamma \in ]1, \alpha[$ .
- Cas  $\alpha < 1$  même chose avec  $\gamma \in ]\alpha, 1]$ .
- Cas  $\alpha = 1$ , comparaison série intégrale avec  $t \mapsto \frac{1}{t(\ln t)^\beta}$ .

# Recherche d'équivalent d'une suite

Méthodes de recherche  
d'équivalents.

---

Si on cherche un équivalent  
d'une suite  $(u_n)$

- Étudier la série  $\sum(u_{n+1} - u_n)$   
ou  $\sum(u_n - u_{n+1})$ , sommes  
partielles ou restes (voir  
théorème de sommation des  
relations de comparaison).
- Chercher  $\alpha \in \mathbb{R}^*$  tel que  $u_{n+1}^\alpha - u_n^\alpha \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l \in \mathbb{R}^*$ , pour avoir

$$u_n^\alpha - u_0^\alpha = \sum_{k=0}^{n-1} u_{k+1}^\alpha - u_k^\alpha \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} nl$$



# Absolute convergence

Définitions et démonstration du théorème de l'absolue convergence d'une série.

---

Une série  $\sum u_n$  (dans  $\mathbb{R}$  ou  $\mathbb{C}$ ) est dite absolument convergente si  $\sum |u_n|$  converge. Si  $\sum u_n$  est absolument convergente, alors elle est convergente.

Démonstration : on étudie  $((u_n)_+)$  et  $((u_n)_-)$  pour le cas réel, puis  $(\operatorname{Re}(u_n))$  et  $(\operatorname{Im}(u_n))$  pour le cas imaginaire, à chaque fois on majore par le module et on applique les théorèmes de comparaison des séries positives.

## Théorème des séries alternées

Énoncer et démonstration du théorème des séries alternées.

---

Si  $(u_n) \in \mathbb{R}_+^{\mathbb{N}}$  décroissante tel que  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ , alors  $\sum u_n$  converge et  $R_n = \sum_{k=n+1}^{+\infty} u_k = S - S_n$  est du signe du premier terme et  $|R_n| \leq |u_{n+1}|$ .

Démonstration : on montre que les suites  $S_{2n}$  et  $S_{2n+1}$  sont adjacentes et on étudie  $R_{2n}$  et  $R_{2n+1}$ .

# Transformation d'Abel

Définition et applications de la transformation d'Abel.

Il s'agit d'une sorte d'IPP sur les séries. Soit  $(a_n)$  et  $(b_n)$  deux suites, la transformation d'Abel est utile si on a des hypothèses sur  $S_n = \sum_{k=0}^n a_k$ . On pose  $S_{-1} = 0$ .

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n a_k b_k &= \sum_{k=0}^n (S_k - S_{k-1}) b_k \\ &= \sum_{k=0}^n S_k b_k - \sum_{k=0}^n S_{k-1} b_k \\ &= S_n b_n - \sum_{k=0}^{n-1} S_k (b_{k+1} - b_k) \end{aligned}$$

Applications :

$$\begin{aligned} \sum \frac{\sin(n\theta)}{n^\alpha} \\ \sum \frac{\cos(n\theta)}{n^\alpha} \\ \sum \frac{e^{in\theta}}{n^\alpha} \end{aligned}$$

Remarque : on peut aussi écrire  $a_k = R_{k-1} - R_k$ , qui peut être intéressant si  $\sum a_n$  converge.

# Règle de Raabe-Duhamel

Énoncé et démonstration de la règle de Raab-Duchamel.

Soit  $(a_n) \in (\mathbb{R}_+^*)^{\mathbb{N}}$ ,  $\frac{a_{n+1}}{a_n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 1$  et

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = 1 - \frac{\alpha}{n} + O_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{1}{n^{1+h}} \right), \quad h > 0$$

On considère  $n^\alpha a_n = u_n$ , on veut montrer que  $u_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} l \in \mathbb{R}_+^*$ , c'est dire que  $(\ln(u_n))$  a une limite réelle. On étudie  $\sum \ln(u_{n+1}) - \ln(u_n)$ .

$$\begin{aligned} \ln(u_{n+1}) - \ln(u_n) &= \ln\left(\frac{a_{n+1}}{a_n}\right) + \alpha \ln\left(\frac{n+1}{n}\right) \\ &= \ln\left(1 - \frac{\alpha}{n} + O\left(\frac{1}{n^{1+h}}\right)\right) + \alpha \ln\left(1 + \frac{1}{n}\right) \\ &= \frac{\alpha}{n} - \frac{\alpha}{n} + O\left(\frac{1}{n^{1+h}}\right) + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \\ &= O\left(\frac{1}{n^{\min(2, 1+h)}}\right) \end{aligned}$$

Donc par le théorème de comparaison des séries à terme positifs (en valeur absolue)

$\sum \ln(u_{n+1}) - \ln(u_n)$  converge, d'où  $(u_n)$  converge.

Ainsi  $n^\alpha a_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} e^l$ , donc  $a_n \sim \frac{e^l}{n^\alpha}$ ,  $\sum a_n$  converge ssi  $\alpha > 1$ .

# Théorème de somme des relations de comparaison pour les séries

Énoncés des théorèmes de somme des relations de comparaison pour les séries.

## Pour les restes de séries convergentes :

Si  $(u_n) \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$ ,  $(a_n) \in \mathbb{R}_+^{\mathbb{N}}$  et  $\sum a_n$  converge.

1. Si  $u_n = O(a_n)$ , alors  $\sum u_n$  converge absolument et

$$\sum_{k=n+1}^{+\infty} u_k = O\left(\sum_{k=n+1}^{+\infty} a_k\right)$$

2. Si  $u_n = o(a_n)$ , alors  $\sum u_n$  converge absolument et

$$\sum_{k=n+1}^{+\infty} u_k = o\left(\sum_{k=n+1}^{+\infty} a_k\right)$$

3. Si  $u_n \sim a_n$ , alors

$$\sum_{k=n+1}^{+\infty} u_k \sim \sum_{k=n+1}^{+\infty} a_k$$

Démonstration : on repasse par les définitions de  $o$  et  $O$  :  $\exists N \in \mathbb{N}$ ,  $\forall n \geq N$ ,  $|u_n| \leq K a_n$ , avec  $K > 0$  fixé pour  $O$  et  $K = \varepsilon > 0$  pour  $o$ . Pour  $\sim$ , on a  $u_n - a_n = o(a_n)$ .

## Pour les sommes partielles de séries divergentes :

Si  $(u_n) \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$ ,  $(a_n) \in \mathbb{R}_+^{\mathbb{N}}$  et  $\sum a_n$  diverge.

1. Si  $u_n = O(a_n)$ , alors  $\sum u_n$  converge absolument et

$$\sum_{k=0}^n u_k = O\left(\sum_{k=0}^n a_k\right)$$

2. Si  $u_n = o(a_n)$ , alors  $\sum u_n$  converge absolument et

$$\sum_{k=0}^n u_k = o\left(\sum_{k=0}^n a_k\right)$$

3. Si  $u_n \sim a_n$ , alors

$$\sum_{k=0}^n u_k \sim \sum_{k=0}^n a_k$$

Démonstration : même que pour l'autre, on a juste à découper la somme entre avant et après un certain rang (pour  $o$  et  $O$ ).

## Équivalents de référence : séries de Riemann

Équivalent des restes ou sommes partielles des séries de Riemann (à redémontrer).

---

Par comparaison série intégrale :

- Pour  $1 \geq \alpha > 0$

$$\int_1^{n+1} \frac{dt}{t^\alpha} \leq 1 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^\alpha} \leq \int_2^n \frac{dt}{t^\alpha}$$

$$S_n(\alpha) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^\alpha} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha}$$

- Pour  $\alpha > 0$

$$\int_{n+1}^{+\infty} \frac{dt}{t^\alpha} \leq \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^\alpha} \leq \int_n^{+\infty} \frac{dt}{t^\alpha}$$

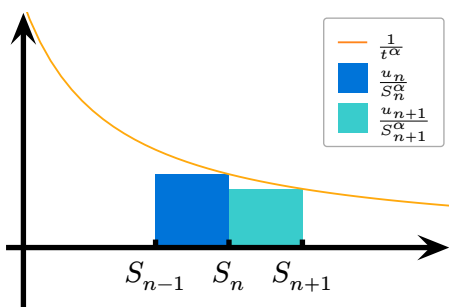
$$R_n(\alpha) = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{1}{k^\alpha} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{1}{\alpha-1} \cdot \frac{1}{n^{\alpha-1}}$$

## Exercice : Nature de la série terme général sur somme partielle

Démonstration de la CNS sur  $\alpha$  de la convergence de la série  $\sum \frac{u_n}{S_n^\alpha}$  (avec  $\sum u_n$  divergente).

Soit  $(u_n) \in (\mathbb{R}_+^*)^{\mathbb{N}}$ ,  $\sum u_n$  diverge, et  $\alpha \in \mathbb{R}$ . On note  $S_n = \sum_{k=1}^n u_k$ .

- Si  $\alpha > 1$  :



Donc pour  $t \in [S_{n-1}, S_n]$

$$\frac{1}{t^\alpha} \geq \frac{1}{S_n^\alpha}$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{u_k}{S_k^\alpha} \leq \int_{S_0}^{S_n} \frac{dt}{t^\alpha} = \frac{1}{\alpha-1} \left( \frac{1}{S_0^{\alpha-1}} - \frac{1}{S_n^{\alpha-1}} \right)$$

Or  $S_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$  donc

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{u_n}{S_n^\alpha} \leq \frac{1}{\alpha-1} \cdot \frac{1}{S_0^\alpha}$$

- Si  $\alpha = 1$  :

Si  $\frac{u_n}{S_n} \not\xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$ , la série diverge grossièrement, et sinon

$$\begin{aligned} \frac{u_n}{S_n} &\sim -\ln\left(1 - \frac{u_n}{S_n}\right) \\ &\sim \ln(S_n) - \ln(S_{n-1}) \end{aligned}$$

Qui est le terme général d'une série télescopique divergente.

- Si  $\alpha \leq 1$ , on compare avec  $\alpha = 1$ , car à partir d'un certain rang  $S_n \geq 1$ .

# Familles sommables

Définition et propriétés élémentaires des familles sommables.

---

Soit  $I$  un ensemble non vide.

Pour  $(u_i) \in \mathbb{R}_+^I$ , on définit

$$\sum_{i \in I} u_i = \sup \left\{ \sum_{j \in J} u_j, J \subseteq I \text{ fini} \right\} \\ \in \mathbb{R}_+ \cup \{+\infty\}$$

Pour une famille  $(u_i) \in \mathbb{K}^I$ , on dit qu'elle est sommable si

$$\sum_{i \in I} |u_i| < +\infty$$

Si  $(u_i)_{i \in I}$  est sommable, alors elle contient un nombre au plus dénombrable d'éléments non nuls (Démonstration : on étudie  $J_n = \{i \in I \mid u_i \geq \frac{1}{n}\}$ )



# Théorème de somme par paquets

Énoncer et éléments de démonstration du théorème de somme par paquets.

Soit  $(u_i)_{i \in I} \in \mathbb{R}^I$ , et  $I = \bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} I_n$  une partition. La famille  $(u_i)$  est sommable ssi

$$(*) : \begin{cases} \forall n \in \mathbb{N}, (u_i)_{i \in I_n} \text{ sommable} \\ \sum \left( \sum_{i \in I_n} |u_i| \right) \text{ converge vers } S \end{cases}$$

Dans ce cas

$$\sum_{i \in I} u_i = \sum_{n=0}^{+\infty} \left( \sum_{i \in I_n} u_i \right)$$

Démonstration :

- Cas positif :
  - On suppose (\*), on prend une sous famille fini  $J$  de  $I$ , on a donc une famille  $(J_n = I_n \cap J)_n$ , on note  $N = \max(n \in \mathbb{N} \mid J_n \neq \emptyset)$  qui existe car  $J$  fini.

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J} u_j &= \sum_{n=0}^N \left( \sum_{j \in J_n} u_j \right) \\ &\leq \sum_{n=0}^{+\infty} \left( \sum_{i \in I_n} u_i \right) = S \end{aligned}$$

- Caractérisation de la borne supérieure, majoration et sous ensembles finis.
- Cas général : D'abord en valeurs absolues, puis parties positives, négatives, réelles et imaginaires.

# Critère de convergence d'intégrales usuelles

Critère de convergence d'intégrales usuelles :

$$\int_1^{+\infty} \frac{dt}{t^\alpha}$$

$$\int_0^1 \frac{dt}{t^\alpha}$$

$$\int_2^{+\infty} \frac{dt}{t^\alpha (\ln t)^\beta}$$

$$\int_0^{\frac{1}{2}} \frac{dt}{t^\alpha (\ln t)^\beta}$$

- 
- $\int_1^{+\infty} \frac{dt}{t^\alpha}$  converge vers  $\frac{1}{\alpha-1}$  ssi  $\alpha > 1$ .
  - $\int_0^1 \frac{dt}{t^\alpha}$  converge vers  $\frac{1}{1-\alpha}$  ssi  $\alpha < 1$ .
  - $\int_2^{+\infty} \frac{dt}{t^\alpha (\ln t)^\beta}$  converge ssi  $\alpha > 1$  ou  $\alpha = 1$  et  $\beta > 1$
  - $\int_0^{\frac{1}{2}} \frac{dt}{t^\alpha (\ln t)^\beta}$  converge ssi  $\alpha < 1$  ou  $\alpha = 1$  et  $\beta > 1$

# Fonction gamma

Définition, convergence et démonstration de la fonction  $\Gamma$ .

---

On définit

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

- Qui converge pour  $x > 0$ .
- Pour  $x > 0$

$$\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$$

- $\Gamma(1) = 1$

$t \mapsto e^{-t} t^{x-1}$  est  $C_{\text{pm}}^0$  sur  $]0, +\infty[$ .

- Sur  $[1, +\infty[$

$$\begin{aligned} e^{-t} t^{x-1} &= o_{t \rightarrow +\infty} \left( e^{-\frac{t}{2}} \right) \\ &= o_{t \rightarrow +\infty} \left( \frac{1}{t^2} \right) \end{aligned}$$

Or  $\int_1^{+\infty} e^{-\frac{t}{2}} dt$  converge, donc par le théorème de comparaison d'intégrales de fonctions positives,

$\int_1^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$  converge.

- Sur  $]0, 1]$

$$e^{-t} t^{x-1} \underset{t \rightarrow 0_+}{\sim} \frac{1}{t^{1-x}}$$

Or  $\int_0^1 \frac{dt}{t^{1-x}}$  converge ssi  $1-x < 1$  d'où  $x > 0$ , et on conclut par le même théorème.

$$\begin{aligned} \Gamma(x+1) &= \int_0^{+\infty} e^{-t} t^x dt \\ &= [-e^{-t} t^x]_0^{+\infty} + x \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \\ &= x\Gamma(x) \end{aligned}$$

# Intégrales de Wallis

Définition, propriétés et démonstration des intégrales de Wallis.

On pose pour  $n \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} W_n &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos t)^n dt \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin \theta)^n d\theta \quad (\theta = \frac{\pi}{2} - t) \end{aligned}$$

## Relation de récurrence

$$\begin{aligned} W_{n+2} &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin t)^{n+2} dt \\ &= \underbrace{\left[ -\cos(t) \sin(t)^{n+1} \right]_0^{\frac{\pi}{2}}}_0 \\ &\quad + (n+1) \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin t)^n \underbrace{(\cos t)^2}_{1 - (\sin t)^2} dt \\ &= (n+1)W_n - (n+1)W_{n+2} \\ &= \frac{n+1}{n+2} W_n \end{aligned}$$

## Formules explicites

$$W_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$W_1 = 1$$

$$W_{2n} = \frac{(2n)!}{2^{2n}(n!)^2} \frac{\pi}{2}$$

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

## Équivalents

Pour  $t \in [0, \frac{\pi}{2}]$

$$0 \leq (\sin t)^{n+2} \leq (\sin t)^{n+1} \leq (\sin t)^n$$

$$0 \leq W_{n+2} \leq W_{n+1} \leq W_n$$

$$\frac{n+1}{n+2} \leq \frac{W_{n+1}}{W_n} \leq 1$$

D'où

$$W_{n+1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} W_n$$

$$W_{2n}^2 \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} W_{2n+1}^2$$

$$\underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} W_{2n} W_{2n+1} = \frac{\pi}{4n+2}$$

Ainsi

$$W_{2n+1} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt{\frac{\pi}{4n+2}}$$

$$W_{2n} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \sqrt{\frac{\pi}{4n}}$$

# Lemme de Riemann-Lebesgue

Énoncé et démonstration du lemme de Riemann-Lebesgue.

---

Si  $I$  est un Intervalle de  $\mathbb{R}$ , et  $f \in C_{\text{pm}}^0(I, \mathbb{K})$  intégrable sur  $I$ , alors

$$\begin{aligned}\int_I f(t) e^{i\lambda t} dt &\xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} 0 \\ \int_I f(t) \cos(\lambda t) dt &\xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} 0 \\ \int_I f(t) \sin(\lambda t) dt &\xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} 0\end{aligned}$$

## Démonstration

- Si  $f$  est  $C^1$  sur un segment : par IPP, on dérive  $f$ ,  $f'$  étant continue sur un segment elle est uniformément continue sur ce segment (théorème de Heine), et est donc bornée (théorème des bornes atteintes).
- On montre d'abord pour  $I$  segment.
  - ▶ On traite le cas  $f$  constante.
  - ▶ On généralise à  $f$  en escalier.
  - ▶ Par densité des fonctions en escalier on étend aux fonctions continues.
- On étend finalement aux intervalles quelconques.

# Hölder

## Inégalité de Hölder et démonstration.

Soit  $p, q \in \mathbb{R}_+^*$  tels que  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ .

Pour  $x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n \in \mathbb{R}_+$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i \leq \left( \sum_{i=1}^n x_i^p \right)^{\frac{1}{p}} \left( \sum_{i=1}^n y_i^q \right)^{\frac{1}{q}}$$

### Démonstration

- Pour tout  $x, y \in \mathbb{R}_+$

$$xy \leq \frac{1}{p}x^p + \frac{1}{q}y^q$$

Le cas nul se traite facilement, puis on utilise la concavité de  $\ln$  sur  $\mathbb{R}_+^*$  :

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{1}{p}x^p + \frac{1}{q}y^q\right) &\geq \frac{1}{p}\ln(x^p) + \frac{1}{q}\ln(y^q) \\ &= \ln(xy) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{p}x^p + \frac{1}{q}y^q \geq xy$$

- On traite d'abord le cas où l'un des vecteurs ( $X$  ou  $Y$ ) est nul.
- On traite ensuite le cas où

$$\sum_{i=1}^n x_i^p = 1 \quad \text{et} \quad \sum_{j=1}^n y_j^q = 1$$

Pour tout  $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$

$$x_i y_i \leq \frac{1}{p}x_i^p + \frac{1}{q}y_i^q$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i y_i &\leq \frac{1}{p} \underbrace{\sum_{i=1}^n x_i^p}_1 + \frac{1}{q} \underbrace{\sum_{i=1}^n y_i^q}_1 \\ &\leq 1 = \left( \sum_{i=1}^n x_i^p \right)^{\frac{1}{p}} \left( \sum_{i=1}^n y_i^q \right)^{\frac{1}{q}} \end{aligned}$$

- Enfin dans le cas général, on pose pour  $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad \tilde{y}_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i}$$

Et ça marche.