

# Notes MAT346

Julien Houle

Automne 2025

# Contents

<b>1</b>	<b>Intégration</b>	<b>2</b>
1.1	Intégrales de Riemann . . . . .	2
	Critère d'intégrabilité . . . . .	4
	Inégalité du triangle . . . . .	7

# Chapitre 1 Intégration

## Section 1.1 Intégrales de Riemann

*Notation.*

$\mathcal{B}[c, d] = \{f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R} | f \text{ est bornée}\}.$

$\mathcal{R}[a, b] = \{f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R} | f \text{ est bornée et intégrable}\}.$

$\mathcal{C}[a, b] = \{f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R} | f \text{ est bornée et continue}\}.$

On suppose nos fonctions bornées.

**Définition.**

- a) Une partition de  $[a, b]$  est un ensemble fini de points  $\Delta = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \subseteq [a, b]$  t.q.  $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ .
- b) L'ensemble des partitions de  $[a, b]$  est  $\Omega[a, b]$ .
- c) On dit  $\Delta'$  est *plus fine* que  $\Delta$ , noté  $\Delta' \geq \Delta$ , si  $\Delta' \supseteq \Delta$ .
- d) *Raffinement commun* de  $\Delta_1$  et  $\Delta_2$ , noté  $\Delta_1 \vee \Delta_2$ , est la partition de  $[a, b]$  formée de  $\Delta_1 \cup \Delta_2$  ordonnés.
- e) La *norme* de  $\Delta$ , notée  $\|\Delta\|$ , est  $\|\Delta\| = \max_{i=1}^n |x_i - x_{i-1}|$ .
- f)

$$\begin{aligned}\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) &= \sup_{x \in [x_{i-1}, x_i]} f(x) \\ \underline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) &= \inf_{x \in [x_{i-1}, x_i]} f(x)\end{aligned}$$

*Remarque.*

$$\begin{aligned}\|x\| &\geq 0 \\ \|\lambda x\| &= |\lambda| \|x\| \\ \|x + y\| &= \|x\| + \|y\|\end{aligned}$$

**Définition.**

- a) La *somme de Riemann par excès* (ou supérieure) de  $f$  pour la partition  $\Delta$  est

$$\overline{S}(f, \Delta) = \sum_{i=1}^n \overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) \cdot (x_i - x_{i-1})$$

- b) La *somme de Riemann par défaut* (ou inférieure) de  $f$  pour la partition  $\Delta$  est

$$\underline{S}(f, \Delta) = \sum_{i=1}^n \underline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) \cdot (x_i - x_{i-1})$$

**Proposition.**

a)

$$\underline{M}(f, [a, b]) \cdot (b - a) \leq \underline{S}(f, \Delta), \forall \Delta \in \Omega[a, b]$$

b)

$$\underline{S}(f, \Delta) \leq \overline{S}(f, \Delta)$$

c)

$$\overline{S}(f, \Delta) \leq \overline{M}(f, [a, b]) \cdot (b - a)$$

**Proposition.** Si  $\Delta' \geq \Delta$ , alors  $\overline{S}(f, \Delta') \leq \overline{S}(f, \Delta)$ .

*démonstration.*

Sans perte de généralité, supposons

$$\Delta : a = x_0 < x_1 < \dots < x_{i-1} < x_i < \dots < x_n = b$$

$$\Delta' : a = x_0 < x_1 < \dots < x_{i-1} < \bar{x} < x_i < \dots < x_n = b$$

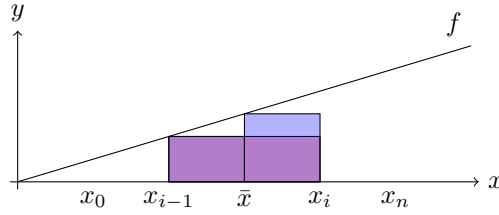
On a

$$\begin{aligned} \overline{S}(f, \Delta) - \overline{S}(f, \Delta') &= [\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) \cdot (x_i - x_{i-1})] \\ &\quad - [\overline{M}(f, [x_{i-1}, \bar{x}]) \cdot (\bar{x} - x_{i-1}) + \overline{M}(f, [\bar{x}, x_i]) \cdot (x_i - \bar{x})] \\ &= (x_i - \bar{x}) [\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) - \overline{M}(f, [\bar{x}, x_i])] \\ &\quad + (\bar{x} - x_{i-1}) [\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) - \overline{M}(f, [x_{i-1}, \bar{x}])] \\ &\geq 0 \end{aligned}$$

□

**Proposition.** Si  $\Delta' \geq \Delta$ , alors  $\underline{S}(f, \Delta') \geq \underline{S}(f, \Delta)$

*démonstration.*



□

*Remarque.*  $\underline{S}(f, \Delta) = -\overline{S}(-f, \Delta)$ .

**Corollaire.**  $\forall \Delta_1, \Delta_2 \in \Omega[a, b], \underline{S}(f, \Delta_1) \leq \overline{S}(f, \Delta_2)$

*démonstration.*

On a  $\Delta_1 \vee \Delta_2 \geq \Delta_1$ . Ainsi,

$$\begin{aligned} \underline{S}(f, \Delta_1) &\leq \underline{S}(f, \Delta_1 \vee \Delta_2) \\ &\leq \overline{S}(f, \Delta_1 \vee \Delta_2) \\ &\leq \overline{S}(f, \Delta_2) \end{aligned}$$

□

**Définition.**

- a) La somme par défaut de  $f$  est  $\underline{S}(f) = \sup_{\Delta \in \Omega[a,b]} \underline{S}(f, \Delta)$ .
- b) La somme par excès de  $f$  est  $\overline{S}(f) = \inf_{\Delta \in \Omega[a,b]} \overline{S}(f, \Delta)$ .

**Théorème.**  $\underline{S}(f) \leq \overline{S}(f)$ *démonstration.*Soit  $\Delta_1 \in \Omega[a, b]$  $\underline{S}(f) = \sup \underline{S}(f, \Delta)$  est le plus petit majorant des  $\underline{S}(f, \Delta)$  avec  $\Delta \in \Omega[a, b]$ .Du corollaire précédant, on a que  $\underline{S}(f, \Delta) \leq \overline{S}(f, \Delta_1)$ .Donc,  $\overline{S}(f, \Delta_1)$  est un majorant des  $\underline{S}(f, \Delta)$ .Ainsi,  $\underline{S}(f) \leq \overline{S}(f, \Delta_1)$ .De même,  $\overline{S}(f) = \inf \overline{S}(f, \Delta)$  est le plus grand minorant des  $\overline{S}(f, \Delta)$  avec  $\Delta \in \Omega[a, b]$ .Comme  $\underline{S}(f)$  est un minorant des  $\overline{S}(f, \Delta)$ , on a que  $\underline{S}(f) \leq \overline{S}(f)$ . □**Définition.**

Soit  $f \in \mathcal{B}[a, b]$ . On dit que  $f$  est *intégrable au sens de Riemann sur  $[a, b]$*  si  $\underline{S}(f) = \overline{S}(f)$  et on note  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ .  
La valeur commune de  $\underline{S}(f)$  et  $\overline{S}(f)$  est notée  $\int_a^b f(x) dx$

**Théorème** (Critère d'intégrabilité).Soit  $f \in \mathcal{B}[a, b]$ . Alors  $f \in \mathcal{R}[a, b]$  si, et seulement si,  $(\forall \varepsilon > 0) (\exists \Delta = \Delta(\varepsilon) \in \Omega[a, b])$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) < \varepsilon$ .*démonstration.* $(\Rightarrow)$  Supposons  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ .Soit  $\varepsilon > 0$ .On a  $\int_a^b f = \overline{S}(f) = \inf \overline{S}(f, \Delta)$ .Comme  $\overline{S}(f) + \frac{\varepsilon}{2}$  ne peut minorer  $\overline{S}(f, \Delta)$ , alors  $\exists \Delta_1 \in \Omega[a, b]$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta_1) < \overline{S}(f) + \frac{\varepsilon}{2}$ .De même,  $\int_a^b f = \underline{S}(f) = \sup \underline{S}(f, \Delta)$ .Comme  $\underline{S}(f) - \frac{\varepsilon}{2}$  ne peut majorer  $\underline{S}(f, \Delta)$ , alors  $\exists \Delta_2 \in \Omega[a, b]$  t.q.  $\underline{S}(f, \Delta_2) > \underline{S}(f) - \frac{\varepsilon}{2}$ .Posons  $\Delta = \Delta(\varepsilon) = \Delta_1 \vee \Delta_2$ .

On a

$$\begin{aligned}
\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) &\leq \overline{S}(f, \Delta_1) - \underline{S}(f, \Delta_2) \\
&< \overline{S}(f) + \frac{\varepsilon}{2} - \left( \underline{S}(f) - \frac{\varepsilon}{2} \right) \\
&= (\overline{S}(f) - \underline{S}(f)) + \varepsilon \\
&= \varepsilon
\end{aligned}$$

( $\Leftarrow$ ) Soit  $\varepsilon > 0$ .

Alors  $\exists \Delta$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) < \varepsilon$ .

Mais alors,

$$\begin{aligned}\varepsilon &> \overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) \\ &\geq \overline{S}(f) - \underline{S}(f) \\ &\geq 0\end{aligned}$$

Du théorème du sandwich,  $\overline{S}(f) = \underline{S}(f)$ , car  $\varepsilon > 0$  est arbitraire.

Donc,  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ .

□

**Corollaire.** *S'il existe  $\Delta \in \Omega[a, b]$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta) = \underline{S}(f, \Delta)$ , alors  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ .*

**Théorème.** *Toute fonction continue sur  $[a, b]$  est intégrable sur  $[a, b]$ .*

*démonstration.*

Soit  $f \in \mathcal{C}[a, b]$ .

Soit  $\varepsilon > 0$ .

Par la proposition d'Archimède,  $\exists n \in \mathbb{Z}$  t.q.  $n\varepsilon > b - a$ .

*Rappel.*

$f$  est uniformément continue sur  $[a, b]$  si  $(\forall \varepsilon > 0) (\exists \delta > 0)$  t.q. pour  $x, y \in [a, b]$ ,  $|x - y| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(y)| < \varepsilon$ .

*Rappel.*

Si  $f$  est continue sur  $[a, b]$ , alors  $f$  est uniformément continue sur  $[a, b]$ .

Comme  $f \in \mathcal{C}[a, b]$ , elle est uniformément continue sur  $[a, b]$ .

Alors,  $\exists \delta > 0$  t.q. pour  $x, y \in [a, b]$ ,  $|x - y| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(y)| < \frac{1}{n}$ .

Soit donc  $\Delta \in \Omega[a, b] : a = x_0 < x_1, \dots < x_n = b$  avec  $\|\Delta\| < \delta$ .

Alors,  $\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) - \underline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) < \frac{1}{n}$ .

*Remarque.*  $\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) - \underline{M}(f, [x_{i-1}, x_i])$  peut être noté  $\text{osc}_f([x_{i-1}, x_i])$ .

On obtient

$$\begin{aligned}\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) &= \sum_{i=1}^n [\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) - \underline{M}(f, [x_{i-1}, x_i])] (x_i - x_{i-1}) \\ &< \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1}) \\ &= \frac{b - a}{n} \\ &< \varepsilon\end{aligned}$$

Donc  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ .

□

**Théorème.** *Toute  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  monotone est intégrable.*

*démonstration.*

(1) Si  $f$  est constante, alors  $\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) = 0 < \varepsilon$ .

(2) Si  $f$  est croissante,

Soit  $\varepsilon > 0$

Soit  $n \in \mathbb{N}$  t.q.  $n\varepsilon > (b - a)(f(b) - f(a))$

Soit  $\Delta : a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$  avec  $x_i = a + i \frac{b-a}{n}$ ,  $i \in [0..n]$

On a

$$\begin{aligned}
\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) &= \sum_{i=1}^n [\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) - \underline{M}(f, [x_{i-1}, x_i])] (x_i - x_{i-1}) \\
&= \sum_{i=1}^n [f(x_i) - f(x_{i-1})] \left( \frac{b-a}{n} \right) \\
&= \frac{b-a}{n} [f(b) - f(a)] \\
&< \varepsilon
\end{aligned}$$

Donc,  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ .

(3) Si  $f$  est décroissante, alors  $-f$  est croissante et  $-f \in \mathcal{R}[a, b]$ .

Donc,  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ .

□

### Théorème.

Si  $f_1, f_2 \in \mathcal{R}[a, b]$ , alors  $f_1 + f_2 \in \mathcal{R}[a, b]$  et  $\int (f_1 + f_2) = \int f_1 + \int f_2$ .

démonstration.

Soit  $\varepsilon > 0$ .

Comme  $f_i \in \mathcal{R}[a, b]$ ,  $\exists \Delta_i \in \Omega[a, b]$  t.q.  $\overline{S}(f_i, \Delta_i) - \underline{S}(f_i, \Delta_i) < \frac{\varepsilon}{2}$ .

Soit  $\Delta = \Delta_1 \vee \Delta_2$ .

Alors,  $\overline{S}(f_i, \Delta) - \underline{S}(f_i, \Delta) < \frac{\varepsilon}{2}$ .

Supposons  $\Delta : a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ .

On a

$$\begin{aligned}
\overline{S}(f_1 + f_2, \Delta) &\leq \overline{S}(f_1, \Delta) + \overline{S}(f_2, \Delta) \\
\underline{S}(f_1 + f_2, \Delta) &\geq \underline{S}(f_1, \Delta) + \underline{S}(f_2, \Delta)
\end{aligned}$$

Car  $\sup(f_1 + f_2) \leq \sup f_1 + \sup f_2$  et  $\inf(f_1 + f_2) \geq \inf f_1 + \inf f_2$ .

Alors,

$$\begin{aligned}
\overline{S}(f_1 + f_2, \Delta) - \underline{S}(f_1 + f_2, \Delta) &\leq \overline{S}(f_1, \Delta) + \overline{S}(f_2, \Delta) - \underline{S}(f_1, \Delta) - \underline{S}(f_2, \Delta) \\
&< \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} \\
&= \varepsilon
\end{aligned}$$

Donc,  $f_1 + f_2 \in \mathcal{R}[a, b]$ .

De plus,

$$\begin{aligned}
\int_a^b f_1 + f_2 &\leq \overline{S}(f_1 + f_2, \Delta) \\
&\leq \overline{S}(f_1, \Delta) + \overline{S}(f_2, \Delta) \\
&< \underline{S}(f_1, \Delta) + \frac{\varepsilon}{2} + \underline{S}(f_2, \Delta) + \frac{\varepsilon}{2} \\
&\leq \int_a^b f_1 + \frac{\varepsilon}{2} + \int_a^b f_2 + \frac{\varepsilon}{2}
\end{aligned}$$

Ainsi,  $\int_a^b f_1 + f_2 < \int_a^b f_1 + \int_a^b f_2 + \varepsilon$ ,  $\forall \varepsilon > 0$ .

Donc,  $\int_a^b f_1 + f_2 \leq \int_a^b f_1 + \int_a^b f_2$ .

De même, on peut montrer que  $\int_a^b f_1 + f_2 \geq \int_a^b f_1 + \int_a^b f_2$ .

Donc,  $\int_a^b f_1 + f_2 = \int_a^b f_1 + \int_a^b f_2$ .

□

**Théorème.**

Si  $f \in \mathcal{R}[a, b]$  et  $\lambda \in \mathbb{R}$ , alors  $\lambda f \in \mathcal{R}[a, b]$  et  $\int \lambda f = \lambda \int f$ .

démonstration.

Laissé en exercice.

Utiliser  $\frac{\varepsilon}{\lambda}$  et  $\overline{S}(\lambda f, \Delta) = \lambda \overline{S}(f, \Delta)$ . □

**Corollaire.**

Si  $f, g \in \mathcal{R}[a, b]$ , alors  $f \leq g \Rightarrow \int f \leq \int g$ .

démonstration.

$g - f \geq 0 \Rightarrow \int g - f \geq 0 \Rightarrow \int g - \int f \geq 0$ . □

**Théorème (Inégalité du triangle).**

Si  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ , alors  $|f| \in \mathcal{R}[a, b]$  et  $|\int f| \leq \int |f|$ .

démonstration.

Soit  $\varepsilon > 0$

Alors,  $\exists \Delta \in \Omega[a, b]$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) < \varepsilon$ .

On a

$$\begin{aligned} \overline{S}(|f|, \Delta) - \underline{S}(|f|, \Delta) &= \sum_{i=1}^n [\overline{M}(|f|, [x_{i-1}, x_i]) - \underline{M}(|f|, [x_{i-1}, x_i])] (x_i - x_{i-1}) \\ &\leq \sum_{i=1}^n [\overline{M}(f, [x_{i-1}, x_i]) - \underline{M}(f, [x_{i-1}, x_i])] (x_i - x_{i-1}) \\ &= \overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) \\ &< \varepsilon \end{aligned}$$

Donc,  $|f| \in \mathcal{R}[a, b]$ .

Enfin,

$$\begin{aligned} -|f| \leq f \leq |f| &\Rightarrow -\int |f| \leq \int f \leq \int |f| \\ &\Rightarrow \int f \leq \int |f| \end{aligned}$$

□

**Théorème.**

Si  $f \in \mathcal{R}[a, b]$  et  $a \leq c < d \leq b$ , alors  $f|_{[c, d]} \in \mathcal{R}[a, b]$ .

démonstration.

Soit  $\varepsilon > 0$

Comme  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ ,  $\exists \Delta_1 \in \Omega[a, b]$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta_1) - \underline{S}(f, \Delta_1) < \varepsilon$ .

Soit  $\Delta_2$  le raffinement de  $\Delta_1$  en ajoutant les points  $c$  et  $d$ .

Alors,  $\overline{S}(f, \Delta_2) - \underline{S}(f, \Delta_2) \leq \overline{S}(f, \Delta_1) - \underline{S}(f, \Delta_1) < \varepsilon$

Donc,  $f \in \mathcal{R}[c, d]$ . □

**Théorème.**

Si  $f \in \mathcal{R}[a, b]$  et  $a < c < b$ , alors  $\int_a^b f = \int_a^c f + \int_c^b f$ .

démonstration.

Soit  $\varepsilon > 0$

$f \in \mathcal{R}[a, b] \Rightarrow f \in \mathcal{R}[a, c] \Rightarrow \exists \Delta_1 \in \Omega[a, c]$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta_1) - \underline{S}(f, \Delta_1) < \frac{\varepsilon}{2}$ .

De même,  $\exists \Delta_2 \in \Omega[c, b]$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta_2) - \underline{S}(f, \Delta_2) < \frac{\varepsilon}{2}$ .



Posons  $\Delta = \Delta_1 \vee \Delta_2$ . Alors,  $\Delta \in \Omega[a, b]$  et

$$\begin{aligned} \int_a^b f &\leq \overline{S}(f, \Delta) \\ &= \overline{S}(f, \Delta_1) + \overline{S}(f, \Delta_2) \\ &< \underline{S}(f, \Delta_1) + \frac{\varepsilon}{2} + \underline{S}(f, \Delta_2) + \frac{\varepsilon}{2} \\ &= \underline{S}(f, \Delta_1) + \underline{S}(f, \Delta_2) + \varepsilon \\ &\leq \int_a^c f + \int_c^b f + \varepsilon \end{aligned}$$

Comme  $\varepsilon > 0$  est arbitraire, on a  $\int_a^b f \leq \int_a^c f + \int_c^b f$ .

De même,  $\int_a^b f \geq \int_a^c f + \int_c^b f$ . □

### **Théorème.**

*Soit  $f \in \mathcal{B}[a, b]$ . Soit  $n \in \mathbb{N}$ .*

*Si  $f$  possède  $n$  discontinuités dans  $[a, b]$ , alors  $f \in \mathcal{R}[a, b]$ .*

*démonstration.*

Pour  $n = 0$ ,  $f \in \mathcal{C}[a, b]$ , donc  $f \in \mathcal{R}[a, b]$  est un résultat connu.

Supposons l'énoncé vrai pour  $n$ .

Supposons que  $f \in \mathcal{B}[a, b]$  admet  $n + 1$  discontinuités.

Soit  $\varepsilon > 0$ .

Soit  $M = \sup_{x \in [a, b]} |f(x)|$

Il y a deux cas à considérer

1.  $a$  ou  $b$  est une discontinuité

SPDG, supposons que  $a$  est la discontinuité.

Soit  $\eta \in \mathbb{R}^+$  t.q.  $a$  est l'unique discontinuité de  $[a, a + \eta]$  et  $\eta < \frac{\varepsilon}{4M}$ .

Alors,  $[a + \eta, b]$  contient  $n$  discontinuités.

De l'hypothèse de récurrence,  $f \in \mathcal{R}[a + \eta, b]$ .

Il existe donc  $\Delta \in \Omega[a + \eta, b]$  t.q.  $\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta) < \frac{\varepsilon}{2}$ .

Posons  $\Delta_\varepsilon = \Delta \vee \{a\}$ .

On a donc

$$\begin{aligned} \overline{S}(f, \Delta_\varepsilon) - \underline{S}(f, \Delta_\varepsilon) &= (\overline{S}(f, \Delta) - \underline{S}(f, \Delta)) + (\overline{M}(f, [a, a + \eta]) - \underline{M}(f, [a, a + \eta])) \eta \\ &< \frac{\varepsilon}{2} + 2M\eta \\ &< \varepsilon \end{aligned}$$

2. □