

I. L'invention du calcul intégral

Le calcul intégral représente l'une des grandes révolutions mathématiques. On associe souvent son nom à celui de Bernhard Riemann (1826-1866), même si les idées et les concepts qui ont été nécessaire se trouvent déjà chez Cauchy (1823), Leibniz et Newton (1675), Cavalieri (1640), Kepler (1615) et ... Archimède! Nous commencerons donc notre étude avec un exemple de ce scientifique grec de Syracuse (-250).

1 La spirale archimédienne

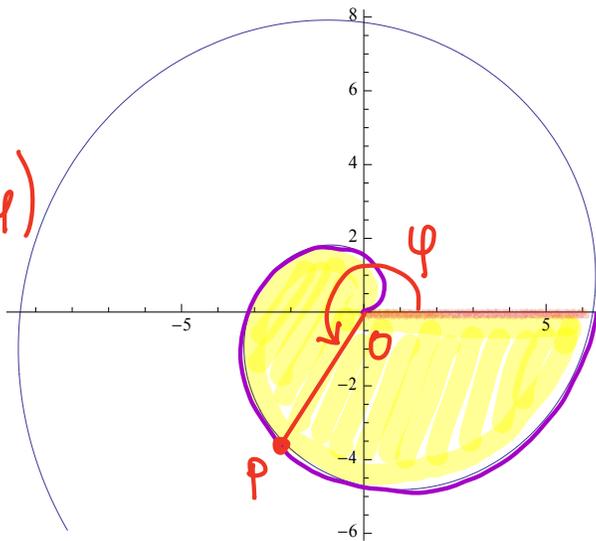
On considère la courbe du plan donnée en coordonnées polaires par l'équation

$$\underline{r = \varphi},$$

pour un angle $0 \leq \varphi \leq \alpha$ où α est un angle positif fixé, ce sera 2π tout à l'heure, et r est la distance au centre.

$$\overline{OP} = \varphi$$

$$P(\varphi \cos \varphi ; \varphi \sin \varphi)$$



aire pour
 $\alpha = 2\pi$

Pour calculer l'aire de la surface comprise entre la spirale et le rayon d'angle α , Archimède découpe l'angle α en n angles égaux $\delta = \alpha/n$. Il approche l'aire cherchée par une somme de secteurs de disque. Pour $1 \leq k \leq n$, il considère le rayon $\varphi = k\delta$ et son intersection avec la spirale. Soit A_k l'aire de la surface délimitée par la spirale et les rayons $\varphi = (k-1)\delta$ et $\varphi = k\delta$.

$$\varphi_k = k\delta = k \cdot \frac{\alpha}{n}$$

d'aire A_k de la k^e "tranche" de spirale est comprise entre celle des secteurs de disque de rayons φ_{k-1} et φ_k

$$\frac{1}{2} \frac{\alpha^3}{n^3} (k-1)^2 = \frac{1}{2} \delta \left((k-1)\delta \right)^2 \leq A_k \leq \frac{1}{2} \delta (k\delta)^2 = \frac{1}{2} \frac{\alpha^3}{n^3} \cdot k^2$$

$\delta = \frac{\alpha}{n}$ (indicated by arrows pointing to the δ terms in the equation above)

Ainsi l'aire A cherchée est comprise entre deux sommes de petits et grands secteurs de disque :

$$\frac{1}{2} \frac{\alpha^3}{n^3} \sum_{k=1}^n (k-1)^2 \leq A \leq \frac{1}{2} \frac{\alpha^3}{n^3} \sum_{k=1}^n k^2$$

$\xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{3}$ (indicated by arrows pointing to the limits of the sums)

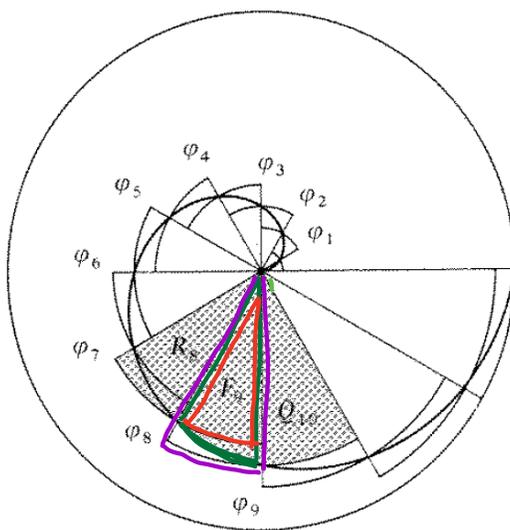
Aire d'un secteur de disque

aire	angle
πr^2	2π
σ	α

$$\sigma = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \pi r^2 = \frac{\alpha r^2}{2}$$

Par le thm des gendarmes,

$$A = \frac{\alpha^3}{6}$$



Nous avons un peu plus de technique à notre disposition qu'Archimède et pensons à utiliser le théorème des deux gendarmes. Lorsque n tend vers l'infini, les deux sommes tendent vers la même limite $\alpha^3/6$. Ce résultat se montre par un petit raisonnement par récurrence à faire en exercice.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^3} \cdot \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{1}{3}$$

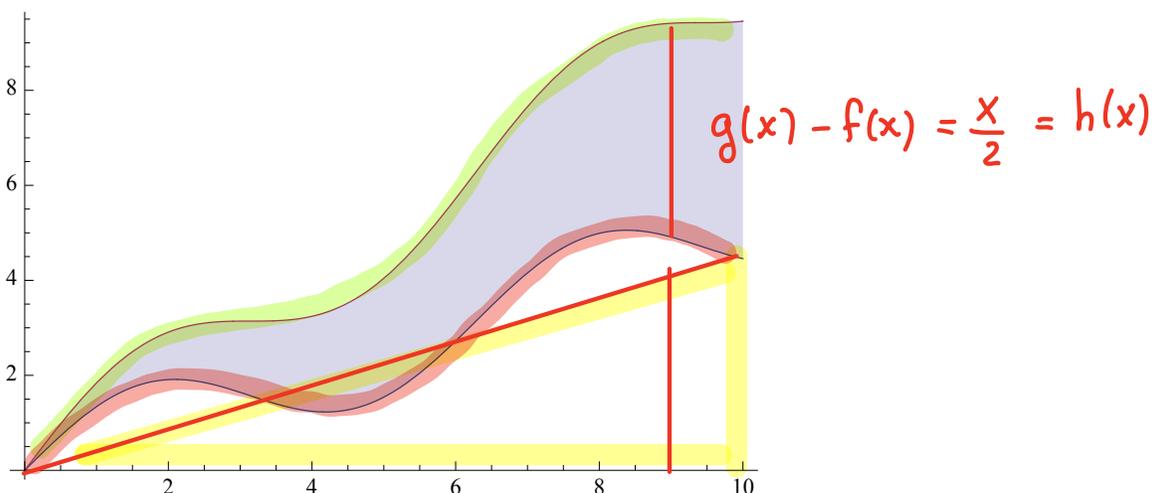
Proposition 1.1. L'aire de la surface comprise entre la spirale d'Archimède et le rayon d'angle 2π vaut $\frac{4\pi^3}{3}$, soit exactement le tiers de l'aire du cercle de rayon 2π .

Démonstration. La valeur de l'aire est donnée par la formule que nous avons trouvée ci-dessus pour $\alpha = 2\pi$.

$$A = \frac{(2\pi)^3}{6} = \frac{8\pi^3}{6} = \frac{4\pi^3}{3} \text{ et l'aire du cercle de rayon } 2\pi \text{ vaut } \pi(2\pi)^2 = 4\pi^3. \quad \square$$

Après les calculs d'Archimède d'aire et de volume, dont celui de la boule par exemple, il faut attendre environ 1800 ans pour que de nouveaux résultats voient le jour. Kepler publie en 1615 un article sur le volume d'un tonneau de vin. Sa méthode consiste à découper le volume en morceaux "infinitésimaux" et calculer la limite. Cavalieri, un élève de Galilée, rend ces méthodes plus systématiques et conceptualise l'idée de voir une surface comme une union infinie de segments, de même qu'un segment est une union infinie de points. Il est soutenu par Pascal, alors que d'autres dénigrent ses méthodes.

Exemple 1.2. Quelle est l'aire de la surface délimitée par les graphes des fonctions f et g définies algébriquement par $f(x) = \sin x + \frac{x}{2}$ et $g(x) = \sin x + x$ pour des valeurs $0 \leq x \leq 10$?



Cavalieri raisonnait ainsi : chaque segment vertical d'abscisse x est de longueur $x/2$. Ainsi l'aire de la surface cherchée est la même que celle de la surface *d'un triangle :*

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 5 = 25$$

Newton et Leibniz sont les pères du calcul intégral, terminologie introduite en 1696 par Jakob Bernoulli. Mais les fondements théoriques seront développés par Cauchy, qui le premier se rend compte de la nécessité d'une démonstration de l'existence de l'intégrale, et complétés par Riemann.

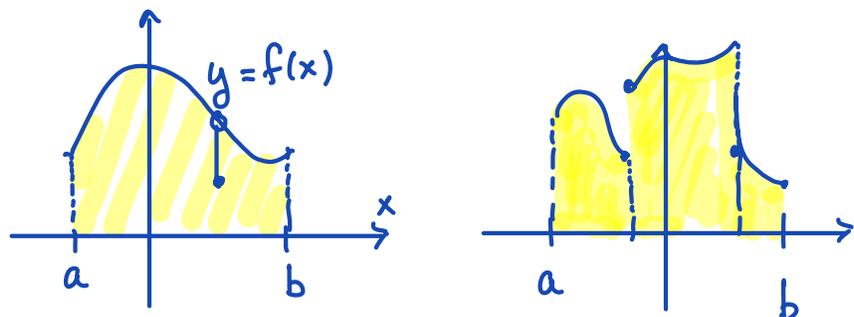


B. Riemann

Né en 1826 à Breselenz, un village dans le royaume de Hanovre, dans l'actuelle Allemagne, Riemann étudie d'abord à l'université de Göttingen où Gauss dirigera sa thèse. Il meurt de tuberculose au cours d'un voyage en Italie, à l'âge de 39 ans. Ses contributions aux mathématiques sont énormes. On parle aujourd'hui encore de surfaces de Riemann, d'intégrale de Riemann - que nous verrons tout à l'heure. La célèbre conjecture de Riemann sur la fonction ζ est l'un des problèmes de Hilbert (1900) et l'un des sept problèmes du millénaire mis au concours par l'institut Clay pour un million de dollars...

2 Les sommes de Darboux

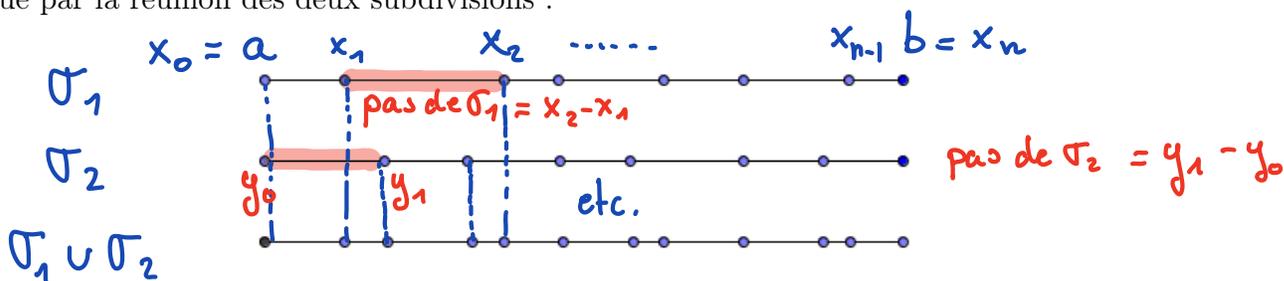
Jean Gaston Darboux (1842-1917) est un mathématicien français. Nous présentons ici sa méthode d'intégration en analyse. Nous travaillons avec une fonction réelle bornée définie sur un intervalle $[a, b]$ et cherchons à calculer l'aire de la surface comprise entre l'intervalle $[a, b]$ sur l'axe Ox et le graphe de la fonction, lorsque cela est possible !



Définition 2.1. Une subdivision σ de l'intervalle $[a, b]$ est la donnée de nombres réels ordonnés $a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$.

La subdivision $a, a + \frac{b-a}{n}, \dots, a + k\frac{b-a}{n}, \dots, a + (n-1)\frac{b-a}{n}, b$ est appelée subdivision régulière d'ordre n .

Si σ_1 et σ_2 sont deux subdivisions du même intervalle $[a, b]$, on note $\sigma_1 \cup \sigma_2$ la nouvelle subdivision obtenue par la réunion des deux subdivisions :



Le pas d'une subdivision σ est la plus grande distance entre deux points successifs de la subdivision, c'est-à-dire le nombre réel $\max\{x_i - x_{i-1} \mid 1 \leq i \leq n\}$.

Le pas de la subdivision régulière d'ordre n de l'intervalle $[0, 1]$ vaut $1/n$. et celui de $[a; b]$ est $\frac{b-a}{n}$

Définition 2.2. Soit σ une subdivision de l'intervalle $[a, b]$ et $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction réelle définie sur $[a, b]$ et bornée.

Sur chaque intervalle $[x_{i-1}; x_i]$ fermé, on définit $m_i =$ borne inférieure de f et $M_i =$ borne supérieure de f .

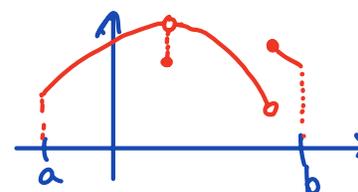
On définit alors la somme de Darboux inférieure $s_\sigma(f)$ et la somme de Darboux supérieure $S_\sigma(f)$ par

$$s_\sigma(f) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1}) m_i \quad \text{et} \quad S_\sigma(f) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1}) M_i$$

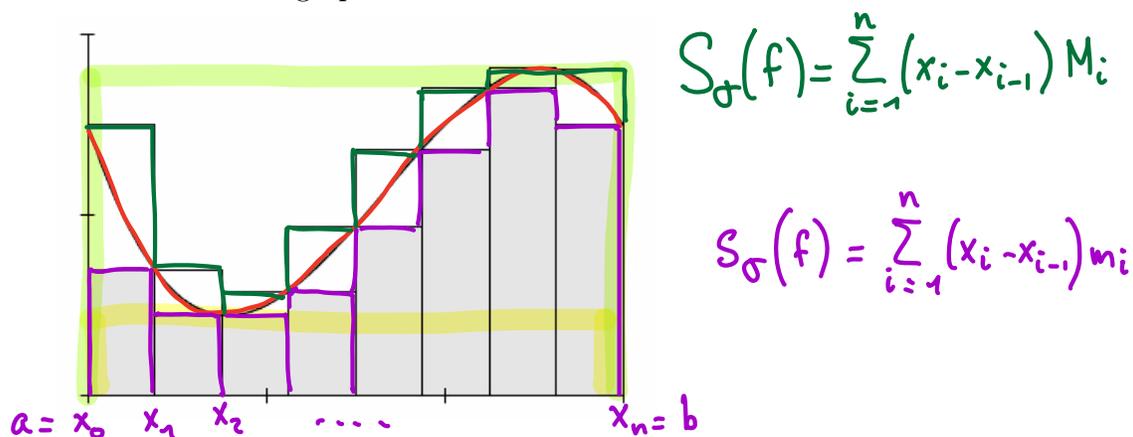
On pose encore m la borne inférieure de la fonction f sur $[a, b]$ et M sa borne supérieure.

Remarque 2.3. Les nombres m_i et M_i existent puisque la fonction f est bornée (nous avons vu que les nombres réels possèdent cette propriété, alors que \mathbb{Q} non). Lorsque la fonction f est aussi continue sur $[a, b]$, la borne supérieure est le maximum de la fonction sur l'intervalle étudié et la borne inférieure est le minimum de la fonction. En effet, une fonction continue sur un intervalle fermé atteint ses extrema.

Ce n'est pas toujours le cas pour les fonctions discontinues :



On visualise sur l'illustration suivante le rapport entre les sommes de Darboux et l'aire de la surface comprise entre l'axe horizontal et le graphe de la fonction.



Lemme 2.4. Soit σ une subdivision de l'intervalle $[a, b]$ et $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction réelle définie sur $[a, b]$ et bornée. Alors

$$m(b - a) \leq s_\sigma(f) \leq S_\sigma(f) \leq M(b - a)$$

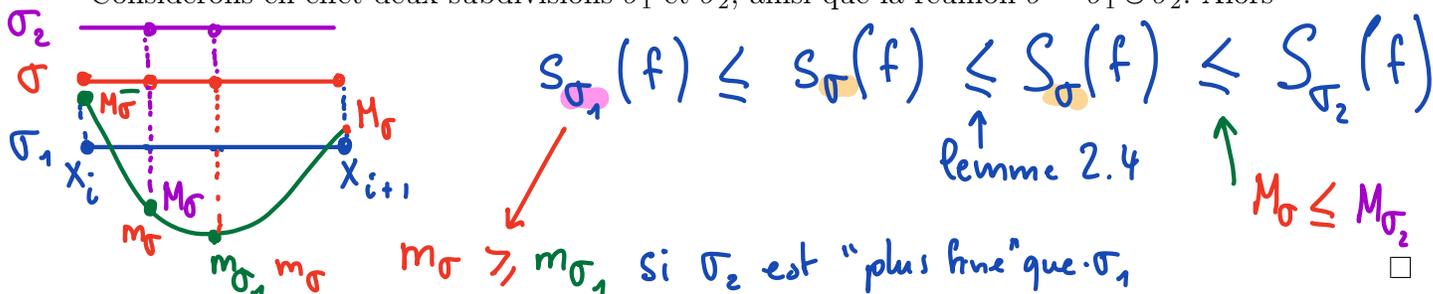
3 Les fonctions intégrables

Le lemme précédent est une évidence puisque $m \leq m_i \leq M_i \leq M$ pour tout i , mais il nous permet d'affirmer que la borne supérieure $s(f)$ de toutes les sommes de Darboux inférieures existe et que la borne inférieure $S(f)$ de toutes les sommes de Darboux supérieures existe aussi (on calcule ces bornes sur toutes les subdivisions possibles de l'intervalle $[a, b]$).

Lemme 3.1. Soit $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction réelle définie sur $[a, b]$ et bornée. Alors $s(f) \leq S(f)$.

Démonstration. Nous allons montrer que toute somme de Darboux inférieure est plus petite ou égale que toute somme de Darboux supérieure.

Considérons en effet deux subdivisions σ_1 et σ_2 , ainsi que la réunion $\sigma = \sigma_1 \cup \sigma_2$. Alors

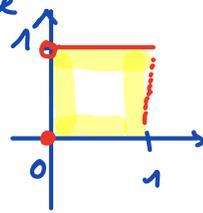


Définition 3.2. Une fonction réelle bornée $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ est *intégrable* sur $[a, b]$ si $s(f) = S(f)$.

Dans ce cas, on pose $\int_a^b f(x)dx = s(f) = S(f)$ et on appelle ce nombre réel l'*intégrale définie* de la fonction f sur l'intervalle $[a, b]$.

Exemple 3.3. Soit la fonction $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $f(0) = 0$ et $f(x) = 1$ pour tout $x > 0$.

Cette fonction n'est pas continue en $x=0$. Mais elle est intégrable



Pour toute subdivision $\sigma \quad x_0=0 < x_1 < \dots < x_n = 1$,

on a $m_1 = 0 = f(0)$ et $m_i = 1 \quad \text{si } i > 1$

$$\Rightarrow S_\sigma(f) = 0(x_1-0) + 1(x_2-x_1) + \dots + 1(1-x_{n-1}) = 1-x_1$$

Par ailleurs, $M_i = 1 \quad \forall i \Rightarrow S_\sigma(f) = 1(x_1-0) + 1(x_2-x_1) + \dots + 1(1-x_{n-1}) = 1$

Donc $S(f) = 1$ et $s(f) = 1$ car x_1 peut être arbitrairement proche de 0.

La plupart des fonctions que nous intégrerons seront continues. $\Rightarrow \int_0^1 f(x) dx = 1$

Proposition 3.4. Toute fonction réelle continue définie sur $[a, b]$ est intégrable.

Démonstration. Nous devons montrer que $s(f) = S(f)$. Puisque $s(f) \leq S(f)$ par le dernier lemme, il suffit de montrer que $\forall \varepsilon > 0$, il existe une subdivision σ telle que $S_\sigma(f) - s_\sigma(f) \leq \varepsilon$.

La démonstration utilise le fait qu'une fonction continue sur un intervalle fermé est uniformément continue : pour tout $\varepsilon > 0$, il existe un nombre $\delta > 0$ tel que, si $|x - y| < \delta$, alors $|f(x) - f(y)| < \varepsilon$ (indépendamment de x ou y). Ainsi, si l'on choisit une suite régulière de pas $< \delta$, on voit que $M_i - m_i < \varepsilon$, si bien que la différence entre les sommes de Darboux supérieure et inférieure est plus petite que $(b - a)\varepsilon$. Cette quantité est arbitrairement petite... \square

D'après la définition d'intégrabilité, il faudrait utiliser toutes les subdivisions de $[a, b]$.

Riemann a montré qu'il suffit de travailler avec les subdivisions régulières. L'idée est que pour toute subdivision, il en existe une régulière qui est plus "fine" (dont le pas est plus petit).

Proposition 3.5. Intégrabilité au sens de Riemann

Soit $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction bornée et σ_n une suite de subdivisions dont le pas tend vers zéro.

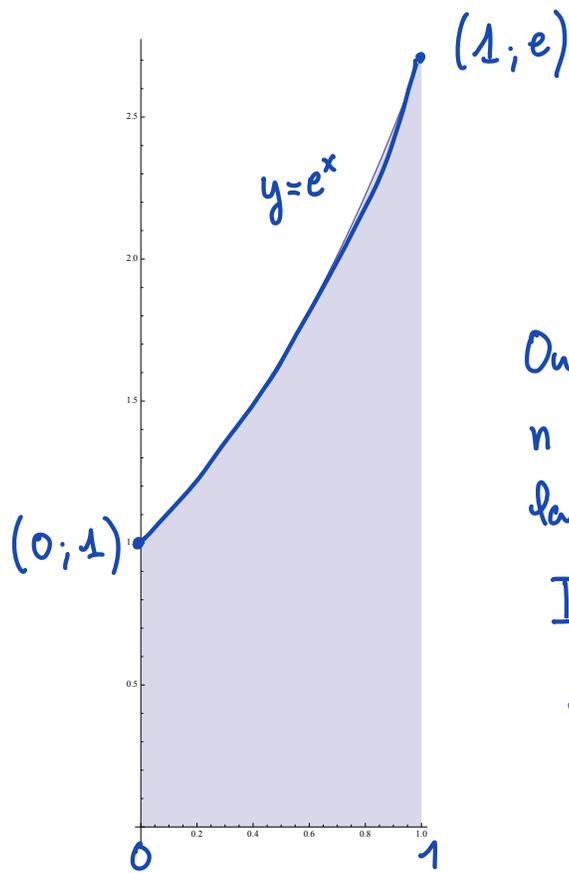
Alors si

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_{\sigma_n}(f) = \lim_{n \rightarrow \infty} S_{\sigma_n}(f),$$

la fonction f est intégrable et la limite ci-dessus est $\int_a^b f(x) dx$.

Exemple 3.6. La fonction exponentielle est continue sur $[0, 1]$, donc intégrable.

Pour calculer $\int_0^1 e^x dx$, il suffit donc de calculer la limite des sommes de Darboux inférieures prises sur les subdivisions régulières $\sigma_n : 0 < 1/n < \dots < i/n < \dots < 1$.



On divise $[0; 1]$ en n sous intervalles de largeur $\frac{1}{n}$

$$I_k = \left[\frac{k-1}{n} ; \frac{k}{n} \right]$$

$$k = 1; \dots, n.$$

Comme e^x est croissante, le minimum sur I_k vaut $e^{\frac{k-1}{n}} = m_k$

$$S_{\sigma_n}(f) = \sum_{k=1}^n e^{\frac{k-1}{n}} \cdot \frac{1}{n} = \sum_{j=0}^{n-1} e^{\frac{j}{n}} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \left(e^{\frac{1}{n}} \right)^j$$

(*) somme d'une suite géométrique de raison $r = e^{\frac{1}{n}}$ de premier terme $a_0 = 1$

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

$$\text{Donc, } S_{\sigma_n}(f) = \frac{1}{n} \cdot 1 \cdot \frac{1 - \left(e^{\frac{1}{n}} \right)^n}{1 - e^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1 - e}{1 - e^{\frac{1}{n}}} = (1 - e) \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{1 - e^{\frac{1}{n}}}$$

$$(*) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{1 - e^{\frac{1}{n}}} \stackrel{x = \frac{1}{n}}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{1 - e^x} \stackrel{\text{B.H}}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{-e^x} \stackrel{(*)}{=} \frac{1}{-1} = -1$$

$$\text{Ainsi, } s(f) = \lim_{n \rightarrow \infty} S_{\sigma_n}(f) \stackrel{(*)}{=} (1 - e) \cdot f(1) = e - 1.$$

$$\Rightarrow \int_0^1 e^x dx = e - 1$$