

« Trouver quelque chose en mathématiques, c'est vaincre une inhibition et une tradition. » Laurent Schwartz

**Chapitre XIII**

**Calcul intégral**

**I – Idée intuitive de la notion d'aire plane**

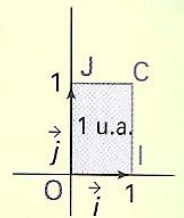
**a) Généralités**

Dans tout ce qui suit, sauf indication contraire :

- le plan, noté  $\mathcal{P}$ , est muni d'un repère orthogonal  $(O ; \vec{i}, \vec{j})$ ;
- $f$  désignant une fonction, on note  $\mathcal{C}_f$  sa courbe représentative dans le repère  $(O ; \vec{i}, \vec{j})$ ;
- $a$  et  $b$  sont deux réels tels que  $a$  est inférieur ou égal à  $b$ .

**Définition 1**

On appelle **unité d'aire**, que l'on note u.a., l'unité de mesure des aires telle que :  $1 \text{ u.a.} = \|\vec{i}\| \times \|\vec{j}\|$ , c'est-à-dire l'aire du rectangle OICJ où I, J et C sont les points définis par :  $\vec{OI} = \vec{i}$ ,  $\vec{OJ} = \vec{j}$  et  $\vec{OC} = \vec{i} + \vec{j}$ .



► On considère qu'une unité de longueur a été choisie pour le calcul des normes.

On sait calculer l'aire de parties du plan telles que les rectangles, les triangles, les disques....

**Nous allons apprendre à calculer l'aire de nouvelles parties du plan, c'est l'un des objectifs du calcul intégral.**

Définition

Soit  $f$  une fonction définie, **continue et positive** sur un intervalle  $[a ; b]$ .

Notons  $D_f$  le domaine du plan délimité par la courbe  $\mathcal{C}_f$ , l'axe des abscisses et les droites verticales d'équations respectives :  $x = a$  et  $x = b$ .

On a :  $D_f = \{M(x ; y) \text{ tels que } \dots\dots\dots\text{et } \dots\dots\dots\}$ .

Illustration :

On dit que  $D_f$  est le domaine situé sous la courbe représentant  $f$ .

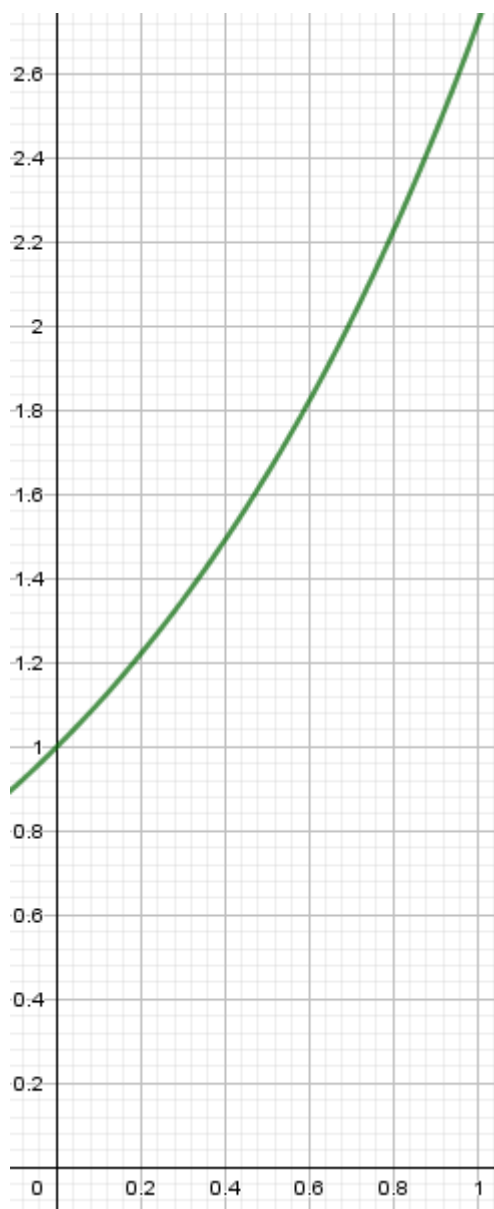
**Propriété admise**

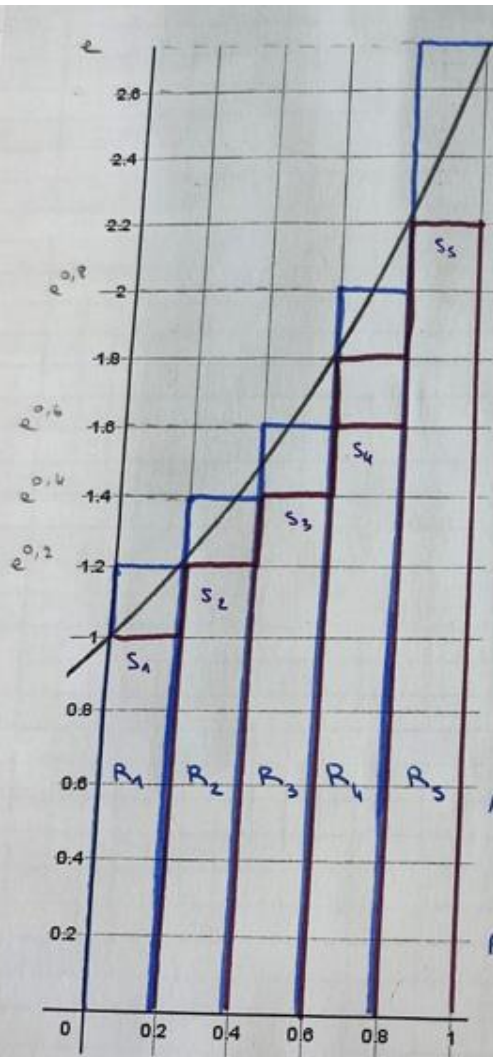
Si  $f$  est une fonction continue et positive sur un intervalle  $[a ; b]$ , alors le domaine  $D_f$  décrit précédemment admet une aire.

Ce résultat d'apparence anodine est délicat à prouver. On va apprendre à calculer l'aire d'un tel domaine.

A titre d'exemple, essayons de calculer l'aire d'un tel domaine : on va par exemple décomposer ce domaine en rectangles, dont on sait facilement calculer les aires.

A l'aide du dessin ci-dessous, proposer, après avoir hachuré  $D_f$ , un premier encadrement de l'aire de  $D_f$  où  $D_f = \{M(x; y) / 0 \leq x \leq 1 \text{ et } 0 \leq y \leq f(x)\}$ , où  $f(x) = e^x$ . Utiliser 5 rectangles.





Ex où  $f(x) = e^x$

$$A(R_1) + A(R_2) + A(R_3) + A(R_4) + A(R_5) \leq A(\text{Dg})$$

→ chacun des rectangles a pr largeur :  $\frac{1}{5} = 0,2$ .

$$A(R_1) = 0,2 \times e^0 = 0,2$$

$$A(R_2) = 0,2 \times e^{0,2}$$

$$A(R_3) = 0,2 \times e^{0,4}$$

$$A(R_4) = 0,2 \times e^{0,6}$$

$$A(R_5) = 0,2 \times e^{0,8}$$

$$\text{Donc } 0,2 + 0,2e^{0,2} + 0,2e^{0,4} + 0,2e^{0,6} + 0,2e^{0,8} \leq A(\text{Dg})$$

$$0,2(1 + e^{0,2} + e^{0,4} + e^{0,6} + e^{0,8}) \leq A(\text{Dg})$$

$$\approx 1,55 \leq A(\text{Dg})$$

$$\text{De m} : A(\text{Dg}) \leq \sum_{i=1}^5 A(S_i) \text{ avec } A(S_1) = 0,2 \times e^{0,2}$$

$$A(S_2) = 0,2 \times e^{0,4}$$

$$A(S_3) = 0,2e^{0,6}$$

$$A(S_4) = 0,2e^{0,8}$$

$$A(S_5) = 0,2e$$

$$A(\text{Dg}) \leq 0,2(e^{0,2} + e^{0,4} + e^{0,6} + e^{0,8} + e)$$

$$\approx 1,90$$

$$\text{Ainsi : } 1,55 \leq A(\text{Dg}) \leq 1,90$$

Pour affiner le précédent encadrement, on va partager le domaine en des rectangles de largeur plus petite.

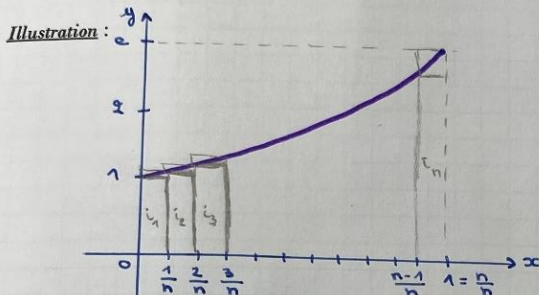
Soit  $n$  un entier naturel non nul fixé.

On subdivise l'intervalle  $[0; 1]$  en  $n$  petits segments de même longueur égale à  $\frac{1}{n}$ .

Encadrons l'aire de  $D_f$  par deux suites  $(i_n)$  et  $(s_n)$  que l'on va définir :

$i_n$  = somme des aires des  $n$  rectangles situés en-dessous  $C_f$  =  $\frac{1}{n} \times e^0 + \frac{1}{n} \times e^{\frac{1}{n}} + \dots + \frac{1}{n} \times e^{\frac{n-1}{n}}$

$s_n$  = somme des aires des  $n$  rectangles situés au-dessus de  $C_f$  =  $\frac{1}{n} (e^0 + e^{\frac{1}{n}} + \dots + e^{\frac{n-1}{n}}) + \frac{1}{n} \times e^1$



$$i_n = \frac{1}{n} (e^0 + e^{\frac{1}{n}} + \dots + e^{\frac{n-1}{n}})$$

$$Rq: i_n = \frac{1}{n} (1 + e^{\frac{1}{n}} + \dots + e^{\frac{n-1}{n}})$$

$$s_n = \frac{1}{n} (e^{\frac{1}{n}} + \dots + e^{\frac{n-1}{n}} + e^1)$$

$$\text{Donc } s_n = i_n + \frac{e}{n} - \frac{1}{n}$$

$$s_n = i_n + \frac{e-1}{n}$$

Déterminer les limites des deux suites  $(i_n)$  et  $(s_n)$  lorsque  $n$  tend vers  $+\infty$ .

$$i_n = \frac{1}{n} (e^{\frac{0}{n}} + e^{\frac{1}{n}} + \dots + e^{\frac{n-1}{n}})$$

$$i_n = \frac{1}{n} (e^{\frac{0}{n}} + e^{\frac{1}{n}} + \dots + e^{\frac{n-1}{n}})$$

↳ somme des termes d'une suite géo de raison  $q = e^{\frac{1}{n}}$  ( $\neq 1$  car  $\frac{1}{n} \neq 0$ )

↳ Rappel : Si  $q \neq 1$ :  $S = q^0 + q^1 + \dots + q^{n-1}$

$$S = \frac{1-q^n}{1-q}$$

$$i_n = \frac{1}{n} \times \frac{1 - (e^{\frac{1}{n}})^n}{1 - e^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{n} \times \frac{1 - e}{1 - e^{\frac{1}{n}}}$$

$$i_n = (1-e) \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{1 - e^{\frac{1}{n}}}$$

Cherchons :  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\frac{1}{n}}{1 - e^{\frac{1}{n}}}$  Or  $\frac{\frac{1}{n}}{1 - e^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{1 - e^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{1 - e^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{1 - e^{\frac{1}{n}}} = \frac{-1}{e^{\frac{1}{n}} - 1}$

Poseons  $X = \frac{1}{n}$  :  $n \rightarrow +\infty$  ;  $X \rightarrow 0$

$$\lim_{X \rightarrow 0} \frac{e^X - 1}{X} = \lim_{X \rightarrow 0} \frac{e^X - e^0}{X - 0} = \exp'(0) = \exp(0) = 1.$$

Par suite  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\frac{1}{n}}{1 - e^{\frac{1}{n}}} = -1.$

Enfin, par limite de produit :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} i_n = (1-e) \times (-1) = e-1.$$

$$S_n = i_n + \frac{e-1}{n} \quad \text{Or } \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{e-1}{n} = 0 \quad \text{et } \lim_{n \rightarrow +\infty} i_n = e-1, \text{ donc}$$

$$\text{par somme : } \lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = e-1.$$

$$\text{Enfin : } \forall n \in \mathbb{N}^*, i_n \leq A(D_f) \leq S_n$$

$$\text{D'après le th. des gendarmes : } \lim_{n \rightarrow +\infty} A(D_f) = A(D_f) = e-1.$$

### Définition

Soit  $f$  une fonction continue et positive sur  $[a ; b]$ ,  $C_f$  sa courbe représentative, et enfin  $D_f$  le domaine situé sous  $C_f$ .

On appelle intégrale de  $f$  entre  $a$  et  $b$ , l'aire, exprimée en unités d'aires, du domaine  $D_f$ .

Cette intégrale est notée :  $\int_a^b f(x)dx$ . On lit : intégrale entre  $a$  à  $b$  de la fonction  $f$ , ou encore, somme de  $a$  à  $b$  de  $f(x)dx$ .

Sans entrer dans les détails (cf. cours de l'enseignement supérieur, pour vraiment comprendre ce qu'est une intégrale), tout comme on l'a fait dans l'exemple précédent, l'aire d'un tel domaine peut être obtenue comme limite d'une somme d'aires de rectangles, d'où le nom de somme parfois utilisé au lieu d'intégrale.

Le terme  $f(x)dx$  peut être vu comme l'aire d'un rectangle dont les dimensions sont :  $f(x)$  et  $dx$ .

**Les nombres  $a$  et  $b$  sont appelés les bornes de l'intégrales :  $a$  est la borne du bas, et  $b$  la borne du haut.**

$x$  est appelée la variable d'intégrale, la lettre désignant la variable n'a pas d'importance et aurait pu s'appeler  $t, u, v, \dots$

Le symbole  $\int$  est donc l'analogue, pour une variable continue, du symbole  $\sum$  pour une variable discrète.

### Exercice 1

Soit  $f$  la fonction définie sur  $[0 ; 3]$  par :  $f(x) = x + 2$ . Calculer  $\int_0^3 f(x)dx$  après avoir représenté le domaine associé à cette intégrale.

✂-----

### Propriétés évidentes de l'intégrale

Soit  $f$  une fonction continue et positive sur un intervalle  $I$  de  $\mathbb{R}$ . Alors, pour tout réel  $a \in I$ , on a :

- $\int_a^a f(x)dx = \dots\dots$
- Si  $f$  est constante sur  $[a ; b]$ , et vaut  $k$ , alors,  $\int_a^b f(x)dx = \dots\dots\dots$

### b) Fonction définie par une intégrale

Considérons une fonction  $f$  continue et positive, définie sur un intervalle  $[a ; b]$ .

Soit  $x$  un réel quelconque situé dans  $[a ; b]$ .

Hachurer le domaine du plan dont l'aire est :  $\int_a^x f(t)dt$ . On admet que cette aire ne dépend que de la valeur de  $x$ .

On crée donc une fonction, notée  $F$ , définie sur  $[a ; b]$  par :

$$\text{Pour tout réel } x \in [a ; b], F(x) = \int_a^x f(t)dt$$

### The Théorème

Si  $f$  est une fonction continue et positive sur l'intervalle  $[a ; b]$ , la fonction  $F$  définie sur  $[a ; b]$  par :

$$F(x) = \int_a^x f(t)dt \text{ est dérivable sur } [a ; b], \text{ et, pour tout réel } x \in [a ; b], \text{ on a : } F'(x) = \dots\dots\dots$$

Preuve : Ce théorème est admis dans le cas général.

On le démontre ici pour une fonction continue, positive **et croissante**.

Soit  $F$  la fonction définie sur l'intervalle  $[a ; b]$  par  $F(x) = \int_a^x f(t) dt$ .

Pour  $x$  fixé, calculons  $\frac{F(x+h) - F(x)}{h}$  avec  $h \neq 0$ ,  $x \in [a ; b]$  et  $x+h \in [a ; b]$ .

• **Premier cas :  $h$  strictement positif**, soit  $a \leq x < x+h \leq b$ .

$F(x+h) = \int_a^{x+h} f(t) dt$  est l'aire entre l'axe des abscisses et la courbe  $\mathcal{C}_f$  sur l'intervalle  $[a ; x+h]$ .

$F(x) = \int_a^x f(t) dt$  est l'aire entre l'axe des abscisses et la courbe  $\mathcal{C}_f$  sur l'intervalle  $[a ; x]$ .

La différence  $\Delta = F(x+h) - F(x)$  est donc, par additivité de

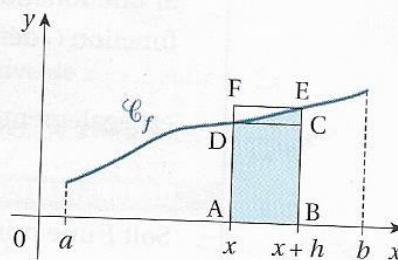
l'aire, l'aire de la partie du plan coloriée en bleu sur la figure ci-contre.

La fonction  $f$  est croissante, donc pour tout  $z$  compris entre  $x$  et  $x+h$  :  $f(x) \leq f(z) \leq f(x+h)$ .

Ce qui permet de dire que  $\Delta$  est comprise entre  $h \times f(x)$ , l'aire du rectangle ABCD, et  $h \times f(x+h)$ , l'aire du rectangle ABEF.

En divisant la double inégalité  $h \times f(x) \leq F(x+h) - F(x) \leq h \times f(x+h)$  par  $h > 0$ , on obtient :

$$f(x) \leq \frac{F(x+h) - F(x)}{h} \leq f(x+h)$$



Comme la fonction  $f$  est continue en  $x$ , lorsque  $h$  tend vers 0,  $f(x+h)$  tend vers  $f(x)$ .

Par le théorème d'encadrement des limites, on en déduit  $\lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ h > 0}} \frac{F(x+h) - F(x)}{h} = f(x)$ .

- **Deuxième cas :  $h$  strictement négatif**, soit  $a \leq x+h < x \leq b$ .

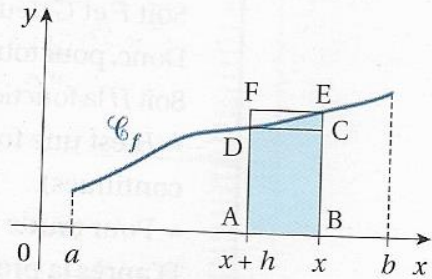
$\Delta = F(x+h) - F(x)$  est l'opposé de l'aire de la partie du plan coloriée en bleu sur la figure ci-contre.

La fonction  $f$  est croissante, donc pour tout  $z$  compris entre  $x+h$  et  $x$  :  $f(x+h) \leq f(z) \leq f(x)$ .

Ce qui permet de dire que  $-\Delta$  est compris entre  $(-h) \times f(x+h)$ , l'aire du rectangle ABCE, et  $(-h) \times f(x)$ , l'aire du rectangle ABDF.

En divisant la double inégalité  $(-h) \times f(x+h) \leq -[F(x+h) - F(x)] \leq (-h) \times f(x)$  par  $-h > 0$ , on obtient :

$$f(x+h) \leq \frac{F(x+h) - F(x)}{h} \leq f(x)$$



Comme la fonction  $f$  est continue en  $x$ , lorsque  $h$  tend vers 0,  $f(x+h)$  tend vers  $f(x)$ .

Par le théorème d'encadrement des limites, on en déduit  $\lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ h < 0}} \frac{F(x+h) - F(x)}{h} = f(x)$ .

- D'après l'étude des deux cas, la fonction  $F$  est dérivable en tout  $x$  de  $[a; b]$  et  $F'(x) = f(x)$ . ■

## II - Lien entre primitives et intégrales

### Propriété

Soit  $f$  une fonction continue et positive sur un intervalle  $I$  de  $\mathbb{R}$ , et  $a$  un réel appartenant à  $I$ .

La fonction  $F$  définie sur  $I$  par :  $F(x) = \int_a^x f(t)dt$  est **LA primitive de  $f$  sur  $I$  qui s'annule en  $a$** .

Remarque : cela établit que toute fonction continue et positive sur un intervalle admet des primitives.

Preuve :

Toute fonction continue sur un intervalle  $I$  admet des primitives sur cet intervalle  $I$ .

Ce point est très utile en pratique.

Sa démonstration est plus délicate et sera donc admise.

**Théorème (qui permet de calculer des intégrales).**

Soit  $f$  une fonction continue et positive sur un intervalle  $[a ; b]$ .

♥♥♥♥♥  $\int_a^b f(x)dx = \dots\dots\dots$  ♥♥♥♥♥ où  $F$  est une primitive quelconque de  $f$  sur  $[a ; b]$ .

On convient de noter :  $[F(x)]_a^b$  la quantité  $F(b) - F(a)$ .

On écrira donc : ♥♥♥♥♥.....♥♥♥♥♥

Cette dernière relation est parfois appelée formule de *Newton-Leibniz*.

Preuve :

✂-----

Remarques

Le réel  $[F(x)]_a^b = F(b) - F(a)$  **ne dépend pas de la primitive de  $f$  choisie.**

On admettra que ce théorème reste vrai pour toute fonction  $f$  continue sur  $[a ; b]$ , même si  $f$  n'est pas de signe positif sur  $[a ; b]$ .

Cela amène naturellement à la définition de l'intégrale de  $f$  sur l'intervalle  $[a ; b]$  :

Définition

Soit  $f$  une fonction continue sur un intervalle  $I$ , et  $a$  et  $b$  deux réels de cet intervalle, et  $F$  une primitive de  $f$  sur  $I$ .

♥♥♥♥♥  $\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$  où  $F$  une primitive de  $f$  sur  $I$ . ♥♥♥♥♥



Bien retenir :  $\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$ , où  $F$  est une primitive quelconque de  $f$  sur  $I$ . En pratique, pour alléger les calculs, on prend systématiquement la constante nulle dans l'expression de  $F$ .

Application fondamentale au calcul d'intégrales :

**Exercice 2**

Calculer les intégrales suivantes :

$$\int_0^1 (x^2 + 3x + 1)dx \quad ; \quad \int_0^1 e^{-x} dx \quad ; \quad \int_1^2 \left(\frac{3}{x} - x + \frac{1}{x^3}\right)dx \quad ; \quad \int_0^1 \frac{2x+1}{x^2+x+4} dx \quad ; \quad \int_0^1 3xe^{-x^2} dx \quad ; \quad \int_1^e \frac{1+\ln(x)}{x} dx \quad ;$$

✂-----

### III – Propriétés de l'intégrale

#### Propriété

Soit  $f$  une fonction continue sur un intervalle  $I$ . Pour tout nombre  $a$  et  $b$  appartenant à  $I$ , on a :

- ♥♥♥  $\int_a^a f(x)dx = \dots$  ♥♥♥

- ♥♥♥  $\int_b^a f(x)dx = \dots$  ♥♥♥

Preuve :

✂ -----

#### Propriété " Relation de Chasles "

Soit  $f$  une fonction continue sur un intervalle  $I$ . Pour tout nombre  $a$ ,  $b$  et  $c$  dans  $I$  on a :

♥♥♥♥♥

♥♥♥♥♥

Par analogie avec les vecteurs, cette relation est appelée la relation de Chasles.

Preuve :

✂ -----

#### Propriété fondamentale (appelée propriété de linéarité de l'intégrale)

Soit  $f$  et  $g$  deux fonctions continues sur un intervalle  $I$ , et  $k$  un réel quelconque.

Pour tous nombres  $a$  et  $b$  situés dans  $I$ , on a :

- ♥♥♥  $\int_a^b (f(x) + g(x))dx =$

- ♥♥♥  $\int_a^b k \times f(x)dx =$

En particulier, ♥♥♥  $\int_a^b (kf(x) + g(x))dx =$  ♥♥♥

Ces propriétés se résument en disant : propriétés de **linéarité de l'intégrale**.

Preuve :

✂ -----

#### Exercice 3

Soit  $(u_n)$  la suite définie sur  $\mathbb{N}$  par : pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,  $u_n = \int_0^1 \frac{e^{-nx}}{1+e^{-x}} dx$ .

a) Déterminer  $u_0 + u_1$ .

b) Calculer  $u_1$ . En déduire  $u_0$ .

**Signe d'une fonction, signe d'une intégrale et inégalités**

Soit  $a$  et  $b$  deux réels tels que :  $a \leq b$ .

- ♥♥♥♥♥ Si pour tout réel  $x \in [a ; b]$ ,  $f(x) \geq 0$ , alors.....(**propriété de positivité de l'intégrale**). ♥♥♥♥♥
- ♥♥♥♥♥ Si pour tout réel  $x \in [a ; b]$ ,  $f(x) \leq 0$ , alors.....♥♥♥♥♥

Preuve :

✂-----



On retiendra que **lorsqu'on intègre dans le bon ordre** (c'est-à-dire quand  $a \leq b$ ), **une fonction de signe constant, l'intégrale de cette fonction a le même signe que cette dernière.**

♥♥♥♥♥ **Propriété (croissance de l'intégrale)** ♥♥♥♥♥

Soit  $a$  et  $b$  deux réels tels que  $a \leq b$ .

Soit  $f$  et  $g$  deux fonctions continues sur  $[a ; b]$ , telles que pour tout réel  $x \in [a ; b]$ , on ait :  $f(x) \leq g(x)$ .

Alors : .....

Retenir : Lorsqu'on intègre dans le bon ordre, **l'intégrale conserve le sens des inégalités.**

Preuve :

✂-----

**Corollaire**

Soit  $m$  et  $M$  deux réels. Si pour tout réel  $x$  de  $[a ; b]$ , on a :  $m \leq f(x) \leq M$ , alors.....

Preuve :

**Exercice 4**

a) Démontrer que :  $0 \leq \int_1^e \ln(x) dx \leq e - 1$ . On commencera par se demander à quel intervalle  $x$  appartient-il ?

b) Justifier que pour tout réel  $t \geq 0$ ,  $\int_0^t x e^{-x} dx \geq 0$ .

c1) Démontrer que, pour tout entier  $k$  supérieur ou égal à 1, on a :  $\frac{1}{k+1} \leq \int_k^{k+1} \frac{1}{x} dx \leq \frac{1}{k}$ .

c2) En déduire que pour tout entier naturel  $n$  non nul,  $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \geq \ln(n+1)$ , puis en déduire la nature et la limite de la suite  $(u_n)$  définie pour tout entier naturel  $n$  non nul par :  $u_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$ .

**Remarque** : les questions  $c_1$  et  $c_2$  peuvent être à la base d'un très joli développement au grand oral : Comment l'infini nous permet-il d'appréhender de nouvelles notions mathématiques (ici les séries) ?

L'exemple précédent montre que non, on appelle série harmonique  $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k}$ .

Par-contre, la série de Riemann  $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2}$  elle converge ! En posant  $v_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2}$  pour tout entier  $n$  non nul, on peut facilement montrer que  $(v_n)$  est une suite croissante, et que  $v_n \leq 2 - \frac{1}{n} < 2$ , en remarquant que :

$\frac{1}{k^2} \leq \frac{1}{k-1} - \frac{1}{k}$  pour tout entier  $k$  supérieur ou égal à 2.

d) Vrai ou faux ? : A-t-on :  $\int_a^b (f(x))^2 dx = (\int_a^b f(x) dx)^2$  ? Justifier.

" Si  $f$  et  $g$  sont continues sur  $[0 ; 1]$  et si  $\int_0^1 f(x) dx = \int_0^1 g(x) dx$ , alors  $f = g$  sur  $[0 ; 1]$ ".

✂ -----

**IV- L'intégration par parties**

Voici un **puissant outil** qui permet de calculer certaines intégrales de fonctions écrites sous la forme d'un produit de deux fonctions.

**Formule de l'intégration par parties (notée IPP), très importante pour le bac et le supérieur !!!**

Soit  $u$  et  $v$  deux fonctions définies sur un même intervalle  $[a ; b]$ , dérivables sur cet intervalle, et telles que  $u'$  et  $v'$  soient continues sur  $[a ; b]$ .

On a : ♥♥♥♥♥  $\int_a^b u(x)v'(x) dx =$

♥♥♥♥♥

Preuve :

✂ -----

Remarques : On aurait aussi pu donner comme relation :

**La formule de l'intégration par parties permet donc parfois, de calculer l'intégrale d'une fonction qui est écrite sous la forme d'un produit de deux fonctions.**

### Exemples d'utilisation

1) A l'aide d'une intégration par parties, calculer les intégrales suivantes :

$$I = \int_0^1 x e^x dx \quad ; \quad J = \int_1^e \ln(x) dx \quad (\heartsuit \heartsuit \text{retenez bien l'astuce classique ici} \heartsuit \heartsuit).$$

$$K = \int_1^e (x^2 + 2x) \ln(x) dx$$

2) En effectuant deux intégrations par parties successives, calculer  $L = \int_0^1 x^2 e^{-x} dx$

✂-----

### Exercice 5

Soit  $x > 0$ .

a) Effectuer une intégration par parties pour calculer :  $I(x) = \int_1^x \frac{\ln(t)}{t^2} dt$

b) En déduire les primitives de la fonction  $f$  définie sur  $]0 ; +\infty[$  par :  $f(x) = \frac{\ln(x)}{x}$  .

✂-----

### Exercice 6

On pose, pour tout entier naturel  $n$  non nul :

$$I_n = \frac{1}{n!} \int_0^1 (1-x)^n e^{-x} dx$$

a) A l'aide d'une intégration par parties, calculer  $I_1$ .

b) Montrer que pour tout entier naturel  $n \geq 1$ , on a :  $I_{n+1} = \frac{1}{(n+1)!} - I_n$  .

c) En déduire les valeurs de  $I_2$  et  $I_3$ .

✂-----

### Exercice 7

Pour tout entier naturel  $n$ , on considère les intégrales suivantes :

$$I_n = \int_0^\pi e^{-nx} \sin(x) dx, \quad J_n = \int_0^\pi e^{-nx} \cos(x) dx.$$

1. Calculer  $I_0$ .

2. a. Justifier que, pour tout entier naturel  $n$ , on a  $I_n \geq 0$ .

b. Montrer que, pour tout entier naturel  $n$ , on a  $I_{n+1} - I_n \leq 0$ .

c. Déduire des deux questions précédentes que la suite  $(I_n)$  converge.

3. a. Montrer que, pour tout entier naturel  $n$ , on a :

$$I_n \leq \int_0^\pi e^{-nx} dx.$$

- b. Montrer que, pour tout entier naturel  $n \geq 1$ , on a :

$$\int_0^\pi e^{-nx} dx = \frac{1 - e^{-n\pi}}{n}.$$

- c. Dédurre des deux questions précédentes la limite de la suite  $(I_n)$ .

4. a. En intégrant par parties l'intégrale  $I_n$  de deux façons différentes, établir les deux relations suivantes, pour tout entier naturel  $n \geq 1$  :

$$I_n = 1 + e^{-n\pi} - nJ_n \quad \text{et} \quad I_n = \frac{1}{n}J_n$$

- b. En déduire que, pour tout entier naturel  $n \geq 1$ , on a

$$I_n = \frac{1 + e^{-n\pi}}{n^2 + 1}$$

5. On souhaite obtenir le rang  $n$  à partir duquel la suite  $(I_n)$  devient inférieure à 0,1. Recopier et compléter la cinquième ligne du script Python ci-dessous avec la commande appropriée.

```

1  from math import *
2  def seuil() :
3      n = 0
4      I = 2
5      ...
6      n = n+1
7      I = (1+exp(-n*pi))/(n*n+1)
8  return n

```

## V - Compléments

### a) Valeur moyenne d'une fonction continue sur un intervalle

#### Définition

Soit  $f$  une fonction continue sur un intervalle  $[a ; b]$  non réduit à un point.

♥♥ On appelle valeur moyenne de  $f$  sur l'intervalle  $[a ; b]$ , le réel noté  $\mu$  défini par :

♥♥  $\mu =$

♥♥

Exemple

Calculer la valeur moyenne de la fonction carrée sur l'intervalle  $[0 ; 1]$ .

Interprétation géométrique de la valeur moyenne d'une fonction dans le cas d'une fonction continue et positive sur  $[a ; b]$ .

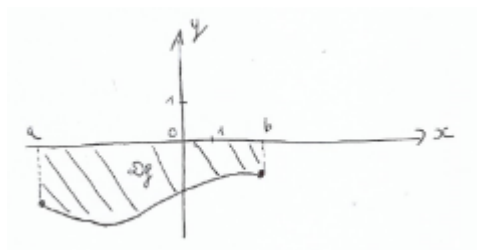
✂-----

Remarque : Soit  $f$  est continue sur  $[a ; b]$ , et  $m$  et  $M$  deux réels. Si pour tout réel  $x$  appartenant à  $[a ; b]$ , on a :  $m \leq f(x) \leq M$ , que peut-on dire de la valeur moyenne de  $f$  sur  $[a ; b]$  ?

b) Intégrale d'une fonction de signe quelconque sur un intervalle et aire.

α) Cas d'une fonction à valeurs négatives sur  $[a ; b]$

Soit  $f$  une fonction continue et **négative** sur  $[a ; b]$ , et  $C_f$  sa courbe représentative, et  $D_f$  le domaine au-dessus de la courbe compris entre les verticales d'équation  $x = a$  et  $x = b$  et l'axe des abscisses.



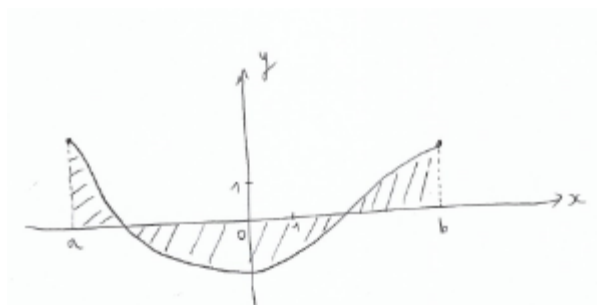
On a :  $Aire(D_f) =$

Donc, si  $f$  est continue et négative sur  $[a ; b]$ ,  $\int_a^b f(x)dx =$

### β) Cas d'une fonction de signe variable sur $[a ; b]$

Soit  $f$  une fonction de signe variable sur  $[a ; b]$ . L'aire du domaine  $D$  coloré ci-dessous est donné par :

Aire ( $D$ ) =



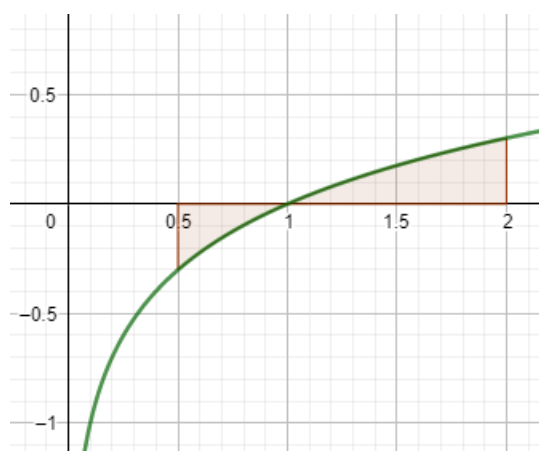
On a donc dans cet exemple :  $\int_a^b f(x)dx =$

**Méthode :** On découpe  $[a ; b]$  en intervalles sur lesquels  $f$  garde un signe constant (ce sera toujours possible en terminale), et on se sert de la définition de l'intégrale d'une fonction à valeurs positives (aire sous la courbe) et de l'intégrale d'une fonction à valeurs négatives (opposé de l'aire au-dessus de la courbe).

De façon plus générale, on peut retenir que : ♥♥ Aire ( $D$ ) =  $\int_a^b |f(x)|dx$ . ♥♥

### Exemple

Calculer l'aire du domaine ci-dessous associé à la fonction  $f$  définie sur  $]0 ; +\infty[$  par :  $f(x) = \ln(x)$ .



c) Aire d'une portion du plan autre qu'un domaine.

**Propriété**

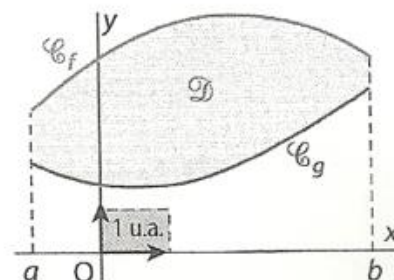
**Aire d'un domaine entre deux courbes sur  $[a; b]$**

Si  $\mathcal{C}_f$  est au-dessus  $\mathcal{C}_g$  sur  $[a; b]$ , alors l'aire du domaine  $\mathcal{D}$  délimité par  $\mathcal{C}_f$  et  $\mathcal{C}_g$  sur  $[a; b]$  est  $\text{aire}(\mathcal{D}) = \int_a^b (f - g)(t) dt$ .

En effet, lorsque  $f$  et  $g$  sont positives (voir schéma ci-contre),

$$\text{aire}(\mathcal{D}) = \int_a^b f(t) dt - \int_a^b g(t) dt = \int_a^b (f(t) - g(t)) dt.$$

On admet que ce résultat reste valable dans le cas général.



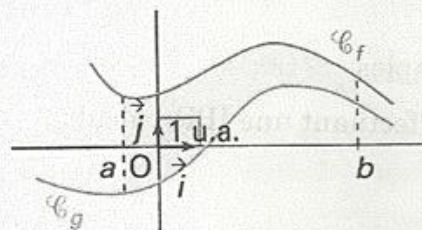
Soit  $I$  un intervalle de  $\mathbb{R}$ , et  $a, b$  deux réels appartenant à  $I$  tels que  $a \leq b$ .

Soit  $f$  et  $g$  deux fonctions définies et continues sur  $I$  telles que :

pour tout  $x$  appartenant à  $[a; b]$ ,  $g(x) \leq f(x)$ .

Soit  $\mathcal{C}_f$  et  $\mathcal{C}_g$  les courbes représentatives des fonctions  $f$  et  $g$  dans le plan muni d'un repère orthogonal

$(O; \vec{i}, \vec{j})$ , et  $\mathcal{D}$  le domaine du plan délimité par  $\mathcal{C}_f$ ,  $\mathcal{C}_g$ , et les droites d'équations  $x = a$  et  $x = b$  :

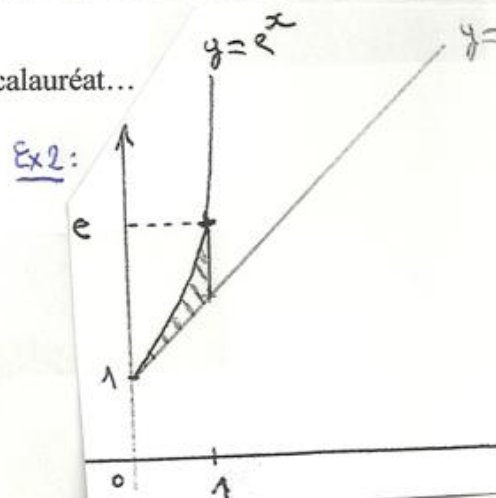
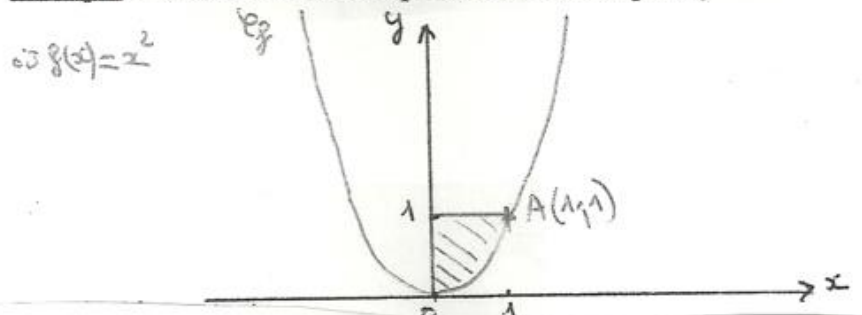


$$\mathcal{D} = \{M(x; y) \in \mathcal{P} \text{ tels que } a \leq x \leq b \text{ et } g(x) \leq y \leq f(x)\}.$$

L'aire  $\mathcal{A}(\mathcal{D})$ , en u.a., du domaine  $\mathcal{D}$  est égale à  $\int_a^b (f(x) - g(x)) dx$ .

Application : attention, il y a souvent une question de ce genre au baccalauréat...

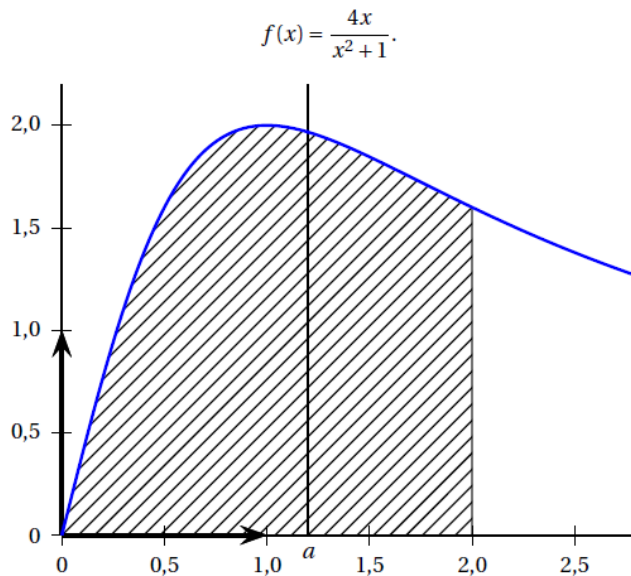
Exemple : Calculer l'aire de la partie suivante du plan



## Exercices sur l'intégration

### Exercice I

La courbe ci-dessous est la représentation graphique, dans un repère orthonormé, de la fonction  $f$  définie par :



La valeur exacte du réel positif  $a$  tel que la droite d'équation  $x = a$  partage le domaine hachuré en deux domaines d'aires égales est :

Réponse A :  $\sqrt{\frac{3}{2}}$

Réponse B :  $\sqrt{\sqrt{5}-1}$

Réponse C :  $\ln 5 - 0,5$

Réponse D :  $\frac{10}{9}$

✂

### Exercice II

On considère la suite  $(u_n)$  définie par

$$u_n = \int_1^2 \frac{1}{x^{n+1}} \ln(x) dx \text{ pour tout entier naturel } n.$$

1. Démontrer que  $u_0 = \frac{1}{2} [\ln(2)]^2$ .

Interpréter graphiquement ce résultat.

2. Prouver que, pour tout entier naturel  $n$  et pour tout nombre réel  $x$  de l'intervalle  $[1; 2]$ , on a

$$0 \leq \frac{1}{x^{n+1}} \ln(x) \leq \frac{1}{x^{n+1}} \ln(2).$$

3. En déduire que pour tout entier naturel  $n$  non nul  $0 \leq u_n \leq \frac{\ln(2)}{n} \left(1 - \frac{1}{2^n}\right)$ .

4. Déterminer la limite de la suite  $(u_n)$ .

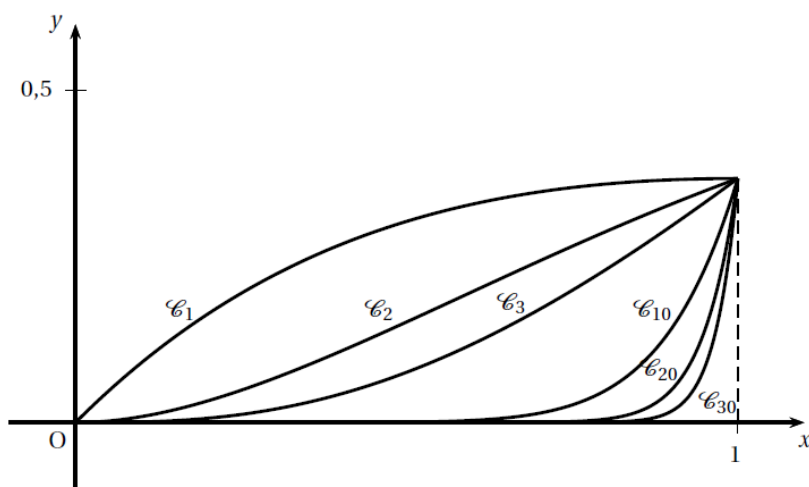
**Exercice III (exercice fondamental dans la démarche utilisée)**

On désigne par  $(I_n)$  la suite définie pour tout entier  $n$  supérieur ou égal à 1 par

$$I_n = \int_0^1 x^n e^{-x} dx.$$

1. Calculer  $I_1$ .
2. Dans cette question, toute trace de recherche ou d'initiative, même incomplète, sera prise en compte dans l'évaluation.

Sur le graphique ci-dessous, on a représenté les portions des courbes  $\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, \mathcal{C}_3, \mathcal{C}_{10}, \mathcal{C}_{20}, \mathcal{C}_{30}$  comprises dans la bande définie par  $0 \leq x \leq 1$ .



- a. Formuler une conjecture sur le sens de variation de la suite  $(I_n)$  en décrivant sa démarche.
- b. Démontrer cette conjecture.
- c. En déduire que la suite  $(I_n)$  est convergente.
- d. Déterminer  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (I_n)$ .

✂

**Exercice IV**

Soit  $a$  un nombre réel compris entre 0 et 1. On note  $f_a$  la fonction définie sur  $\mathbf{R}$  par :

$$f_a(x) = ae^{ax} + a.$$

On note  $I(a)$  l'intégrale de la fonction  $f_a$  entre 0 et 1 :

$$I(a) = \int_0^1 f_a(x) dx.$$

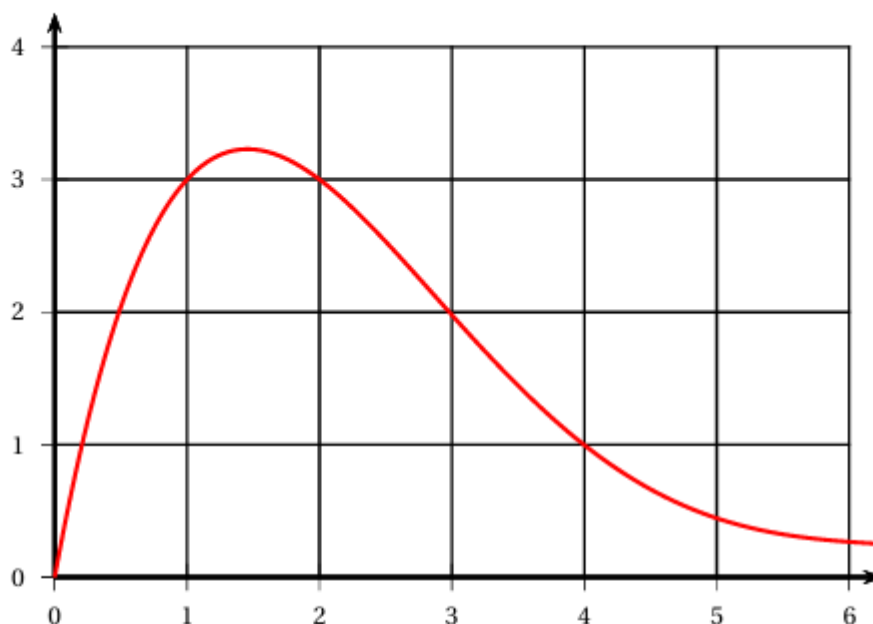
1. On pose dans cette question  $a = 0$ . Déterminer  $I(0)$ .
2. On pose dans cette question  $a = 1$ .  
On étudie donc la fonction  $f_1$  définie sur  $\mathbf{R}$  par :

$$f_1(x) = e^x + 1.$$

- a. Sans étude, représenter graphiquement sur la copie la fonction  $f_1$  dans un repère orthogonal et faire apparaître le nombre  $I(1)$ .
- b. Calculer la valeur exacte de  $I(1)$ , puis arrondir au dixième.
3. Existe-il une valeur de  $a$  pour laquelle  $I(a)$  est égale à 2 ?  
Si oui, en donner un encadrement d'amplitude  $10^{-2}$ .

**Bribes de QCM / vrai-faux :**

2. La courbe d'une fonction  $f$  définie sur  $[0 ; +\infty[$  est donnée ci-dessous.



Un encadrement de l'intégrale  $I = \int_1^5 f(x) dx$  est :

A.  $0 \leq I \leq 4$

B.  $1 \leq I \leq 5$

C.  $5 \leq I \leq 10$

D.  $10 \leq I \leq 15$

3. On considère la fonction  $g$  définie sur  $\mathbb{R}$  par  $g(x) = x^2 \ln(x^2 + 4)$ .

Alors  $\int_0^2 g'(x) dx$  vaut, à  $10^{-1}$  près :

A. 4,9

B. 8,3

C. 1,7

D. 7,5

On considère la suite  $(v_n)$  définie pour tout entier  $n \geq 1$  par

$$v_n = \int_1^n \ln x dx.$$

**Affirmation 5 :** La suite  $(v_n)$  est croissante.

**Exercice V** (Là on fait de belles Mathématiques !)**122 Irrationalité du nombre e**

Pour tout entier naturel  $n \geq 1$ , on note :

$$I_n = \int_0^1 x^n e^{1-x} dx.$$

1. Calculer  $I_1$ .
2.  $n$  est un nombre entier naturel tel que  $n \geq 1$ .

a) Démontrer que pour tout réel  $x$  de  $[0; 1]$ ,

$$x^n \leq x^n e^{1-x} \leq e x^n.$$

b) En déduire que :

$$\frac{1}{n+1} \leq I_n \leq \frac{e}{n+1}.$$

3. À l'aide de la méthode d'intégration par parties, démontrer que pour tout entier naturel  $n \geq 1$ ,

$$I_{n+1} = (n+1) I_n - 1.$$

4. Pour tout entier naturel  $n \geq 1$ , on note :

$$k_n = n! e - I_n.$$

a) Exprimer  $k_{n+1}$  en fonction de  $k_n$ .

b) Calculer  $k_1$ . Démontrer par récurrence que pour tout nombre  $n$  de  $\mathbb{N}^*$ ,  $k_n$  est un nombre entier naturel.

c) Avec les questions 4. b) et 2. b), démontrer que pour tout entier naturel  $n \geq 2$ , le nombre  $n! e = k_n + I_n$  n'est pas un entier naturel.

5. a)  $p$  et  $q$  sont deux nombres entiers naturels non nuls.

Démontrer que pour tout entier naturel  $n \geq q$ , le nombre  $\frac{n! p}{q}$  est un entier naturel.

b) En déduire alors que le nombre  $e$  est irrationnel.

La découverte des nombres irrationnels (ou incommensurables) remonte sans doute à l'époque de Pythagore avec le calcul de la longueur de la diagonale du carré de côté 1, cette longueur étant égale à  $\sqrt{2}$ . L'irrationalité du nombre  $e$  a été prouvée par Leonhard Euler en 1737.

Dédicace à tous ceux qui ne visent que le côté utilitaire des choses (ça sert à quoi ?), ce bel exercice vous montre que les Mathématiques, le calcul, et le raisonnement logique existent indépendamment des applications que l'on peut en donner, et débouchent parfois sur des résultats spectaculaires et qui ne servent... à rien en pratique !

Etudier les Mathématiques pour ce qu'elles sont, et non pas pour ce à quoi elles peuvent servir, est une forme de curiosité d'esprit qui permet de saisir les multiples facettes et la beauté de cette discipline. Le corollaire à tout cela est de passer du temps à étudier et comprendre des concepts abstraits. Comme le disait Virgile, « *Labor omnia vincit improbus* ».

À l'heure du consumérisme avancé, des addictions aux smartphones et à leurs applications souvent débiles et abrutissantes, et de la néfaste inintelligence artificielle, les seules questions de l'utilité à court terme et de l'instantanéité semblent intéresser les individus.

Espérons que le travail effectué cette année en Mathématiques aura su vous convaincre qu'étudier, c'est sortir de l'instantanéité et du consumérisme.

Les six cents pages écrites cette année, auront essayé, le plus souvent possible, d'être fidèle à l'essence des Mathématiques.

Je dédie ce cours à la mémoire de Marc Langlet (†2023), regretté professeur de Mathématiques de ma jeunesse, qui m'a tant appris et m'a communiqué sa passion pour les Mathématiques et leurs enseignements.

**Les exercices suivants (délicieux) sont des exercices classiques de MPSI/PCSI. A vous de vous exercer !**

**Exercice 45** Soit  $n$  et  $p$  sont des entiers naturels, on pose :  $I_{n,p} = \int_0^1 x^n(1-x)^p dx$ .

1. Calculer  $I(N,0)$  pour tout entier naturel  $N$ .
2. Déterminer une relation de récurrence entre  $I_{n,p}$  et  $I_{n+1,p-1}$ .
3. En déduire la valeur de  $I_{n,p}$  pour tous les couples  $(n,p)$ .

**Exercice 46** On définit la suite  $(u_n)_{n \geq 1} : u_n = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \dots + \frac{(-1)^{n-1}}{n} = \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1}}{k}$ .

1. Pour  $x \neq -1$  et  $n \geq 1$ , établir :  $1 - x + x^2 - x^3 + \dots + (-1)^{n-1}x^{n-1} = \frac{1}{1+x} - \frac{(-x)^n}{1+x}$ .
2. En déduire :  $\int_0^1 \frac{(-x)^n}{1+x} dx = \ln 2 - u_n$ .
3. Justifier l'inégalité  $\left| \int_0^1 \frac{(-x)^n}{1+x} dx \right| \leq \frac{1}{n+1}$ . Montrer que  $(u_n)_{n \geq 1}$  converge : limite ?

**Exercice 49** On pose, pour tout entier  $n \geq 0$ ,  $u_n = \int_1^e x^2 \ln^n x dx$ .

1. Calculer  $u_0$  et  $u_1$ .
2. Montrer que :  $\forall x \in [1, e], \ln x \leq \frac{x}{e}$ .  
En déduire un encadrement de  $u_n$  permettant de déterminer la limite de la suite  $(u_n)_{n \geq 0}$ .
3. Montrer que :  $\forall n \geq 0, u_{n+1} = \frac{e^3}{3} - \frac{n+1}{3}u_n$ .  
En déduire l'existence et la valeur de  $C = \lim_{n \rightarrow \infty} (nu_n)$  : on note  $u_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{C}{n}$ .