Exercice 1 :

- Construire le polynôme d'interpolation P_2 basé sur le système de trois points : $(0,2)$, $(1,1)$ et $(2,2)$, en utilisant successivement les trois méthodes (directe, Lagrange, Newton).

Méthode directe : $P_2(x) = ax^2 + bx + c$ et donc :

$$\begin{cases} P_2(0) = 2 \\ P_2(1) = 1 \\ P_2(2) = 2) \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} c = 2, \\ a+b+c = 1 \\ 4a+2b+c = 2 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} c = 2, \\ a = 1 \\ b = -2 \end{cases}$$

Soit :

$$P_2(x) = ax^2 + bx + c = x^2 - 2x + 2$$

Les polynômes de base de Lagrange sont donnés par :

$$L_0(x) = \frac{(x-1)(x-2)}{(0-1)(0-2)} = \frac{1}{2}(x^2 - 3x + 2)$$

$$L_1(x) = \frac{(x-0)(x-2)}{(1-0)(2-1)} = 2x - x^2$$

$$L_2(x) = \frac{(x-0)(x-1)}{(2-0)(2-1)} = \frac{1}{2}(x^2 - x)$$

et :

$$P_2(x) = 2L_0(x) + L_1(x) + 2L_2(x) = 2\frac{1}{2}(x^2 - 3x + 2) + 2x - x^2 + 2\frac{1}{2}(x^2 - x) = x^2 - 2x + 2$$

Méthode de Newton : Calculons d'abord les différences divisées :

0	2			
1	1	$\frac{1-2}{1-0} = -1$		
2	2	$\frac{2-1}{2-1} = 1$	$\frac{1-(-1)}{2-0} = 1$	

et :

$$P_2(x) = 2 \times 1 + (-1) \times (x-0) + 1 \times (x-0)(x-1) = 2 - x + x^2 - x + 1 = x^2 - 2x + 2$$

- Déterminer le polynôme d'interpolation P_3 basé sur le système de points : $(0,2)$, $(1,1)$, $(2,2)$ et $(3,3)$.

Le meilleur choix et d'appliquer la méthode de Newton, en complétant le tableau précédent avec le point (3.3). Méthode de Newton : Calculons d'abord les différences divisées :

0	2			
1	1	$\frac{1-2}{1-0} = -1$		
2	2	$\frac{2-1}{2-1} = 1$	$\frac{1-(-1)}{2-0} = 1$	
3	3	$\frac{3-2}{3-2} = 1$	$\frac{1-1}{3-1} = 0$	$\frac{0-1}{3-0} = \frac{-1}{3}$

$$P_3(x) = 2 - (x-x_0) + 1(x-x_0)(x-x_1) - \frac{1}{3}(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2) = 2 - x + x(x-1) - \frac{1}{3}x(x-1)(x-2)$$

$$P_3(x) = \frac{-1}{3}x^3 + 2x^2 + \frac{-8}{3}x + 2$$

Méthode directe : Le polynôme P_3 s'écrit :

$$P_3(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

On a :

$$\begin{cases} f(0) = 2 \Rightarrow d = 2 \\ f(1) = 1 \Rightarrow a+b+c+d = 1 \\ f(2) = 2 \Rightarrow 8a+4b+2c+d = 2 \\ f(3) = 3 \Rightarrow 27a+9b+3c+d = 3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d = 2 \\ a+b+c = -1 \\ 8a+4b+2c = 0 \\ 27a+9b+3c = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d = 2 \\ a+b+c = -1 \\ 6a+2b = 2 & \text{E3-2E2} \\ 24a+6b = 4 & \text{E3-3E2} \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} d = 2 \\ a+b+c = -1 \\ 6a+2b = 2 \\ 24a+6b = 4 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d = 2 \\ a+b+c = -1 \\ 6a+2b = 2 \\ 6a = -2 & \text{E4-3E3} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d = 2 \\ c = \frac{-8}{3} \\ b = 2 \\ a = \frac{-1}{3} \end{cases}$$

Donc :

$$P_3(x) = \frac{-1}{3}x^3 + 2x^2 + \frac{-8}{3}x + 2$$

Méthode de Lagrange : Calculons d'abord les polynômes caractéristiques de Lagrange :

$$L_0(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} = \frac{(x-1)(x-2)(x-3)}{(0-1)(0-2)(0-3)} = \frac{-1}{6}(x^3 - 6x^2 + 11x - 6)$$

$$L_1(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_0)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} = \frac{(x-0)(x-2)(x-3)}{(1-0)(1-2)(1-3)} = \frac{1}{2}(x^3 - 5x^2 + 6x)$$

$$L_2(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)} = \frac{(x-0)(x-1)(x-3)}{(2-0)(2-1)(2-3)} = \frac{-1}{2}(x^3 - 4x^2 + 3x)$$

$$L_3(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)} = \frac{(x-0)(x-1)(x-2)}{(3-0)(3-1)(3-2)} = \frac{1}{6}(x^3 - 3x^2 + 2x)$$

D'où :

$$P_3(x) = 2L_0(x) + 1L_1(x) + 2L_2(x) + 3L_3(x)$$

$$P_3(x) = \frac{-1}{3}(x^3 - 6x^2 + 11x - 6) + \frac{1}{2}(x^3 - 5x^2 + 6x) - (x^3 - 4x^2 + 3x) + \frac{1}{2}(x^3 - 3x^2 + 2x) = \frac{-1}{3}x^3 + 2x^2 + \frac{-8}{3}x + 2$$

Exercice 2 :

Déterminer le polynôme d'interpolation de Lagrange $P_2(x)$ de $f(x) = \dfrac{1}{1+x}$ par rapport aux points 0; $\frac{3}{4}$; 1.

- Représenter sur un même graphique le polynôme et la fonction interpolée.
- Comparer, à l'aide d'une calculatrice, $f(\frac{1}{2})$ et $P_2(\frac{1}{2})$.
- Rappeler la formule de l'erreur et donner une majoration de $|E(x)| = |f(x) - P_2(x)|$.
- Évaluer l'erreur commise en considérant les points support : 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ et 1.

Déterminer le polynôme d'interpolation de Lagrange $P_2(x)$ de $f(x) = \dfrac{1}{1+x}$ par rapport aux points 0; $\frac{3}{4}$; 1.

Polynômes caractéristiques de Lagrange par rapport aux points 0; $\frac{3}{4}$ et 1 :

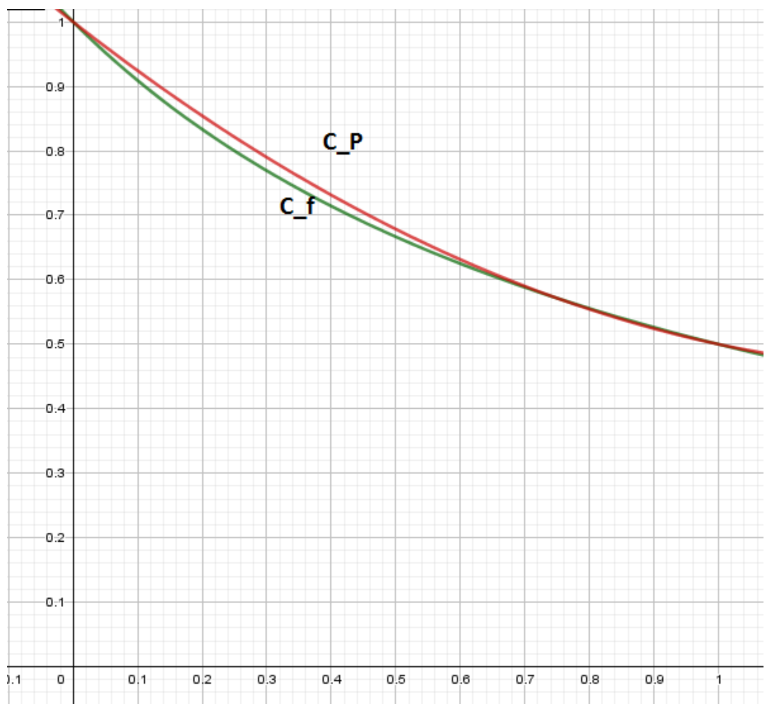
$$L_0(x) = \frac{(x-\frac{3}{4})(x-1)}{(0-\frac{3}{4})(0-1)} = \frac{4}{3}\left(x^2 - \frac{7}{4}x + \frac{3}{4}\right)$$

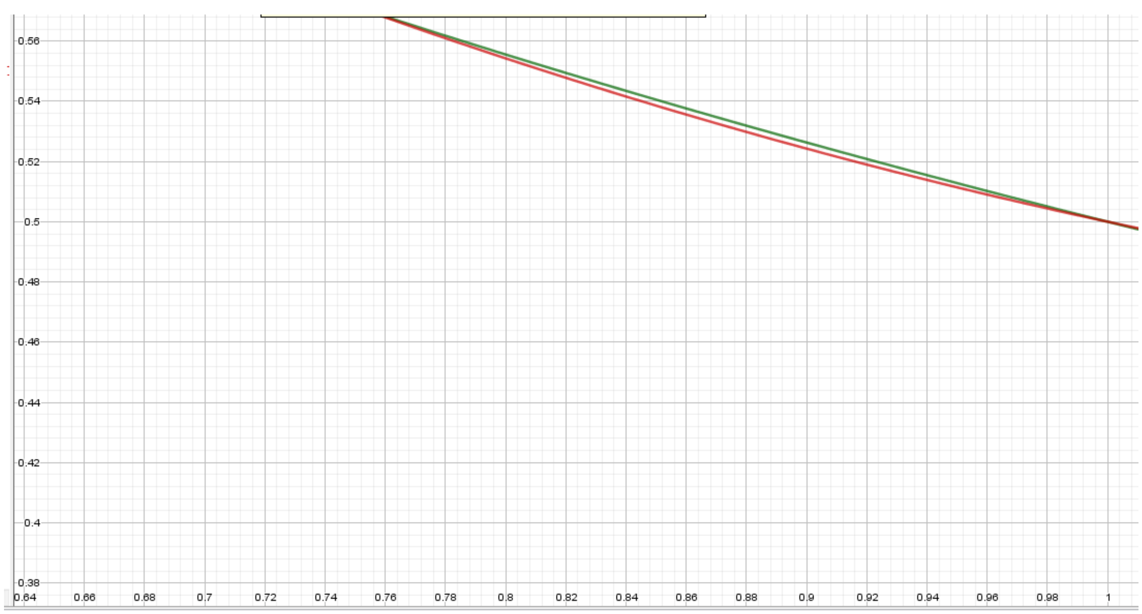
$$L_1(x) = \frac{(x-0)(x-1)}{(\frac{3}{4}-0)(\frac{3}{4}-1)} = \frac{-16}{3}\left(x^2 - x\right)$$

$$L_2(x) = \frac{(x-0)(x-\frac{3}{4})}{(1-0)(1-\frac{3}{4})} = 4\left(x^2 - \frac{3}{4}x\right)$$

Donc le polynômes d'interpolation par rapport aux points $(0,1)$, $(\frac{3}{4}, \frac{4}{7})$ et $(1, \frac{1}{2})$ est donné par :
$P_2(x) = L_0(x) + \frac{4}{7}L_1(x) + \frac{1}{2}L_2(x) = \frac{2}{7}x^2 - \frac{11}{14}x + 1$

Représenter sur un même graphique le polynôme et la fonction interpolée ;
Les deux courbes passent pas les trois points $(0, 1)$, $(\frac{3}{4}, \frac{4}{7})$ et $(1, \frac{1}{2})$ mais elles ne sont pas confondues, il faut ajouter d'autres points (par exemple, 0.1, 0.2, 0.3,...) pour pouvoir ajuster la représentation. Il faut bien choisir l'échelle sur l'axe des ordonnées pour pouvoir distinguer les deux courbes ? elles ont trois points en commun mais leurs différence est réduite (égale à l'erreur !).
Agrandissement de la représentation dans la partie $[0.8, 1]$





Comparer, à l'aide d'une calculatrice, $f(\frac{1}{2})$ et $P_2(\frac{1}{2})$;

$$f(\frac{1}{2}) = \frac{2}{3} \sim 0,666667 \text{ et } P_2(\frac{1}{2}) = \frac{19}{28} \sim 0,678571$$

La différence entre les deux valeurs est d'ordre $0,01$ on peut dire qu'elles sont égales à 10^{-2} près ;

Rappeler la formule de l'erreur et donner une majoration de $|E(x)| = |f(x) - P_2(x)|$;
Formule générale : Il existe ξ entre compris entre le plus petit et le plus grand points d'interpolation (si les points sont ordonnés du plus petit au plus grand, en peut écrire $\xi \in [x_0, x_n]$) tel que :

$$|E_n(x)| = |f(x) - P_n(x)| = |(x - x_0)(x - x_1)....(x - x_n)| \frac{|f^{(n+1)}(\xi)|}{(n+1)!}$$

Concernant f et P_2, il existe $\xi \in [0,1]$ tel que :

$$|E_2(x)| = |f(x) - P_2(x)| = |(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)|\frac{|f^{(3)}(\xi)|}{(3)!} = |x(x-\frac{3}{4})(x-1)|\frac{|f^{(3)(\xi)}|}{6}$$

On a :

$$f(x) = \frac{1}{1+x} \quad f'(x) = \frac{-1}{(1+x)^2} \quad f''(x) = \frac{2}{(1+x)^3} \quad f^{(3)}(x) = \frac{-6}{(1+x)^4} \quad f^{(4)}(x) = \frac{24}{(1+x)^5} > 0$$

On en déduit que $f^{(3)}$ est croissante et pour $x \in [0,1]$ on a $f^{(3)}(0) \leq f^{(3)}(x) \leq f^{(3)}(1)$ soit $-6 \leq f^{(3)}(x) \leq \frac{-6}{16}$

Finalement,

$$|f^{(3)}(\xi)| \leq \sup_{x\in[0,1]} |f^{(3)}(x)| = 6$$

et,

$$|E_2(x)| \leq |x(x-\frac{3}{4})(x-1)|$$

A titre d'exemple, $|E_2(\frac{1}{2})| \leq \frac{1}{2}\frac{1}{4}\frac{1}{2} = \frac{1}{16} \sim 0,0625$ qui est une majoration de la valeur exacte donnée par $|E_2(\frac{1}{2})| = |f(\frac{1}{2}) - P_2(\frac{1}{2})| \sim 0,01$.

4) Évaluer l'erreur commise en considérant les points support : 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ et 1. D'après la formule du cours, il existe $\xi \in [0,1]$ tel que :

$$|E_4(x)| = |f(x) - P_4(x)| = |x(x-\frac{1}{4})(x-\frac{1}{2})(x-\frac{3}{4})(x-1)|\frac{|f^{(5)}(\xi)|}{5!}$$

On a :

$$f^{(4)}(x) = \frac{24}{(1+x)^5} \quad f^{(5)}(x) = \frac{-120}{(1+x)^6}$$

et avec un calcul d'encadrement, nous avons successivement :

$$0 \leq x \leq 1 \quad 1 \leq 1+x \leq 2 \quad 1 \leq (1+x)^6 \leq 2^6 \quad \frac{1}{64} \leq \frac{1}{(1+x)^6} \leq 1 \quad -120 \leq f^{(5)}(x) \leq \frac{-120}{64}$$

et

$$|f^{(5)}(\xi)| \leq \sup_{x\in[0,1]} |f^{(5)}(x)| = 120$$

Finalement,

$$|E_4(x)| = |f(x) - P_4(x)| \leq |x(x-\frac{1}{4})(x-\frac{1}{2})(x-\frac{3}{4})(x-1)|$$

Exercice 3 :

On considère une fonction f définie sur l'intervalle $[2, 2.4]$, dont on connaît les valeurs suivantes :

$f(2) = 5.2$, $f(2.1) = 6.4$, $f(2.2) = 5.8$, $f(2.3) = 6.1$ et $f(2.4) = 6$

1) Établir le tableau des différences finies de f ;

x_i	$f(x_i)$	DD_1	DD_2	DD_3	DD_4
2	$5,2$	$-$	$-$	$-$	$-$
$2,1$	$6,4$	$\frac{6,4-5,2}{2,1-2} = 12$	$-$	$-$	$-$
$2,2$	$5,8$	$\frac{5,8-6,4}{2,2-2,1} = -6$	$\frac{-6-12}{2,2-2} = -90$	$-$	$-$
$2,3$	$6,1$	$\frac{6,1-5,8}{2,3-2,2} = 3$	$\frac{3-(-6)}{2,3-2,1} = 45$	$\frac{45+90}{2,3-2} = 450$	$-$
$2,4$	6	$\frac{6-6,1}{2,4-2,3} = -1$	$\frac{-1-3}{2,4-2,2} = -20$	$\frac{-20-45}{2,4-2,1} = \frac{-650}{3}$	$\frac{\frac{-650}{3}-450}{2,4-2} = \frac{-5000}{3}$

2) En déduire le polynôme d'interpolation de Newton de f d'ordre 4, associé aux points $x_0 = 2$, $x_1 = 2.1$, $x_2 = 2.2$, $x_3 = 2.3$ et $x_4 = 2.4$.

Le polynôme d'interpolation est donné par la méthode de Newton :

$$P_4(x) = 5,2+12(x-2)-90(x-2)(x-2,1)+450(x-2)(x-2,1)(x-2,2)-\frac{5000}{3}(x-2)(x-2,1)(x-2,2)(x-2,3)$$

$$P_4(x) = 5,2 + 12(x-2) - 90(x^2 - 4,1x + 4,2) + 450(x^3 - 6,3x^2 + 13,22x - 9,24)$$
$$-\frac{5000}{3}(x^4 - 8,6x^3 + 27,71x^2 - 39,646x + 21,252)$$

$$P_4(x) = -\frac{5000}{3}x^4 + x^3(\frac{43000}{3} + 450) + x^2(-\frac{138550}{3} - 2835 - 90) + x(\frac{198230}{3} + 5949 + 369 + 12)$$
$$+(-\frac{106260}{3} - 4158 - 378 - 24 + 5,2)$$
$$P_4(x) = -\frac{5000x^4}{3} + \frac{44350x^3}{3} - \frac{147325x^2}{3} + \frac{217220x}{3} - \frac{199874}{5}$$

Ou en valeurs approchées des coefficients :

$$P_4(x) = -1666.67x^4 + 14783.3x^3 - 49108.3x^2 + 72406.7x - 39974.8$$

Peut-on donner, à partir du tableau précédent, les polynômes d'interpolation par rapport aux points x_0, x_1, x_2 et x_3 ?

Oui, il suffit de d'utiliser le tableau pour les différences divisées des 4 points au lieu de 5 points (en supprimant x_4, toute la ligne est à supprimer) :

x_i	$f(x_i)$	DD_1	DD_2	DD_3	DD_4
2	$5,2$	$-$	$-$	$-$	$-$
$2,1$	$6,4$	$\frac{6,4-5,2}{2,1-2} = 12$	$-$	$-$	$-$
$2,2$	$5,8$	$\frac{5,8-6,4}{2,2-2,1} = -6$	$\frac{-6-12}{2,2-2} = -90$	$-$	$-$
$2,3$	$6,1$	$\frac{6,1-5,8}{2,3-2,2} = 3$	$\frac{3-(-6)}{2,3-2,1} = 45$	$\frac{45+90}{2,3-2} = 450$	$-$
$\cancel{2,4}$	$\cancel{6}$	$\cancel{\frac{6-6,1}{2,4-2,3} = -1}$	$\cancel{\frac{-1-3}{2,4-2,2} = -20}$	$\cancel{\frac{-20-45}{2,4-2,1} = \frac{-650}{3}}$	$\cancel{\frac{\frac{-650}{3}-450}{2,4-2} = \frac{-5000}{3}}$

Donc :

$$P_3(x) = 5,2 + 12(x-2) - 90(x-2)(x-2,1) + 450(x-2)(x-2,1)(x-2,2)$$

$$P_3(x) = 450x^3 - 2925x^2 + 6330x - \frac{22774}{5}$$

Par rapport aux points x_1, x_2, x_3 et x_4 ? Expliquer la réponse.

La réponse est aussi oui mais avec une méthode différente : en effet, lorsqu'on supprime x_0, il en suffit pas de supprimer la 1ère ligne mais toutes les différences divisées qui utilisent x_0 (la première valeur de chaque colonnes ! !) :

x_i	$f(x_i)$	DD_1	DD_2	DD_3	DD_4
$\cancel{2}$	$\cancel{5,2}$	$-$	$-$	$-$	$-$
$2,1$	$6,4$	$\cancel{\frac{6,4-5,2}{2,1-2} = 12}$	$-$	$-$	$-$
$2,2$	$5,8$	$\frac{5,8-6,4}{2,2-2,1} = -6$	$\cancel{\frac{-6-12}{2,2-2} = -90}$	$-$	$-$
$2,3$	$6,1$	$\frac{6,1-5,8}{2,3-2,2} = 3$	$\frac{3-(-6)}{2,3-2,1} = 45$	$\cancel{\frac{45+90}{2,3-2} = 450}$	$-$
$2,4$	6	$\frac{6-6,1}{2,4-2,3} = -1$	$\frac{-1-3}{2,4-2,2} = -20$	$\frac{-20-45}{2,4-2,1} = \frac{-650}{3}$	$\cancel{\frac{\frac{-650}{3}-450}{2,4-2} = \frac{-5000}{3}}$

Donc :

$$P'_3(x) = 6,4 - 6(x-2,1) + 45(x-2,1)(2,2) - \frac{650}{3}(x-2,1)(x-2,2)(x-2,3)$$

$$P'_3(x) = -\frac{650x^3}{3} + 1475x^2 - \frac{10030x}{3} + \frac{12646}{5}$$

Remarque : La même méthode est à utiliser si nous supprimons plusieurs points du début ou de la fin du tableau, par contre, nous ne pouvons pas utiliser le même tableau pour déduire les différences divisées lorsque nous supprimons un point du milieu du tableau. Par exemple, pour x_0, x_1, x_3 et x_4 il faut refaire les calculs dès le début ! !

3) Donner une valeur approchée de $f(2.25)$ et donner une majoration de l'erreur $|f(x) - P_4(x)|$ si f est de classe $\mathcal{C}^5$.

On a : $f(2.25) \sim P_4(2,25)$

et, il existe ξ tel que :

$$|f(x) - P_4(x)| = |(x-2)(x-2,1)(x-2,2)(x-2,3)(x-2,4)|\frac{|f^{(5)(\xi)}|}{5!}$$

$$|f(x) - P_4(x)| \leq \frac{M}{5!}|(x-2)(x-2,1)(x-2,2)(x-2,3)(x-2,4)|$$

avec : $M = \sup_{x\in[2;2,4]} |f^{(5)}(x)|$

Remarque : Nous pouvons aussi donner une approximation de $f(2.25)$ en utilisant $P_3(.)$ et $P_3'(.)$.

Exercice 4 :

Pour calculer le zéro d'une fonction $f(x)$ inversible sur un intervalle $[a,b]$ on peut utiliser l'interpolation : après avoir évalué f sur une discrétisation x_i de $[a,b]$, on interpole l'ensemble $(y_i = f(x_i), x_i)_{i=0}^m$ et on obtient un polynôme $p(y)$ tel que : $f(x) = 0 \Leftrightarrow x = p(0)$.

1) Utiliser cette méthode pour évaluer l'unique racine r de la fonction $f(x) = \exp(x) - 2$ dans l'intervalle $[0,1]$ avec trois points d'interpolation ;

Localisation de la racine : Soit $f(x) = e^x - 2$, f est une fonction continue croissante (car $f'(x) = e^x > 0$) et $f(0)f(1) = (-1)(e-2) < 0$ donc l'équation $f(x) = 0$ admet une racine unique $\bar{x} \in [0,1]$

f est inversible (admet une fonction réciproque) car f est une bijection (continue + croissante) de $[0,1]$ vers $[-1, e-2]$.

Discrétisation de l'intervalle en trois points ($n = 2$) et $x_i = 0 + i(\frac{1-0}{2}) = \frac{i}{2}$ donc $x_0 = 0$, $x_1 = \frac{1}{2}$ et $x_2 = 1$. Le tableau des valeurs de $f(x_i)$:

x_i	0	$\frac{1}{2}$	1
$y_i = f(x_i)$	-1	$e^{\frac{1}{2}} - 2$	$e-2$

Le tableau inversé (les valeurs $(y_i, f^{-1}(y_i) = x_i)$) :

y_i	-1	$e^{\frac{1}{2}} - 2$	$e-2$
$x_i = f^{-1}(y_i)$	0	$\frac{1}{2}$	1

Le polynôme d'interpolation $P_2(x)$ sur la base des points y_i et les valeurs $x_i = f^{-1}(y_i)$ est une approximation de $f^{-1}(x)$ (nous pouvons le calculer par n'importe quelle méthode d'interpolation). Par exemple, le tableau des différences divisées est donnée par :

y_i	x_i	DD_1	DD_2
-1	0	$-$	$-$
$e^{\frac{1}{2}} - 2$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\frac{1}{2}-0}{e^{\frac{1}{2}}-2+1} = \frac{1}{2(e^{\frac{1}{2}}-1)} \simeq 0,345$	$-$
$e-2$	1	$\frac{1-\frac{1}{2}}{e-2-(e^{\frac{1}{2}}-2)} = \frac{1}{2(e-e^{\frac{1}{2}})}$	$\frac{\frac{\frac{1}{2}}{e-e^{\frac{1}{2}}} - \frac{\frac{1}{2}}{e^{\frac{1}{2}}-1}}{e-2+1} = \frac{1}{2(e-1)}(\frac{1}{e-e^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{e^{\frac{1}{2}}-1}) = \frac{1}{2(e-1)}\frac{2e^{\frac{1}{2}}-1-e}{e^{\frac{3}{2}}-2e+e^{\frac{1}{2}}}$ $= \frac{1}{2(e-1)}\frac{-(e+1-2e^{\frac{1}{2}})}{e^{\frac{1}{2}}(e-2e^{\frac{1}{2}}+1)} = \frac{-1}{2e^{\frac{1}{2}}(e-1)} \simeq -0,176$

Donc le polynôme d'interpolation sur la base des (y_i) est donné par :

$$P_2(x) = 0 + \frac{1}{2(e^{\frac{1}{2}}-1)}(x-y_0) - \frac{1}{2e^{\frac{1}{2}}(e-1)}(x-y_0)(x-y_1)$$

$$P_2(x) = 0 + \frac{1}{2(e^{\frac{1}{2}}-1)}(x+1) - \frac{1}{2e^{\frac{1}{2}}(e-1)}(x+1)(x-e^{\frac{1}{2}}+2)$$

On a : $f(\bar{x}) = 0 \Leftrightarrow \bar{x} = f^{-1}(0) \sim P_2(0) = \frac{1}{2(e^{\frac{1}{2}}-1)} - \frac{1}{2e^{\frac{1}{2}}(e-1)}(-e^{\frac{1}{2}}+2) = \frac{e^{\frac{3}{2}}+e-4e^{\frac{1}{2}}+2}{2e^{\frac{1}{2}}(e^{\frac{1}{2}}-1)(e^1-1)}$

Soit : $\bar{x} \sim 0,708$

2) Comparer ensuite le résultat obtenu avec l'approximation du zéro de f obtenue par la méthode de Newton en 3 itérations à partir de $x_0 = 0$.
D'abord, vérifiant les conditions de convergence : f est de classe $\mathcal{C}^1$ avec $f'(x) > 0$ et $f''(x) > 0$ par contre $f(x_0) = f(0) = -2$ calculons x_1 : $x_1 = x_0 - \frac{f(x_k)-2}{f'(x_k)} = 0 - \frac{1-2}{1} = 1$ et $f(x_1) = e - 2 > 0$ de même signe que $f''(x)$. On en déduit que la méthode de Newton converge vers $\overline{x}$ et une valeur approchée après trois itérations est donnée par x_3 avec :

$$x_2 = 1 - \frac{e-2}{e} \sim 0.736 \text{ et } x_3 = x_2 - \frac{e^{x_2}-2}{e^{x_2}} \sim 0.694$$

Exercice 5 : La division euclidienne d'un polynôme V par un polynôme W non nul consiste à écrire (d'une manière unique) V sous la forme $V = Wq + r$ où q et r sont deux polynômes, le second vérifiant $deg(r) < deg(W)$; q est le quotient de la division euclidienne de V et W et r le reste de cette division.

1) Montrer que si $W(x) = (x - a_0)(x - a_1)(x - a_d)$ alors r est le polynôme d'interpolation de V aux points $(a_0,\ a_1, ..., a_d)$;
Soit $P_d(x)$ le polynôme d'interpolation de $V(x)$ par rapport au points a_0, a_1,...,a_d alors, on a :

$$P_d(a_i) = V(a_i) = q(a_i)W(a_i) + r(a_i) \qquad i = 0, 1, ..., d$$

Or,

$$W(a_i) = (a_i - a_0)...(a_i - a_i)...(a_i - a_d) = 0 \qquad i = 0, 1, ..., d$$

On en déduit :

$$P_d(a_i) = r(a_i) \qquad i = 0, 1, ..., d \Rightarrow (P_d - r)(a_i) = 0 \qquad i = 0, 1, ..., d$$

Remarquons que le polynôme d'interpolation $P_d(x)$ est de degré au plus égal à d et le reste de la division euclidienne est strictement inférieur au degré de $V(x)$ (qui égal à $d + 1$).

Donc, le degré du polynôme $(P_d - r)(x)$ est de degré au plus égal à d et ayant $d + 1$ racines (a_0,...,a_d), on en déduit que ce polynôme est le polynôme identiquement nul : $(P_d - r)(x) = 0$ et $P_d(x) = r(x)$. (Un polynôme non identiquement nul de degré n ne peut pas avoir plus de n racines).

2) Utiliser une division euclidienne pour calculer le polynôme d'interpolation de Lagrange de $V(x) = x^5 - 3x^4 + x - 3$ aux points $-1,\ 0,\ 1,\ 2$. Vérifier le résultat obtenu.
Il suffit d'effectuer la division euclidienne de $V(x)$ par $W(x)$ avec

$$W(x) = (x+1)(x-0)(x-1)(x-2) = (x^3 - x)(x-2) = x^4 - 2x^3 - x^2 + 2x$$

On a :

$$V(x) = (x-1)W(x) + (-x^3 - 3x^2 + 3x - 3)$$

Donc :

$$P_3(x) = -x^3 - 3x^2 + 3x - 3$$

Pour vérifier le résultat, il suffit qu comparer les images des points x_i utilisant $V(x)$ et $P_3(x)$:

$$P_3(0) = -3 = V(0), \quad P_3(1) = -4 = V(1), \quad P_3(-1) = -8 = V(-1), ...$$

Exercice 6 :

Soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ la fonction définie par $f(x) = 2 - 3x^2$:

1) Calculer le polynôme P_0 qui interpole f au point d'abscisse $x_0 = 0$;

Le polynôme P_0 est de degré zéro donc égal à une constante et il prend la même valeur que f au point $x_0 = 0$:

$$P_0(x) = P_0(x_0) = f(x_0) = f(0) = 2$$

2) Calculer le polynôme P_1 qui interpole f aux points d'abscisse $x_0 = 0$ et $x_1 = 1$;

Utilisant, par exemple, la méthode de Newton :

x_i	$f(x_i)$	$DD1$
0	2	$-$
1	-1	$\frac{-1-2}{1-0} = -3$

Donc :

$$P_1(x) = 2 - 3(x - x_0) = 2 - 3x$$

3) Calculer le polynôme P_2 qui interpôle f aux points d'abscisse $x_0 = 0$, $x_1 = 1$ et $x_2 = 2$;

Complétant le tableau précédent en ajoutant la ligne $x_2 = 2$:

x_i	$f(x_i)$	$DD1$	$DD2$
0	2	$-$	$-$
1	-1	$\frac{-1-2}{1-0} = -3$	$-$
2	-10	$\frac{-10+1}{2-1} = -9$	$\frac{-9+3}{2-0} = -3$

Donc :

$$P_2(x) = 2 - 3(x - x_0) - 3(x - x_0)(x - x_1) = 2 - 3x - 3x(x - 1) = 2 - 3x^2 = f(x)$$

Le résultat précédent est tout à fait normal car f est un polynôme de degré 2 et on ne peut pas trouver une meilleur approximation de f par un autre polynôme de degré 2.

4) Calculer le polynôme P_n, $n \geq 3$ qui interpole f aux points d'abscisse $x_0 = 0$, $x_1 = 1$, $x_2 = 2$, $\cdots$, et $x_n = n$. Est-ce que le résultat est vrai pour une fonction f quelconque.

Remarquons que nous ne pouvons pas faire des calculs (car le nombre de points n'est pas fini !), par contre, on a :

$$P_n(x_i) = f(x_i) \Rightarrow (P_n - f)(x_i) = 0 \quad i = 0, 1, ..., n$$

$f(x)$ est un polynôme de degré 2 et $P_n(x)$ est un polynôme de degré $n \geq 3$ donc $(P_n - f)(x)$ est un polynôme de degré n ayant $n + 1$ racines (x_0, x_1,...,x_n). On en déduit que :

$$(P_n - f)(x) = 0 \quad \text{et} \quad P_n(x) = f(x)$$

Exercice 7 :

Soit f une fonction de classe C^3, définie sur $[0,3]$ et à valeurs réelles.

1) Déterminer le polynôme d'interpolation d'ordre 2 de f, noté $P_2(.)$, qui prend les même valeurs que $f(.)$ en $x = 0, 1, 3$;

On a :

$$L_0(x) = \frac{(x-1)(x-3)}{(0-1)(0-3)} = \frac{1}{3}(x^2 - 4x + 3)$$
$$L_1(x) = \frac{(x-0)(x-3)}{(1-0)(1-3)}\frac{-1}{2}(x^2 - 3x)$$
$$L_2(x) = \frac{(x-0)(x-1)}{(3-0)(3-1)} = \frac{1}{6}(x^2 - x)$$

Donc :

$$P_2(x) = f(0)L_0(x) + f(1)L_1(x) + f(2)L_2(x)$$

2) Déterminer la méthode de quadrature élémentaire obtenue en remplaçant l'intégrale de $f(.)$ sur $[0,3]$ par celle de $P_2(.)$;

$$\int_0^3 f(x)dx \sim \int_0^3 P_2(x) = \int_0^3 (f(0)L_0(x) + f(1)L_1(x) + f(2)L_2(x))dx$$
$$= f(0)\int_0^3 L_0(x)dx + f(1)\int_0^3 L_1(x)dx + f(2)\int_0^3 L_2(x)dx$$

On a :

$$\int_0^3 L_0(x)dx = \int_0^3 \frac{1}{3}(x^2 - 4x + 3)dx = \frac{1}{3}\left[\frac{x^3}{3} - 2x^2 + \frac{3x}{2}\right]_0^3 = 0$$
$$\int_0^3 L_1(x)dx = \int_0^3 \frac{-1}{2}(x^2 - 3x) = -12\left[\frac{x^3}{3} - \frac{3x^2}{2}\right]_0^3 = \frac{9}{4}$$
$$\int_0^3 L_2(x)dx = \int_0^3 \frac{1}{6}(x^2 - x) = 16\left[\frac{x^3}{3} - \frac{x^2}{2}\right]_0^3 = \frac{3}{4}$$

Donc, on obtient la quadrature suivante :

$$P_2(x) = f(0)\times 0 + f(1)\times\frac{9}{4} + f(2)\times\frac{3}{4} = 3(0\times f(0) + \frac{3}{4}\times f(1) + \frac{1}{4}\times f(3)$$

avec $\omega_0 = 0$, $\omega_1 = \frac{3}{4}$ et $\omega_2 = \frac{1}{4}$

Remarque : cette quadrature est différente de celle obtenue avec la méthode de Simpson (Newton-cotes, $n = 2$) car la répartition des points dans l'intervalle n'est pas uniforme : $2 - 1 = 1 \neq 2 = 2 - 0$.

3) Montrer que l'ordre de la méthode est égal à 2.

Si f est un polynôme de degré 0, 1 ou 2 alors $P_2(x) = f(x)$ et la quadrature est exacte :

$$\int_0^3 f(x)dx = \int_0^3 P_2(x)$$

Donc, l'ordre de cette méthode est au moins égale à 2. Il suffit maintenant de trouver un exemple d'un polynôme de degré 3 telle que la quadrature ne soit pas exacte : Si $f(x) = x^3$, on a :

$$\int_0^3 f(x)dx = \left[\frac{x^4}{4}\right]_0^3 = \frac{81}{4}$$

$$3(0\times f(0) + \frac{3}{4}\times f(1) + \frac{1}{4}\times f(2)) = 3(\frac{3}{4} + \frac{1}{4}\times 27) = \frac{90}{4} \neq \int_0^3 f(x)dx$$

Donc la méthode est d'ordre 2.

Exercice 8 :

On se place sur l'intervalle $[-1,+1]$:

1) Calculer les polynômes de base de degré 3 associés aux points $\left\{-1,-\frac{1}{3},\ \frac{1}{3},1\right\}$;

$$L_0(x)=\frac{(x+\frac{1}{3})(x-\frac{1}{3})(x-1)}{(-1+\frac{1}{3})(-1-\frac{1}{3})(-1-1)}=\frac{-1}{16}(9x^2-1)(x-1)$$
$$L_1(x)=\frac{(x+1)(x-\frac{1}{3})(x-1)}{(\frac{-1}{3}+1)(\frac{-1}{3}-\frac{1}{3})(\frac{-1}{3}-1)}=\frac{9}{16}(3x-1)(x^2-1)$$
$$L_2(x)=\frac{(x+1)(x+\frac{1}{3})(x-1)}{(\frac{1}{3}+1)(\frac{1}{3}+\frac{1}{3})(\frac{1}{3}-1)}=\frac{-9}{16}(x^2-1)(3x+1)$$
$$L_3(x)=\frac{(x+1)(x+\frac{1}{3})(x-\frac{1}{3})}{(1+1)(1+\frac{1}{3})(1-\frac{1}{3})}=\frac{1}{16}(x+1)(9x^2-1)$$

2) En déduire le polynôme d'interpolation, P_3, de degré inférieur ou égal à 3 d'une fonction f définie sur $[-1,+1]$, associé aux points $\{-1,-\frac{1}{3},\ \frac{1}{3},\ 1\}$;

$$P_3(x)=f(-1)L_0(x)+f(-\frac{1}{3})L_1(x)+f(\frac{1}{3})L_2(x)+f(1)L_3(x)$$

3) Décrire la méthode de quadrature sur $[-1,+1]$ obtenue en remplaçant l'intégrale de f par celle de P_3. Quel est l'ordre de cette méthode ?

$$\int_{-1}^{1}f(x)dx\simeq f(-1)\int_{-1}^{1}L_0(x)dx+f(-\frac{1}{3})\int_{-1}^{1}L_1(x)dx+f(\frac{1}{3})\int_{-1}^{1}L_2(x)dx+f(1)\int_{-1}^{1}L_3(x)dx$$

On a :

$$\int_{-1}^{1}L_0(x)dx=\frac{-1}{16}\int_{-1}^{1}(9x^2-1)(x-1)dx=\frac{1}{4}$$
$$\int_{-1}^{1}L_1(x)dx=\frac{9}{16}\int_{-1}^{1}(3x-1)(x^2-1)dx=\frac{3}{4}$$
$$\int_{-1}^{1}L_2(x)dx=\frac{-9}{16}\int_{-1}^{1}(x^2-1)(3x+1)dx=\frac{3}{4}$$
$$\int_{-1}^{1}L_3(x)dx=\frac{1}{16}\int_{-1}^{1}(x+1)(9x^2-1)dx=\frac{1}{4}$$

D'ou :

$$\int_{-1}^{1}f(x)dx=2(\frac{1}{8}f(-1)+\frac{3}{8}f(\frac{-1}{3})+\frac{3}{8}f(\frac{1}{3})+\frac{1}{8}f(1))$$

Cette quadrature (méthode de Simpson $\frac{3}{8}$) est donnée sur un intervalle $[a,b]$:

$$\int_{a}^{b}f(x)dx=\frac{b-a}{8}(f(a)+f(a+\frac{b-a}{3})+f(a+2\frac{b-a}{3})+f(a+3\frac{b-a}{3})+f(b))$$

Cette méthode est d'ordre au moins égal à 3 (si f est un polynôme de degré 3 alors $f(x)=P_3(x)$ et au plus égal à 4 (résultat général de la méthode de Newton-cotes).

Soit f est le polynôme de degré 4 tel que $f(x)=x^4$, on a :

$$I=\int_{-1}^{1}f(x)dx=[\frac{x^5}{5}]_{-1}^{1}=\frac{2}{5}=\frac{14}{35}$$

$$\widetilde{I}_2=(\frac{1}{8}f(-1)+\frac{3}{8}f(\frac{-1}{3})+\frac{3}{8}f(\frac{1}{3})+\frac{1}{8}f(1))=\frac{1}{4}(1+\frac{1}{17}+\frac{1}{27}+1)=\frac{14}{27}\neq I$$

Donc, la méthode est d'ordre 3.

Exercice 9 :

Estimer $\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx$ à partir des données suivantes :

x	0	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{3}{2}$	2	$\frac{5}{2}$
$f(x)$	$\frac{3}{2}$	2	2	$1,6364$	$1,2500$	$0,9565$

en utilisant :

1. La méthode des rectangles à gauche composite ;

   On a :

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx = \int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx + \int_{\frac{1}{2}}^{1} f(x)dx + \int_1^{\frac{3}{2}} f(x)dx + \int_{\frac{3}{2}}^{2} f(x)dx + \int_2^{\frac{5}{2}} f(x)dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \int_0^{\frac{1}{2}} f(0)dx + \int_{\frac{1}{2}}^{1} f(\frac{1}{2})dx + \int_1^{\frac{3}{2}} f(1)dx + \int_{\frac{3}{2}}^{2} f(\frac{3}{2})dx + \int_2^{\frac{5}{2}} f(2)dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq f(0)\int_0^{\frac{1}{2}} dx + f(\frac{1}{2})\int_{\frac{1}{2}}^{1} dx + f(1)\int_1^{\frac{3}{2}} dx + f(\frac{3}{2})\int_{\frac{3}{2}}^{2} dx + f(2)\int_2^{\frac{5}{2}} dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \frac{1}{2}\left[f(0) + f(\frac{1}{2}) + f(1) + f(\frac{3}{2}) + f(2)\right] \simeq \frac{1}{2}\left[\frac{3}{2} + 2 + 2 + 1,6364 + 1,2500\right]$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq 4,1932$$

   Utilisation de la formule du cours : $h = \frac{1}{2}$, $n = 5$, $a_i = 0 + ih = \frac{i}{2}$ avec $i = 0, ...5$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq h\sum_{i=0}^{n-1} f(a_i) = h\sum_{i=0}^{4} f(\frac{i}{2}) = \frac{1}{2}\left[f(0) + f(\frac{1}{2}) + ... + f(2)\right]$$

2. La méthode des rectangles à droite composite ;

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx = \int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx + \int_{\frac{1}{2}}^{1} f(x)dx + \int_1^{\frac{3}{2}} f(x)dx + \int_{\frac{3}{2}}^{2} f(x)dx + \int_2^{\frac{5}{2}} f(x)dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \int_0^{\frac{1}{2}} f(\frac{1}{2})dx + \int_{\frac{1}{2}}^{1} f(1)dx + \int_1^{\frac{3}{2}} f(\frac{3}{2})dx + \int_{\frac{3}{2}}^{2} f(2)dx + \int_2^{\frac{5}{2}} f(\frac{5}{2})dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq f(\frac{1}{2})\int_0^{\frac{1}{2}} dx + f(1)\int_{\frac{1}{2}}^{1} dx + f(\frac{3}{2})\int_1^{\frac{3}{2}} dx + f(2)\int_{\frac{3}{2}}^{2} dx + f(\frac{5}{2})\int_2^{\frac{5}{2}} dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \frac{1}{2}\left[f(\frac{1}{2}) + f(1) + f(\frac{3}{2}) + f(2) + f(\frac{5}{2})\right] \simeq \frac{1}{2}[2 + 2 + 1,6364 + 1,2500 + 0.9565]$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq 3,92145$$

   Utilisation de la formule du cours : $h = \frac{1}{2}$, $n = 5$, $a_i = 0 + ih = \frac{i}{2}$ avec $i = 0, ...5$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq h\sum_{i=1}^{n} f(a_i) = h\sum_{i=1}^{5} f(\frac{i}{2}) = \frac{1}{2}\left[f(\frac{1}{2}) + ... + f(2) + f(\frac{5}{2})\right]$$

3. La méthode des trapèzes composite.

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx = \int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx + \int_{\frac{1}{2}}^{1} f(x)dx + \int_1^{\frac{3}{2}} f(x)dx + \int_{\frac{3}{2}}^{2} f(x)dx + \int_2^{\frac{5}{2}} f(x)dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \int_0^{\frac{1}{2}} \frac{f(0) + f(\frac{1}{2})}{2}dx + \int_{\frac{1}{2}}^{1} \frac{f(\frac{1}{2}) + f(1)}{2}dx + \int_1^{\frac{3}{2}} \frac{f(1) + f(\frac{3}{2})}{2}dx + \int_{\frac{3}{2}}^{2} \frac{f(\frac{3}{2}) + f(2)}{2}dx$$

$$+ \int_2^{\frac{5}{2}} \frac{f(2) + f(\frac{5}{2})}{2}dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \frac{f(0)+f(\frac{1}{2})}{2}\int_0^{\frac{1}{2}} dx + \frac{f(\frac{1}{2})+f(1)}{2}\int_{\frac{1}{2}}^{1} dx + \frac{f(1)+f(\frac{3}{2})}{2}\int_1^{\frac{3}{2}} dx + \frac{f(\frac{3}{2})+f(2)}{2}\int_{\frac{3}{2}}^{2} dx$$

$$+\frac{f(2)+f(\frac{5}{2})}{2}\int_2^{\frac{5}{2}} dx$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \frac{1}{2}\frac{f(0)+f(\frac{1}{2})}{2} + \frac{1}{2}\frac{f(\frac{1}{2})+f(1)}{2} + \frac{1}{2}\frac{f(1)+f(\frac{3}{2})}{2} + \frac{1}{2}\frac{f(\frac{3}{2})+f(2)}{2} + \frac{1}{2}\frac{f(2)+f(\frac{5}{2})}{2}$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \frac{1}{4}(f(0)+f(\frac{5}{2})) + \frac{1}{2}\left[f(\frac{1}{2})+f(1)+f(\frac{3}{2})+f(2)\right]$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \frac{1}{4}(\frac{3}{2}+0.9565) + \frac{1}{2}(2+2+1.6364+1.25)$$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq 4,057325$$

Utilisation de la formule du cours : $h=\frac{1}{2}$, $n=5$, $a_i = 0+ih = \frac{i}{2}$ avec $i=0,...5$

$$\int_0^{\frac{5}{2}} f(x)dx \simeq \frac{h}{2}(f(a_0)+f(a_n)) + h\sum_{i=1}^{n-1} f(a_i) = \frac{1}{4}(f(0)+f(\frac{5}{2})) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{4} f(\frac{i}{2})$$

$$= \frac{1}{4}(f(0)+f(\frac{5}{2})) + \frac{1}{2}\left[f(\frac{1}{2})+...+f(2)\right]$$

Exercice 10 :

Estimer, à l'aide des théorèmes du cours, le nombre de sous-intervalles n nécessaire pour obtenir une approximation de :

$$I = \int_0^1 \frac{4}{1+x^2}dx$$

avec une erreur moindre que 10^{-2}, en utilisant :

1. La méthode du point milieu combinée ;

$$E_n = \frac{b-a}{24}(\frac{b-a}{n})^2|f''(\eta)|$$

Donc :

$$E_n = \frac{1-0}{24}(\frac{1-0}{n})^2|f''(\eta)| = \frac{1}{24}(\frac{1}{n^2})|f''(\eta)|$$

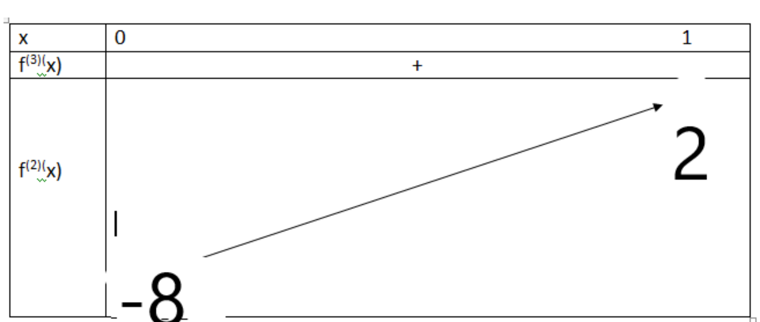
cherchons une majoration de $|f''(\eta)|$, on a :

$$f'(x) = \frac{-8x}{(1+x^2)^2}$$

$$f''(x) = \frac{24x^2-8}{(1+x^2)^3}$$

$$f^{(3)}(x) = 96x\frac{(1-x^2)}{(1+x^2)^4} \geq 0 \text{ sur } [0,1]$$

On en déduit : $|f''(\eta)| \leq 2$ et :



$$E_n = \frac{1}{24}(\frac{1}{n^2})|f''(\eta)| \leq 8\frac{1}{24}(\frac{1}{n^2}) = \frac{1}{3n^2}$$

Il suffit de prendre :

$$\frac{1}{3n^2} \leq 10^{-6} \Rightarrow 3n^2 \geq 10^6 \Rightarrow n \geq \sqrt{\frac{10^6}{3}} \Rightarrow n \geq 577.35$$

il suffit de considérer $n = 587$.

2. La méthode des trapèzes combinée ;

$$E_n = \frac{(b-a)^3}{12}(\frac{b-a}{n})^2|f''(\eta)|$$

Donc :

$$E_n = \frac{(1-0)^3}{12}(\frac{1-0}{n})^2|f''(\eta)| = \frac{1}{12}(\frac{1}{n^2})|f''(\eta)|$$

On en déduit :

$$E_n = \frac{1}{12}(\frac{1}{n^2})|f''(\eta)| \leq 8\frac{1}{12}(\frac{1}{n^2}) = \frac{2}{3n^2}$$

Il suffit de prendre :

$$\frac{2}{3n^2} \leq 10^{-6} \Rightarrow n^2 \geq \frac{2}{3} \times 10^6 \Rightarrow n \geq \sqrt{\frac{2}{3} \times 10^6 n} \geq 816.49$$

il suffit de considérer $n = 817$.

3. La méthode de Simpson combinée ;

$$E_n = \frac{b-a}{180}(\frac{b-a}{4n})^4|f^{(4)}(\eta)|$$

$$E_n = \frac{1-0}{180}(\frac{1-0}{4n})^4|f^{(4)}(\eta)| = \frac{1}{180}\frac{1}{256n^4}|f^{(4)}(\eta)| = \frac{1}{46080n^4}|f^{(4)}(\eta)|$$

Il suffit donc de trouver une majoration de $|f^{(4)}(\eta)|$ sur $[-1, 1]$.

On donne :

$$\sup_{x\in[0,1]} |f^{(4)}(x)| = 96$$

Donc :

$$E_n \leq \frac{96}{46080n^4} = \frac{1}{480n^4}$$

Il suffit de choisir n tel que :

$$\frac{1}{480n^4} \leq 10^{-6}$$

$$n \geq \sqrt[4]{\frac{10^6}{480}} \Rightarrow n \geq 6.75$$

Il suffit de prendre $n = 7$.

Commenter les résultats trouvés.

La méthode de Simpson combinée donne la meilleure approximation en peu d'intervalles suivie de la méthode du rectangle au centre combinée puis la méthode des trapèzes.