

## 1 TP de prise en main

Nous utiliserons Xcas, que l'on lance sur les netbooks depuis le menu Education (pensez à mettre Xcas à jour sur les netbooks empruntés, connectez-vous à Internet puis lancez Xcas et cliquez sur le menu Fich, Quitter et mettre à jour), sur les PC du DLST à partir de l'icône Xcas du bureau. Vous pouvez aussi l'installer si vous disposez de votre propre PC ou Mac, cf. [www-fourier.ujf-grenoble.fr/~parisse/install\\_fr](http://www-fourier.ujf-grenoble.fr/~parisse/install_fr).

Si vous n'avez jamais utilisé Xcas auparavant, commencez par parcourir le tutoriel, celui-ci est accessible depuis le menu Aide, Debuter en calcul formel. Lisez au moins jusqu'au paragraphe 2.4 (vous pouvez sauter le paragraphe 2.2 sur les chaînes de caractère), puis faites les exercices du TP de prise en main. Pour trouver les noms de commandes, regardez d'abord dans le menu Outils, puis Cmds si vous ne trouvez pas dans le menu Outils, ou dans le menu Graphe qui fournit des assistants pour les représentations graphiques.

Les TP qui suivent ce TP de prise en main demandent souvent d'écrire des petits programmes, pour cela vous pouvez consulter le paragraphe 6 du tutoriel.

1. Écrire le polynôme  $(x + 3)^7 \times (x - 5)^6$  selon les puissances décroissantes de  $x$ .
2. Simplifier les expressions suivantes :

$$\sqrt{3 + 2\sqrt{2}}, \quad \frac{1 + \sqrt{2}}{1 + 2\sqrt{2}}, \quad e^{i\pi/6}, \quad 4\operatorname{atan}\left(\frac{1}{5}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{1}{239}\right)$$

3. Factoriser :

$$x^8 - 3x^7 - 25x^6 + 99x^5 + 60x^4 - 756x^3 + 1328x^2 - 960x + 256$$

$$x^6 - 2x^3 + 1, \quad (-y + x)z^2 - xy^2 + x^2y$$

4. Calculez les intégrales et simplifiez le résultat :

$$\int \frac{1}{e^x - 1} dx, \quad \int \frac{1}{x \ln(x)} \ln(\ln(x)) dx, \quad \int e^{x^2} dx, \quad \int x \sin(x) e^x dx$$

Vérifiez en dérivant les expressions obtenues.

5. Déterminer la valeur de :

$$\int_1^2 \frac{1}{(1+x^2)^3} dx, \quad \int_1^2 \frac{1}{x^3+1} dx$$

6. Calculer les sommes suivantes

$$\sum_{k=1}^N k, \quad \sum_{k=1}^N k^2, \quad \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2}$$

7. Développer  $\sin(3x)$ , linéariser l'expression obtenue et vérifier qu'on retrouve l'expression initiale.
8. Calculer le développement de Taylor en  $x = 0$  à l'ordre 4 de :

$$\ln(1 + x + x^2), \quad \frac{\exp(\sin(x)) - 1}{x + x^2}, \quad \sqrt{1 + e^x}, \quad \frac{\ln(1 + x)}{\exp(x) - \sin(x)}$$

9. Trouver les entiers  $n$  tels que le reste de la division euclidienne de  $123n$  par 256 soit 17.

10. Déterminer la liste des diviseurs de 45768.  
Factoriser 100 !

11. Résoudre le système linéaire :

$$\begin{cases} x + y + az = 1 \\ x + ay + z = 2 \\ ax + y + z = 3 \end{cases}$$

12. Déterminer l'inverse de la matrice :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & a \\ 1 & 1 & a & 1 \\ 1 & a & 1 & 1 \\ a & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

## 2 TP1 : Suites récurrentes

On souhaite étudier des suites récurrentes  $(u_n)$  définies par  $u_{n+1} = f(u_n)$  et  $u_0$ , où  $f$  est une fonction de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$ , par exemple  $f(x) = \sqrt{2+x}$ .

### Exercice 1

1. En utilisant le tableur de Xcas (menu Tableur), représenter les premiers termes de la suite  $u_{n+1} = \sqrt{2+u_n}$  avec  $u_0 = 0.1$  ou  $u_0 = 1/10$  (menu Math->suite récurrente du tableur).
2. Calculer ensuite en mode exact et approché les 10 premiers termes de la suite : vous pouvez définir la cellule A1 par `=sqrt(2+A0)`, puis déplacer la souris vers la partie située en bas à droite de la cellule A1 (le curseur souris change de forme), puis appuyer sur le bouton de la souris et relâcher à la fin de la zone où vous voulez copier la formule définissant A1.
3. Quels sont les avantages et inconvénients d'utiliser une valeur initiale exacte ou approchée ?

La feuille de calcul précédente donne une idée de la convergence de la suite, mais ne donne aucune information quantitative sur la vitesse de convergence. Au lieu de calculer un nombre fixé de termes de la suite, on va écrire un programme avec un test d'arrêt selon la valeur  $|u_{n+1} - u_n|$  comparé à un nombre positif (petit)  $\varepsilon$  fixé à l'avance. Pour éviter que le programme ne boucle indéfiniment lorsque la suite ne converge pas (ou converge trop lentement pour la machine), on fixe aussi un nombre maximal d'itération  $N$ .

### Exercice 2

Écrire un programme `iter` prenant en argument la fonction  $f$ , la valeur de  $u_0$ , de  $N$  et de  $\varepsilon$ , et qui s'arrête dès que l'une des conditions suivantes est satisfaite :

- $|u_{n+1} - u_n| < \varepsilon$
- le nombre d'itérations dépasse  $N$ .

Dans le premier cas le programme renverra la valeur de  $u_{n+1}$ , dans le second cas une séquence composée de  $u_N$  et de  $N$ .

Tester votre programme avec  $f(x) = \sqrt{2+x}$  et  $f(x) = x^2$ .

On suppose que la fonction  $f$  satisfait aux hypothèses du théorème du point fixe. On notera  $k < 1$  la constante de contractance. On peut alors trouver un encadrement de la limite  $l$  de la suite  $(u_n)$  en fonction de  $u_n, u_{n-1}$  et  $k$ .

### Exercice 3

Écrire un programme `iter_k` prenant en argument la fonction  $f$ , la valeur de  $u_0$ , la constante  $k$  et l'écart toléré  $\varepsilon$ , et qui s'arrête dès que  $|u_n - l| \leq \varepsilon$ .

Vérifier les hypothèses du théorème du point fixe pour  $f(x) = 2 \cos(x/3)$  sur  $[0, 2]$  et expliciter une constante de contractance  $k$ . Déterminer une valeur approchée de la limite de  $(u_n)$  à  $1e-3$  près en utilisant la fonction `iter_k`.

La convergence de ces suites est en général linéaire, le nombre de décimales exactes augmente de la même valeur à chaque itération. Par contre lorsqu'on est prêt d'une racine, la méthode de Newton permet en gros de multiplier par deux le nombre de décimales à chaque itération.

#### Exercice 4

1. Donner une suite itérative obtenue par la méthode de Newton convergeant vers  $\sqrt{7}$ .
2. Montrer que la fonction  $f: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$  définie par

$$f(x) = \frac{7x + 7}{x + 7}$$

admet  $\sqrt{7}$  pour point fixe. Trouver un intervalle  $I$  contenant  $\sqrt{7}$  sur lequel les hypothèses du théorème du point fixe sont satisfaites et expliciter une constante de contractance  $k$ .

3. Comparer au tableur la vitesse de convergence des 10 premiers termes des deux suites (calculez les avec par exemple 200 chiffres significatifs et faites `evalf(., 20)` sur les différence entre 2 termes successifs).
4. En utilisant la fonction `iter`, trouver un encadrement de  $\sqrt{7}$  à  $1e-6$  près par les deux méthodes (on pourra prendre une valeur initiale approchée puis entière exacte pour avoir une valeur numérique approchée puis une fraction). Combien d'itérations sont nécessaires ?

Dans certains cas, la fonction  $f$  n'est pas contractante, mais on peut réécrire l'équation à résoudre sous une autre forme avec une fonction contractante, par exemple en utilisant une fonction réciproque.

#### Exercice 5

Donner un encadrement à  $1e-6$  près d'une racine de l'équation  $\tan(x) = x$  sur l'intervalle  $]3\pi/2, 5\pi/2[$  en utilisant une méthode de point fixe. On observera que  $\tan$  n'est pas contractante mais que sa fonction réciproque l'est (attention à  $y$  ajuster correctement un multiple entier de  $\pi$ ).

### 3 TP2 : Types. Calcul exact et approché. Algorithmes de bases

1. Utiliser la commande `type` pour déterminer la représentation utilisée par le logiciel pour représenter une fraction, un nombre complexe, un flottant en précision machine, un flottant avec 100 décimales, la variable  $x$ , l'expression  $\sin(x) + 2$ , la fonction  $x \rightarrow \sin(x)$ , une liste, une séquence, un vecteur, une matrice. Essayez d'accéder aux parties de l'objet pour les objets composites (en utilisant `op` par exemple).
2. Déterminer le plus petit entier  $n$  tel que  $(1.0 + 2^{-n}) - 1.0$  renvoie 0 sur PC avec la précision par défaut puis avec `Digits:=30` (on pourra au préalable mettre `epsilon` à 0 dans la configuration du CAS). Même question sur votre calculatrice si vous en avez une.
3. Calculer la valeur de  $a := \exp(\pi\sqrt{163})$  avec 30 chiffres significatifs, puis sa partie fractionnaire (`frac(.)`). Proposez une commande permettant de décider si  $a$  est un entier.
4. Déterminer la valeur et le signe de la fraction rationnelle

$$F(x, y) = \frac{1335}{4}y^6 + x^2(11x^2y^2 - y^6 - 121y^4 - 2) + \frac{11}{2}y^8 + \frac{x}{2y}$$

en  $x = 77617$  et  $y = 33096$  en faisant deux calculs, l'un en mode approché (`F(77617.0, 33096.0)`) et l'autre en mode exact. Que pensez-vous de ces résultats ? Combien de chiffres significatifs faut-il pour obtenir un résultat raisonnable en mode approché ?

5. À quelle vitesse votre logiciel multiplie-t-il des grands entiers (en fonction du nombre de chiffres) ? On pourra tester le temps de calcul  $t(n)$  (`time(a*(a+1))[0]`) du produit de  $a \times (a + 1)$  pour  $a = 10^n$  avec  $n = 10000, 20000, 40000$ . Comment évolue le temps de calcul lorsque le nombre de décimales double ?
6. Comparer le temps de calcul de  $a^n \pmod{m}$  par la fonction `powmod` et la méthode "prendre le reste modulo  $m$  après avoir calculé  $a^n$ " (vous pouvez aussi programmer la méthode rapide et la méthode lente, cf. par exemple l'article exponentiation rapide de wikipedia).

7. Programmation de la méthode de Horner  
Il s'agit d'évaluer efficacement un polynôme

$$P(X) = a_n X^n + \dots + a_0$$

en un point. On pose  $b_0 = P(\alpha)$  et on écrit :

$$P(X) - b_0 = (X - \alpha)Q(X)$$

où :

$$Q(X) = b_n X^{n-1} + \dots + b_2 X + b_1$$

On calcule alors par ordre décroissant  $b_n, b_{n-1}, \dots, b_0$ .

- Donner  $b_n$  en fonction de  $a_n$  puis pour  $i \leq n-1$ ,  $b_i$  en fonction de  $a_i$  et  $b_{i+1}$ . Indiquez le détail des calculs pour  $P(X) = X^3 - 2X + 5$  et une valeur de  $\alpha$  entière non nulle.
- Écrire un fonction `horn` effectuant ce calcul : on donnera en arguments le polynôme sous forme de la liste de ces coefficients (dans l'exemple  $[1, 0, -2, 5]$ ) et la valeur de  $\alpha$  et le programme renverra  $P(\alpha)$ . (On pourra aussi renvoyer les coefficients de  $Q$ ).
- En utilisant cette fonction, écrire une fonction qui calcule le développement de Taylor complet d'un polynôme en un point.

## 4 TP3 : Séries entières

### Exercice 1.

- Rappeler le développement de Taylor  $T_{2n+1}(x)$  au voisinage de  $x = 0$  de  $f(x) = \sin(x)$  à l'ordre  $2n$ .
- Tracer sur un même graphique les graphes des fonctions  $f$  et  $T_1, T_3, T_5, T_7$
- Graphiquement on voit que  $T_7(x)$  approche  $\sin(x)$  : sur quel intervalle cette approximation vous paraît-elle acceptable ?
- Donner une majoration du reste  $R_{2n+1}(x)$  du développement de Taylor de  $f$  à l'ordre  $2n+1$ , où  $f(x) = T_{2n+1}(x) + R_{2n+1}(x)$ .
- On prend  $T_7(x)$  comme valeur approchée de  $\sin(x)$  pour  $x \in [-1, 1]$ .  
Donner une majoration indépendante de  $x$  de l'erreur commise.  
(A titre d'illustration, tracer la différence  $T_7(x) - \sin(x)$ .)
- En déduire un encadrement de  $\sin(1)$ .

**Exercice 2.** On veut approcher  $\cos(x)$  à  $1e-6$  près en utilisant des développements en séries entières.

- Déterminer le plus petit  $k$  tel que :

$$T_{2k}(x) = \sum_{j=0}^k (-1)^j \frac{x^{2j}}{(2j)!}$$

réalise cette approximation sur  $[0, \pi/4]$ .

- Écrire une fonction qui calcule une valeur approchée à  $1e-6$  de  $\cos(x)$  sur  $[-100, 100]$  en justifiant et en effectuant les étapes suivantes :
  - on retire un multiple entier de  $\pi$  (obtenu par arrondi de  $x/\pi$ ) pour se ramener à l'intervalle  $[-\pi/2, \pi/2]$  (on discutera sur l'erreur commise)
  - si  $x$  est négatif, on remplace  $x$  par  $-x$  (que devient  $\cos(x)$  ?)
  - lorsque  $x \in [0, \pi/4]$ , on utilise le développement en séries ci-dessus.
  - lorsque  $x \in [\pi/4, \pi/2]$ , on se ramène au développement de l'exercice précédent en appliquant la formule  $\sin(x) = \cos(\pi/2 - x)$ .
- Afin de tester votre fonction  $f$  et éviter d'éventuelles erreurs grossières, faites afficher le graphe de  $f$ , disons sur l'intervalle  $[-10, 10]$ , puis le graphe de la différence  $f - \cos$  où  $\cos$  est la fonction déjà implémentée dans Xcas.

### Exercice 3

1. Pour  $x > 0$  exprimer  $\arctan(-x)$  en fonction de  $\arctan(x)$ . Calculer la dérivée de  $\arctan(x) + \arctan(1/x)$ , en déduire  $\arctan(1/x)$  en fonction de  $\arctan(x)$  pour  $x > 0$ . Montrer que le calcul de  $\arctan(x)$  sur  $\mathbb{R}$  peut se ramener au calcul de  $\arctan(x)$  sur  $[0, 1]$ .
2. Rappeler le développement en séries entières de  $\arctan(x)$  en  $x = 0$ , et son rayon de convergence. Soit  $\alpha \in [0, 1]$ , montrer que

$$\alpha - \frac{\alpha^3}{3} + \frac{\alpha^5}{5} - \frac{\alpha^7}{7} \leq \arctan(\alpha) \leq \alpha - \frac{\alpha^3}{3} + \frac{\alpha^5}{5}$$

en déduire que la méthode de Newton appliquée à l'équation  $\tan(x) - \alpha = 0$  avec comme valeur initiale  $\alpha - \frac{\alpha^3}{3} + \frac{\alpha^5}{5}$  est une suite décroissante qui converge vers  $\arctan(\alpha)$ .

3. Déterminez par cette méthode une valeur approchée à  $1e-8$  près de  $\pi/4 = \arctan(1)$ .
4. On pourrait calculer  $\pi/4$  avec la même précision en utilisant le développement en séries de la formule de Machin

$$\frac{\pi}{4} = 4 \arctan\left(\frac{1}{5}\right) - \arctan\left(\frac{1}{239}\right)$$

Combien de termes faudrait-il calculer dans le développement des deux arctangentes ?

### Exercice 4

1. Écrire le développement en séries entières au voisinage de  $x = 0$  de :

$$g(x) = \frac{e^{-x} - 1}{x}$$

2. On veut calculer une valeur approchée de

$$I = \int_0^1 g(x) dx$$

En utilisant le développement de  $g$ , écrire  $I$  sous la forme d'une série  $\sum_{j=0}^{\infty} v_j$ .

3. Soit  $R_n = \sum_{j=n+1}^{\infty} v_j$  le reste de cette série. Donner une majoration de  $|R_n|$ .
4. En déduire un encadrement de  $I$  faisant intervenir  $\sum_{j=0}^n v_j$ . Calculer explicitement cet encadrement lorsque  $n = 10$ .

### Exercice 5

Cet exercice reprend les calculs de  $\ln(x)$  et  $\exp(x)$  discutés en cours dans l'objectif de les illustrer par vos propres expériences sur ordinateur.

1. La série alternée  $s_n = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \frac{1}{k}$  tend vers  $\ln 2$ , et les termes consécutifs donnent des encadrements  $s_{2m+1} < \ln 2 < s_{2m}$ . Jusqu'à quel rang faut-il aller afin de garantir un encadrement à  $10^{-5}$  près ? Calculer cette approximation de  $\ln 2$  avec Xcas. Même question pour  $10^{-10}$ . Qu'observez-vous ?  
On considère ensuite la série  $\ln 2 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{(2k+1)3^{2k+1}}$ . Jusqu'à quel rang faut-il aller afin de garantir une approximation à  $10^{-5}$  près ? Calculer cette approximation de  $\ln 2$  avec Xcas. Même question pour  $10^{-10}$ . Conclusion ?
2. On se propose d'approcher  $\exp(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$  pour  $x = -32$ . Avant de se lancer dans ce calcul, estimer l'ordre de grandeur de  $\exp(-32)$  puis l'ordre de grandeur des plus grands termes dans la somme.  
Jusqu'à quel rang faut-il aller afin de garantir une approximation à  $10^{-20}$  près ? Calculer cette approximation de  $\exp(-32)$  avec Xcas, d'abord en utilisant la précision standard de 53 bits, soit 16 décimales. Quel problème observez-vous ? On pourra augmenter la précision des nombres flottants utilisés : quelle précision est nécessaire, environ, pour raisonnablement effectuer ce calcul ?  
Est-ce que ces problèmes se posent pour l'approximation de  $a_0 = \exp(-1)$  ? Comment en déduire une approximation de  $\exp(-32)$  avec un minimum d'opérations ?

### Exercice 6

On reprend des idées des exercices 4 et 5 pour implémenter le calcul de la fonction sinus intégral définie par :

$$\mathbf{Si}(x) = \int_0^x \frac{\sin(t)}{t} dt$$

1. Donner un développement en séries entières de la fonction **Si**, ainsi que le rayon de convergence, et une majoration du reste en fonction de  $x$ .
2. Lorsque  $x > 1$ , on a le problème de la série qui “commence par diverger” (comme pour l’exponentielle de l’exercice 5.2), mais sans possibilité de “réduire l’argument”. Combien de chiffres significatifs perd-on lorsqu’on calcule **Si**( $x$ ) par la série entière ? (En pratique, on calculera la série avec ce nombre de chiffres significatifs en plus).
3. Lorsque  $x$  est grand, on préfère utiliser le développement asymptotique de la fonction **Si**. On admettra que

$$\int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} dt = \frac{\pi}{2}$$

On calcule alors **Si** en faisant des intégrations par parties successives, en intégrant la fonction trigonométrique et en dérivant la fraction rationnelle. Les termes tout intégré donnent le développement asymptotique, et l’intégrale le reste. Par exemple, calculer le développement asymptotique à l’ordre 10 et une majoration du reste pour  $|x| \geq 100$ . En déduire une valeur approchée de **Si**(100).

4. En calculant **Si**(100) à l’aide du développement en séries entières, en déduire une valeur approchée de  $\pi$ .

## 5 TP4 : Polynômes

### Exercice 1

Donner le détail des calculs avec Bézout de la décomposition en éléments simples de :

$$f(x) = \frac{1}{(x^2 - 4)(x - 1)}$$

en déduire :

- une primitive de  $f$
- le coefficient de  $x^n$  du développement en séries entières de cette fraction en 0.

### Exercice 2

Factoriser sur  $\mathbb{R}$  (`factor`) et sur  $\mathbb{C}$  (`cfactor`) le polynôme  $P(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$ . Quels sont les degrés des facteurs ? Même question mais en remplaçant  $P$  par `evalf(P)`. En regroupant les racines de  $P$ , retrouver la factorisation exacte de  $P$  dans  $\mathbb{R}$  et  $\mathbb{C}$ .

### Exercice 3

Trouver une racine du polynôme  $P$  ci-dessus en appliquant la méthode de Newton avec une valeur initiale complexe aléatoire, éliminer cette racine par division euclidienne, chercher une autre racine, etc. jusqu’à obtenir la factorisation complète de  $P$ . Comparer la valeur de  $P$  et celle obtenue en développant le produit des  $X - \text{racine}$ .

Bonus : Écrire une fonction qui cherche une racine d’un polynôme en utilisant la méthode de Newton. Ajouter un test pour être sûr que la racine du polynôme est simple. Tester avec le polynôme  $P$  ci-dessus. Bonus : modifier la fonction ci-dessus pour trouver toutes les racines (lorsqu’on trouve une racine, on divise le polynôme par  $X - \alpha$ , et on relance la recherche de racines sur le polynôme obtenu).

### Exercice 4

Écrire une fonction qui détermine les racines rationnelles d’un polynôme  $P$  à coefficients entiers (elles sont de la forme  $p/q$  où  $q$  divise le coefficient dominant de  $P$  et  $\pm p$  divise son coefficient de plus bas degré). Tester avec le polynôme  $P = 12x^5 + 10x^4 - 6x^3 + 11x^2 - x - 6$ .

### Exercice 5

En utilisant les suites de Sturm, déterminer le nombre de racines du polynôme  $P$  ci-dessus sur l’intervalle  $[-3, 0]$ . Même question sur  $\mathbb{R}$  tout entier.

### Exercice 6

Représenter sur un même graphe  $\cos(x)$  et son polynôme interpolateur de Lagrange en utilisant les 7 points d'abscisses équidistantes  $\{0, \pi/6, \dots, \pi\}$ . Donner une majoration de l'erreur entre ce polynôme et la fonction  $\cos$  en un réel  $x$ , représenter graphiquement cette erreur pour  $x \in [0, \pi]$ . Où l'erreur est-elle la plus grande ?

### Exercice supplémentaire

Écrire un programme calculant les coefficients du polynôme d'interpolation de Lagrange par l'algorithme des différences divisées.

### Exercice 7

Éliminer successivement  $a$  et  $b$  du système :

$$\begin{cases} a^3 + b^3 + c^3 = 8 \\ a^2 + b^2 + c^2 = 6 \\ a + b + 2c = 4 \end{cases}$$

puis trouver les racines du polynôme en  $c$ , puis calculer les valeurs de  $b$  puis  $a$  correspondantes (en cherchant les racines du PGCD des 2 puis 3 équations en  $b$  puis  $a$  après remplacement de  $c$  puis  $b$  par leurs valeurs).

## 6 TP5 : Intégration

**Exercice 1** : Calculer une valeur approchée de

$$\int_0^1 \frac{dx}{1+x}$$

par la méthode des rectangles, du point milieu et des trapèzes en utilisant un pas de  $1/10$  et de  $1/100$  (vous pouvez la fonction `plotarea` ou utiliser le tableur ou écrire un programme effectuant ce calcul avec comme arguments la fonction, la borne inférieure, la borne supérieure et le nombre de subdivision). Observez numériquement la différence entre les valeurs obtenues et la valeur exacte de l'intégrale.

### Exercice 2

Calculer le polynôme interpolateur  $P$  de Lagrange de  $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$  aux points d'abscisse  $\frac{j}{4}$  pour  $j$  variant de 0 à 4. Donner un majorant de la différence entre  $P$  et  $f$  en un point  $x \in [0, 1]$ . Représenter graphiquement ce majorant. Calculer une majoration de l'erreur entre l'intégrale de  $f$  et l'intégrale de  $P$  sur  $[0, 1]$ . En déduire un encadrement de  $\pi/4$ .

### Exercice 3

On reprend le calcul de  $\int_0^1 \frac{dx}{1+x}$  mais en utilisant un polynôme interpolateur de degré 4 sur  $N$  subdivisions de  $[0, 1]$  (de pas  $h = 1/N$ ). Déterminer une valeur de  $N$  telle que la valeur approchée de l'intégrale ainsi calculée soit proche à  $10^{-8}$  près de  $\ln(2)$ . En déduire une valeur approchée à  $10^{-8}$  de  $\ln(2)$ .

Même question pour  $\int_0^1 \frac{dx}{1+x^2}$  et  $\pi/4$  (pour majorer la dérivée  $n$ -ième de  $\frac{1}{1+x^2}$ , on pourra utiliser une décomposition en éléments simples sur  $\mathbb{C}$ ).

## 7 TP6 : Algèbre linéaire

### 7.1 Méthode du pivot

1. Choisissez 5 vecteurs aléatoires exacts dans  $\mathbb{R}^3$ , trouvez deux relations linéaires indépendantes entre ces 5 vecteurs en calculant le noyau d'une application linéaire.
2. Déterminez le temps mis par votre logiciel pour résoudre un système linéaire de  $n$  équations à  $n$  inconnues à coefficients aléatoires numériques puis exacts de taille  $n = 5, 10, 20, 40$ . Commentez.
3. Soit  $M$  une matrice carrée aléatoire de taille 3 à coefficients entiers, on lui accole à droite la matrice identité de même taille puis on applique la fonction de réduction sous forme échelonnée, soit  $N$  la partie droite de la matrice réduite. Calculez  $M * N$ . Écrire une fonction `gaussinv` réalisant ce calcul pour une matrice carrée  $M$  quelconque.

## 7.2 Réduction des endomorphismes.

### 1. Polynôme caractéristique par interpolation

Soit  $B$  une matrice carrée aléatoire de taille  $n = 20$ . Calculez  $A = B^t B$  puis  $\det(A - \lambda I)$  pour  $\lambda = 0, \dots, n$  puis le polynôme caractéristique de  $B$  par interpolation de Lagrange. Factorisez le polynôme en mode approché, puis comparez avec les valeurs propres numériques de  $A = B^t B$  (obtenues par la fonction de calcul de valeurs propres du logiciel).

Bonus : Écrire une fonction qui calcule le polynôme caractéristique d'une matrice par cette méthode.

### 2. Polynôme caractéristique par puissances

Soit  $A$  une matrice carrée aléatoire de taille  $n = 5$  et  $v$  un vecteur aléatoire de taille 5. Calculez la matrice dont les colonnes sont  $v, Av, A^2v, \dots, A^5v$  puis une base de son noyau. En déduire le polynôme minimal et le polynôme caractéristique de  $A$ .

3. Écrire un programme mettant en oeuvre la méthode de la puissance. Utilisez ce programme pour trouver une valeur approchée de la valeur propre de norme maximale par la méthode de la puissance de  $B^t B$  où  $B$  est une matrice aléatoire.

4. En utilisant la méthode des itérations inverses, trouvez la plus petite valeur propre de la matrice précédente.

5. (bonus)

Pour trouver les autres valeurs propres/vecteurs propres, on élimine la valeur propre trouvée en remplaçant  $A$  par  $A' = A - \lambda_1 w_1^t w_1$ . Une fois une valeur propre de  $A'$  trouvée, on peut améliorer la précision en utilisant des itérations inverses sur la matrice  $A$ . Trouvez toutes les valeurs propres de la matrice :

$$D = \begin{pmatrix} 9 & -1 & 2 \\ -1 & 5 & -2 \\ 2 & -2 & -7 \end{pmatrix}$$

### 6. Couple de complexe conjugué de module maximal

Trouver le couple de valeurs propres de plus grand module de la matrice :

$$E = \begin{pmatrix} -3 & -8 & -3 & 4 \\ 7 & 8 & 6 & 5 \\ -1 & 4 & -4 & 1 \\ 7 & -4 & -5 & 7 \end{pmatrix}$$

Faites de même pour le couple de plus petit module.