

TRAVAUX PRATIQUES - E.D.P.

Groupe 3

Travail individuel et personnel

Table des matières

|                                                               |          |
|---------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1 Les différences finies pour une EDP 1D stationnaire</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Problème modèle Dirichlet/Dirichlet . . . . .             | 1        |
| 1.2 Problème modèle Neumann/Dirichlet . . . . .               | 3        |
| 1.2.1 Neumann ordre 1 . . . . .                               | 3        |
| 1.2.2 Neumann ordre 2 . . . . .                               | 3        |
| <b>2 Les Différences Finies pour l'équation de la chaleur</b> | <b>3</b> |

1 Les différences finies pour une EDP 1D stationnaire

1.1 Problème modèle Dirichlet/Dirichlet

On souhaite résoudre par un schéma de type différences finies le problème suivant

$$-u''(x) = f(x), \forall x \in ]a; b[ \quad (1.1)$$

$$u(a) = u_a \in \mathbb{R} \quad (1.2)$$

$$u(b) = u_b \in \mathbb{R} \quad (1.3)$$

Par exemple, on peut prendre comme jeu de données  $a = -\frac{1}{3}\pi$ ,  $b = \frac{5}{3}\pi$ ,  $f(x) = \cos(-x+1) + \sin(-\pi+x)$ ,  $u_a = \frac{1}{2}\sqrt{3} + \cos(\frac{1}{3}\pi+1)$  et  $u_b = \frac{1}{2}\sqrt{3} + \cos(-\frac{5}{3}\pi+1)$ . Dans ce cas la solution exacte est  $u(x) = \cos(-x+1) + \sin(-\pi+x)$ .

On définit la matrice associée au laplacien (en 1D opérateur dérivée seconde) discrétisé à l'ordre 2 par  $\mathbb{K} \in \mathcal{M}_d(\mathbb{R})$  avec

$$\mathbb{K} = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}$$

**Q. 1** Ecrire une fonction `Lap1D` (fichier `Lap1D.m`) permettant de générer cette matrice et un petit programme (fichier `prg0.m`) permettant de la tester/valider rapidement.  $\square$

L'archive fournie, fichier `CodesEDP0G3.zip` disponible sur Discord, contient le script/programme `EDP0`, et les fonctions `setEDP0` et `solveEDP0`, permettant de résoudre numériquement le problème (1.1)-(1.2)-(1.3) par un schéma différences finies d'ordre 2. Ce programme va afficher la solution numérique obtenue, la solution exacte et l'erreur. La fonction `solveEDP0` utilise la fonction `Lap1D` que vous avez implémentée.

Dans ce programme, la variable `x` contient l'ensemble des  $x_i$ ,  $i \in \llbracket 0, N \rrbracket$ , discrétisation régulière de l'intervalle  $[a; b]$  définie par

$$x_i = a + ih, \text{ avec } h = (b - a)/N.$$

**Q. 2** Ecrire le programme `OrdreEDP0` (fichier `OrdreEDP0.m`) permettant de représenter l'erreur en fonction du pas  $h$  de discrétisation en échelle logarithmique et d'afficher l'ordre de la méthode. Un exemple de représentation est donné en Figure 1. □

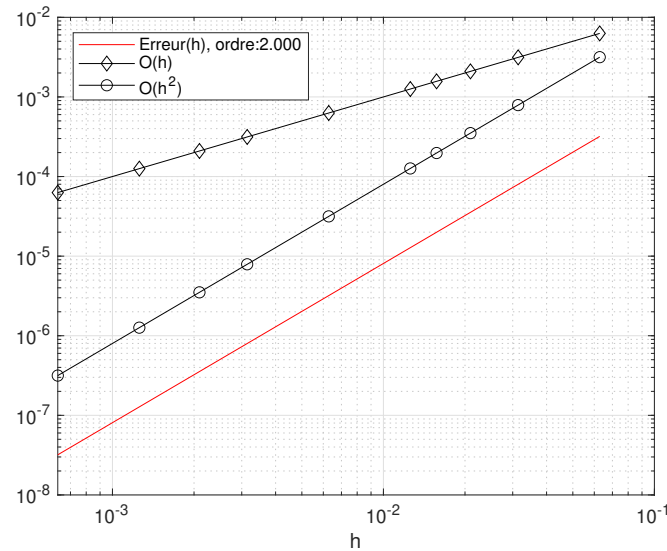


FIGURE 1 – Représentation de l'erreur en fonction de  $h$

**Q. 3** a. Sur le même principe que l'exemple précédent, écrire les fonctions `setEDP1` et `solveEDP1`, ainsi que le programme `EDP1` permettant de calculer une solution approchée de :

$$-u''(x) + \nu u(x) = f(x), \quad \forall x \in ]a; b[ \quad (1.4)$$

$$u(a) = u_a \in \mathbb{R} \quad (1.5)$$

$$u(b) = u_b \in \mathbb{R} \quad (1.6)$$

avec  $\nu \geq 0$ . Avec un choix judicieux de données, ce programme représentera la solution approchée ainsi que la solution exacte.

b. Ecrire le programme `OrdreEDP1` (fichier `OrdreEDP1.m`) permettant de représenter, en échelle logarithmique, l'erreur en fonction du pas  $h$  de discrétisation et d'afficher l'ordre de la méthode. Le jeu de données sera choisi judicieusement. □

**A faire en 1h00 (temps indicatif)**

- ◇ Créer une archive compressée nommée `<NOM>-TP2-part1-Q1aQ3` contenant l'ensemble des fichiers nécessaires à l'exécution des programmes demandés en Q1 à Q3. Ici `<NOM>` correspond évidemment à votre nom.
- ◇ Envoyer un mail à l'enseignant ayant pour **sujet** "`<NOM> TP2 part1 Q1 a Q3`" et y joindre l'archive.

## 1.2 Problème modèle Neumann/Dirichlet

On cherche à résoudre par un schéma de type différences finies le problème suivant

$$-u''(x) = f(x), \forall x \in ]a; b[ \quad (1.7)$$

$$u'(a) = v_a \in \mathbb{R} \quad (1.8)$$

$$u(b) = u_b \in \mathbb{R} \quad (1.9)$$

Par exemple, on peut prendre comme jeu de données  $a = -\frac{1}{3}\pi$ ,  $b = \frac{3}{4}\pi$ ,  $f(x) = 6x + 9 \cos(3x - 2)$ ,  $v_a = -\frac{1}{3}\pi^2 + 3 \sin(\pi + 2)$  et  $u_b = -\frac{27}{64}\pi^3 + \cos(\frac{9}{4}\pi - 2)$ . Dans ce cas la solution exacte est  $u(x) = -x^3 + \cos(3x - 2)$ .

### 1.2.1 Neumann ordre 1

Dans la condition aux limites de Neumann (1.8), on va approcher  $u'(a)$  à l'ordre 1 par  $\frac{u(a+h)-u(a)}{h}$

**Q. 4** Ecrire les fonctions `setEDP2` et `solveEDP2`, ainsi que le programme `EDP2` permettant de représenter une solution approchée du problème précédent.  $\square$

**Q. 5** Ecrire le programme `OrdreEDP2` (fichier `OrdreEDP2.m`) permettant de représenter l'erreur en fonction du pas  $h$  de discrétisation en échelle logarithmique et d'afficher l'ordre de la méthode.  $\square$

### 1.2.2 Neumann ordre 2

Dans la condition aux limites de Neumann (1.8), on va approcher  $u'(a)$  à l'ordre 2 par  $\frac{-u(a+2h)+4u(a+h)-3u(a)}{2h}$

**Q. 6** Ecrire la fonction `solveEDP3` permettant de résoudre le problème (1.7)-(1.8)-(1.9) à l'ordre 2 ainsi que le programme `EDP3` permettant de représenter une solution approchée à l'ordre 2 de ce problème.  $\square$

**Q. 7** Ecrire le programme `OrdreEdp3` (fichier `OrdreEDP3.m`) permettant de représenter l'erreur en fonction du pas  $h$  de discrétisation en échelle logarithmique et d'afficher l'ordre de la méthode.  $\square$

### — A faire en 2h00 (temps indicatif) —

- ◇ Créer une archive compressée nommée `<NOM>-TP2-part1-Q4aQ7` contenant l'ensemble des fichiers nécessaires à l'exécution des programmes demandés en Q4 à Q7. Ici `<NOM>` correspond évidemment à votre nom.
- ◇ Envoyer un mail à l'enseignant ayant pour sujet "`<NOM> TP2 part1 Q4 a Q7`" et y joindre l'archive.

## 2 Les Différences Finies pour l'équation de la chaleur

On souhaite résoudre numériquement l'E.D.P. suivante

$$\frac{\partial u}{\partial t}(t, x) - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(t, x) + c(x)u(t, x) = f(t, x), \forall (t, x) \in ]t_0; t_0 + T] \times ]a; b[, \quad (2.1)$$

$$u(t_0, x) = u_0(x), \forall x \in [a; b], \quad (2.2)$$

$$u(t, a) = u_a(t), \forall t \in [t_0; t_0 + T], \quad (2.3)$$

$$u(t, b) = u_b(t), \forall t \in [t_0; t_0 + T]. \quad (2.4)$$

avec  $\nu$  un réel strictement positif,  $t_0 \in \mathbb{R}$ ,  $T > 0$ ,  $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ ,  $a < b$  et  $c$  une fonction positive.

On note  $t^n$ ,  $n \in \llbracket 0, N_t \rrbracket$  et  $x_i$ ,  $i \in \llbracket 0, N_x \rrbracket$  les discrétisations régulières des intervalles  $[t_0; t_0 + T]$  et  $[a; b]$  avec  $N_t$  pas de discrétisation en temps et  $N_x$  pas de discrétisation en espace.

On souhaite implémenter deux schémas de résolution de cette E.D.P. :

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} - \nu \frac{u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} + c_i u_i^{n+1} = f_i^{n+1}. \quad (2.5)$$

et

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} - \nu \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{\Delta x^2} + c_i u_i^n = f_i^n. \quad (2.6)$$

où  $\Delta t = T/N_t$ ,  $\Delta x = (b-a)/N_x$ ,  $f_i^n = f(t^n, x_i)$ ,  $c_i = c(x_i)$  et  $u_i^n \approx u(t^n, x_i)$ .

On rappelle que le premier schéma est le **schéma d'Euler implicite** et le second le **schéma d'Euler explicite**. Le schéma d'Euler implicite est inconditionnellement stable et le schéma d'Euler explicite est stable sous la condition de C.F.L.

$$\nu \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}.$$

On note,  $\forall n \in \llbracket 0, N_t \rrbracket$ ,  $\mathbf{U}^n$  les vecteurs de dimension  $N_x + 1$ , de composantes  $\mathbf{U}_i^n = u_{i-1}^n$ ,  $\forall i \in \llbracket 1, N_x + 1 \rrbracket$ .

**Q. 8** Pour chaque schéma, écrire sur feuille et de manière détaillée la discrétisation de l'E.D.P. (2.1) à (2.4) □

On étudie cette E.D.P. avec les données  $t_0 = 0$ ,  $T = 1$ ,  $a = -\frac{1}{3}$ ,  $b = \frac{2}{3}$ ,  $\nu = \frac{1}{5}$ ,  $k = 3$

$$\begin{aligned} c(x) &= x^2 + \frac{1}{5}, \\ f(t, x) &= \frac{1}{5} \pi^2 \cos\left(\frac{1}{5} \pi + \pi x\right) \cos(kt) + \frac{1}{5} (5x^2 + 1) \cos\left(\frac{1}{5} \pi + \pi x\right) \cos(kt) - k \cos\left(\frac{1}{5} \pi + \pi x\right) \sin(kt), \\ u_0(x) &= \cos\left(\frac{1}{5} \pi + \pi x\right), \\ u_a(t) &= \frac{1}{8} \left( \sqrt{5} + 2 \sqrt{-\frac{3}{2} \sqrt{5} + \frac{15}{2} + 1} \right) \cos(kt), \\ u_b(t) &= -\frac{1}{8} \left( \sqrt{5} + 2 \sqrt{-\frac{3}{2} \sqrt{5} + \frac{15}{2} + 1} \right) \cos(kt). \end{aligned}$$

Dans ce cas, la solution exacte est donnée par  $u_{\text{ex}}(t, x) = \cos\left(\frac{1}{5} \pi + \pi x\right) \cos(kt)$ .

**Q. 9** Pour résoudre l'E.D.P. par un schéma d'Euler implicite, des codes sont fournis (archive CodesEDP-chaueurG3.zip disponible sur Discord) : le programme `mainChaleurImplicite.m` (script Matlab), ainsi que les fonctions `setEDP.m`, `CalculF.m`, `NormInf.m` et `PlotSol.m`. Pour exécuter le programme `mainChaleurImplicite`, il manque le fichier `EulerImplicite.m` correspondant à la fonction :

`[t,x,u]=EulerImplicite(EDP,Nt,Nx)`

résolvant l'E.D.P. par un schéma d'Euler implicite avec

- **EDP** : structure, retournée par la fonction `setEDP`, contenant l'ensemble des données de l'E.D.P. à résoudre.
- **Nt** : nombre de pas de discrétisation en temps,
- **Nx** : nombre de pas de discrétisation en espace,
- **t** : discrétisation en temps (dimension `Nt+1`),
- **x** : discrétisation en espace (dimension `Nx+1`),
- **u** : `u(i,n)` solution approchée au temps `t(n)` et point `x(i)` (dimension `(Nx+1,Nt+1)`),

Ecrire la fonction `EulerImplicite`. □

**Q. 10** a. Pour résoudre l'E.D.P. par un schéma d'Euler explicite, le programme `mainChaleurExplicite` (script Matlab) est fourni, ainsi que les fonctions `setEDP.m`, `CalculF.m`, `NormInf.m` et `PlotSol.m` (voir question précédente).

Il manque le fichier `EulerExplicite.m` correspondant à la fonction :

`[t,x,u]=EulerExplicite(EDP,Nt,Nx)`

résolvant l'E.D.P. par un schéma d'Euler explicite. Les paramètres sont identiques à ceux de la fonction `EulerImplicite`.

Ecrire la fonction `EulerExplicite`.

- b. Dans le programme `mainChaleurExplicite`, changer les paramètres `Nx` et `Nt` comme proposé dans le code pour avoir convergence ou divergence...

□

Comme première application, résoudre numériquement par le schéma implicite d'Euler le problème de conduction thermique dans une barre de longueur  $L = 6$  :

$$\frac{\partial u}{\partial t}(t, x) - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(t, x) = 0, \quad \forall (t, x) \in ]0; T] \times ]0; L[, \quad (2.7)$$

$$u(t_0, x) = u_0(x), \quad \forall x \in [0; L], \quad (2.8)$$

$$u(t, 0) = u_g(t), \quad \forall t \in [0; T], \quad (2.9)$$

$$u(t, L) = u_d(t), \quad \forall t \in [0; T]. \quad (2.10)$$

avec  $T = 10$ ,  $u_0(x) = 100$ ,  $\forall x \in [0, L]$

$$u_g(t) = \begin{cases} 100 - 70t, & \forall t \in [0, 1] \\ 30, & \forall t > 1 \end{cases}$$

$$u_d(t) = \begin{cases} 100 - 80t, & \forall t \in [0, 1] \\ 20, & \forall t > 1 \end{cases}$$

- Q. 11** a. Ecrire le programme `Q11main.m` permettant de résoudre ce problème par le schéma d'Euler implicite.  
b. Executer ce programme pour différentes valeurs de  $\nu$  (par exemple  $\nu = 0.1$ ,  $\nu = 1$  et  $\nu = 10$ . Qu'observe-t'on ?

□

Pour la seconde application, la seule modification par rapport à l'application précédente est que la conductivité thermique est une fonction constante par morceaux en espace :

$$\nu(x) = \begin{cases} 1, & \forall x \in [0, \frac{L}{3}] \\ 0.2 & \forall x \in ]\frac{L}{3}, \frac{2L}{3}] \\ 0.5 & \forall x \in ]\frac{2L}{3}, L]. \end{cases}$$

- Q. 12** a. Expliquer rapidement, sur feuille, quels sont les modifications à apporter au programme précédent.  
b. Ecrire le programme `Q12main.m` permettant de résoudre ce problème par le schéma d'Euler implicite.

□

### A faire en 3h00 (temps indicatif)

- ◇ Créer une archive compressée nommée `TP2-Q9aQ12` contenant l'ensemble des fichiers nécessaires à l'exécution des programmes demandés en Q9 à Q12.
- ◇ Envoyer un mail à l'enseignant ayant pour sujet "<NOM> TP2 Q9a12" et y joindre l'archive compressée créée précédemment ainsi qu'un scan (format pdf) de la réponse manuscrite à la question Q.12 1. Ici <NOM> correspond évidemment à votre nom.