

DM RNDP

Jules Berry, Thomas Poisson

Table des matières

1	Préliminaires	2
1.1	Question 1	2
1.2	Question 2	2
1.3	Question 3	3
1.4	Quastion 4	4
1.5	Question 5	6
2	Polynômes de Tchebychev	6
2.1	Question 1	6
2.2	Question 2	7

1 Préliminaires

1.1 Question 1

On cherche une fonction $u \in \mathcal{C}^2([-1, 1])$ telle que

$$\begin{cases} -(\alpha(x)u'(x))' + \gamma(x)u(x) = f(x) & \forall x \in]-1, 1[, \\ u(-1) = c_1, \quad u(1) = c_2 \end{cases}. \quad (1)$$

Soit u un solution de ce problème et on pose

$$v(x) = u(x) - c_1 \frac{x-1}{2} - c_2 \frac{x+1}{2}$$

cette fonction est alors aussi $\mathcal{C}^2([-1, 1])$ et on a de plus

$$v'(x) = u'(x) - \frac{c_1 + c_2}{2}, \quad v''(x) = u''(x).$$

En injectant cette fonction dans l'EDO de (1) on a

$$\begin{aligned} -(\alpha(x)v'(x))' + \gamma(x)v(x) &= -\alpha'(x)v'(x) - \alpha(x)v''(x) + \gamma(x)v(x) \\ &= -(\alpha(x)u'(x))' + \frac{c_1 + c_2}{2}\alpha'(x) + \gamma(x)u(x) - \gamma(x)\left(c_1 \frac{x-1}{2} + c_2 \frac{x+1}{2}\right) \end{aligned}$$

On a donc que la fonction v est solution du problème

$$\begin{cases} -(\alpha(x)v'(x))' + \gamma(x)v(x) = \tilde{f}(x) \\ v(-1) = v(1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

où $\tilde{f}(x) = f(x) + \gamma(x)\left(c_1 \frac{x-1}{2} + c_2 \frac{x+1}{2}\right) - \frac{c_1 + c_2}{2}\alpha'(x)$.

De plus il est clair que $v(-1) = v(1) = 0$ et comme $f \in L^2([-1, 1])$, $\alpha \in \mathcal{C}^1([-1, 1])$ et $\gamma \in L^\infty([-1, 1]) \subset L^2([-1, 1])$ on a aussi $\tilde{f} \in L^2([-1, 1])$.

On voit alors que le problème (2) est de la forme souhaitée. De plus si v est une solution de ce problème et en posant $w(x) = v(x) + c_1 \frac{x-1}{2} + c_2 \frac{x+1}{2}$, on peut voir que w est une solution de (1). On a donc montré que l'étude de ce dernier se ramène à l'étude de (2).

1.2 Question 2

On pose $u = \rho v$ où $\rho : x \in [-1, 1] \mapsto \exp\left(\frac{1}{2} \int_{-1}^x \frac{\beta(t)}{\alpha(t)} dt\right)$. Alors si u est une solution de l'EDO

$$-(\alpha u')' + \beta u' + \gamma u = f \quad (3)$$

On remarque alors que

$$\begin{aligned}\rho'(x) &= \frac{d}{dx} \exp\left(\frac{1}{2} \int_{-1}^x \frac{\beta(t)}{\alpha(t)} dt\right) = \frac{\beta(x)}{2\alpha(x)} \exp\left(\frac{1}{2} \int_{-1}^x \frac{\beta(t)}{\alpha(t)} dt\right) \\ &= \frac{\beta(x)}{2\alpha(x)} \rho(x).\end{aligned}$$

Et par suite

$$\rho'' = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta' \alpha - \beta \alpha'}{\alpha^2} \rho + \frac{\beta}{\alpha} \rho' \right) = \frac{\beta' \alpha + 2\beta^2 - \beta \alpha'}{2\alpha^2} \rho.$$

En réétudiant l'EDO on trouve donc

$$\begin{aligned}-(\alpha u')' + \beta u' + \gamma u &= -\alpha'(\rho' v + \rho v') - \alpha(\rho'' v + 2\rho' v' + \rho v'') + \beta(\rho' v + \rho v') + \gamma \rho v \\ &= \rho \left(-\frac{\alpha' \beta v}{\alpha} - \alpha' v' - \frac{\beta' v}{2} - \frac{\beta^2 v}{\alpha} + \frac{\beta \alpha' v}{\alpha} - \beta v' - \alpha v'' + \frac{\beta^2 v}{\alpha} + \beta v' + \gamma v \right) = f\end{aligned}$$

Par définition de la fonction de ρ celle-ci est strictement positive et on peut donc diviser par ρ dans l'équation. Alors en simplifiant le membre de gauche on trouve

$$-\alpha' v' - \alpha v'' - \frac{1}{2} \beta' v + \gamma v = \frac{f}{\rho}.$$

Alors en posant $\delta = \gamma - \frac{1}{2} \beta'$ et $g = \frac{f}{\rho}$. On trouve donc

$$-(\alpha v')' + \delta v = g. \quad (4)$$

On remarque au passage que nous avons supposé que la fonction β était au moins \mathcal{C}^1 .

1.3 Question 3

On considère l'EDO $-(\alpha u')' + \gamma u = f$ sur $[a, b]$. En posant

$$h : x \in [-1, 1] \mapsto a \frac{x-1}{2} + b \frac{x+1}{2}$$

et on considérant la fonction $v : x \in [-1, 1] \mapsto u \circ h(x)$ on trouve que $v(-1) = u(a)$ et $v(1) = u(b)$. De plus en posant aussi $\tilde{\alpha} = \alpha \circ h$, $\tilde{\gamma} = \frac{b-a}{2} \gamma \circ h$ on a en supposant que u est une solution de l'EDO

$$\begin{aligned}-(\tilde{\alpha}(x)v'(x))' + \tilde{\gamma}(x)v(x) &= -(\alpha(h(x))(u(h(x)))')' + \frac{a+b}{2} \gamma(h(x))v(h(x)) \\ &= -\frac{a+b}{2}(\alpha(h(x))u'(h(x)))' + \frac{a+b}{2} \gamma(h(x))u(h(x)) \\ &= \frac{a+b}{2}f(h(x)).\end{aligned}$$

On peut alors poser $\tilde{f}(x) = \frac{a+b}{2} f \circ h(x)$ et on a alors que v est solution de la nouvelle EDO

$$-(\tilde{\alpha}(x)v'(x))' + \tilde{\gamma}(x)v(x) = \tilde{f}(x).$$

Comme la fonction h est un polynôme de degrés un elle est bijective de $[-1, 1]$ dans $[a, b]$. Alors si v est solution de la dernière EDO on peut inverser la construction en posant $u = h^{-1} \circ v$ on voit que u est solution de la première EDO.

1.4 Quastion 4

On cherche ici une solution $u \in H^2([-1, 1])$ de

$$\begin{cases} -(\alpha(x)u'(x))' + \gamma(x)u(x) = f(x) & \forall x \in [-1, 1] \\ u(-1) = u(1) = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

On commence par trouver une solution à la formulation variationnelle de (5) dans l'espace $H_0^1([-1, 1])$. Soit $\phi \in H_0^1([-1, 1])$ on a alors

$$-\int_{-1}^1 (\alpha(t)u'(t))'\phi(t) dt + \int_{-1}^1 \gamma(t)u(t)\phi(t) dt = \int_{-1}^1 f(t)\phi(t) dt.$$

En intégrant par parties on trouve

$$\int_{-1}^1 (\alpha(t)u'(t))\phi'(t) dt + \int_{-1}^1 \gamma(t)u(t)\phi(t) dt = \int_{-1}^1 f(t)\phi(t) dt.$$

On cherche ensuite à appliquer le théorème de Lax-Milgram dans $H_0^1([-1, 1])$. Pour cela on pose a la forme bilinéaire

$$a : (\phi, \psi) \in (H_0^1([-1, 1]))^2 \mapsto \int_{-1}^1 (\alpha(t)\phi'(t))\psi'(t) dt + \int_{-1}^1 \gamma(t)\phi(t)\psi(t) dt$$

et l la forme linéaire

$$l : \phi \in H_0^1([-1, 1]) \mapsto \int_{-1}^1 f(t)\phi(t) dt.$$

On a alors

$$|\langle l, \phi \rangle| \leq \int_{-1}^1 |f(t)\phi(t)| dt \leq \|f\|_{L^2} \|\phi\|_{L^2} \leq \|f\|_{L^2} \|\phi\|_{H^1}$$

ce qui montre que l est une forme linéaire continue sur $H_0^1(-1, 1)$. De plus on a aussi

$$\begin{aligned} |a(\phi, \psi)| &\leq \int_{-1}^1 |\alpha(t)\phi'(t)\psi'(t)| dt + \int_{-1}^1 |\gamma(t)\phi(t)\psi(t)| dt \\ &\leq \|\alpha\|_{L^\infty} \int_{-1}^1 |\phi'(t)\psi'(t)| dt + \|\gamma\|_{L^\infty} \int_{-1}^1 |\phi(t)\psi(t)| dt \\ &\leq M (\|\phi'\|_{L^2} \|\psi'\|_{L^2} + \|\phi\|_{L^2} \|\psi\|_{L^2}) \\ &\leq M \sqrt{\|\phi\|_{L^2}^2 + \|\phi'\|_{L^2}^2} \sqrt{\|\psi\|_{L^2}^2 + \|\psi'\|_{L^2}^2} \\ &= M \|\phi\|_{H^1} \|\psi\|_{H^1} \end{aligned}$$

Ce qui montre que a est une forme bilinéaire continue sur $H_0^1(-1, 1)$.

Il reste donc à montrer que a est coercive. Pour cela il suffit de voir que

$$a(\phi, \phi) = \int_{-1}^1 \alpha(t) |\phi'(t)|^2 dt + \int_{-1}^1 \gamma(t) |\phi(t)|^2 dt \geq \alpha_0 \|\phi'\|_{L^2}^2$$

et par l'inégalité de Poincaré on sait que la norme $\phi \mapsto \|\phi'\|_{L^2}$ est équivalente à la norme usuelle de $H_0^1(-1, 1)$.

On peut à présent appliquer le théorème de Lax-Milgram pour obtenir l'existence d'une unique solution u à la formulation variationnelle du problème (5) dans $H_0^1(-1, 1)$. Il nous faut à présent montrer que cette solution est dans $H_0^2(-1, 1)$, c'est-à-dire qu'elle admet une dérivée faible seconde qui soit dans $L^2(-1, 1)$. On cherche donc une fonction $g \in L^2(-1, 1)$ qui vérifie

$$-\int u\phi' = \int g\phi$$

pour toute fonction test $\phi \in \mathcal{D}(-1, 1)$.

Comme u est solution de la formulation variationnelle du problème, on sait déjà que

$$\int_{-1}^1 (\alpha(t)u'(t))\phi'(t) dt = \int_{-1}^1 (f(t) - \gamma(t)u(t))\phi(t) dt.$$

Ce qui signifie que la fonction $\alpha u'$ admet comme dérivée faible $\gamma u - f$ qui se trouve être dans L^2 . On a donc que $\alpha u \in H^1$. Or on sait que $(\alpha u')' = \alpha' u' + \alpha u''$. Ce qui donne

$$u'' = \frac{\gamma u - \alpha' u' - f}{\alpha}$$

qui a bien un sens car α est supposée strictement positive. De plus peut voir que u'' est dans L^2 . Ce qui montre que la solution u de (5) est dans H^2 .

1.5 Question 5

On se donne la fonction

$$\omega(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

et on cherche à montrer que la forme bilinéaire

$$\langle \phi, \psi \rangle_\omega = \int_{-1}^1 \phi(x)\psi(x)\omega(x) dx$$

définit un produit scalaire sur $\mathcal{C}^0([-1, 1])$.

La forme bilinéaire $\langle \cdot, \cdot \rangle_\omega$ est clairement symétrique et on a

$$\langle \phi, \phi \rangle_\omega = \int \frac{|\phi(x)|^2}{\sqrt{1-x^2}} dx \geq 0$$

et on remarque que $\langle \phi, \phi \rangle_\omega = 0$ si, et seulement si, $\phi = 0$ car ω est strictement positive sur $]-1, 1[$. Il reste juste à montrer que l'intégrale est bien définie. Or on a

$$|\langle \phi, \psi \rangle_\omega| \leq \|\phi\|_\infty \|\psi\|_\infty \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx.$$

Or on a

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx &= 2 \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1-x}\sqrt{1+x}} dx \\ &\leq 2 \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1-x}} dx < +\infty. \end{aligned}$$

Ce qui montre que $\langle \cdot, \cdot \rangle_\omega$ définit un produit scalaire.

2 Polynômes de Tchebychev

2.1 Question 1

On montre que pour tout $n \in \mathbb{N}$ il existe une unique polynôme $T_n \in \mathbb{R}_n[X]$ tel que $T_n(\cos(\omega)) = \cos(n\omega)$. On procède par récurrence en commençant par remarquer que l'on a clairement $T_0(X) = 1$ et $T_1(X) = X$. Ensuite on a

$$\begin{aligned} (\cos(\omega))^n &= \left(\frac{e^{i\omega} + e^{-i\omega}}{2} \right)^n = 2^{-n} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} e^{ik\omega} e^{-i(n-k)\omega} \\ &= 2^{-n} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} e^{i(2k-n)\omega}. \end{aligned}$$

On note de plus que $\binom{n}{k} = \binom{n}{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ et on note alors cette quantité h_k^n . On a alors

$$\begin{aligned} (\cos(\omega))^n &= 2^{-n} \sum_{k=0}^{\lfloor n/2 \rfloor} h_k^n (e^{i(2k-n)\omega} + e^{i(n-2k)\omega}) \\ &= 2^{-(n-1)} \sum_{k=0}^{\lfloor n/2 \rfloor} h_k^n \cos((n-2k)\omega). \end{aligned}$$

On note à présent $m = \lfloor n/2 \rfloor$ et d'après l'hypothèse de récurrence pour tout $k \in \{1, \dots, m\}$ il existe un polynôme $T_{n-2k}(X)$ tel que $T_{n-2k}(\cos(\omega)) = \cos((n-2k)\omega)$. On peut alors poser

$$T_n(X) = X^n - \sum_{k=1}^m 2^{(n-1)} \widetilde{h}_k^n T_{n-2k}(X)$$

où l'on a noté $\widetilde{h}_k^n = \begin{cases} (h_k^n)^{-1}, & h_k^n \neq 0 \\ 0, & h_k^n = 0 \end{cases}$.

Pour l'unicité, si on suppose qu'il existe un autre polynôme $R_n(X)$ vérifiant que $R_n(\cos(\omega)) = \cos(n\omega)$. Alors pour tout $\omega \in [0, 2\pi]$ $\cos(\omega)$ est une racine du polynôme $T_n - R_n$ ce qui implique $T_n - R_n = 0$.

2.2 Question 2

On montre que $T_{n+2}(x) + T_n(x) = 2xT_{n+1}(x)$. Pour cela on a

$$\begin{aligned} T_{n+2}(\cos(\omega)) + T_n(\cos(\omega)) &= \cos((n+2)\omega) + \cos(n\omega) \\ &= \frac{e^{i((n+2)\omega)} + e^{-i((n+2)\omega)} + e^{in\omega} + e^{-in\omega}}{2} \\ &= \frac{e^{i((n+1)\omega)}(e^{in\omega} + e^{-in\omega}) + e^{-i((n+1)\omega)}(e^{in\omega} + e^{-in\omega})}{2} \\ &= 2 \cos(\omega) \cos((n+1)\omega) \\ &= 2 \cos(\omega) T_{n+1}(\cos(\omega)). \end{aligned}$$

Comme de plus \cos est une bijection de $[0, 2\pi]$ dans $[-1, 1]$ on a montré que pour tout $x \in [-1, 1]$ on a $T_{n+2}(x) + T_n(x) = 2xT_{n+1}(x)$.