

Problèmes aux limites en dimension 1

Simon Hergott

May 10, 2023

1 Introduction au problème

Cet article aura pour but de résumer les résultats et applications concernant les problèmes aux limites en dimension 1. Nous reviendrons sur la méthode des différences finies, fondant l'approximation des solutions des problèmes aux limites, et nous traiterons de plus quelques applications les plus courantes pour cette catégorie de problèmes. Éventuellement, nous verrons brièvement les méthodes de résolution de ces problèmes en dimension 2. Rappelons d'abord l'énoncé du modèle du problème aux limites en dimension 1:

$$-u''(x) = f(x) \quad \forall x \in]0, 1[\quad (1)$$

$$u(0) = u(1) = 0 \quad (2)$$

Ce problème est donc simplement caractérisé par l'équation (1) munie des conditions limites (2). Une partie importante lors de la résolution de ce problème est donc de trouver les valeurs propres et les fonctions propres (fonctions ne subissant qu'une transformation scalaire lors de leur utilisation comme solution) de l'équation différentielle

$$X'' + \alpha X = 0 \quad \forall X \in]0, 1[, \forall \alpha \in \mathbb{R}^* \quad (3)$$

Nous pouvons alors écrire les solutions de (1) comme les fonctions de la forme

$$u(x) = c_1 + c_2 x - \int_0^x F(s) ds \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R} \quad (4)$$

selon le théorème fondamental de l'Analyse, avec

$$F(s) = \int_0^s f(t) dt \quad (5)$$

Nous verrons que l'on peut écrire u sous la forme

$$u(x) = \int_0^1 G(x, s) f(s) ds \quad x \in [0, 1] \quad (6)$$

ce qui nous permettra d'introduire avec G le concept de *Fonction de Greene*.

Les applications du problème aux limites en dimension 1 sont multiples, et relativement nombreuses dans la physique où sa résolution permet la simulation de plusieurs phénomènes tels que la conduction de la chaleur, et les déformations élastiques.

2 Méthode des différences finies

Développée en 1715 par Brook Taylor dans son ouvrage *Methodus incrementorum directa et inversa*, la méthode des différences finies est un procédé courant utilisé pour approcher la solution d'équations différentielles. En résumé, on établit une grille de points généralement uniforme sur l'espace de recherche pour discrétiser le problème (le réduire à un nombre fini de pas), puis on réduit la distance entre les points pour approcher au maximum la solution. Formellement, on utilise la formule de Taylor pour discrétiser les différentielles n -ièmes : on peut alors choisir la formule de Taylor-Young, ou la formule de Taylor avec reste intégral pour évaluer les erreurs (la discrétisation induit une approximation, qui engendre des erreurs). Dans le cas de Taylor-Young simple (on appellera ici de cette manière la formule de Taylor sans reste intégral), on a :

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \sum_{0 \leq i \leq n} \frac{f^{(i)}(x_0)}{i!} h^i$$

La méthode des différences finies sert à approximer la dérivée de certaines fonctions par des valeurs numériques, qui ne peut parfois pas être calculées par des méthodes formelles classiques. En effet, généralement les fonctions ne peuvent pas être formulées analytiquement ce qui rend le calcul de leurs dérivées impossible.

Pour appliquer la méthode des différences finies, on se place sur un segment $[0, \alpha]$ (on verra plus tard que dans le cas du problème aux limites en dimension 1, $\alpha = 1$) sur lequel on ajoute un pas de discrétisation h et une suite de points $x_n | n \in [0, N]$ avec $Nh = \alpha$. Ici, le pas est uniforme mais il peut tout à fait être défini non uniformément sur chaque x_i pour tout $i \in [0, N - 1]$ comme h_i , avec $\sum_{0 \leq i < N} h_i = \alpha$. On appellera x_n la grille.

Posons une fonction régulière u telle que : $u : [0, \alpha] \rightarrow \mathbb{R}$, et on appellera u_n l'évaluation de u en chaque point x_n de la grille.

On appelle une *différence finie à p points* une combinaison linéaire de p u_n , servant à approximer au point x_n les dérivées de u . Considérons Du une différence finie, on dira qu'elle *approche* $u^{(l)}(x_n)$ à l'ordre q si :

$$\exists C > 0, h_0 > 0 \quad | \quad \forall h \in [0, h_0] \quad ||Du - u^{(l)}(x_n)|| \leq Ch^q \quad (7)$$

Cette méthode permet donc de décomposer les équations différentielles ordinaires en un système d'équations linéaires, solvable en utilisant l'algèbre linéaire.

2.1 Un exemple : la méthode d'Euler

Nous nous focaliserons maintenant sur un exemple pour définir la stabilité des méthodes numériques en général : nous utiliserons la méthode d'Euler, aussi appelée *méthode de la tangente*. Pour cela, nous poserons le problème à valeur initiale

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (8)$$

avec la condition initiale

$$y(t_0) = y_0 \quad (9)$$

Nous pouvons remarquer que ce problème ressemble fortement au problème aux limites, sauf qu'ici il n'y en a qu'une. Dans Méthodes Numériques d'Alfo Quarteroni, cet exemple est utilisé en donnant $\frac{dy}{dt} = 0$, la résolution reste la même. Nous supposons ici que les fonctions f et y sont continues dans le compact contenant le point (t_0, y_0) . Nous savons alors qu'il existe une solution dans un certain intervalle autour de t_0 . Nous supposons la solution est unique, en partant du principe que la fonction f est linéaire sans quoi l'intervalle pourrait être difficile à déterminer.

La méthode d'Euler est relativement simple : si on réécrit l'équation (8) au point t_n (toujours dans le compact de définition), nous pouvons arriver à la forme

$$\frac{d\phi}{dt}(t_n) = f(t_n, \phi(t_n)) \quad (10)$$

qui nous permet de la réécrire par le quotient de la différence aux points t_{n+1} et t_n :

$$\frac{\phi(t_{n+1}) - \phi(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \approx f(t_n, \phi(t_n)) \quad (11)$$

Enfin, en remplaçant ϕ par y et en notant $y(t_n) = y_n$, nous pouvons écrire

$$y_{n+1} = y_n + f(t_n, y_n)(t_{n+1} - t_n) \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (12)$$

qui, en supposant le pas uniforme et de valeur h se simplifie en

$$y_{n+1} = y_n + h * f_n \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (13)$$

La méthode d'Euler consiste à calculer l'équation (13) en boucle en utilisant le résultat de l'étape précédente pour la nouvelle évaluation. L'algorithme est très simple, et nous pouvons dès à présent constater qu'il est extrêmement important d'éviter l'amplification d'erreurs d'étape en étape, en évaluant leur propagation. Afin de comprendre les erreurs apparaissant lors de l'utilisation de méthodes numériques d'approximation, nous allons voir quelques méthodes alternatives pour voir la méthode d'Euler sous un autre angle. Plusieurs méthodes sont possibles pour y parvenir, l'une d'entre elles est d'écrire le problème (8) sous la forme d'une intégrale. En supposant $y = \phi(t)$ la solution de notre problème en satisfaisant la condition (9), nous avons

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \phi'(t) dt = \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(t, \phi(t)) dt \quad (14)$$

ce qui revient à dire

$$\phi(t_{n+1}) = \phi(t_n) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(t, \phi(t)) dt \quad (15)$$

L'intégrale de l'équation ci dessus (15) peut être représentée graphiquement comme l'aire sous la courbe de f entre t_n et t_{n+1} . En approxinant f par sa fonction discrète en posant $f(t, \phi(t)) \approx f(t_n, \phi(t_n))$ et en gardant l'hypothèse que nous sommes sur une *grille* (si ce concept n'a pas encore été défini, il le sera tout à l'heure) de pas uniforme h , nous avons alors:

$$\phi(t_{n+1}) \approx \phi(t_n) + hf(t_n, \phi(t_n)) \quad (16)$$

Une autre approche consiste à supposer que la solution $\phi(t)$ est développable au sens de Taylor (en série de Taylor) en t_n :

$$\phi(t_n + h) = \phi(t_n) + \phi'(t_n)h + \phi''(t_n)\frac{h^2}{2!} + \dots \quad (17)$$

Cette expression suppose que le développement de Taylor comprend plus que 2 termes, sinon nous aurions retrouvé une écriture précédente de la formule d'Euler.

L'utilisation de méthodes numériques telles que la formule d'Euler engendre des erreurs, qui doivent être identifiées et dont l'importance doit être vérifiée avant de pouvoir utiliser la solution approximée comme satisfaisante. En effet, un problème se pose pour la *convergence* de la solution : lorsque le pas h (en supposant qu'il soit uniforme, sinon considérer la distance entre les points de la grille) tend vers 0, est ce que la distance entre les solutions approximées y_n en les points t_n tend vers 0? Et approchent-elles les véritables solutions du problème? Même en répondant à ces questions, nous pouvons encore nous demander avec quelle vitesse les solutions convergent-elles ; reformulé, à quel niveau de précision sur h faut-il aller afin de garantir une certaine marge d'erreur maximum? Certains effets de bord peuvent aussi ne pas être évidents : la diminution de la taille du pas afin de garantir une meilleure précision pourrait causer de plus grandes erreurs, qui annuleraient tout bénéfice.

Il y a un certain nombre de sources fondamentales d'erreurs dans l'approximation numérique d'un problème de valeur initiale (ce qui s'étend aux problèmes aux limites):

1. La formule est une approximation, donc source d'erreur. Dans le cas de la méthode d'Euler, la solution est approximée par une ligne droite en lieu et place de la courbe.
2. Les données utilisées sont souvent elle mêmes des approximations (voir à nouveau la méthode d'Euler)
3. Éventuellement, dans le cas d'un calcul sur ordinateur la précision pour chaque variable est finie (la mémoire ne peut stocker de valeurs analogiques)

En supposant que lors d'un calcul sur ordinateur la précision soit infinie (nous venons de vérifier que ce n'est pas vrai), nous pouvons poser E_n l'erreur d'approximation en chaque point t_n par:

$$E_n = \phi(t_n) - u_n \quad (18)$$

Cette erreur ne repose que sur les deux premiers points de la liste, elle est parfois appelée *erreur globale de troncature*.

En revanche, en relâchant l'hypothèse d'avoir des ordinateurs parfait, nous devons faire face à une erreur supplémentaire, *l'erreur d'arrondi* qui intervient dès lors que l'on calcule avec une arithmétique à *précision finie*. Cette erreur d'arrondi en un point t_n s'exprime comme

$$R_n = y_n - Y_n \quad (19)$$

avec Y_n la valeur calculée par la machine en utilisant la méthode numérique.

En ajoutant ces erreurs, nous pouvons constater que l'erreur totale est la somme de la valeur absolue des erreurs d'approximation, et des erreurs d'arrondi.

2.2 Consistance

Étant donné ces erreurs, nous pouvons alors évaluer la *consistance* d'un problème: les méthodes génériques pour approcher la solution de (8) (en considérant $\frac{dy}{dt} = 0$ pour simplifier) sont en général toutes constituées d'une suite de problèmes approchés

$$f_n(t_n, y_n) = 0 \quad (20)$$

Nous supposons que le problème est *bien posé* (que sa solution existe, soit unique et dépende continûment des données), sans quoi il devient difficile de montrer sa consistance. Nous verrons plus tard que les problèmes aux limites considérés sont eux aussi bien posés, cette hypothèse n'est donc pas gênante ici.

Nous verrons que la notion de consistance est

3 Résolution du problème en dimension 1

Revenons à l'introduction de cet article : nous avons vu que pour $u \in C^2[0, 1]$ satisfaisant l'équation (1), on avait u de la forme (4) Pour retrouver la fonction de Greene, nous devons intégrer par parties $\int_0^x F(s)ds$:

$$\int_0^x F(s)ds = [sF(s)]_0^x - \int_0^x sF'(s)ds = \int_0^x (x-s)f(s)ds \quad (21)$$

D'après (2), les constantes c_1 et c_2 sont respectivement égales à 0 et $\int_0^1 (1-s)f(s)ds$. On peut alors écrire u sous la forme

$$u(x) = x \int_0^1 (1-s)f(s)ds - \int_0^x (x-s)f(s)ds = \int_0^1 G(x, s)f(s)ds \quad (22)$$

avec

$$G(x, s) = \begin{cases} s(1-x) & s \in [0, x] \\ x(1-s) & s \in [x, 1] \end{cases} \quad (23)$$

On remarquera qu'on a continuité de la fonction G pour $s = x$, et que G est une fonction *affine* de x à s fixé, et de s à x fixé. Elle se nomme *Fonction de Greene* pour le problème aux limites défini par (1) et (2).

3.1 L'histoire avec Greene

La fonction de Greene est continue et symétrique sur $[0, 1]^2$, ainsi que positive non strictement ($G(x, s) = 0 \iff x = 0 \vee s = 0$). Son existence dans le problème générique (1) (nous verrons plus tard des applications précises du problème comme la déformation d'une corde élastique) est assurée par sa définition sur tout l'intervalle entre les limites (dans notre cas, (2) mais on pourrait fixer d'autres limites).

On voit alors que lorsque G existe et qu'elle est connue formellement, on peut écrire explicitement les solutions du problème aux limites dans une forme très simple. Un des principaux avantages de la représentation (22) des solutions du problème est qu'elle élimine la dépendance au terme $f(s)$, qui n'est dépendant que de l'équation différentielle en (1) et des limites qui nous sont imposées : une fois que l'on aura déterminé G , les solutions seront connues selon $f(s)$ pour peu pqu'on puisse écrire les solutions sous la forme (22). Nous verrons dans les applications que cette forme n'est pas forcément admissible sous toutes les conditions.

De plus, la forme intégrale (22) est bien plus propice à l'analyse numérique que l'équation différentielle (1), ce qui rend le traitement par ordinateur bien plus simple et efficace. Les motivations principales sont donc de passer d'une recherche de u à une recherche de G : il faut alors trouver un moyen d'exprimer G sans avoir à résoudre l'équation (1).

Nous pouvons alors lister quelques propriétés de la fonction de Greene, qui nous seront utiles par la suite dans la résolution du problème:

1. G satisfait l'équation homogène de (1):

$$G'' = 0 \quad (24)$$

sur les intervalles $0 \leq s < x$ et $x < s \leq L$ avec dans notre cas $L = 1$. Généralement, on a bien continuité en $s = x$, nous le prouverons dans le cas du problème de l'élasticité d'une corde. (ou pas? Remettre la démo éventuellement)

2. $G(x, 0) = G(x, L)$, elle satisfait donc les conditions limites (2).
3. $G(x, s) = G(s, x)$, G est symétrique sur ses arguments.

A partir de ces propriétés, nous pouvons commencer la résolution du problème aux limites en supposant l'existence d'une fonction de Greene G . Si cette supposition est valide, alors nous pouvons retrouver (22) depuis (1), ainsi que ses propriétés listées précédemment. En effet, d'après (1), après une multiplication des deux côtés par G nous pouvons intégrer comme suit:

$$\int_0^1 u'' G(x, s) dx = - \int_0^1 f(x) G(x, s) dx \quad (25)$$

avec comme seule supposition la continuité lorsque $s \rightarrow x$. Pour être plus formel, nous pouvons exclure de l'intervalle d'intégration le point $x = s$ et éviter toute intégrale impropre.

$$\int_0^1 u'' G(x, s) dx = \lim_{\epsilon \rightarrow s^-} \int_0^\epsilon u'' G(x, s) dx + \lim_{\eta \rightarrow s^+} \int_\eta^1 u'' G(x, s) dx \quad (26)$$

En intégrant deux fois par parties les deux intégrales à droite, nous avons:

$$\int_0^\epsilon u'' G(x, s) dx = [Gu' - G'u]_0^\epsilon + \int_0^\epsilon u G'''(x, s) dx \quad (27)$$

$$\int_{\eta}^1 u'' G(x, s) dx = [Gu' - G'u]_0^{\epsilon} + \int_{\eta}^1 u G'''(x, s) dx \quad (28)$$

Or, en choisissant $G(x, s)$ de manière à satisfaire $G'' = 0$ en tant que fonction de x dans les intervalles des intégrales $([0, \epsilon] \cup [\eta, 1])$, alors les intégrales à droite sont nulles. En ajoutant les termes restants (qu'on avait enlevés afin d'éviter les intégrales impropres), on revient en supposant G symétrique à:

$$-\int_0^1 f(x) G(x, s) dx = (G(s, s^-)u'(s^-) - G'(s, s^-)u(s^-) - G(0, s)u'(0) + G(1, s)u'(1) - G(s, s^+)u'(s^+) + G'(s, s^+)u(s^+)) \quad (29)$$

En supposant que G vérifie les conditions limites et que u est continu en s , nous pouvons écrire:

$$\int_0^1 f(x) G(x, s) dx = -u(s)(G'(s, s^+) - G'(s, s^-)) + u'(s)(G(s, s^+) - G(s, s^-)) \quad (30)$$

De plus, G est continue en $x = s$, tandis que G' y est discontinue. Nous aurons besoin de cette proposition pour continuer, nous allons la démontrer.

À partir de (1), nous pouvons utiliser la méthode de la variation des variables pour supposer que, si le problème existe, alors les solutions seront de la forme

$$u(x) = A(x)\cos(kx) + B(x)\sin(kx). \quad (31)$$

En dérivant deux fois selon x et en supposant qu'on ait $A'(x)\cos(kx) + B'(x)\sin(kx) = 0$, on trouve que (31) constitue effectivement une solution, à la condition

$$-kA'\sin(kx) + kB'\cos(kx) = -f(x) \quad (32)$$

En résolvant (32) accompagné de sa condition présupposée, nous pouvons alors exprimer A' et B' :

$$A'(x) = \frac{f(x)\sin(kx)}{k} \quad (33)$$

$$B'(x) = \frac{-f(x)\cos(kx)}{k} \quad (34)$$

Nous pouvons alors écrire la solution de (1) comme:

$$u(x) = \frac{\cos(kx)}{k} \int_{c_1}^x f(s)\sin(ks)ds - \frac{\sin(kx)}{k} \int_{c_2}^x f(s)\cos(ks)ds \quad (35)$$

avec c_1, c_2 constantes bien choisies pour satisfaire les conditions (2). En utilisant la condition en 0 de (2), on trouve $c_1 = 0$. De même, la condition en 1 implique

$$u(x) = \frac{1}{k} \int_0^x f(s)\sin(k(s-x))ds - \frac{\sin(kx)}{k\sin(kl)} \int_x^1 f(s)\sin(k(s-1))ds \quad (36)$$

ce qui nous donne enfin

$$\begin{aligned} u(x) &= \int_0^x \frac{\sin(ks)\sin(k(1-x))}{k\sin(k)} ds + \int_x^1 f(s) \frac{\sin(kx)\sin(k(1-s))}{k\sin(k)} ds \\ &= \int_0^1 f(s)G(x,s)ds \end{aligned} \quad (37)$$

qui revient au même pour introduire la fonction de Greene, de manière bien détaillée cette fois. On a par la même occasion montré la consistance du problème aux limites (revoir la def!!!!).

Finalement, nous aboutissons à une forme de G intéressante:

$$G(x,s) = \frac{\sin(ky)\sin(k(1-x))}{k\sin(k)} \quad s \in [0,x] \quad (38)$$

$$G(x,s) = \frac{\sin(kx)\sin(k(1-s))}{k\sin(k)} \quad s \in [x,1] \quad (39)$$

À partir d'ici, nous pouvons vérifier aisément que la fonction G est continue en $s = x$, et que sa dérivée est discontinue en ce même point.

Depuis (30), nous pouvons alors conclure que

$$u(s) = \int_0^1 f(x)G(x,s)ds \quad (40)$$

et nous obtenons alors une représentation désirable de la solution du problème aux limites par une fonction G . Cette fonction vérifie tous les axiomes de la fonction de Greene énoncés auparavant, nous avons donc établi une méthode pour retrouver la solution des problèmes aux limites d'une manière relativement directe. Néanmoins, cette méthode suppose que nous connaissions la fonction G .

3.2 Suite de la resolution : approximation par différences finies

Sur la grille des points $(x_j)_{j=0}^n$ de pas uniforme h (on a donc $x_j = jh$) sur $[0,1]$, l'approximation de la solution est une suite finie $(u_j)_{j=0}^n$ telle que:

$$-\frac{u_{j+1} - 2u_j + u_{j-1}}{h^2} = f(x_j) \quad j \in [[1, n-1]] \quad (41)$$

avec $u_i = 0$ aux points 0 et n . On a alors u_j approche $u(x_j)$, la valeur de chaque point de la grille. Pour s'en convaincre, on se référera à ... dans la partie traitant des différences finies centrées, en remplaçant $u''(x)$ par son approximation du 2nd ordre.

On posera $u = \langle u_1, \dots, u_{n-1} \rangle$ et $f = \langle f_1, \dots, f_{n-1} \rangle$ vecteurs avec $f_i = f(x_i)$, en utilisant une notation empruntée au C++. Nous pouvons alors voir que (41) peut s'écrire comme

$$A_{df}u = f \quad (42)$$

avec A_{df} matrice carrée de différences finies de taille $(n - 1)$ définie par

$$A_{fd} = h^{-2} \text{tridiag}_{n-1}(-1, 2, -1) \quad (43)$$

Elle est à diagonale dominante par ligne, et définie positive (démontrable).

Alors, l'équation (42) n'admet qu'une unique solution.

Définissons les M-Matrices comme suit : une M-Matrice est une matrice carrée inversible avec tous ses coefficients non sur la diagonale négatifs ou nuls, ainsi que tous les coefficients de son inverse sont positifs ou nuls. Nous pouvons noter que A_{df} est une M-Matrice, ce qui permet de satisfaire la condition de monotonie de la solution exacte $u(x)$: nous avons alors $f > 0 \implies u > 0$ (propriété du *maximum discret*).

Le but est maintenant de réécrire (41). Pour cela, nous pouvons considérer V_h ensemble de fonctions discrètes définies sur les x_j points de la grille. Pour tout v_h dans V_h , elle est alors définie en tout point de la grille, et $v_j = v_h(x_j)$.

On posera de plus $V_h^0 = \{v_h \in V_h | v_0 = v_n = 0\}$. On pourra définir L_h comme

$$(L_h v_h)(x_j) = -\frac{v_{j+1} - 2v_j + v_{j-1}}{h^2} \quad v_h \in V_h \quad j \in [[1, n-1]] \quad (44)$$

On peut alors encore réécrire le problème (41) comme:

$$(L_h u_h)(x_j) = f(x_j) \quad j \in [[1, n-1]] \quad (45)$$

en cherchant $u_h \in V_h^0$: on prend en compte les conditions limites.

3.3 Analyse de la stabilité

Nous allons maintenant analyser la *stabilité* du problème. On peut définir la stabilité par la capacité de l'algorithme de résolution à ne pas amplifier les erreurs, et à produire des résultats cohérents. Ici, nous allons essayer de montrer que la solution renvoyée en appliquant la méthode des différences finies au problème est bornée par une des variables d'entrées.

Pour cela, nous aurons besoin de quelques notions supplémentaires. Nous définirons le *produit scalaire discret* comme

$$(w_h, v_h)_h = h \sum_{k=0}^n c_k w_k v_k \quad \forall v_h, w_h \in V_h \quad (46)$$

avec $c_i = 1 \forall i \in [[1, n-1]]$ et $c_0 = c_n = 1/2$. On peut retrouver le produit scalaire discret par différences finies, avec la *formule composite du trapèze* (voir partie sur les différences finies). On peut alors définir une norme sur V_h par la racine du produit scalaire d'un opérateur de V_h avec lui même.

Nous pouvons alors émettre plusieurs propriétés sur ce produit scalaire. Tout d'abord, il est symétrique et défini positif pour l'opérateur L_h dans V_h^0 :

$$(L_h w_h, v_h)_h = (v_h, L_h w_h)_h \quad (L_h v_h, v_h)_h \geq 0 (0 \Leftrightarrow v_h = 0) \quad (47)$$

(démonstration possible)

On définit la norme $||| \cdot |||_h$ sur V_h^0 par:

$$|||v_h||| = \left\{ h \sum_{j=0}^{n-1} \left(\frac{v_{j+1} - v_j}{h} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (48)$$

On peut alors constater que

$$(L_h v_h)_h = |||v_h|||_h^2 \quad \forall v_h \in V_h^0 \quad (49)$$

De plus, on a:

$$||v_h||_h^2 \leq \frac{1}{\sqrt{2}} |||v_h|||_h \quad \forall v_h \in V_h^0 \quad (50)$$

(démonstration possible, on utilise l'inégalité de Minkowski en repartant de la définition des v_j)

De même, on peut écrire la version discrète de l'inégalité de Poincaré: en notant $v_h^{(1)}$ la fonction discrète de v_h dans V_h^0 prenant ses valeurs sur la grille par $(v_{j+1} - v_j)/h$ avec $j \in [[0, n-1]]$, on peut la voir comme la dérivée discrète de v_h .

On peut alors écrire l'inégalité comme

$$||v_h||_h \leq \frac{1}{\sqrt{2}} ||v_h^{(1)}||_h \quad \forall v_h \in V_h^0 \quad (51)$$

À partir de (50), on peut multiplier chaque équation par (45) pour avoir

$$(L_h u_h, u_h)_h = (f, u_h)_h \quad (52)$$

En reprenant la notation introduite dans (44), on peut définir f_d fonction discrète égale à f en chaque point de la grille. On a alors $f_d(x_i) = f(x_i)$. À partir de (49), on peut trouver

$$|||u_h|||_h^2 \leq ||f_d||_h ||u_h||_h \quad (53)$$

à partir de l'inégalité de Schwarz. Alors, on a

$$||u_h||_h \leq \frac{1}{2} ||f_d||_h \quad (54)$$

Regarder d'où sortent les u_h qui traînent par ici!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

ce qui conclut que la seule solution correspondant à $f_d = 0$ est $u_h = 0$, donc le problème aux différences finies ne possède qu'une seule solution. La stabilité, titre de cette section, est quant à elle donnée par la majoration (ou *borne*, comme on est sur une norme) de la solution par f_d qui est une des données du problème.

3.4 convergence

Nous devons maintenant prouver la convergence du problème aux limites. Nous devons introduire ici la notion de *consistance* : on est page 427 et on fait un point sur les méthodes numériques, page 37

Si place, regarder les différences finies pour la résolution de problèmes à coefs variables; sinon, on s'en tape.

4 Introduction à la résolution du problème en dimension 2

5 Applications

5.1 Conduction de la chaleur

5.2 Déformation d'une corde élastique

5.3 Problème stationnaire elliptique

5.4 Problème hyperbolique