Utilisation des Technologies de l'Information et de la Communication pour la modélisation et la diffusion des résultats d'une équation aux dérivées partielles

Projet TIC

ZIOUCHE Tiziri,GUERNANE Imene

Usthb

Décembre 2025

Table des matières

Introduction

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.
- Les EDP constituent un domaine où l'apport numérique est central : chaleur, fluides, ondes, etc.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.
- Les EDP constituent un domaine où l'apport numérique est central : chaleur, fluides, ondes, etc.
- La résolution analytique étant souvent limitée, les méthodes numériques offrent des approximations fiables.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.
- Les EDP constituent un domaine où l'apport numérique est central : chaleur, fluides, ondes, etc.
- La résolution analytique étant souvent limitée, les méthodes numériques offrent des approximations fiables.
- Ce projet illustre l'usage des TIC pour modéliser un phénomène physique et analyser son évolution.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.
- Les EDP constituent un domaine où l'apport numérique est central : chaleur, fluides, ondes, etc.
- La résolution analytique étant souvent limitée, les méthodes numériques offrent des approximations fiables.
- Ce projet illustre l'usage des TIC pour modéliser un phénomène physique et analyser son évolution.
- Outils utilisés : LaTeX pour la rédaction, GitHub pour l'organisation du code, Overleaf pour la collaboration.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.
- Les EDP constituent un domaine où l'apport numérique est central : chaleur, fluides, ondes, etc.
- La résolution analytique étant souvent limitée, les méthodes numériques offrent des approximations fiables.
- Ce projet illustre l'usage des TIC pour modéliser un phénomène physique et analyser son évolution.
- Outils utilisés : LaTeX pour la rédaction, GitHub pour l'organisation du code, Overleaf pour la collaboration.
- Le travail porte sur l'équation de la chaleur décrivant la diffusion thermique dans le temps.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.
- Les EDP constituent un domaine où l'apport numérique est central : chaleur, fluides, ondes, etc.
- La résolution analytique étant souvent limitée, les méthodes numériques offrent des approximations fiables.
- Ce projet illustre l'usage des TIC pour modéliser un phénomène physique et analyser son évolution.
- Outils utilisés : LaTeX pour la rédaction, GitHub pour l'organisation du code, Overleaf pour la collaboration.
- Le travail porte sur l'équation de la chaleur décrivant la diffusion thermique dans le temps.
- Nous proposons une résolution numérique par différences finies.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.
- Les EDP constituent un domaine où l'apport numérique est central : chaleur, fluides, ondes, etc.
- La résolution analytique étant souvent limitée, les méthodes numériques offrent des approximations fiables.
- Ce projet illustre l'usage des TIC pour modéliser un phénomène physique et analyser son évolution.
- Outils utilisés : LaTeX pour la rédaction, GitHub pour l'organisation du code, Overleaf pour la collaboration.
- Le travail porte sur l'équation de la chaleur décrivant la diffusion thermique dans le temps.
- Nous proposons une résolution numérique par différences finies.
- Une simulation complète est réalisée sous MATLAB pour le calcul scientifique et la visualisation.

Introduction

- Les TIC jouent un rôle essentiel dans l'analyse, la modélisation et la diffusion des connaissances scientifiques.
- Leur évolution permet de simuler et visualiser des phénomènes complexes autrefois difficiles à résoudre analytiquement.
- Les EDP constituent un domaine où l'apport numérique est central : chaleur, fluides, ondes, etc.
- La résolution analytique étant souvent limitée, les méthodes numériques offrent des approximations fiables.
- Ce projet illustre l'usage des TIC pour modéliser un phénomène physique et analyser son évolution.
- Outils utilisés : LaTeX pour la rédaction, GitHub pour l'organisation du code, Overleaf pour la collaboration.
- Le travail porte sur l'équation de la chaleur décrivant la diffusion thermique dans le temps.
- Nous proposons une résolution numérique par différences finies.
- Une simulation complète est réalisée sous MATLAB pour le calcul scientifique et la visualisation.
- La démarche relie théorie mathématique et mise en œuvre numérique pour étudier une EDP.

Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)

Technologies de l'Information et de la Communication

- Les TIC regroupent les outils et méthodes de production, traitement et partage de l'information.

Technologies de l'Information et de la Communication

- Les TIC regroupent les outils et méthodes de production, traitement et partage de l'information.
- Elles jouent un rôle fondamental dans l'enseignement supérieur et la recherche scientifique.

Technologies de l'Information et de la Communication

- Les TIC regroupent les outils et méthodes de production, traitement et partage de l'information.
- Elles jouent un rôle fondamental dans l'enseignement supérieur et la recherche scientifique.
- Elles facilitent la modélisation numérique et l'analyse des phénomènes physiques.

Technologies de l'Information et de la Communication

- Les TIC regroupent les outils et méthodes de production, traitement et partage de l'information.
- Elles jouent un rôle fondamental dans l'enseignement supérieur et la recherche scientifique.
- Elles facilitent la modélisation numérique et l'analyse des phénomènes physiques.
- Les TIC améliorent le travail collaboratif et permettent des simulations complexes.

Outils de résolution numérique

- Les outils numériques sont essentiels pour résoudre les EDP et effectuer des simulations.

Outils de résolution numérique

- Les outils numériques sont essentiels pour résoudre les EDP et effectuer des simulations.
- Ils permettent aussi l'analyse de données et la visualisation de phénomènes physiques.

MATLAB

- MATLAB est un environnement de calcul numérique très utilisé en ingénierie.

MATLAB

- MATLAB est un environnement de calcul numérique très utilisé en ingénierie.
- Il offre des fonctions puissantes pour la résolution d'EDP et la simulation.

MATLAB

- MATLAB est un environnement de calcul numérique très utilisé en ingénierie.
- Il offre des fonctions puissantes pour la résolution d'EDP et la simulation.
- Il facilite l'implémentation des schémas numériques comme les différences finies.

MATLAB

- MATLAB est un environnement de calcul numérique très utilisé en ingénierie.
- Il offre des fonctions puissantes pour la résolution d'EDP et la simulation.
- Il facilite l'implémentation des schémas numériques comme les différences finies.
- MATLAB produit des visualisations claires et précises.

Python

- Python est un langage open-source très populaire en sciences.

Python

- Python est un langage open-source très populaire en sciences.
- Ses bibliothèques (NumPy, SciPy, Matplotlib) sont adaptées aux EDP.

Python

- Python est un langage open-source très populaire en sciences.
- Ses bibliothèques (NumPy, SciPy, Matplotlib) sont adaptées aux EDP.
- Il permet de développer rapidement des méthodes numériques personnalisables.

Python

- Python est un langage open-source très populaire en sciences.
- Ses bibliothèques (NumPy, SciPy, Matplotlib) sont adaptées aux EDP.
- Il permet de développer rapidement des méthodes numériques personnalisables.
- C'est une alternative gratuite et performante à MATLAB.

GeoGebra

- GeoGebra est un outil interactif de visualisation mathématique.

GeoGebra

- GeoGebra est un outil interactif de visualisation mathématique.
- Il sert à illustrer des concepts liés aux EDP et aux conditions limites.

Jupyter Notebook

- Jupyter Notebook permet d'exécuter du code Python de façon interactive.

Jupyter Notebook

- Jupyter Notebook permet d'exécuter du code Python de façon interactive.
- Il combine texte, équations et graphiques dans un même document.

Jupyter Notebook

- Jupyter Notebook permet d'exécuter du code Python de façon interactive.
- Il combine texte, équations et graphiques dans un même document.
- C'est un outil idéal pour l'enseignement des méthodes numériques.

Outils de collaboration scientifique

- Les TIC facilitent le travail à distance et le partage scientifique.

Outils de collaboration scientifique

- Les TIC facilitent le travail à distance et le partage scientifique.
- Elles assurent une gestion efficace des documents et références.

Overleaf, Colab, Zotero

- Overleaf : plateforme collaborative pour rédiger en LaTeX.

Overleaf, Colab, Zotero

- Overleaf : plateforme collaborative pour rédiger en LaTeX.
- Google Colab : exécution du code Python dans le cloud.

Overleaf, Colab, Zotero

- Overleaf : plateforme collaborative pour rédiger en LaTeX.
- Google Colab : exécution du code Python dans le cloud.
- Zotero : gestionnaire bibliographique pour organiser les références.

GitHub

- GitHub est une plateforme de gestion de versions.

GitHub

- GitHub est une plateforme de gestion de versions.
- Elle permet de stocker et partager le code MATLAB/Python.

GitHub

- GitHub est une plateforme de gestion de versions.
- Elle permet de stocker et partager le code MATLAB/Python.
- GitHub assure un suivi des modifications et la collaboration en groupe.

Outils de présentation

- PDF : standard de diffusion scientifique.

Outils de présentation

- PDF : standard de diffusion scientifique.
- LaTeX interactif : intégration d'animations ou graphiques dynamiques.

Outils de présentation

- PDF : standard de diffusion scientifique.
- LaTeX interactif : intégration d'animations ou graphiques dynamiques.
- Beamer : classe LaTeXpour présentations professionnelles.

Outils de présentation

- PDF : standard de diffusion scientifique.
- LaTeX interactif : intégration d'animations ou graphiques dynamiques.
- Beamer : classe LaTeXpour présentations professionnelles.
- PowerPoint : outil simple pour des présentations classiques.

Outils de présentation

- PDF : standard de diffusion scientifique.
- LaTeX interactif : intégration d'animations ou graphiques dynamiques.
- Beamer : classe LaTeXpour présentations professionnelles.
- PowerPoint : outil simple pour des présentations classiques.
- Canva : plateforme de design pour posters et présentations visuelles.

Intérêt des TIC en recherche scientifique

- Accès rapide à l'information scientifique.

Intérêt des TIC en recherche scientifique

- Accès rapide à l'information scientifique.
- Automatisation des calculs complexes.

Intérêt des TIC en recherche scientifique

- Accès rapide à l'information scientifique.
- Automatisation des calculs complexes.
- Facilitation de la collaboration en ligne.

Intérêt des TIC en recherche scientifique

- Accès rapide à l'information scientifique.
- Automatisation des calculs complexes.
- Facilitation de la collaboration en ligne.
- Amélioration de la qualité des rapports et articles.

Intérêt des TIC en recherche scientifique

- Accès rapide à l'information scientifique.
- Automatisation des calculs complexes.
- Facilitation de la collaboration en ligne.
- Amélioration de la qualité des rapports et articles.
- Reproductibilité des résultats grâce au partage du code.

Importance des TIC dans les EDP

- Implémentation des méthodes numériques (DF, EF, VF).

Importance des TIC dans les EDP

- Implémentation des méthodes numériques (DF, EF, VF).
- Simulation rapide de modèles physiques complexes.

Importance des TIC dans les EDP

- Implémentation des méthodes numériques (DF, EF, VF).
- Simulation rapide de modèles physiques complexes.
- Visualisation graphique : courbes, surfaces, animations 2D/3D.

Importance des TIC dans les EDP

- Implémentation des méthodes numériques (DF, EF, VF).
- Simulation rapide de modèles physiques complexes.
- Visualisation graphique : courbes, surfaces, animations 2D/3D.
- Gestion et stockage des projets via GitHub.

Importance des TIC dans les EDP

- Implémentation des méthodes numériques (DF, EF, VF).
- Simulation rapide de modèles physiques complexes.
- Visualisation graphique : courbes, surfaces, animations 2D/3D.
- Gestion et stockage des projets via GitHub.
- Documentation claire via LaTeX, Jupyter ou Overleaf.

Etude de l’équation de la chaleur: cadre théorique

Étude de l'équation de la chaleur : cadre théorique

- Cette partie présente le cadre théorique de l'équation de la chaleur.

Étude de l'équation de la chaleur : cadre théorique

- Cette partie présente le cadre théorique de l'équation de la chaleur.
- L'objectif est de comparer la solution analytique avec l'approche numérique.

Étude de l'équation de la chaleur : cadre théorique

- Cette partie présente le cadre théorique de l'équation de la chaleur.
- L'objectif est de comparer la solution analytique avec l'approche numérique.
- Ce modèle est simple physiquement mais très riche mathématiquement.

Étude de l'équation de la chaleur : cadre théorique

- Cette partie présente le cadre théorique de l'équation de la chaleur.
- L'objectif est de comparer la solution analytique avec l'approche numérique.
- Ce modèle est simple physiquement mais très riche mathématiquement.
- Il illustre clairement les notions fondamentales des EDP.

Étude de l'équation de la chaleur : cadre théorique

- Cette partie présente le cadre théorique de l'équation de la chaleur.
- L'objectif est de comparer la solution analytique avec l'approche numérique.
- Ce modèle est simple physiquement mais très riche mathématiquement.
- Il illustre clairement les notions fondamentales des EDP.
- L'équation est facile à simuler numériquement sous MATLAB.

Étude de l'équation de la chaleur : cadre théorique

- Cette partie présente le cadre théorique de l'équation de la chaleur.
- L'objectif est de comparer la solution analytique avec l'approche numérique.
- Ce modèle est simple physiquement mais très riche mathématiquement.
- Il illustre clairement les notions fondamentales des EDP.
- L'équation est facile à simuler numériquement sous MATLAB.
- Sa structure parabolique se prête bien aux méthodes de différences finies.

Étude de l'équation de la chaleur : cadre théorique

- Cette partie présente le cadre théorique de l'équation de la chaleur.
- L'objectif est de comparer la solution analytique avec l'approche numérique.
- Ce modèle est simple physiquement mais très riche mathématiquement.
- Il illustre clairement les notions fondamentales des EDP.
- L'équation est facile à simuler numériquement sous MATLAB.
- Sa structure parabolique se prête bien aux méthodes de différences finies.
- Elle intervient dans de nombreuses applications industrielles : métallurgie, bâtiment, électronique, biomédical...

Position du problème

- On considère l'équation de la chaleur sur l'intervalle $[0, L]$.

$$\begin{cases} u_t(x,t) = \alpha\, u_{xx}(x,t), & x \in [0,L],\ t > 0, \\ u(0,t) = 0,\ u(L,t) = 0, & t \geq 0, \\ u(x,0) = f(x), & x \in [0,L]. \end{cases}$$

Position du problème

- On considère l'équation de la chaleur sur l'intervalle $[0, L]$.
- La diffusivité thermique est notée $\alpha > 0$.

$$\begin{cases} u_t(x,t) = \alpha\, u_{xx}(x,t), & x \in [0,L],\ t > 0, \\ u(0,t) = 0,\ u(L,t) = 0, & t \geq 0, \\ u(x,0) = f(x), & x \in [0,L]. \end{cases}$$

Position du problème

- On considère l'équation de la chaleur sur l'intervalle $[0, L]$.
- La diffusivité thermique est notée $\alpha > 0$.
- On cherche une fonction $u(x,t)$ vérifiant :

$$\begin{cases} u_t(x,t) = \alpha\, u_{xx}(x,t), & x \in [0,L],\ t > 0, \\ u(0,t) = 0,\ u(L,t) = 0, & t \geq 0, \\ u(x,0) = f(x), & x \in [0,L]. \end{cases}$$

Position du problème

- On considère l'équation de la chaleur sur l'intervalle $[0, L]$.
- La diffusivité thermique est notée $\alpha > 0$.
- On cherche une fonction $u(x,t)$ vérifiant :

$$\begin{cases} u_t(x,t) = \alpha\, u_{xx}(x,t), & x \in [0,L],\ t > 0, \\ u(0,t) = 0,\ u(L,t) = 0, & t \geq 0, \\ u(x,0) = f(x), & x \in [0,L]. \end{cases}$$

- Ce modèle décrit la diffusion progressive de la chaleur dans une barre de longueur L.

Solution analytique formelle

- La solution est obtenue par séparation des variables.

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right)$$

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \, dx$$

Solution analytique formelle

- La solution est obtenue par séparation des variables.
- Elle s'exprime sous forme d'une série de Fourier :

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right)$$

$$B_n = \frac{2}{L}\int_0^L f(x)\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)\, dx$$

Solution analytique formelle

- La solution est obtenue par séparation des variables.
- Elle s'exprime sous forme d'une série de Fourier :

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right)$$

- Les coefficients B_n dépendent de la condition initiale $f(x)$:

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx$$

Solution analytique formelle

- La solution est obtenue par séparation des variables.
- Elle s'exprime sous forme d'une série de Fourier :

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right)$$

- Les coefficients B_n dépendent de la condition initiale $f(x)$:

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \, dx$$

- Cette solution sert de référence pour valider l'approche numérique.

Étude de l'équation de la chaleur: approche numérique

Approche numérique de l'équation de la chaleur

- La résolution analytique des EDP n'est pas toujours possible.

Approche numérique de l'équation de la chaleur

- La résolution analytique des EDP n'est pas toujours possible.
- Une approche numérique est nécessaire pour obtenir des solutions exploitables.

Approche numérique de l'équation de la chaleur

- La résolution analytique des EDP n'est pas toujours possible.
- Une approche numérique est nécessaire pour obtenir des solutions exploitables.
- La méthode des différences finies est simple, efficace et très utilisée.

Méthode des différences finies

- Approximation des dérivées par des expressions discrètes.

Méthode des différences finies

- Approximation des dérivées par des expressions discrètes.
- Discrétisation du domaine : $x_i = i\Delta x$, $t_n = n\Delta t$.

Méthode des différences finies

- Approximation des dérivées par des expressions discrètes.
- Discrétisation du domaine : $x_i = i\Delta x$, $t_n = n\Delta t$.
- Approximation temporelle : $u_t \approx \dfrac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}$.

Méthode des différences finies

- Approximation des dérivées par des expressions discrètes.
- Discrétisation du domaine : $x_i = i\Delta x$, $t_n = n\Delta t$.
- Approximation temporelle : $u_t \approx \dfrac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}$.
- Approximation spatiale : $u_{xx} \approx \dfrac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta x)^2}$.

Méthode des différences finies

- Approximation des dérivées par des expressions discrètes.
- Discrétisation du domaine : $x_i = i\Delta x$, $t_n = n\Delta t$.
- Approximation temporelle : $u_t \approx \dfrac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}$.
- Approximation spatiale : $u_{xx} \approx \dfrac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta x)^2}$.
- Substitution $\rightarrow$ schéma explicite FTCS.

Schéma explicite FTCS

- Après approximation, on obtient :

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \alpha \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta x)^2}$$

Schéma explicite FTCS

- Après approximation, on obtient :

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \alpha \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta x)^2}$$

- Condition initiale : $u_i^0 = f(x_i)$.

Schéma explicite FTCS

- Après approximation, on obtient :

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \alpha \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta x)^2}$$

- Condition initiale : $u_i^0 = f(x_i)$.
- Conditions limites : $u_0^n = 0$, $u_N^n = 0$.

Condition de stabilité

- Le schéma explicite nécessite une condition de stabilité.

Condition de stabilité

- Le schéma explicite nécessite une condition de stabilité.
- Coefficient de stabilité :

$$r = \frac{\alpha\,\Delta t}{(\Delta x)^2}$$

Condition de stabilité

- Le schéma explicite nécessite une condition de stabilité.
- Coefficient de stabilité :

$$r = \frac{\alpha \, \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

- Condition : $r < 0.5$.

Condition de stabilité

- Le schéma explicite nécessite une condition de stabilité.
- Coefficient de stabilité :

$$r = \frac{\alpha\,\Delta t}{(\Delta x)^2}$$

- Condition : $r < 0.5$.
- Cette contrainte garantit une simulation stable.

Simulation sous MATLAB

- Un premier code calcule la solution exacte.

Simulation sous MATLAB

- Un premier code calcule la solution exacte.
- Un second code implémente le schéma explicite.

Simulation sous MATLAB

- Un premier code calcule la solution exacte.
- Un second code implémente le schéma explicite.
- Les deux solutions sont comparées sur la même grille.

Simulation sous MATLAB

- Un premier code calcule la solution exacte.
- Un second code implémente le schéma explicite.
- Les deux solutions sont comparées sur la même grille.
- MATLAB permet une visualisation rapide et précise.

Visualisation des résultats

- Solution exacte : décroissance exponentielle.

Visualisation des résultats

- Solution exacte : décroissance exponentielle.
- Solution approchée : profil très similaire.

Visualisation des résultats

- Solution exacte : décroissance exponentielle.
- Solution approchée : profil très similaire.
- Superposition : courbes presque confondues.

Visualisation des résultats

- Solution exacte : décroissance exponentielle.
- Solution approchée : profil très similaire.
- Superposition : courbes presque confondues.
- Le schéma numérique reproduit bien le comportement physique.

Estimation de l'erreur numérique

- Comparaison entre solution exacte et approchée.

Estimation de l'erreur numérique

- Comparaison entre solution exacte et approchée.
- Erreur ponctuelle : $e = u - u_{exact}$.

Estimation de l'erreur numérique

- Comparaison entre solution exacte et approchée.
- Erreur ponctuelle : $e = u - u_{exact}$.
- Norme L_2 calculée : 6.03×10^{-4}.

Estimation de l'erreur numérique

- Comparaison entre solution exacte et approchée.
- Erreur ponctuelle : $e = u - u_{exact}$.
- Norme L_2 calculée : 6.03×10^{-4}.
- Norme L_∞ calculée : 3.02×10^{-3}.

Estimation de l'erreur numérique

- Comparaison entre solution exacte et approchée.
- Erreur ponctuelle : $e = u - u_{exact}$.
- Norme L_2 calculée : 6.03×10^{-4}.
- Norme L_∞ calculée : 3.02×10^{-3}.
- L'erreur est faible $\rightarrow$ bonne précision du schéma.