

## TP : Equations différentielles

Dans ce TP, on aura besoin des modules suivants :

```
import numpy as np
import scipy as sc
import numpy.linalg as LA
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.integrate as integrate
```

Le dernier module sera utilisé pour résoudre des équations différentielles avec la commande `odeint`.

### Exercice 1 Schéma d'Euler, calcul d'erreur

On considère le problème suivant :

$$\begin{cases} x'(t) = x(t) + 2y(t) \\ y'(t) = 2x(t) + y(t) \end{cases}$$

sur l'intervalle  $[0, 1]$  avec la condition initiale  $x(0) = 5$  et  $y(0) = 0$ .

1. Faire un programme afin de déterminer la solution approchée de ce système à l'aide d'un schéma d'Euler explicite.
2. En prenant un pas de temps  $\Delta t = 0.01$ , tracer la solution approchée de ce système en fonction du temps.
3. On rappelle que la solution exacte de ce système est donnée par  $x(t) = \frac{5}{2}(e^{-t} + e^{3t})$  et  $y(t) = \frac{5}{2}(-e^{-t} + e^{3t})$ . Comparer graphiquement la solution exacte et la solution approchée pour différentes valeurs de  $\Delta t$ .
4. Pour  $0 \leq n \leq N$ , on note  $t_n = n\Delta t$  les points de discrétisation et  $X_n$  la solution approchée au temps  $t_n$ . Écrire une routine calculant l'erreur  $\max_{0 \leq n \leq N} \|X(t_n) - X_n\|_\infty$ . On pourra utiliser la commande `norm` du module `numpy.linalg` (avec l'option `np.inf`).
5. Tracer l'erreur en fonction de  $\Delta t$  en échelle logarithmique.
6. Utiliser la commande `np.polyfit` pour déterminer la droite qui approche au sens des moindres carrés les points de la courbe tracée à la question précédente (il s'agit de la droite de régression).
7. On observe que la pente de la droite est proche de 1. Comment l'interpréter ?
8. Reprendre les trois dernières questions pour le schéma du point milieu défini dans l'exercice 4.

## Exercice 2 Étude d'un pendule : Portrait de phase

On considère un pendule de longueur  $l$ . L'évolution de  $\theta$  l'angle du pendule par rapport à la verticale est donnée par l'équation suivante :

$$\theta''(t) + \frac{g}{l} \sin(\theta(t)) = 0.$$

On définit  $\omega = \theta'$ , on a ainsi le système

$$\begin{cases} \theta'(t) = \omega(t) \\ \omega'(t) = -\frac{g}{l} \sin(\theta(t)). \end{cases}$$

On suppose que  $\theta(0)$  et  $\omega(0)$  sont donnés. On veut tracer le portrait de phase de ce problème pour les paramètres  $l = 5$  et  $g = 9.81$ .

1. Tracer la solution de ce problème dans le plan des phases pour la donnée initiale  $(\theta(0), \omega(0)) = (\theta_0, 0)$  avec  $\theta_0 \in [0, 2\pi]$  (prendre de nombreuses valeurs de  $\theta_0$  et tracer toutes les solutions sur le même graphe). On pourra résoudre le système en utilisant la commande `odeint` du module `scipy.integrate`.

La syntaxe pour la commande `odeint` est :

```
sol=integrate.odeint(f,X0,t)
```

où

- `f` a été définie de la façon suivante :

```
def f(X,t): ...
```

(même si `f` ne dépend pas de `t`, il faut que l'argument apparaisse en seconde position en entrée).

- `X0` correspond à la condition initiale
- `t` est le vecteur contenant les temps en lesquels la solution est évaluée (le premier coefficient du vecteur est le temps initial)
- `sol` est le vecteur contenant les valeurs prises par la solution évaluée aux temps du vecteur `t`.

2. Pour compléter le portrait de phase, ajouter plusieurs courbes issues des données initiales  $(-\pi, \omega_0)$  avec  $\omega_0 > 0$  et  $(3\pi, \omega_0)$  avec  $\omega_0 < 0$ .
3. Ajouter les points critiques sur cette figure.
4. Faisons maintenant un zoom près du point  $(0, 0)$ . Sur une autre figure, représenter le diagramme des phases près du point  $(0, 0)$ . Ajouter les isoclines.
5. Enfin, nous allons représenter  $f$  sur cette figure. Pour cela, on pourra utiliser les commandes `np.meshgrid`, `np.hypot` et `plt.quiver`.

**NB :** si vous essayez de représenter  $f$  comme ici sur la première figure, vous pourriez avoir des difficultés dues au fait que  $\omega$  et  $\theta$  n'ont pas le même ordre de grandeur.

### Exercice 3 Schémas implicites

Dans cet exercice, nous allons utiliser les schémas d'Euler implicite et de Crank–Nicolson pour résoudre le problème de l'exercice 1.

1. Coder une routine `Newton(F, dF, X0, tol, maxiter)` qui renvoie la solution  $X \in \mathbb{R}^2$  de l'équation  $F(X) = 0$  calculée par la méthode de Newton ( $dF$  est la jacobienne de  $F$ ).
2. En utilisant la question précédente, coder le schéma d'Euler implicite donné par  $X_{n+1} = X_n + hf(t_{n+1}, X_{n+1})$ .
3. Coder le schéma de Crank–Nicolson donné par  $X_{n+1} = X_n + \frac{h}{2}(f(t_{n+1}, X_{n+1}) + f(t_n, X_n))$ .
4. Retrouver numériquement les taux de convergence de ces deux schémas (voir la fin de l'exercice 1).

### Exercice 4 Étude d'un pendule : simulations numériques.

Reprenons le système considéré dans l'exercice 2. Pour résoudre ce problème sur  $[0, T]$ , on prend  $N \in \mathbb{N}^*$ , puis on définit le pas de discrétisation  $h = \frac{T}{N}$  et les temps de discrétisation  $t_n = nh$  pour  $0 \leq n \leq N$ .

1. Déterminer la solution approchée de ce système à l'aide d'un schéma d'Euler explicite :

$$\begin{cases} \theta_{n+1} = \theta_n + h\omega_n \\ \omega_{n+1} = \omega_n - h\frac{g}{l}\sin(\theta_n). \end{cases}$$

On prendra  $T = 12$ ,  $N = 200$ ,  $l = 5$ ,  $g = 9.81$  et les conditions initiales  $\theta(0) = \frac{\pi}{3}$ ,  $\omega(0) = 0$ .

2. Tracer  $\theta$  et  $\omega$  en fonction du temps.
3. Mettre en œuvre le schéma du point-milieu.

Le schéma du point-milieu pour approcher l'EDO  $y'(t) = f(t, y(t))$  est donné par :

$$y_{n+1} = y_n + hf\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}f(t_n, y_n)\right)$$

4. Comparer la solution donnée par la fonction `odeint` et les solutions données par ces deux méthodes (on présentera  $\theta$  et  $\omega$  sur deux graphes différents).
5. Comparer les solutions sur le portrait de phases.
6. Refaire les questions précédentes avec la méthode d'Euler implicite (et comparer).

### Exercice 5 Système de Lotka-Volterra

On considère le système de Lotka-Volterra sur l'intervalle  $[0, 30]$  :

$$\begin{cases} x'(t) &= x(t)(2 - y(t)/10) \\ y'(t) &= y(t)(x(t)/10 - 4) \end{cases}$$

avec les conditions initiales  $x(0) = 100$  et  $y(0) = 70$ .

1. Tracer  $x$  et  $y$  en fonction du temps.
2. Tracer la solution dans le plan de phase.
3. Tracer les isoclines dans le plan de phase.
4. Tester d'autres conditions initiales.