

# Résolution approchée d'équations différentielles du premier ordre

Ingénierie numérique et simulations

LYCÉE CARNOT (DIJON), 2013 - 2014

Germain Gondor

# Sommaire

- 1 Mise en place du problème
- 2 Méthodes à un pas
- 3 Mise en forme des systèmes d'équations différentielles
- 4 Annexe mathématique

# Sommaire

- 1 Mise en place du problème
  - Problème de Cauchy
  - Existence et unicité de la solution
  - Résolution numérique
- 2 Méthodes à un pas
- 3 Mise en forme des systèmes d'équations différentielles
- 4 Annexe mathématique

Une grande part des problèmes scientifiques se modélisent par une équation différentielle dont on cherche la solution pour dimensionner ou comprendre le phénomène.

Quand les équations sont simples (linéaires d'ordre 1 ou 2) la résolution analytique est aisée, mais nombre de modélisations conduisent à des équations non linéaires. Ce cours a pour objectif de proposer des méthodes pour déterminer une solution approchée.

# Problème de Cauchy

Le problème de Cauchy consiste à trouver les fonctions  $\vec{Y}$  de  $[0, T] \rightarrow \mathbb{R}^N$ , telles que :

$$\begin{cases} \frac{d\vec{Y}}{dt} = \vec{F}(t, \vec{Y}) \\ \vec{Y}(t_0) = \vec{Y}_0 \end{cases}$$

où  $t_0 \in [0, T]$  et  $\vec{Y}_0 \in \mathbb{R}^N$  sont des données.

La plupart des systèmes d'équations différentielles de tout ordre peuvent se mettre sous cette forme de système d'équations différentielles du premier ordre<sup>a</sup>.

---

a. à l'exception des équations différentielles implicites

# Existence et unicité de la solution

**Théorème de Cauchy-Lipschitz** : soit  $\vec{F}$  une fonction de  $[0, T] \times \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$  continue et lipschitzienne en  $\vec{Y}$ .

Alors,  $\forall t_0 \in [0, T]$  et  $\forall \vec{Y}_0 \in \mathbb{R}^N$ , le problème de Cauchy admet une solution unique définie sur  $[0, T]$ .

**Rappel** :  $\vec{F}$  lipschitzienne en  $\vec{Y}$  :

$\exists k > 0$  tel que,  $\forall \vec{Y} \in \mathbb{R}^N, \forall \vec{Z} \in \mathbb{R}^N, \forall t \in [0, T]$ ,

$$\|\vec{F}(t, \vec{Y}) - \vec{F}(t, \vec{Z})\| \leq k \cdot \|\vec{Y} - \vec{Z}\|$$

# Résolution numérique

**OBJECTIF** : Obtenir une solution approchée au problème de Cauchy pour une discrétisation temporelle de l'intervalle donné.

# Résolution numérique

**OBJECTIF :** Obtenir une solution approchée au problème de Cauchy pour une discrétisation temporelle de l'intervalle donné.

La démarche s'appuie sur la forme initiale de l'équation différentielle où il est facile de voir que la fonction  $\vec{F}(t, \vec{Y})$  traduit l'évolution de  $\vec{Y}$ , c'est-à-dire la pente de la courbe  $\vec{F}(t, \vec{Y})(t)$ .



# Résolution numérique

**OBJECTIF :** Obtenir une solution approchée au problème de Cauchy pour une discrétisation temporelle de l'intervalle donné.

La démarche s'appuie sur la forme initiale de l'équation différentielle où il est facile de voir que la fonction  $\vec{F}(t, \vec{Y})$  traduit l'évolution de  $\vec{Y}$ , c'est-à-dire la pente de la courbe  $\vec{F}(t, \vec{Y})(t)$ .

Les schémas d'intégration numériques exploitent  $\vec{F}(t, \vec{Y})$  pour traduire l'évolution sur un pas de temps.

En notant  $h$  le pas de temps et  $N$  le nombre de pas de temps, l'intervalle est discrétisé par  $t_0 = 0, t_1 = h, \dots, t_N = N.h$ .

En notant  $h$  le pas de temps et  $N$  le nombre de pas de temps, l'intervalle est discrétisé par  $t_0 = 0$ ,  $t_1 = h$ , ...,  $t_N = N.h$ .

Sur un sous-intervalle donné, on cherche à déterminer la solution sous la forme :

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{d\vec{Y}}{dt} dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) dt$$

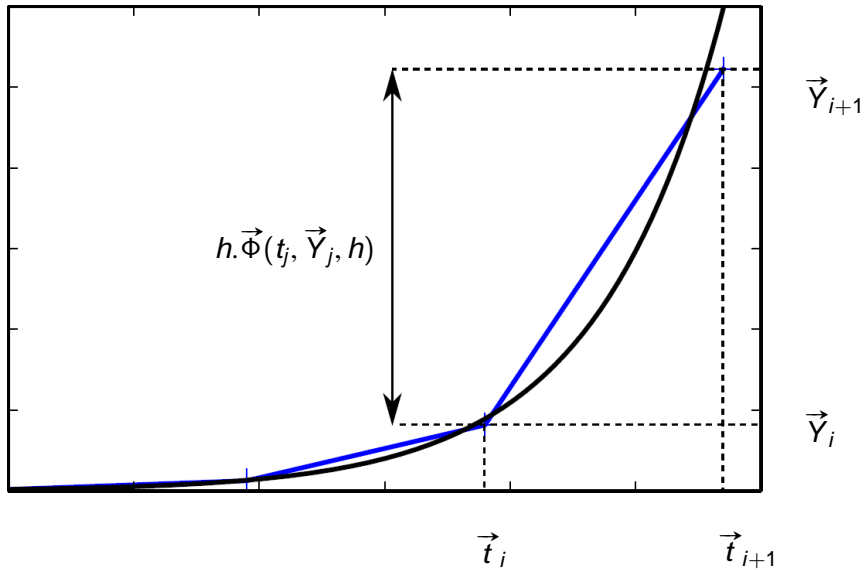
En notant  $h$  le pas de temps et  $N$  le nombre de pas de temps, l'intervalle est discrétisé par  $t_0 = 0$ ,  $t_1 = h$ , ...,  $t_N = N.h$ .

Sur un sous-intervalle donné, on cherche à déterminer la solution sous la forme :

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{d\vec{Y}}{dt} dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) dt$$

On en déduit que :

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) dt$$



Les méthodes de résolution numérique des équations différentielles sont basées sur des techniques d'estimation de l'intégrale de la fonction  $\vec{F}$ .

Les méthodes de résolution numérique des équations différentielles sont basées sur des techniques d'estimation de l'intégrale de la fonction  $\vec{F}$ .

On s'intéressera dans ce cours aux méthodes de résolution à un pas qui se mettent sous la forme générale :

Les méthodes de résolution numérique des équations différentielles sont basées sur des techniques d'estimation de l'intégrale de la fonction  $\vec{F}$ .

On s'intéressera dans ce cours aux méthodes de résolution à un pas qui se mettent sous la forme générale :

$$\begin{cases} \vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + h \cdot \vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_j, h) \\ \vec{Y}(t_0) = \vec{Y}_0 \end{cases}$$



Les méthodes de résolution numérique des équations différentielles sont basées sur des techniques d'estimation de l'intégrale de la fonction  $\vec{F}$ .

On s'intéressera dans ce cours aux méthodes de résolution à un pas qui se mettent sous la forme générale :

$$\begin{cases} \vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + h \cdot \vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_j, h) \\ \vec{Y}(t_0) = \vec{Y}_0 \end{cases}$$

où il faudra choisir  $\vec{\Phi}$  intelligemment.

Les méthodes de résolution numérique des équations différentielles sont basées sur des techniques d'estimation de l'intégrale de la fonction  $\vec{F}$ .

On s'intéressera dans ce cours aux méthodes de résolution à un pas qui se mettent sous la forme générale :

$$\begin{cases} \vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + h \cdot \vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_j, h) \\ \vec{Y}(t_0) = \vec{Y}_0 \end{cases}$$

où il faudra choisir  $\vec{\Phi}$  intelligemment.

La fonction  $\vec{\Phi}$  représente la pente de la droite permettant de passer de  $\vec{Y}_i$  à  $\vec{Y}_{i+1}$ .

# Sommaire

- 1 Mise en place du problème
- 2 Méthodes à un pas
  - Méthode d'Euler explicite
  - Méthode d'Euler implicite
  - Méthode de Runge-Kutta
  - Conclusion
- 3 Mise en forme des systèmes d'équations différentielles
- 4 Annexe mathématique

Support :  $y(t) = e^{-t}$

L'exemple élémentaire qui servira de support est la résolution de l'équation différentielle :

Support :  $y(t) = e^{-t}$

L'exemple élémentaire qui servira de support est la résolution de l'équation différentielle :

$$\dot{y}(t) + y(t) = 0 \text{ avec } y(0) = 1$$

Support :  $y(t) = e^{-t}$

L'exemple élémentaire qui servira de support est la résolution de l'équation différentielle :

$$\dot{y}(t) + y(t) = 0 \text{ avec } y(0) = 1$$

dont la solution exacte est  $y(t) = e^{-t}$ .

# Méthode d'Euler explicite

## Méthode

La première façon d'approximer l'intégrale est de réaliser une méthode des rectangles à gauche.

$$\text{Ainsi } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) dt = h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i).$$

# Méthode d'Euler explicite

## Méthode

La première façon d'approximer l'intégrale est de réaliser une méthode des rectangles à gauche.

$$\text{Ainsi } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) dt = h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i).$$

$$\text{On en déduit que } \vec{\Phi} = \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i)$$



# Méthode d'Euler explicite

## Méthode

La première façon d'approximer l'intégrale est de réaliser une méthode des rectangles à gauche.

$$\text{Ainsi } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) dt = h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i).$$

$$\text{On en déduit que } \vec{\Phi} = \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i)$$

Ainsi la relation de récurrence générale est :

# Méthode d'Euler explicite

## Méthode

La première façon d'approximer l'intégrale est de réaliser une méthode des rectangles à gauche.

$$\text{Ainsi } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) dt = h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i).$$

$$\text{On en déduit que } \vec{\Phi} = \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i)$$

Ainsi la relation de récurrence générale est :

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i)$$

# Méthode d'Euler explicite

## Méthode

La pente permettant de passer de  $\vec{Y}_i$  à  $\vec{Y}_{i+1}$  est la valeur de  $\vec{F}(t_i, \vec{Y}_i)$  comme l'illustre la figure ci-contre où le champ de la fonction  $\vec{F}$  est tracée.

# Méthode d'Euler explicite

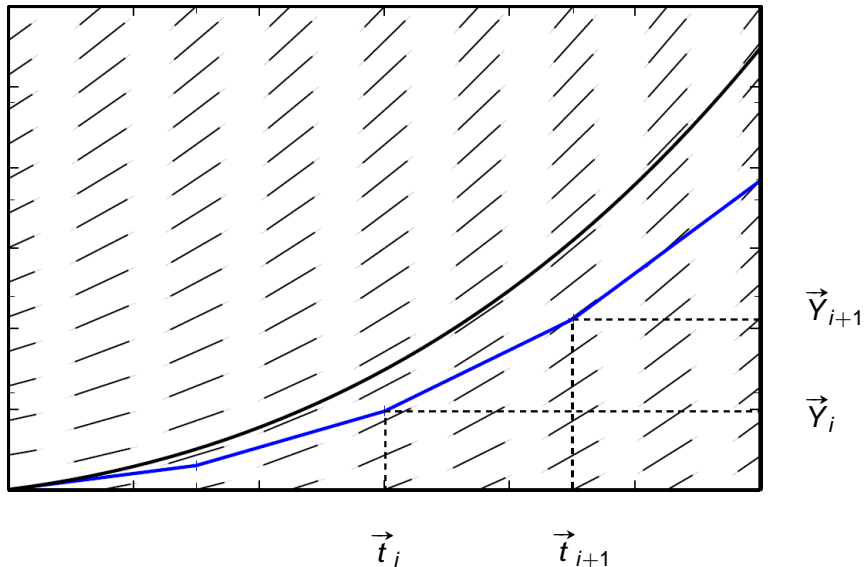
## Méthode

La pente permettant de passer de  $\vec{Y}_i$  à  $\vec{Y}_{i+1}$  est la valeur de  $\vec{F}(t_i, \vec{Y}_i)$  comme l'illustre la figure ci-contre où le champ de la fonction  $\vec{F}$  est tracée.

On peut aussi exprimer la relation sous la forme :

$$\vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) = \frac{d\vec{Y}}{dt}(t_i) \simeq \frac{\vec{Y}_{i+1} - \vec{Y}_i}{h}$$

# Méthode d'Euler explicite



# Propriétés

## Stabilité

# Propriétés

**Stabilité**  $\vec{\Phi}$  est lipschitzienne donc le schéma est stable.

**Consistance**

## Propriétés

**Stabilité**  $\vec{\Phi}$  est lipschitzienne donc le schéma est stable.

**Consistance** L'erreur de consistance est

$$c_i = \vec{Y}_{ex}(t_{i+1}) - \vec{Y}_{ex}(t_i) - h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_{ex}(t_i))$$

Or le développement de Taylor-Lagrange donne :



## Propriétés

**Stabilité**  $\vec{\Phi}$  est lipschitzienne donc le schéma est stable.

**Consistance** L'erreur de consistance est

$$c_i = \vec{Y}_{ex}(t_{i+1}) - \vec{Y}_{ex}(t_i) - h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_{ex}(t_i))$$

Or le développement de Taylor-Lagrange donne :

$$\vec{Y}_{ex}(t_i + h) = \vec{Y}_{ex}(t_{i+1}) = \vec{Y}_{ex}(t_i) + h \cdot \vec{Y}'_{ex}(t_i) + \frac{h^2}{2} \cdot \vec{Y}''_{ex}(\xi)$$

avec  $\xi \in [t_i, t_i + h]$ .

## Propriétés

**Stabilité**  $\vec{\Phi}$  est lipschitzienne donc le schéma est stable.

**Consistance** L'erreur de consistance est

$$c_i = \vec{Y}_{ex}(t_{i+1}) - \vec{Y}_{ex}(t_i) - h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_{ex}(t_i))$$

Or le développement de Taylor-Lagrange donne :

$$\vec{Y}_{ex}(t_i + h) = \vec{Y}_{ex}(t_{i+1}) = \vec{Y}_{ex}(t_i) + h \cdot \vec{Y}'_{ex}(t_i) + \frac{h^2}{2} \cdot \vec{Y}''_{ex}(\xi)$$

avec  $\xi \in [t_i, t_i + h]$ .

Or  $\vec{Y}'_{ex} = \vec{\Phi}(t_i, \vec{Y}_{ex}(t_i), h) = \vec{F}(t_i, \vec{Y}_{ex}(t_i))$

## Propriétés

**Stabilité**  $\vec{\Phi}$  est lipschitzienne donc le schéma est stable.

**Consistance** L'erreur de consistance est

$$c_i = \vec{Y}_{ex}(t_{i+1}) - \vec{Y}_{ex}(t_i) - h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_{ex}(t_i))$$

Or le développement de Taylor-Lagrange donne :

$$\vec{Y}_{ex}(t_i + h) = \vec{Y}_{ex}(t_{i+1}) = \vec{Y}_{ex}(t_i) + h \cdot \vec{Y}'_{ex}(t_i) + \frac{h^2}{2} \cdot \vec{Y}''_{ex}(\xi)$$

avec  $\xi \in [t_i, t_i + h]$ .

$$\text{Or } \vec{Y}_{ex} = \vec{\Phi}(t_i, \vec{Y}_{ex}(t_i), h) = \vec{F}(t_i, \vec{Y}_{ex}(t_i))$$

On en déduit que  $c_i = \frac{h^2}{2} \cdot \vec{Y}''_{ex}(\xi)$  avec  $\xi \in [t_i, t_i + h]$

Ainsi la méthode est consistante. Comme elle est stable, on en déduit qu'elle est convergente.

L'expression de l'erreur de consistance indique que la méthode est d'ordre 1.

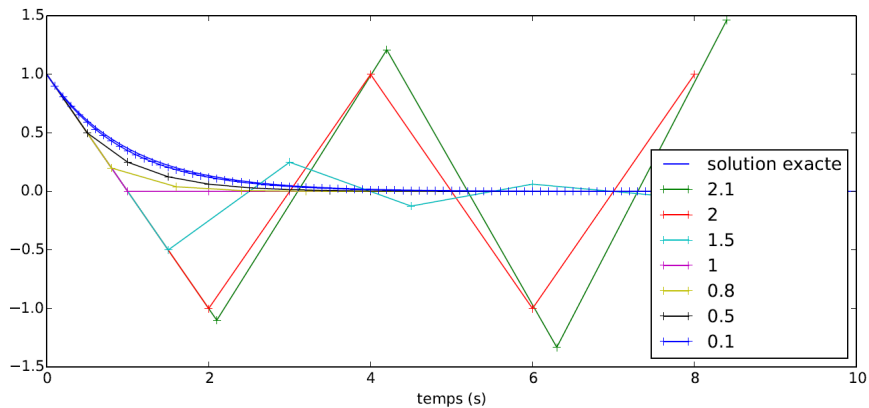
# Application

**Q - 1** : *Écrire la relation de récurrence de la méthode d'Euler sur l'exemple.*

# Application

**Q - 1 :** *Écrire la relation de récurrence de la méthode d'Euler sur l'exemple.*

**Q - 2 :** *Montrer que pour certaines valeurs de  $h$ , la solution peut présenter des problèmes. Justifier et commenter les courbes de la FIG 1.*



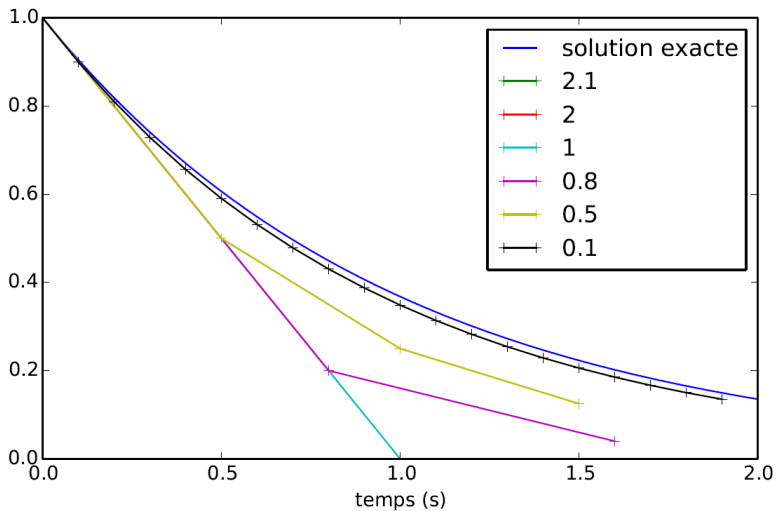


FIGURE: Solution de l'application pour le schéma Euler explicite.



Le tableau suivant donne l'erreur comme étant le maximum de l'écart entre la solution exacte et la solution approchée ainsi que le temps de calcul pour différentes valeurs du pas de temps.

$h$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$N$ pas de temps	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
Erreur	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Temps (s)	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-1}$	5,0	50

On constate que l'erreur évolue linéairement en fonction du pas de temps ainsi que le temps de calcul (complexité en  $O(N)$  car une seule boucle).

Il faut descendre à un pas de temps très faible avant d'obtenir un niveau d'erreur satisfaisant. On voit bien ici la limitation des méthodes d'ordre 1.

## Méthode d'Euler implicite

La seconde façon d'approximer l'intégrale est de réaliser une méthode des rectangles à droite.

$$\text{Ainsi } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) . dt = h . \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$$

## Méthode d'Euler implicite

La seconde façon d'approximer l'intégrale est de réaliser une méthode des rectangles à droite.

$$\text{Ainsi } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) . dt = h . \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$$

On en déduit que  $\vec{\Phi} = \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$

## Méthode d'Euler implicite

La seconde façon d'approximer l'intégrale est de réaliser une méthode des rectangles à droite.

$$\text{Ainsi } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) . dt = h . \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$$

On en déduit que  $\vec{\Phi} = \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$

Ainsi la relation de récurrence générale est :

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + h . \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$$

## Méthode d'Euler implicite

La seconde façon d'approximer l'intégrale est de réaliser une méthode des rectangles à droite.

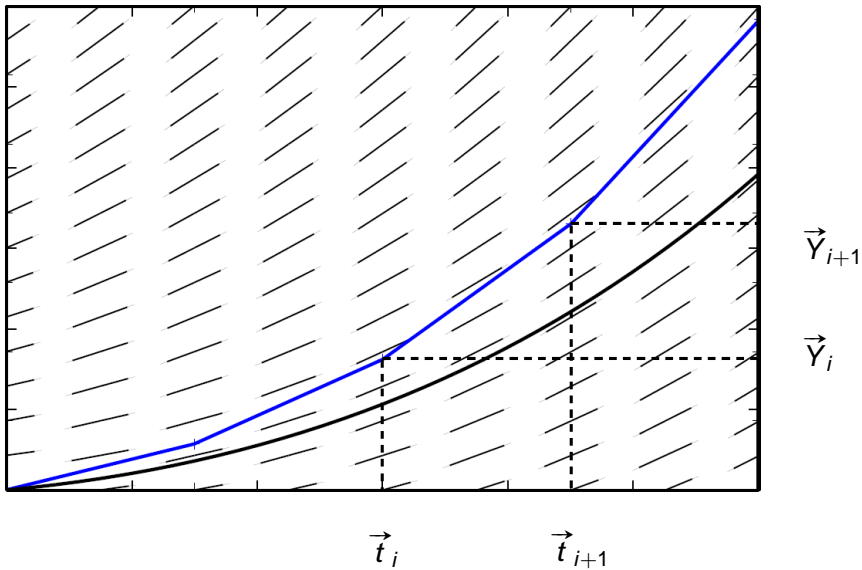
$$\text{Ainsi } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{F}(t, \vec{Y}) . dt = h . \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$$

On en déduit que  $\vec{\Phi} = \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$

Ainsi la relation de récurrence générale est :

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + h . \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$$

La pente permettant de passer de  $\vec{Y}_i$  à  $\vec{Y}_{i+1}$  est la valeur de  $\vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1})$  comme l'illustre la figure ci-contre où le champ de la fonction  $\vec{F}$  est tracé.



On peut aussi exprimer la relation sous la forme :

$$\vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1}) = \frac{d\vec{Y}}{dt}(t_{i+1}) \simeq \frac{\vec{Y}_{i+1} - \vec{Y}_i}{h}$$



On peut aussi exprimer la relation sous la forme :

$$\vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1}) = \frac{d\vec{Y}}{dt}(t_{i+1}) \simeq \frac{\vec{Y}_{i+1} - \vec{Y}_i}{h}$$

On remarque que le second membre dépend aussi de  $\vec{Y}_{i+1}$ . Il faut donc dans les cas non linéaires se ramener à un problème stationnaire à résoudre avec la méthode de Newton sur :

$$\vec{Y}_{i+1} - \vec{Y}_i - h \cdot \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1}) = 0$$

ce qui alourdit notablement le calcul.

On peut aussi exprimer la relation sous la forme :

$$\vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1}) = \frac{d\vec{Y}}{dt}(t_{i+1}) \simeq \frac{\vec{Y}_{i+1} - \vec{Y}_i}{h}$$

On remarque que le second membre dépend aussi de  $\vec{Y}_{i+1}$ . Il faut donc dans les cas non linéaires se ramener à un problème stationnaire à résoudre avec la méthode de Newton sur :

$$\vec{Y}_{i+1} - \vec{Y}_i - h \cdot \vec{F}(t_{i+1}, \vec{Y}_{i+1}) = 0$$

ce qui alourdit notablement le calcul.

Dans les cas linéaires, il faut au moins une inversion, ce qui est aussi très lourd pour les problèmes de grande dimension. Il faut donc retenir qu'une méthode implicite est généralement plus coûteuse qu'une méthode explicite à pas de temps égal.

# Propriétés

De même que pour la méthode explicite, la méthode est convergente et d'ordre 1.

# Application

**Q - 1 :** *Écrire la relation de récurrence de la méthode d'Euler implicite sur l'exemple.*

**Q - 2 :** *Montrer que quelle que soit la valeur de  $h$ , la solution ne peut plus présenter les mêmes problèmes qu'en explicite.*

La solution approchée pour différents pas de temps est donnée sur la FIG 2.

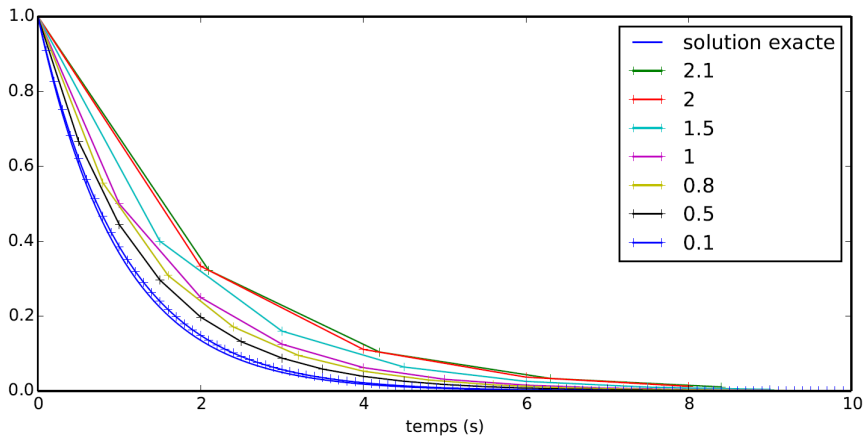


FIGURE: Solution de l'application pour le schéma Euler implicite.

Le tableau suivant donne l'erreur comme étant le maximum de l'écart entre la solution exacte et la solution approchée ainsi que le temps de calcul pour différentes valeurs du pas de temps.

$h$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$N$ pas de temps	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
Erreur	$5,9 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Temps (s)	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	3,7	37	370

On constate que l'erreur évolue linéairement en fonction du pas de temps ainsi que le temps de calcul (complexité en  $O(N)$  car une seule boucle).

On constate que l'erreur évolue linéairement en fonction du pas de temps ainsi que le temps de calcul (complexité en  $O(N)$  car une seule boucle).

Le temps de calcul est cependant plus important à cause de la résolution de l'équation avec l'algorithme de Newton (on aurait pu inverser analytiquement la relation dans ce cas d'école).



On constate que l'erreur évolue linéairement en fonction du pas de temps ainsi que le temps de calcul (complexité en  $O(N)$  car une seule boucle).

Le temps de calcul est cependant plus important à cause de la résolution de l'équation avec l'algorithme de Newton (on aurait pu inverser analytiquement la relation dans ce cas d'école).

Il faut descendre à un pas de temps très faible avant d'obtenir un niveau d'erreur satisfaisant. On voit bien ici la limitation des méthodes d'ordre 1.

# Méthode de Runge-Kutta

Les méthodes d'Euler peuvent être vu comme une approximation du développement de Taylor-Lagrange à l'ordre 1.

# Méthode de Runge-Kutta

Les méthodes d'Euler peuvent être vues comme une approximation du développement de Taylor-Lagrange à l'ordre 1.

Pour augmenter la précision, une solution pourrait être d'augmenter l'ordre de développement; c'est cependant impossible sans les expressions des dérivées n-ième de la fonction  $\vec{F}$ .

# Méthode de Runge-Kutta

Les méthodes d'Euler peuvent être vu comme une approximation du développement de Taylor-Lagrange à l'ordre 1.

Pour augmenter la précision, une solution pourrait être d'augmenter l'ordre de développement; c'est cependant impossible sans les expressions des dérivées n-ième de la fonction  $\vec{F}$ .

Le schéma de Runge-Kutta permet d'obtenir des méthodes d'ordres plus élevés sans utiliser les fonctions dérivées de  $\vec{F}$ .

# Expression générale des méthodes de Runge-Kutta explicites

La méthode générale consiste à déterminer  $\vec{\Phi}$  à partir d'approximations successives.

# Expression générale des méthodes de Runge-Kutta explicites

La méthode générale consiste à déterminer  $\vec{\Phi}$  à partir d'approximations successives.

On choisit

$$\vec{\Phi}(\tau, \vec{Y}, h) = \sum_{i=1}^q a_i \cdot k_i(\tau, \vec{Y}, h) \quad \text{avec} \quad k_1(\tau, \vec{Y}, h) = \vec{F}(\tau, \vec{Y})$$

# Expression générale des méthodes de Runge-Kutta explicites

La méthode générale consiste à déterminer  $\vec{\Phi}$  à partir d'approximations successives.

On choisit

$$\vec{\Phi}(\tau, \vec{Y}, h) = \sum_{i=1}^q a_i \cdot k_i(\tau, \vec{Y}, h) \quad \text{avec} \quad k_1(\tau, \vec{Y}, h) = \vec{F}(\tau, \vec{Y})$$

pour  $i \geq 2$

$$k_i(\tau, \vec{Y}, h) = \vec{F}(\tau + \alpha_i \cdot h, \vec{Y} + \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij} \cdot k_j(\tau, \vec{Y}, h))$$

On choisit les paramètres  $q$ ,  $a_i$ ,  $\alpha_i$  et  $\beta_{ij}$  pour que la méthode soit d'ordre  $p$ .

On remarque que la méthode d'Euler explicite est le cas particulier de Runge-Kutta d'ordre 1.

En pratique, on va rarement au delà de l'ordre 4.



## Runge-Kutta d'ordre 2 (RK2) – Méthode de Heun

Le relation de récurrence est

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i + h, \vec{Y}_i + h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i))$$

## Runge-Kutta d'ordre 2 (RK2) – Méthode de Heun

Le relation de récurrence est

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i + h, \vec{Y}_i + h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i))$$

On a donc pris  $\vec{\Phi}(\tau, \vec{Y}, h) = \frac{k_1 + k_2}{2}$  avec :

## Runge-Kutta d'ordre 2 (RK2) – Méthode de Heun

Le relation de récurrence est

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i + h, \vec{Y}_i + h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i))$$

On a donc pris  $\vec{\Phi}(\tau, \vec{Y}, h) = \frac{k_1 + k_2}{2}$  avec :

$$k_1 = \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) \quad \text{et} \quad k_2 = \vec{F}(t_i + h, \vec{Y}_i + h \cdot k_1)$$

## Runge-Kutta d'ordre 2 (RK2) – Méthode de Heun

Le relation de récurrence est

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i + h, \vec{Y}_i + h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i))$$

On a donc pris  $\vec{\Phi}(\tau, \vec{Y}, h) = \frac{k_1 + k_2}{2}$  avec :

$$k_1 = \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) \quad \text{et} \quad k_2 = \vec{F}(t_i + h, \vec{Y}_i + h \cdot k_1)$$

Cette relation est une intégration de type trapèze entre la valeur au pas  $i$  et la valeur du pas  $i+1$  estimée à partir d'une méthode d'Euler explicite.

## Runge-Kutta d'ordre 2 (RK2) – Méthode de Heun

Le relation de récurrence est

$$\vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) + \frac{h}{2} \cdot \vec{F}(t_i + h, \vec{Y}_i + h \cdot \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i))$$

On a donc pris  $\vec{\Phi}(\tau, \vec{Y}, h) = \frac{k_1 + k_2}{2}$  avec :

$$k_1 = \vec{F}(t_i, \vec{Y}_i) \quad \text{et} \quad k_2 = \vec{F}(t_i + h, \vec{Y}_i + h \cdot k_1)$$

Cette relation est une intégration de type trapèze entre la valeur au pas  $i$  et la valeur du pas  $i+1$  estimée à partir d'une méthode d'Euler explicite.

La solution approchée de l'application pour différents pas de temps est donnée sur la FIG 3.

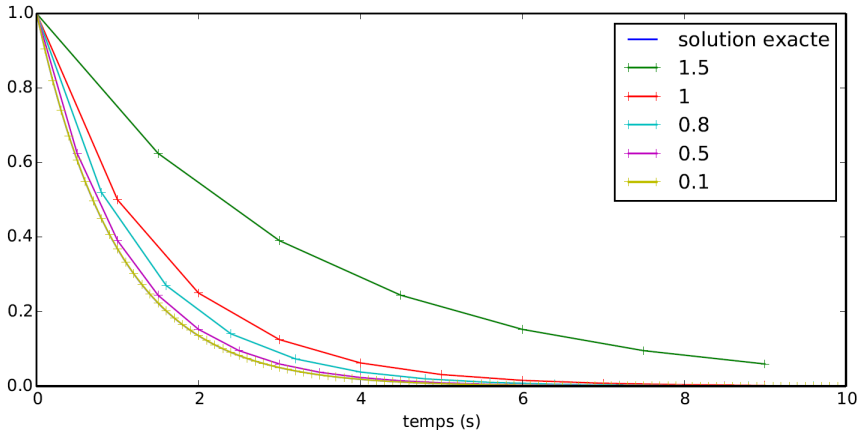


FIGURE: Solution de l'application pour le schéma de Heun.

Le tableau suivant donne l'erreur comme étant le maximum de l'écart entre la solution exacte et la solution approchée ainsi que le temps de calcul pour différentes valeurs du pas de temps.

$h$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$N$ pas de temps	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
Erreur	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-12}$
Temps (s)	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	1,2	12	120

On constate que l'erreur évolue quadratiquement en fonction du pas de temps : en divisant le pas de temps par 10, l'erreur diminue d'un facteur 100.

Le temps de calcul est toujours linéaire car la complexité n'a pas augmenté (complexité en  $O(N)$ ). Il est environ double de la méthode d'Euler explicite puisqu'il y a deux évaluations de  $\vec{F}(t, \vec{Y})$ .



## Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4)

La fonction  $\vec{\Phi}$  est  $\vec{\Phi}(\tau, \vec{Y}, h) = \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4)$  avec quatre évaluations successives de  $\vec{F}$  :

$$k_1(\tau, \vec{Y}, h) = \vec{F}(\tau, \vec{Y})$$

$$k_2(\tau, \vec{Y}, h) = \vec{F}\left(\tau + \frac{h}{2}, \vec{Y} + \frac{h}{2} \cdot k_1(\tau, \vec{Y}, h)\right)$$

$$k_3(\tau, \vec{Y}, h) = \vec{F}\left(\tau + \frac{h}{2}, \vec{Y} + \frac{h}{2} \cdot k_2(\tau, \vec{Y}, h)\right)$$

$$k_4(\tau, \vec{Y}, h) = \vec{F}(\tau + h, \vec{Y} + h \cdot k_3(\tau, \vec{Y}, h))$$

La solution approchée pour différents pas de temps est donnée sur la FIG 4.

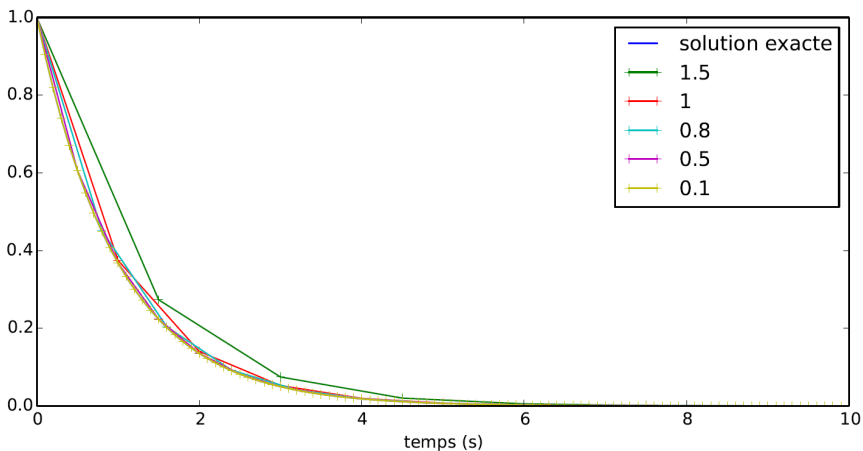


FIGURE: Solution de l'application pour le schéma de Runge-Kutta d'ordre 4.

Le tableau suivant donne l'erreur comme étant le maximum de l'écart entre la solution exacte et la solution approchée ainsi que le temps de calcul pour différentes valeurs du pas de temps.

$h$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
$N$ pas de temps	100	1000	10000
Erreur	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-10}$	$9,2 \cdot 10^{-14}$
Temps (s)	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$

On constate que l'erreur évolue à l'ordre 4 en fonction du pas de temps :

Le tableau suivant donne l'erreur comme étant le maximum de l'écart entre la solution exacte et la solution approchée ainsi que le temps de calcul pour différentes valeurs du pas de temps.

$h$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
$N$ pas de temps	100	1000	10000
Erreur	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-10}$	$9,2 \cdot 10^{-14}$
Temps (s)	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$

On constate que l'erreur évolue à l'ordre 4 en fonction du pas de temps : ainsi, en divisant le pas de temps par 10, l'erreur diminue d'un facteur 10000.

Le tableau suivant donne l'erreur comme étant le maximum de l'écart entre la solution exacte et la solution approchée ainsi que le temps de calcul pour différentes valeurs du pas de temps.

$h$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
$N$ pas de temps	100	1000	10000
Erreur	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-10}$	$9,2 \cdot 10^{-14}$
Temps (s)	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$

On constate que l'erreur évolue à l'ordre 4 en fonction du pas de temps : ainsi, en divisant le pas de temps par 10, l'erreur diminue d'un facteur 10000.

Le temps de calcul est toujours linéaire car la complexité n'a pas augmentée (complexité en  $O(N)$ ).

## Conclusion

En terme de schéma explicite, la méthode de Runge-Kutta à l'ordre 4 est souvent utilisée.

Cependant, vous devez connaître uniquement la méthode d'Euler.

Concernant le choix du pas de temps, il obéit à un compromis entre le temps de calcul, la stabilité et le stockage en mémoire.

## Conclusion

En terme de schéma explicite, la méthode de Runge-Kutta à l'ordre 4 est souvent utilisée.

Cependant, vous devez connaître uniquement la méthode d'Euler.

Concernant le choix du pas de temps, il obéit à un compromis entre le temps de calcul, la stabilité et le stockage en mémoire.

Le choix de ce pas de temps dépendra essentiellement de la dynamique du système à représenter : si on veut représenter une dynamique à 10 kHz, il faudrait prendre un pas de temps de l'ordre de  $10^{-5}$  (10 points par période).

Le choix du pas de temps est souvent fait de manière empirique par expérience de l'ingénieur.

# Sommaire

- 1 Mise en place du problème
- 2 Méthodes à un pas
- 3 Mise en forme des systèmes d'équations différentielles
  - Equation harmonique
  - Système masse-ressort-amortisseur entretenu
  - Création du glycol
- 4 Annexe mathématique



# Équation harmonique

Prenons un système masse-ressort.

# Équation harmonique

Prenons un système masse-ressort.

Son équation du mouvement se met sous la forme :

$$\ddot{y}(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) = 0$$

# Équation harmonique

Prenons un système masse-ressort.

Son équation du mouvement se met sous la forme :

$$\ddot{y}(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) = 0$$

Les conditions initiales sont  $y(0) = 1$  et  $\dot{y}(0) = 0$ .

# Équation harmonique

Prenons un système masse-ressort.

Son équation du mouvement se met sous la forme :

$$\ddot{y}(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) = 0$$

Les conditions initiales sont  $y(0) = 1$  et  $\dot{y}(0) = 0$ .

**Q - 3 :** *Mettre ce problème sous la forme du problème de Cauchy.*

# Équation harmonique

Prenons un système masse-ressort.

Son équation du mouvement se met sous la forme :

$$\ddot{y}(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) = 0$$

Les conditions initiales sont  $y(0) = 1$  et  $\dot{y}(0) = 0$ .

**Q - 3 :** *Mettre ce problème sous la forme du problème de Cauchy.*

L'idée est d'introduire des variables supplémentaires. Ici, on introduit la fonction  $y_2(t)$  telle qu'elle soit solution de  $y_2(t) = \dot{y}_1(t)$  avec  $y_1(t) = y(t)$ .

L'équation différentielle du système masse-ressort s'écrit ainsi :

L'équation différentielle du système masse-ressort s'écrit ainsi :

$$\dot{y}_2(t) = -\omega_0^2 \cdot y_1(t)$$

L'équation différentielle du système masse-ressort s'écrit ainsi :

$$\dot{y}_2(t) = -\omega_0^2 \cdot y_1(t)$$

En posant

$$\vec{Y}(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix}, \quad \vec{F}(t, \vec{Y}) = \begin{pmatrix} y_2(t) \\ -\omega_0^2 y_1(t) \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{Y}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$



L'équation différentielle du système masse-ressort s'écrit ainsi :

$$\dot{y}_2(t) = -\omega_0^2 \cdot y_1(t)$$

En posant

$$\vec{Y}(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix}, \quad \vec{F}(t, \vec{Y}) = \begin{pmatrix} y_2(t) \\ -\omega_0^2 y_1(t) \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{Y}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

on obtient bien la forme du problème de Cauchy.

La résolution se fait de la même manière que précédemment sauf que cette fois les grandeurs manipulées sont des vecteurs et non plus des scalaires.

**Une autre solution classique** permettant de résoudre cette équation différentielle avec la méthode d'Euler explicite est d'appliquer deux fois la définition.

On note  $Y_p$  la dérivée première. On a  $Y_p = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{h}$

**Une autre solution classique** permettant de résoudre cette équation différentielle avec la méthode d'Euler explicite est d'appliquer deux fois la définition.

On note  $Yp$  la dérivée première. On a  $Yp_i = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{h}$

On note  $Ypp$  la dérivée seconde.

$$Ypp_i = \frac{Yp_{i+1} - Yp_i}{h} = \frac{Y_{i+2} - 2.Y_{i+1} + Y_i}{h^2}$$

**Une autre solution classique** permettant de résoudre cette équation différentielle avec la méthode d'Euler explicite est d'appliquer deux fois la définition.

On note  $Yp$  la dérivée première. On a  $Yp_i = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{h}$

On note  $Ypp$  la dérivée seconde.

$$Ypp_i = \frac{Yp_{i+1} - Yp_i}{h} = \frac{Y_{i+2} - 2.Y_{i+1} + Y_i}{h^2}$$

On en déduit que

$$Y_{i+2} = (-h^2.\omega_0^2 - 1).Y_i + 2.Y_{i+1}$$

On obtient une relation de récurrence directe qui peut être programmée.

**Une autre solution classique** permettant de résoudre cette équation différentielle avec la méthode d'Euler explicite est d'appliquer deux fois la définition.

On note  $Yp$  la dérivée première. On a  $Yp_i = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{h}$

On note  $Ypp$  la dérivée seconde.

$$Ypp_i = \frac{Yp_{i+1} - Yp_i}{h} = \frac{Y_{i+2} - 2.Y_{i+1} + Y_i}{h^2}$$

On en déduit que

$$Y_{i+2} = (-h^2.\omega_0^2 - 1).Y_i + 2.Y_{i+1}$$

On obtient une relation de récurrence directe qui peut être programmée.

# Système masse-ressort-amortisseur entretenu

Soit un système masse-ressort-amortisseur soumis à une excitation extérieure harmonique.

# Système masse-ressort-amortisseur entretenue

Soit un système masse-ressort-amortisseur soumis à une excitation extérieure harmonique.

L'équation différentielle se met sous la forme générale :

# Système masse-ressort-amortisseur entretenu

Soit un système masse-ressort-amortisseur soumis à une excitation extérieure harmonique.

L'équation différentielle se met sous la forme générale :

$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_0\dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = f_0 \sin(\omega t)$$



# Système masse-ressort-amortisseur entretenu

Soit un système masse-ressort-amortisseur soumis à une excitation extérieure harmonique.

L'équation différentielle se met sous la forme générale :

$$\ddot{y}(t) + 2.\xi.\omega_0.\dot{y}(t) + \omega_0^2.y(t) = f_0.\sin(\omega t)$$

Les conditions initiales sont  $y(0) = 1$  et  $\dot{y}(0) = 0$  (solution FIG 5(a)).

# Système masse-ressort-amortisseur entretenu

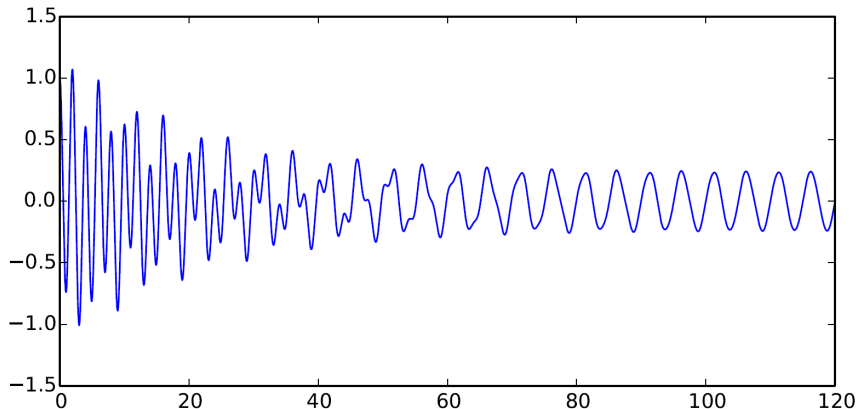
Soit un système masse-ressort-amortisseur soumis à une excitation extérieure harmonique.

L'équation différentielle se met sous la forme générale :

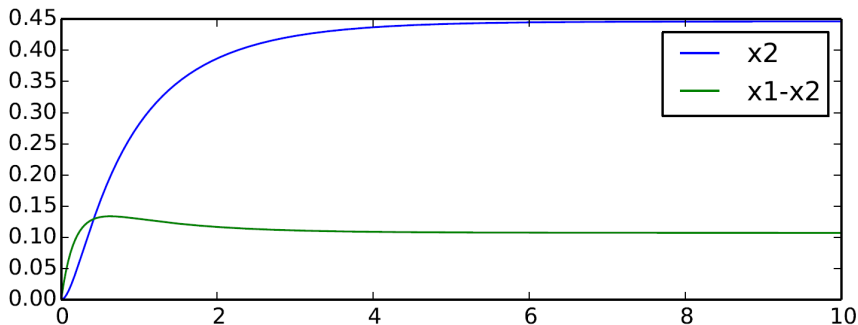
$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_0\dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = f_0 \sin(\omega t)$$

Les conditions initiales sont  $y(0) = 1$  et  $\dot{y}(0) = 0$  (solution FIG 5(a)).

**Q - 7 :** *Mettre ce problème sous la forme du problème de Cauchy.*



(a) Solution de l'équation différentielle du système masse-ressort-amortisseur pour  $\omega_0 = 2$  rad/s,  $\xi = 0,015$ ,  $f_0 = 2$  N et  $\omega = 5$  rad/s.

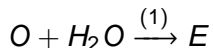


(b) Solution de l'équation différentielle de la réaction de création du glycol.

**FIGURE:** Solutions des exemples 2 et 3.

# Création du glycol

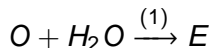
Le glycol (noté  $E$ ) résulte de l'addition d'eau à l'oxyde d'éthylène (noté  $O$ ) en phase gazeuse, selon la réaction



de constante de vitesse  $k_1$ .

# Création du glycol

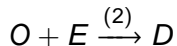
Le glycol (noté  $E$ ) résulte de l'addition d'eau à l'oxyde d'éthylène (noté  $O$ ) en phase gazeuse, selon la réaction



de constante de vitesse  $k_1$ .

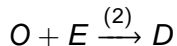
Cette réaction est effectuée à 473 K sous une pression  $P = 15,0$  bar.

Industriellement le temps de passage dans le réacteur ne permet pas d'atteindre l'état d'équilibre thermodynamique et on constate l'apparition de diéthylèneglycol (noté  $D$ ) produit par la réaction



se déroulant également en phase gazeuse, de constante de vitesse  $k_2$ .

Industriellement le temps de passage dans le réacteur ne permet pas d'atteindre l'état d'équilibre thermodynamique et on constate l'apparition de diéthylèneglycol (noté  $D$ ) produit par la réaction

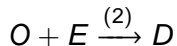


se déroulant également en phase gazeuse, de constante de vitesse  $k_2$ .

Les réactions sont supposées d'ordre un par rapport à chacun des réactifs et totales.



Industriellement le temps de passage dans le réacteur ne permet pas d'atteindre l'état d'équilibre thermodynamique et on constate l'apparition de diéthylèneglycol (noté  $D$ ) produit par la réaction



se déroulant également en phase gazeuse, de constante de vitesse  $k_2$ .

Les réactions sont supposées d'ordre un par rapport à chacun des réactifs et totales.

Pour traduire le fait que l'eau réagit moins vite que le glycol  $E$  sur l'oxyde d'éthylène  $O$ , les constantes de vitesse  $k_1$  et  $k_2$  sont choisies telles que  $k_2 = 5.k_1$ .

Le mélange initial est constitué d'oxyde d'éthylène et d'eau à la concentration molaire  $c_0 = 1$  mol/L chacun. On notera  $x_1$  l'avancement de la réaction (1) en mol/L et  $x_2$  l'avancement de la réaction (2) en mol/L

Les équations différentielles modélisant le mécanisme réactionnel sont (solution FIG 5(b)):

**Q - 8** : *Mettre ce problème sous la forme du problème de Cauchy.*

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = k_1 \cdot (c_0 - x_1 - x_2) \cdot (c_0 - x_1) \\ \frac{dx_2}{dt} = k_2 \cdot (c_0 - x_1 - x_2) \cdot (x_1 - x_2) \end{cases}$$

# Sommaire

- 1 Mise en place du problème
- 2 Méthodes à un pas
- 3 Mise en forme des systèmes d'équations différentielles
- 4 Annexe mathématique
  - Définitions
  - Propriétés

# Définitions

On note  $\vec{Y}_{ex}(t)$  la solution exacte.

# Erreur de consistance au pas $i$

## DÉFINITION: Erreur de consistance au pas $i$

On note  $c_i$  l'erreur de consistance au pas  $i$  telle que

$$c_i = \vec{Y}_{\text{ex}}(t_{i+1}) - \vec{Y}_{\text{ex}}(t_i) - h \cdot \vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_{\text{ex}}(t_j), h)$$

# Erreur de consistance au pas $i$

## DÉFINITION: Erreur de consistance au pas $i$

On note  $c_i$  l'erreur de consistance au pas  $i$  telle que

$$c_i = \vec{Y}_{ex}(t_{i+1}) - \vec{Y}_{ex}(t_i) - h \cdot \vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_{ex}(t_j), h)$$

Elle permet de définir l'erreur réalisée entre l'approximation et la solution exacte au pas de temps  $i$ .

# Méthode consistante

## DÉFINITION: Méthode consistante

|| *La méthode est dite consistante si*  $\lim_{h \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N |c_i| = 0$

# Méthode stable

Soit le schéma choisi et le schéma perturbé

$$\begin{cases} \vec{Y}_{i+1} = \vec{Y}_i + h \cdot \vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_j, h) \\ \vec{Y}_{\text{ex}}(t_0) = \vec{Y}_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{Y}_{i+1}^* = \vec{Y}_i^* + h \cdot \vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_j^*, h) + \zeta_i \\ \vec{Y}_{\text{ex}}^*(t_0) = \vec{Y}_0^* \end{cases}$$

## DÉFINITION: Méthode stable

*La méthode est stable si*

$$\exists M > 0 / \sup_{0 \leq i \leq N} |\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq M \cdot \left( |\vec{Y}_0^* - \vec{Y}_0| + \sum_{i=0}^N |\zeta_i| \right)$$



# Méthode convergente

## DÉFINITION: Méthode convergente

*La méthode est convergente si*

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left[ \sup_{0 \leq i \leq N} |\vec{Y}_{\text{ex}}(t_i) - \vec{Y}_i| \right] = 0$$

# Ordre de convergence

## DÉFINITION: Méthode d'ordre $p$

*Une méthode est dite d'ordre  $p$  si*

$$\exists M > 0 / \forall i, |c_i| \leq M.h^{p+1}$$

# Propriétés

## Propriété 1

Une méthode est convergente si et seulement si elle est stable et consistante.

## Propriété 2

Si  $\vec{\Phi}$  est lipschitzienne en  $\vec{Y}$  alors le schéma numérique est stable.

### Démonstration :

Soit le schéma numérique et le schéma perturbé avec  $\vec{\Phi}$   $k$ -lipschitzienne.

On a :  $|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| = |\vec{Y}_{i-1}^* - \vec{Y}_{i-1} + h.(\vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_j^*, h) - \vec{\Phi}(t_j, \vec{Y}_j, h)) + \zeta_{i-1}|$

Or  $\vec{\Phi}$  est  $k$ -lipschitzienne et par inégalité triangulaire, on obtient

Or  $\vec{\Phi}$  est  $k$ -lipschitzienne et par inégalité triangulaire, on obtient

$$|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k).|\vec{Y}_{i-1}^* - \vec{Y}_{i-1}| + |\zeta_{i-1}|$$

Or  $\vec{\Phi}$  est  $k$ -lipschitzienne et par inégalité triangulaire, on obtient

$$|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k).|\vec{Y}_{i-1}^* - \vec{Y}_{i-1}| + |\zeta_{i-1}|$$

Par récurrence simple,  $|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k)^i.|\vec{Y}_0^* - \vec{Y}_0| + \sum_{k=0}^{i-1} |\zeta_k|$

Or  $\vec{\Phi}$  est  $k$ -lipschitzienne et par inégalité triangulaire, on obtient

$$|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k).|\vec{Y}_{i-1}^* - \vec{Y}_{i-1}| + |\zeta_{i-1}|$$

Par récurrence simple,  $|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k)^i.|\vec{Y}_0^* - \vec{Y}_0| + \sum_{k=0}^{i-1} |\zeta_k|$

Comme  $1 + h.k > 1$ ,  $1 \leq (1 + h.k)^i \leq (1 + h.k)^N$ , ainsi



Or  $\vec{\Phi}$  est  $k$ -lipschitzienne et par inégalité triangulaire, on obtient

$$|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k).|\vec{Y}_{i-1}^* - \vec{Y}_{i-1}| + |\zeta_{i-1}|$$

Par récurrence simple,  $|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k)^i.|\vec{Y}_0^* - \vec{Y}_0| + \sum_{k=0}^{i-1} |\zeta_k|$

Comme  $1 + h.k > 1$ ,  $1 \leq (1 + h.k)^i \leq (1 + h.k)^N$ , ainsi

$$\forall i, \quad |\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq M. (|\vec{Y}_0^* - \vec{Y}_0| + \sum_{i=0}^N |\zeta_i|)$$

Or  $\vec{\Phi}$  est  $k$ -lipschitzienne et par inégalité triangulaire, on obtient

$$|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k).|\vec{Y}_{i-1}^* - \vec{Y}_{i-1}| + |\zeta_{i-1}|$$

Par récurrence simple,  $|\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq (1 + h.k)^i.|\vec{Y}_0^* - \vec{Y}_0| + \sum_{k=0}^{i-1} |\zeta_k|$

Comme  $1 + h.k > 1$ ,  $1 \leq (1 + h.k)^i \leq (1 + h.k)^N$ , ainsi

$$\forall i, \quad |\vec{Y}_i^* - \vec{Y}_i| \leq M. (|\vec{Y}_0^* - \vec{Y}_0| + \sum_{i=0}^N |\zeta_i|)$$

Donc la borne supérieure est également majorée par ce terme, on en déduit que le schéma est stable.