

Physique Numérique – Semaine 3

Rappel des concepts introduits en semaine 2

- ☐ Cas de l'oscillateur harmonique, schéma d'Euler explicite
- ☐ Analyse de stabilité Von Neumann: croissance / décroissance de l'erreur
- ☐ Solution analytique du schéma numérique
- ☐ Croissance / décroissance de l'énergie mécanique numérique

Plan de la semaine 3

- ☐ Schémas symplectiques: Euler-Cromer, Verlet
- ☐ Exercice 3: aimant dans un champ magnétique
- ☐ Expériences et simulations de démonstration

Documentation

- Lecture pour la Semaine #3: Notes de cours
 - Chapitre 2, section 2.4.4, **Section 2.7**

<http://moodle.epfl.ch/mod/resource/view.php?id=8220>

Rappel semaine 2

■ 2.4 Oscillations - Analyses de stabilité numérique

Propagation de
l'erreur e_n

Matrice de gain G

Valeurs propres λ_i

Stable si

$$|\lambda_i| \leq 1$$

Section 2.4.2 – Von Neumann

Oscillation,
(dé)croissance?

$$y_{num} = Ae^{i\omega t}$$

$$\omega = \omega_r + i\gamma$$

oscillant

exponentiel

$$\gamma \geq 0$$

Section 2.4.3

Propriétés de
conservation

$$E_{mec} = const$$

$$E_{mec,n+1} = E_{mec,n} + ??$$

$$\frac{\Delta E_{mec}^{(num)}}{\Delta t} \leq 0$$

Section 2.4.4

2.4.3 Stabilité. Oscillations, (dé)croissance exponentielle. Sol. Analytique des Eqs. Discrètes.

$$y_n = \Re\{Ae^{i\omega t_n}\} = \Re\{Ae^{i\sqrt{k/m}t_n} e^{\left(\frac{k}{m}\frac{\Delta t}{2}\right)t_n}\}$$

$$y_n = e^{\left(\frac{k}{m}\frac{\Delta t}{2}\right)t_n} |A| \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t_n + \varphi\right)$$

Amplitude augmentant exponentiellement dans le temps

Taux de croissance proportionnel à Δt

Oscillation sinusoidale

En posant $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ = fréquence propre

$$e^{(\omega_0 \Delta t)^2 (\frac{t_n}{\Delta t})/2} = e^{\omega_0 \Delta t^2 n/2}$$

Paramètre crucial

2.4.4 Euler expl. osc. harmo. Conservation E_{mec} 1

Analytiquement: $E_{mec} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = const$

Numériquement:
$$E_{mec,n+1} = \frac{1}{2}mv_{n+1}^2 + \frac{1}{2}kx_{n+1}^2$$

$$= \frac{1}{2}m\left(v_n - \frac{k}{m}x_n\Delta t\right)^2 + \frac{1}{2}k(x_n + v_n\Delta t)^2$$

$$= \frac{1}{2}mv_n^2 + \frac{1}{2}kx_n^2 - v_n kx_n\Delta t + kx_n v_n\Delta t + \frac{1}{2}\frac{k^2}{m}x_n^2\Delta t^2 + \frac{1}{2}kv_n^2\Delta t^2$$

$$E_{mec,n+1} = E_{mec,n} + \left(\frac{k}{m}E_{mec,n}\Delta t\right)\Delta t \quad (*)$$

$$E_{mec,n+1} > E_{mec,n} \quad \forall \Delta t$$

**L'énergie mécanique
augmente à chaque
pas de temps**

2.4.4 Euler expl. osc. harmo. Conservation E_{mec} 2

$$\frac{\Delta E_{mec,n}}{\Delta t} = \left(\frac{k}{m} \Delta t \right) E_{mec,n}$$

$$E_{mec,n} = E_{mec,0} e^{\left(\frac{k}{m} \Delta t \right) t_n}$$

$$\gamma_{Emec} = \frac{k}{m} \Delta t$$

**L'énergie mécanique
augmente
exponentiellement au
cours du temps**

**Le taux de croissance
est proportionnel à Δt**

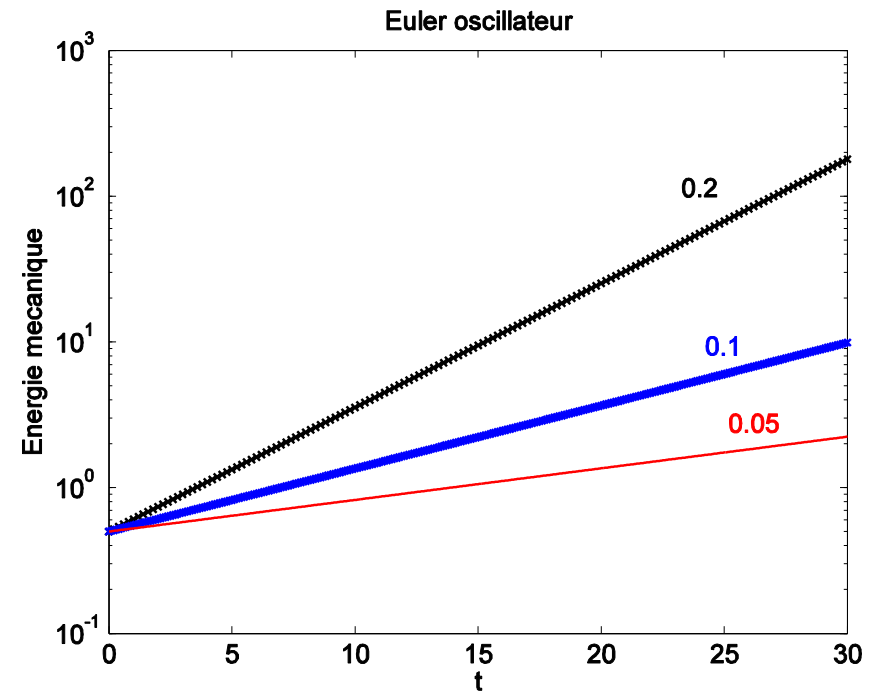


FIG. 2.10 (bas)

On trouvait un taux de croissance du mode propre

$$\gamma = \text{Im}(\omega) = -\frac{k}{m} \frac{\Delta t}{2}$$

$$\gamma_{Emec} = -2\gamma$$

???

2.4 Oscillateur harmonique. Conclusions

- Le schéma d' **Euler explicite** est **toujours instable** lorsqu'il est appliqué à l'oscillateur harmonique. La norme de l'erreur augmente à chaque pas de temps
- L'amplitude des oscillations croît exponentiellement, avec un taux de croissance proportionnel à Δt
- L'énergie mécanique n'est pas conservée, mais croît exponentiellement, avec un taux de croissance proportionnel à Δt
- **Paramètre numérique crucial: $\omega_0 \Delta t$**
 - $\omega_0 \Delta t \ll 1$ veut dire plusieurs pas temporels par période
- **Amélioration des schémas numériques nécessaire!**
 - **Euler – Cromer $\sim \Delta t$ (*)**
 - **Stormer-Verlet $\sim (\Delta t)^2$**
 - **Runge-Kutta ordre 4 $\sim (\Delta t)^4$**
- (*) changement apparemment minime, mais... (**demo**)

2.7.1 Euler-Cromer: déjà un grand progrès!

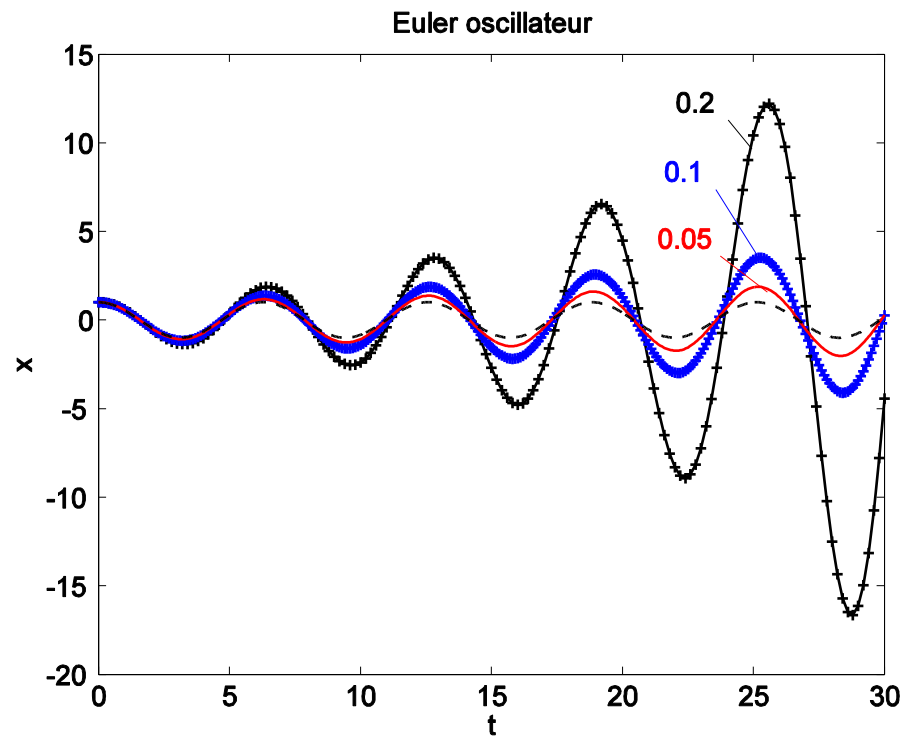


FIG. 2.8

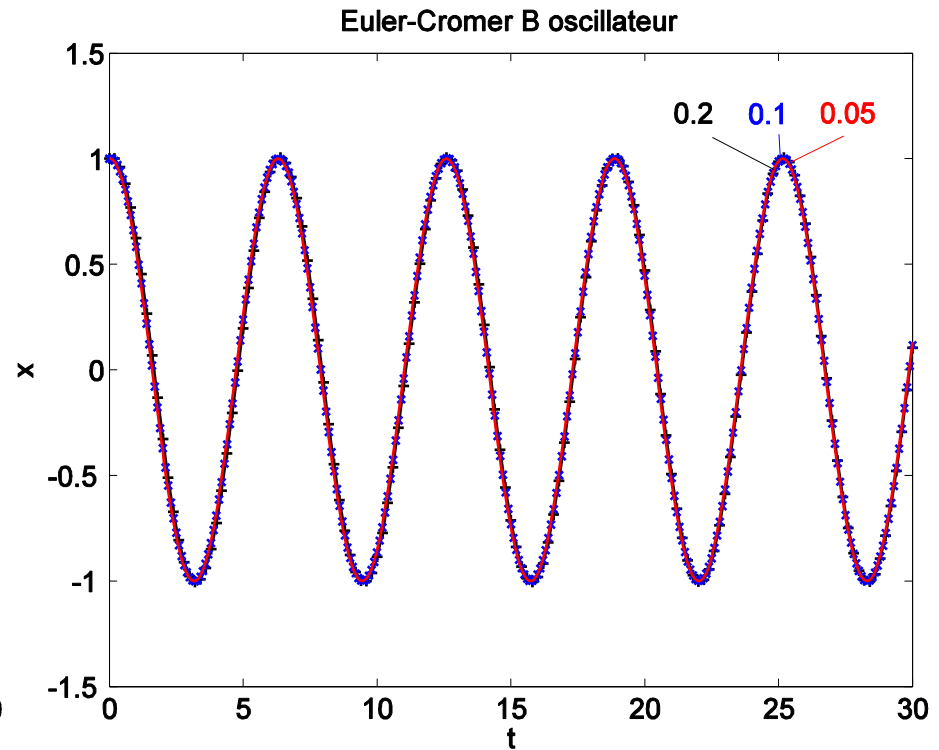


FIG. 2.9

- Les schémas d'Euler-Cromer et de Verlet seront présentés au tableau et seront illustrés par des simulations numériques.

2.7.1 Euler-Cromer («symplectique»)

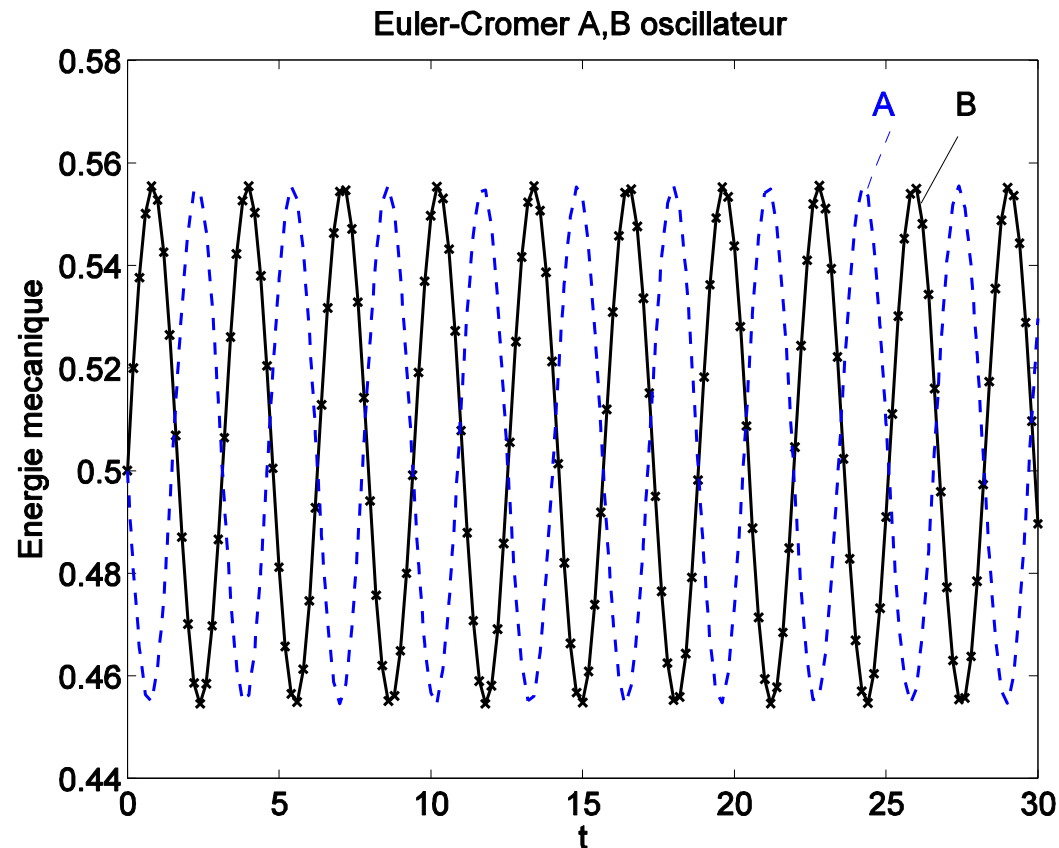
- Pour la force de portance de Magnus, comme pour la force de Lorentz due au champ magnétique, l'accélération en x dépend de v_z , et l'accélération en z dépend de v_x .
- Le schéma d'Euler-Cromer, s'écrit, pour la particule dans un champ magnétique selon z:

$$v_{x,n+1} = v_{x,n} + \Omega v_{y,n}$$

$$v_{y,n+1} = v_{y,n} - \Omega v_{x,n+1} \quad (\text{Euler explicite: } v_{x,n})$$

- Vous pouvez essayer ce schéma pour le problème de Magnus ou pour une particule dans un champ magnétique

2.7.1 Euler-Cromer: pied gauche ou pied droite d'abord?



- En combinant Euler-Cromer « A » et « B » pour deux demi-pas de temps, on aboutit au schéma de Verlet. La dérivation sera présentée au tableau.

2.7.2 Verlet

$$x_{j+1} = x_j + v_j \Delta t + \frac{F}{m}(x_j, t_j) \frac{\Delta t^2}{2}$$

$$v_{j+1} = v_j + \left(\frac{F}{m}(x_j, t_j) + \frac{F}{m}(x_{j+1}, t_{j+1}) \right) \frac{\Delta t}{2}$$

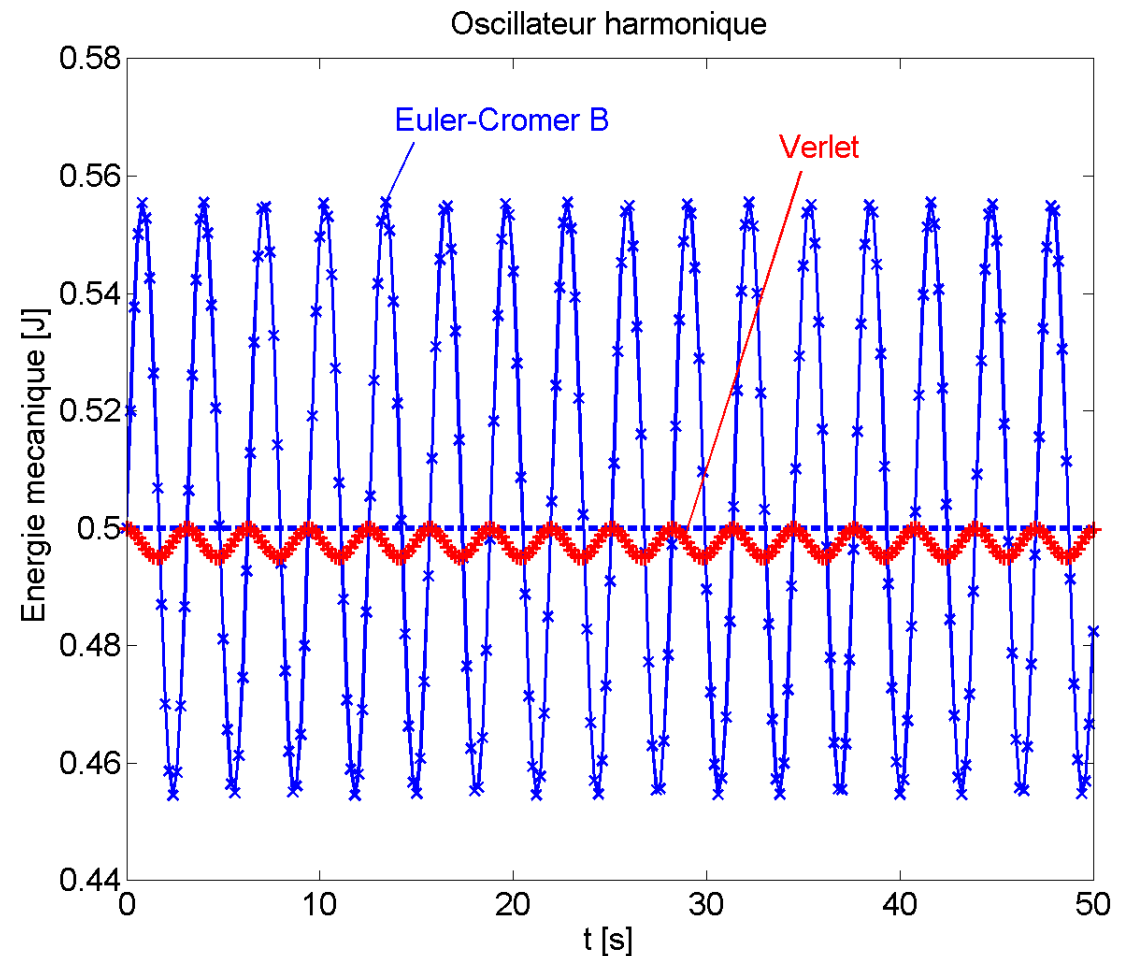
- Généralisé ici à une force dépendant explicitement du temps
- L'algorithme est conditionnellement stable pour l'oscillateur harmonique (il y a une limite de stabilité, $\Delta t_{\max}$, cf plus loin)
- Il est d'ordre 2 en Δt : erreur $\sim (\Delta t)^2$
- Une seule évaluation de F par pas temporel
- Peut être utilisé pour de longues simulations sans qu'il y ait accumulation systématique d'erreurs sur la conservation de l'énergie
- S'applique en principe bien aux systèmes conservatifs

2.7.2 Verlet

$$\begin{aligned} q_{j+1} &= q_j + \frac{p_j}{m} \Delta t + \frac{1}{2m} F(q_j, t_j) \Delta t^2 \\ p_{j+1} &= p_j + \frac{\Delta t}{2} (F(q_j, t_j) + F(q_{j+1}, t_{j+1})) \end{aligned} \tag{2.106}$$

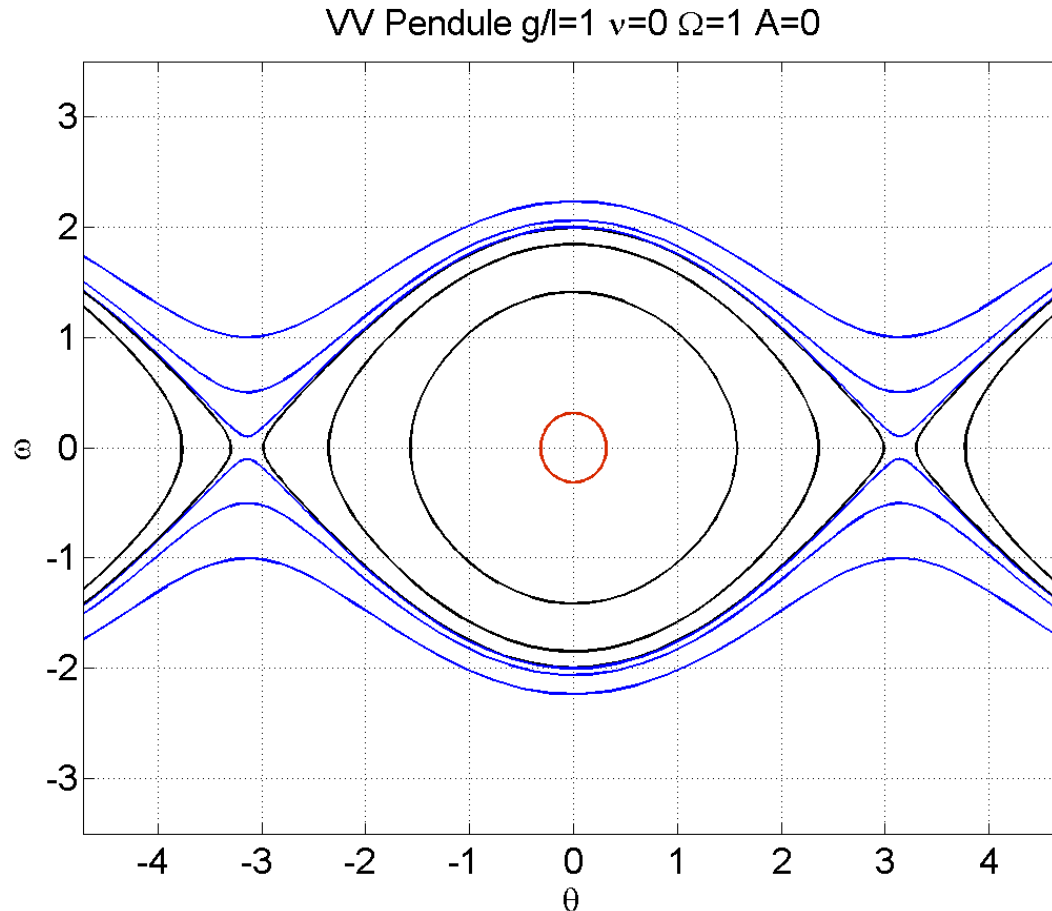
- Généralisé ici à une force dépendant explicitement du temps
- L'algorithme est conditionnellement stable pour l'oscillateur harmonique (il y a une limite de stabilité, Δt max, cf plus loin)
- Il est d'ordre 2 en Δt : erreur $\sim (\Delta t)^2$
- Une seule évaluation de F par pas temporel
- Peut être utilisé pour de longues simulations sans qu'il y ait accumulation systématique d'erreurs sur la conservation de l'énergie
- S'applique en principe bien aux systèmes conservatifs

Verlet – oscillateur harmonique



■ Même $\Delta t=0.2$

Euler-Cromer et Verlet sont symplectiques



Analogie:

Ensemble d'orbites dans
l'espace de phase



Ecoulement fluide

Symplectique

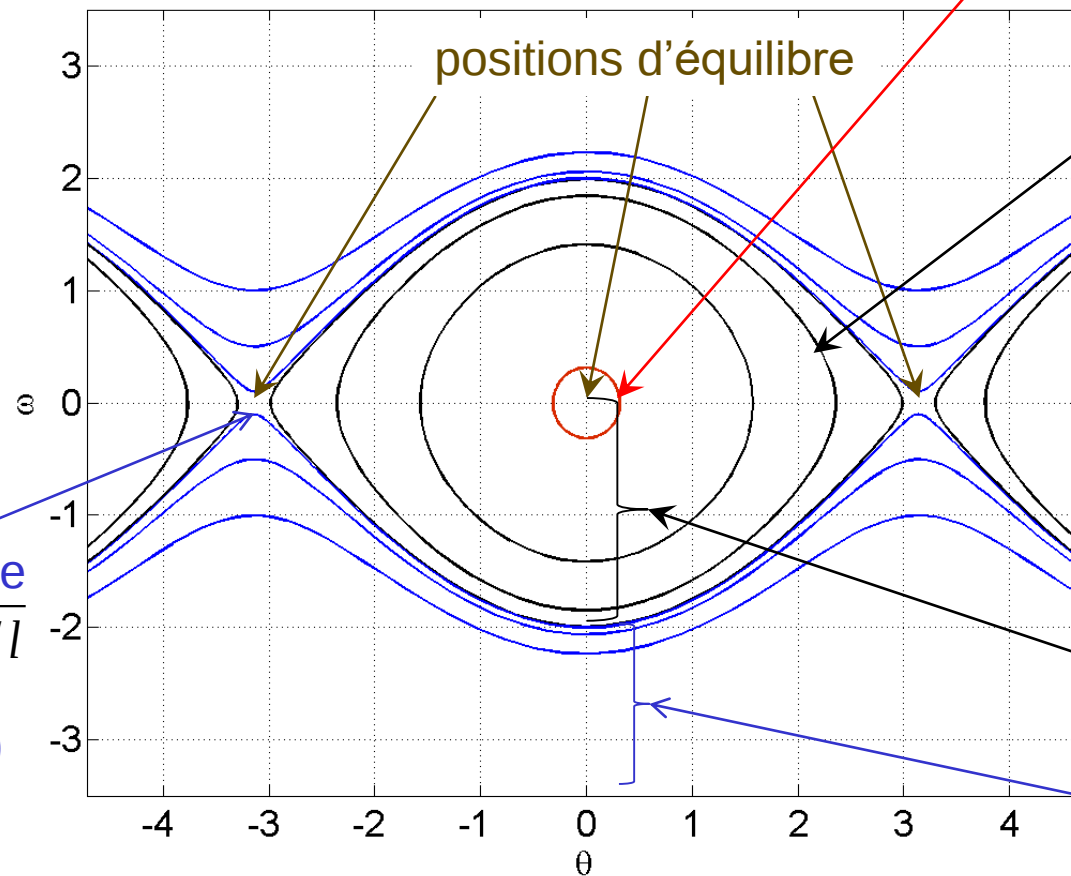


Incompressible

- Conservation du « volume » dans l'espace de phase (x,v)

Orbites dans l'espace de phase

VV Pendule $g/l=1$ $v=0$ $\Omega=1$ $A=0$



Petits mvmts,
fréquence propre $\sqrt{g/l}$
indépendante de
l'amplitude

Grands mvmts,
Période
dépendant de
l'amplitude

Orbites piégées

Orbites
passantes

Petits mvmts,
fréquence propre
imaginaire $i\sqrt{g/l}$
→ instable
(physiquement!)

Formulations alternatives de Verlet - 1

■ Verlet «leapfrog» (saute-mouton)

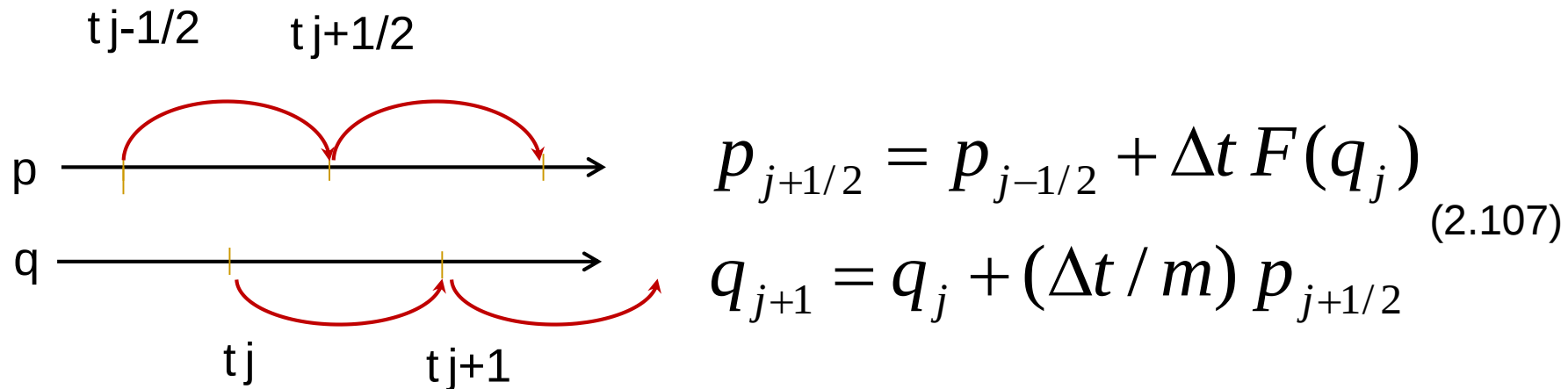


Schéma à niveaux décalés («staggered»)

Nécessite un premier «demi-pas» pour être initialisé

Désavantage: on ne connaît pas p et q aux mêmes instants

Formulations alternatives de Verlet - 2

■ Stormer - Verlet

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F(q) \\ p/m \end{pmatrix} \Leftrightarrow \frac{d^2 q}{dt^2} = F(q)/m \quad (2.108)$$

$$\frac{d^2 q}{dt^2}(t_j) = \frac{1}{\Delta t^2} (q_{j+1} - 2q_j + q_{j-1}) + O(\Delta t^2)$$

$$q_{j+1} = 2q_j - q_{j-1} + (\Delta t^2 / m) F(q_j) \quad (2.110)$$

Schéma à 3 niveaux

Nécessite un premier pas «en arrière» (q_{-1}) pour être initialisé

Cet algorithme date de 1907 (Stormer)

2.7.3 Stabilité du schéma de Verlet

- On montre (preuve au tableau) que le schéma de Verlet est stable pour le problème de l'oscillateur harmonique, à la condition que:

$$\omega_0 \Delta t \leq 2$$

où ω_0 est la fréquence propre (physique!) du système:

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}$$

N.B.: Il en est de même pour Euler-Cromer.

2.7.4 Extension du schéma Verlet à des forces dépendant de la vitesse et du temps

Soit le cas

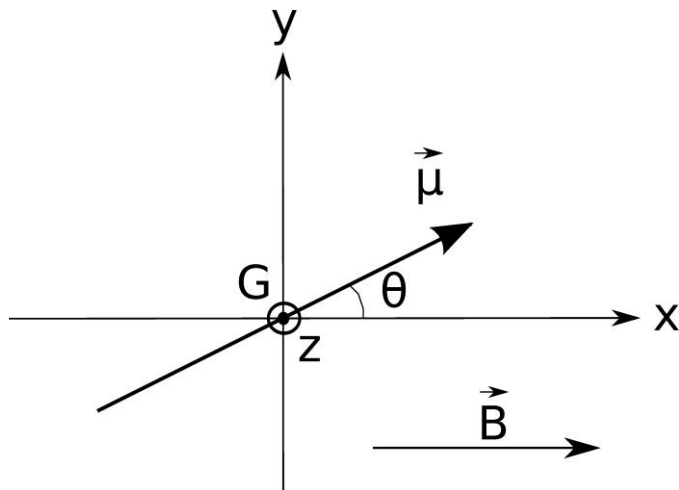
$$\frac{1}{m} F(x, v, t) = a(x, v, t) = a_1(x, t) + a_2(v, t)$$

$$\boxed{x_{j+1}} = x_j + v_j \Delta t + \frac{1}{2} a(x_j, v_j, t_j) (\Delta t)^2 \quad (2.125)$$

$$\boxed{v_{j+1/2}} = v_j + \frac{1}{2} a(x_j, v_j, t_j) \Delta t \quad (2.126)$$

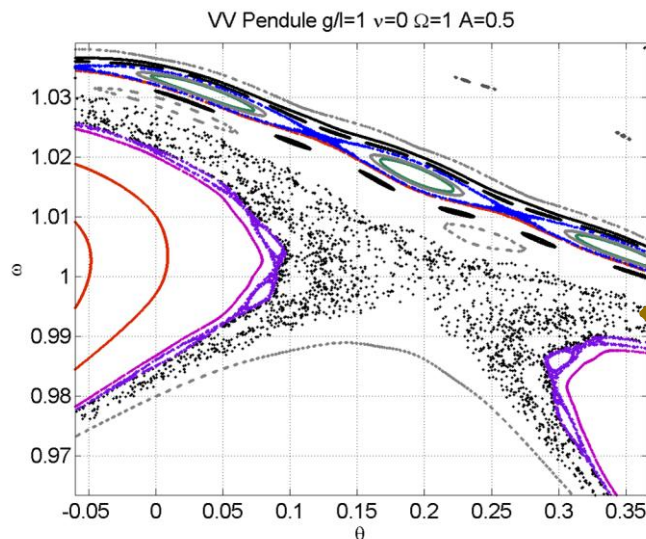
$$v_{j+1} = v_j + \frac{1}{2} (a_1(x_j, t_j) + a_1(\boxed{x_{j+1}}, t_{j+1})) \Delta t + a_2(\boxed{v_{j+1/2}}, t_{j+1/2}) \Delta t \quad (2.127)$$

Exercice 2: aimant dans un champ magnétique



$$\vec{B}(t) = (B_0 + B_1 \sin(\Omega t))\vec{e}_x$$

- Avec champ B_0 statique. Petits mouvements. Mode propre et fréquence propre.
- Avec champ B_1 oscillatoire. Résonance paramétrique. Doublement de période.
- Mouvement chaotique. Instabilité des orbites. Non-convergence numérique.
- Sections de Poincaré.
- Avec amortissement. Chaos et attracteurs étranges.



Pendule avec oscillation verticale