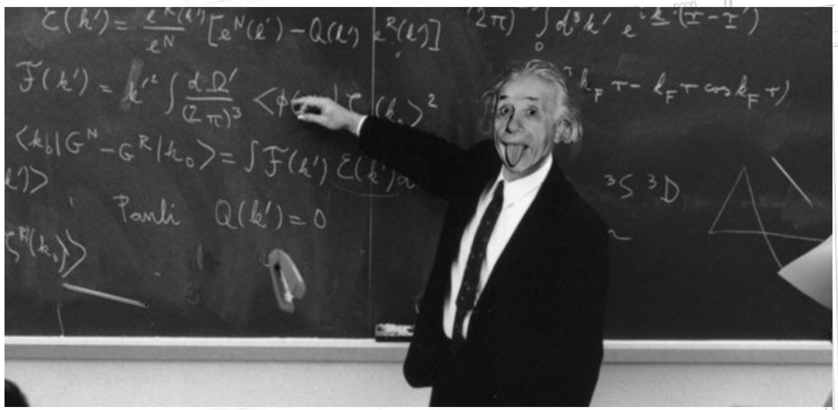
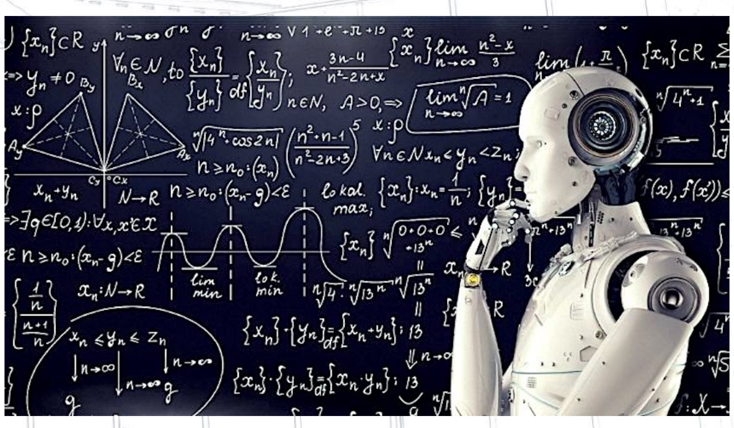
L'intelligence artificielle : un nouvel outil pour la physique ?

Hubert Baty - Observatoire astronomique de Strasbourg

hubert.baty@unistra.fr



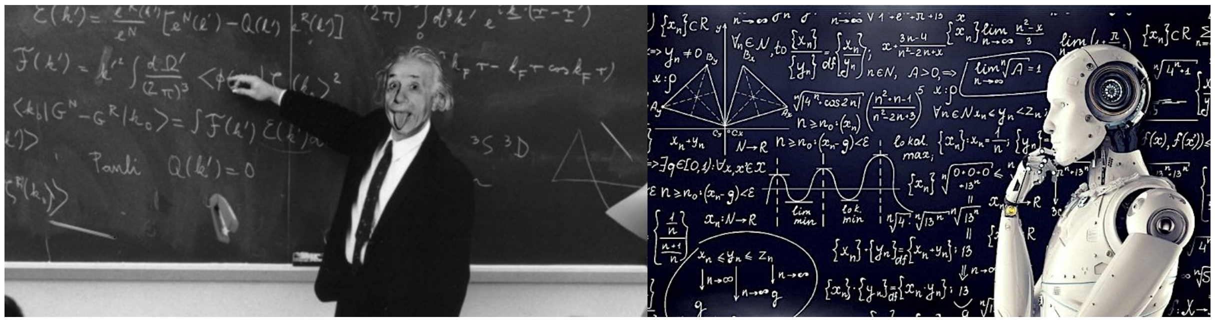


Plan général des cours

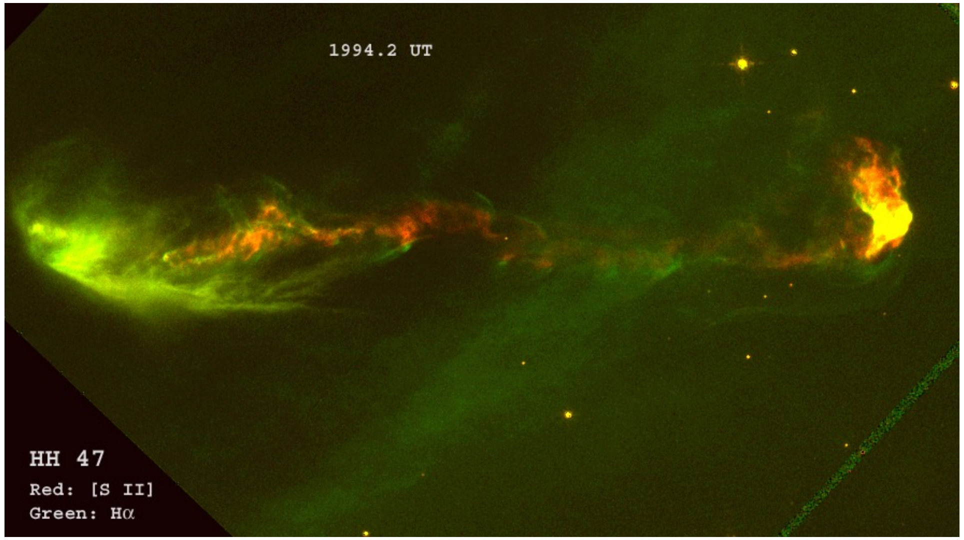
I. Introduction aux méthodes numériques classiques pour résoudre les lois de la physique

II. C’est quoi l’intelligence artificielle (IA) ? Exemples

III. Utilisation de l’IA (réseaux de neurones) pour résoudre les lois de la physique

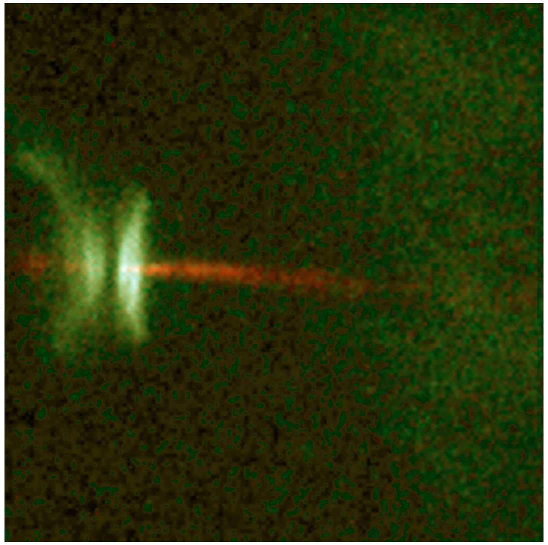


I. Introduction aux méthodes numériques classiques pour résoudre les lois de la physique



Observations par Hubble de jet issu d'une étoile en formation

Hubble ou HST (télescope spatial)



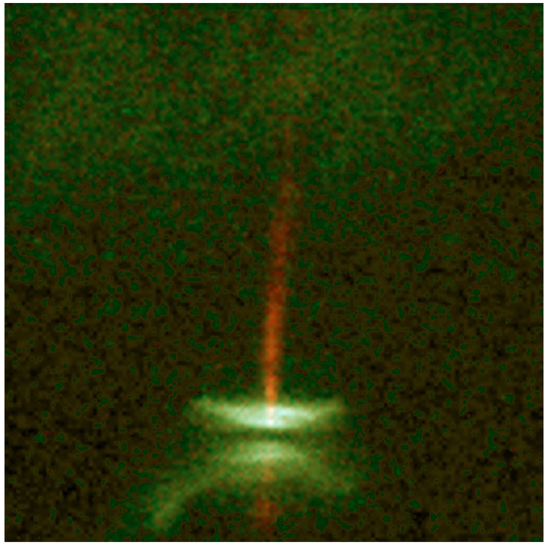
https://www.cs.mcgill.ca/~rwest/wikispeedia/wpcd/images/46/4631.gif.htm

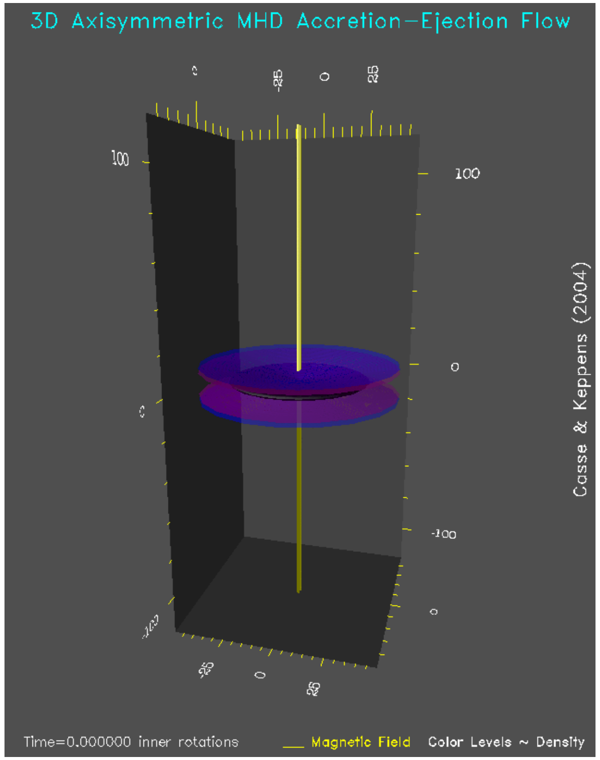
Jets de matière émise depuis un disque de matière autour d'une étoile jeune (Observations HST)

Credit:C. Burrows NASA

I. Introduction aux méthodes numériques classiques pour résoudre les lois de la physique

Observations par <u>Hubble</u> de jets issus d'une étoile en formation





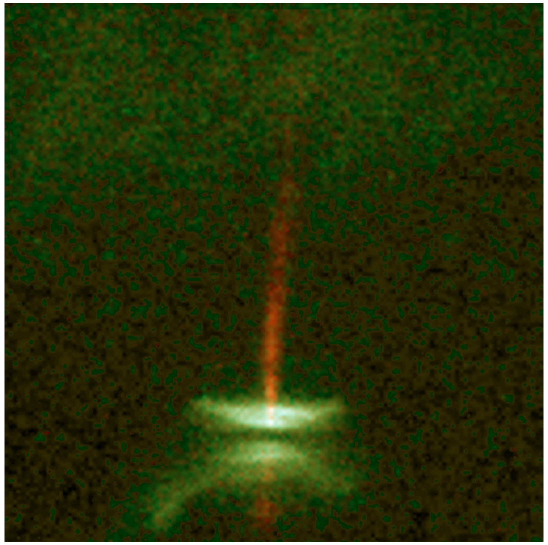
https://apc.u-paris.fr/~fcasse/Simu.html

<u>Simulations numériques</u> de jets astrophysiques

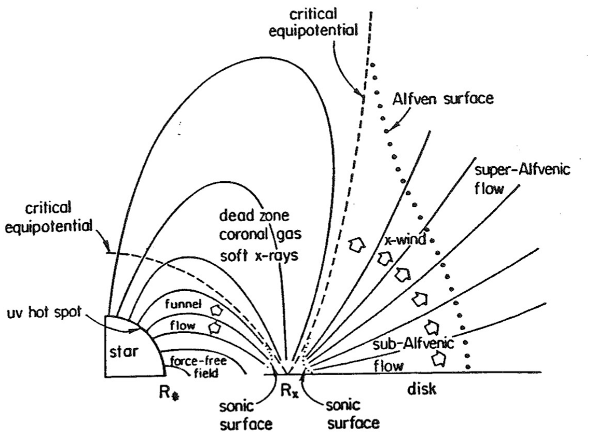
-> exemple de solution numérique (plusieurs semaines de calcul sur 'super-calculateurs')

I. Introduction aux méthodes numériques classiques pour résoudre les lois de la physique

Observations par <u>Hubble</u> de jets issus d'une étoile en formation



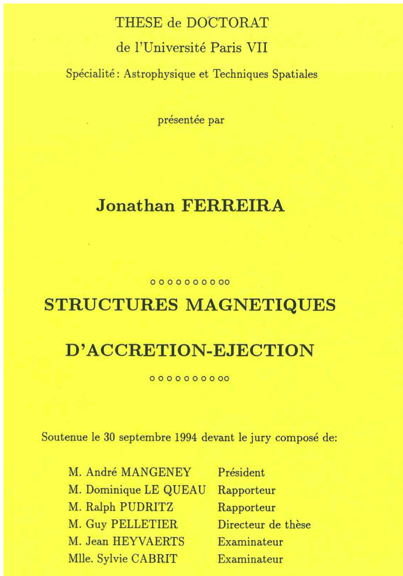
Il faut résoudre des équations représentant des lois



$$\nabla.\mathrm{T} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \mathrm{T}_{r\phi}\right)\mathbf{e}_\phi = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\eta_v r^3 \frac{\partial \Omega}{\partial r}\mathbf{e}_\phi$$

ındis que le terme de chauffage visqueux s'écrit

$$(\mathbf{T}.\nabla)\mathbf{u} = \eta_v \left(r\frac{\partial \Omega}{\partial r}\right)^2$$



THESE de DOCTORAT
de l'Université Paris VII
Spécialité: Astrophysique et Techniques Spatiales

présentée par

Jonathan FERREIRA

STRUCTURES MAGNETIQUES
D'ACCRETION-EJECTION

Soutenue le 30 septembre 1994 devant le jury composé de:

M. André MANGENEY	Président
M. Dominique LE QUEAU	Rapporteur
M. Ralph PUDRITZ	Rapporteur
M. Guy PELLETIER	Directeur de thèse
M. Jean HEYVAERTS	Examinateur
Mlle. Sylvie CABRIT	Examinateur

Avant l'ère du numérique

Calculs analytiques de solutions de jets astrophysiques

- des années de calcul avec un crayon et du papier !

I. Introduction aux méthodes numériques classiques pour résoudre les lois de la physique

1. Exemples de lois fondamentales (ou pas) en physique

2. Notions de solution analytique et numérique

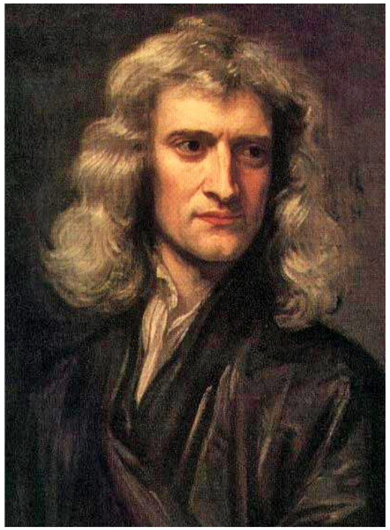
3. Un exemple de schéma numérique simple et ses limitations

4. Illustrations de simulations numériques en astrophysique

1. Exemples de lois fondamentales …

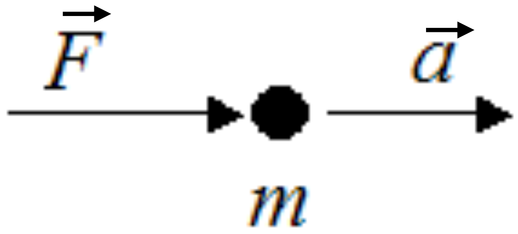
<u>Le principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

- Aussi appelée <u>seconde loi de Newton</u> (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)



Isaac Newton (1687)

$$\boxed{\vec{F} = m\,\vec{a}}$$



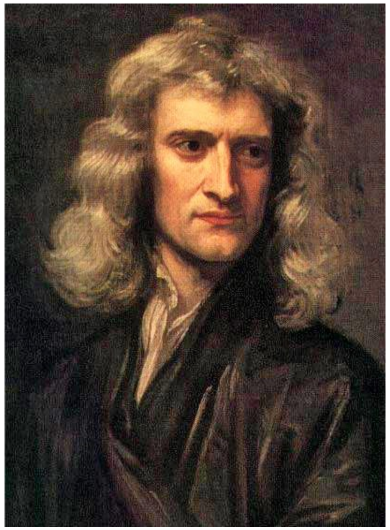
$\vec{F}$ est la force, $\vec{a}$ est l’accélération, et m la masse

Comment est utilisée cette loi ?

1. Exemples de lois fondamentales …

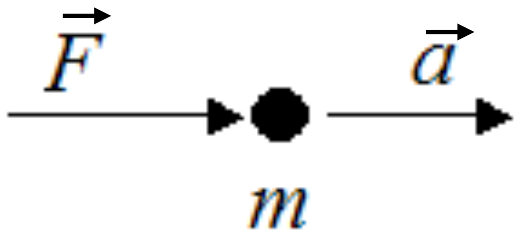
<u>Le principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

- Aussi appelée <u>seconde loi de Newton</u> (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)



Isaac Newton (1687)

$$\boxed{\vec{F} = m\,\vec{a}}$$



$\vec{F}$ est la force, $\vec{a}$ est l'accélération, et m la masse

- Il peut y avoir plusieurs forces (il faut alors prendre la somme)

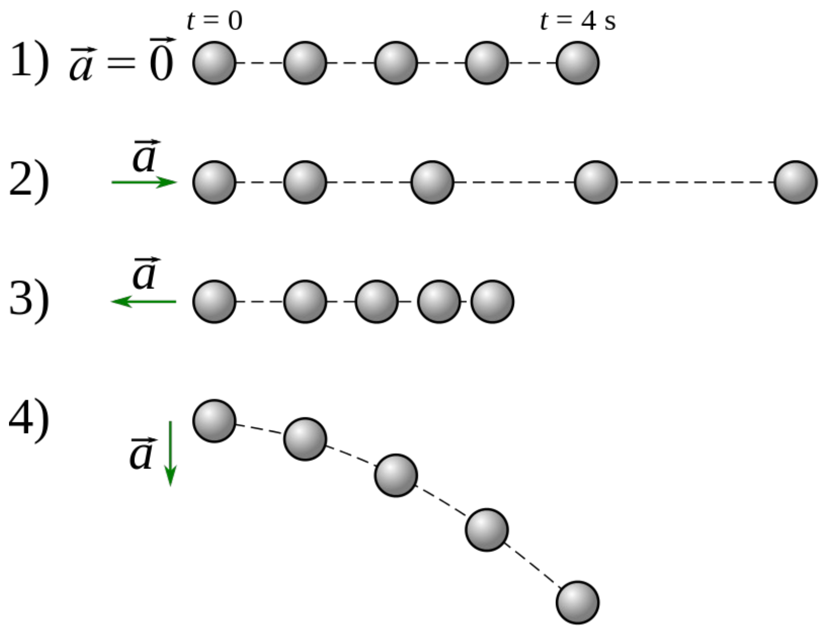
-> **1.** <u>La loi permet de déduire l'accélération, puis la vitesse et enfin la trajectoire, à partir de la force si elle est connue (avec m)</u>

- <u>Unités</u>: trajectoire -> distance (m)
  -> vitesse (m/s), accélération (m/s/s)

1. Exemples de lois fondamentales …

<u>Le principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

- Liens entre **accélération $\vec{a}$**, **vitesse $\vec{v}$** et **trajectoire $\vec{r}$**



Source Wikipédia

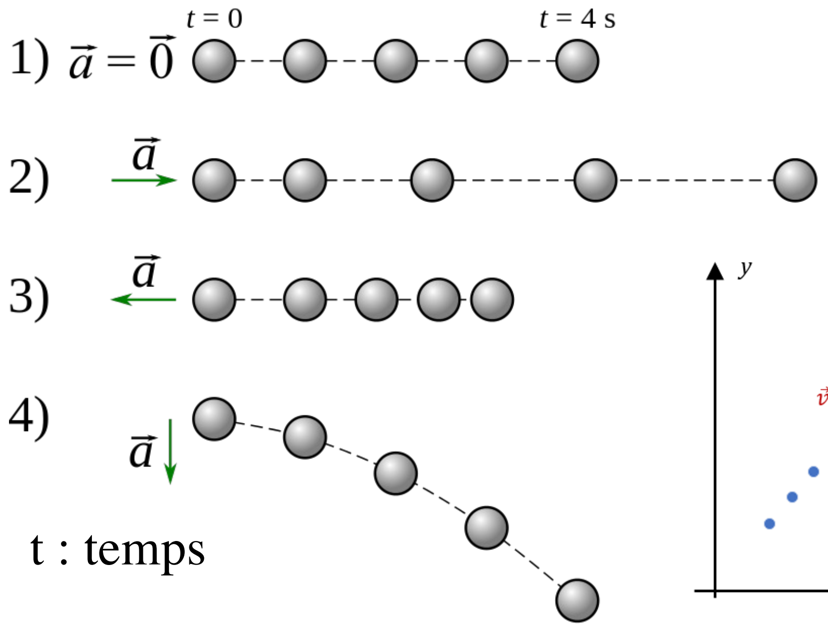
Accélération -> variation de la vitesse

-> en norme (2 et 3)
-> en direction (4)

1. Exemples de lois fondamentales …

<u>Le principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

- Liens entre **accélération $\vec{a}$**, **vitesse $\vec{v}$** et **trajectoire $\vec{r}$**

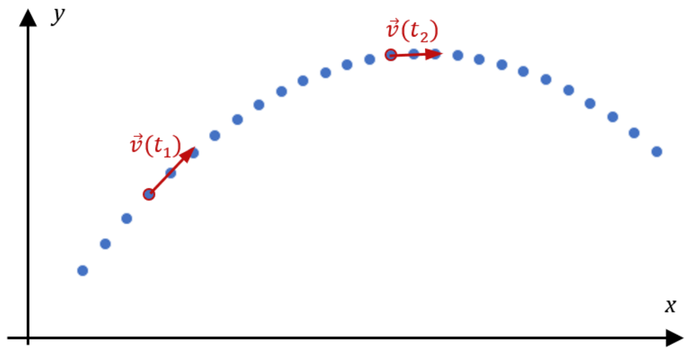


t : temps

Source Wikipédia

Accélération -> variation de la vitesse

-> en norme (2 et 3)
-> en direction (4)



dérivée

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

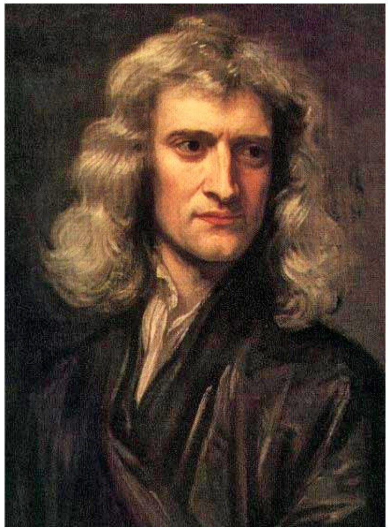
$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}.$$

Intégrations a => v => r

1. Exemples de lois fondamentales …

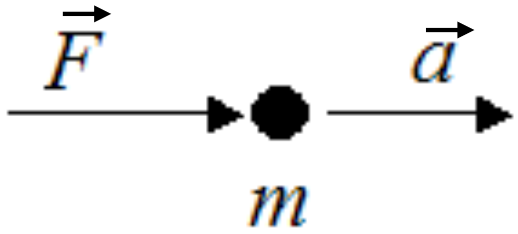
<u>Le principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

- Aussi appelée <u>seconde loi de Newton</u> (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)



Isaac Newton (1687)

$$\boxed{\vec{F} = m\,\vec{a}}$$



$\vec{F}$ est la force, $\vec{a}$ est l'accélération, et m la masse

- Il peut y avoir plusieurs forces (il faut alors prendre la somme)

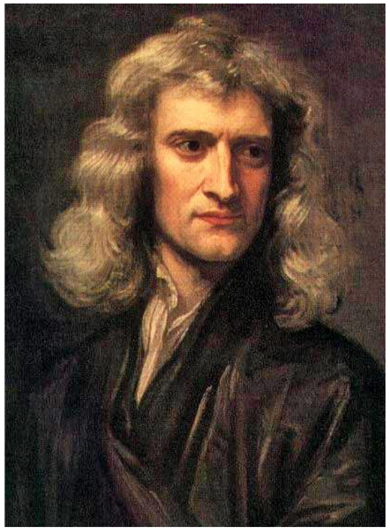
-> **2.** <u>La loi permet aussi de déduire la force (inconnue) à partir de l'accélération si on connaît la masse</u>

<u>-> **3.** La loi permet aussi de déduire la masse à partir de l'accélération si on connaît la force</u>

1. Exemples de lois fondamentales …

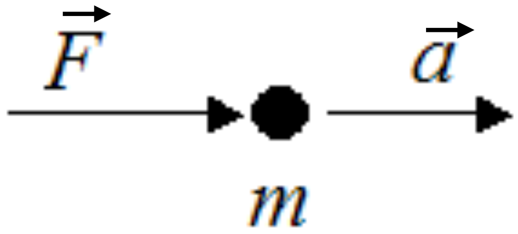
<u>Le principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

- Aussi appelée <u>seconde loi de Newton</u> (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)



Isaac Newton
(1687)

$$\boxed{\vec{F} = m\,\vec{a}}$$



$\vec{F}$ est la force, $\vec{a}$ est l'accélération, et m la masse

- <u>Remarque</u> : cette loi avait été obtenue par Galilée (plusieurs années plus tôt) dans le cas particulier où la <u>force est nulle</u>

=> Trajectoire = repos, ou alors ligne droite à vitesse constante !

1. Exemples de lois fondamentales …

Le principe fondamental de la dynamique **(PFD)**

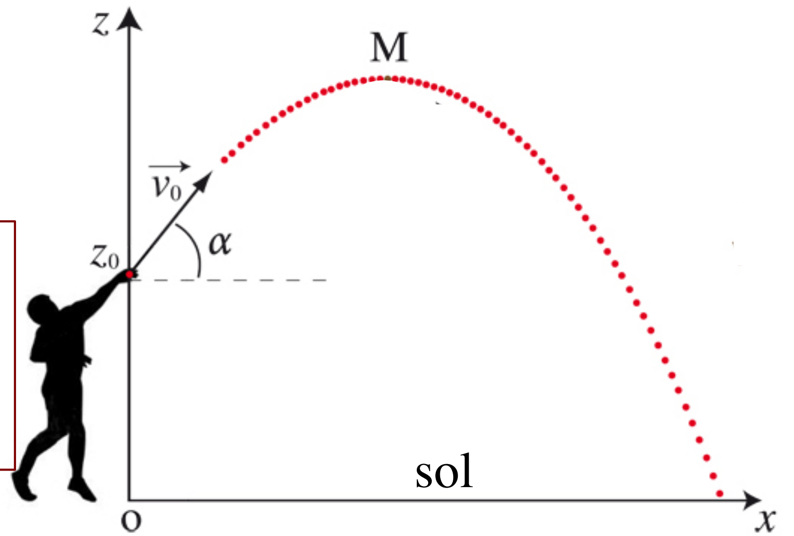
- Aussi appelée seconde loi de Newton (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)

-> Appliquée à un projectile : à partir de la force ?
(frottements négligés)

Conditions initiales

- Vitesse initiale V_0 et un angle initial α

- Hauteur initiale z_0



1. Exemples de lois fondamentales …

Le principe fondamental de la dynamique (PFD)

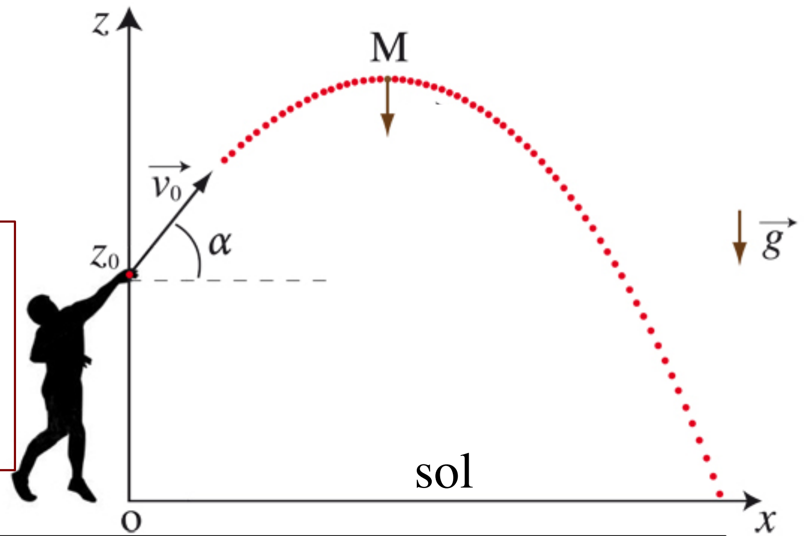
- Aussi appelée seconde loi de Newton (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)

-> Appliquée à un projectile : la force est le poids !
(frottements négligés)

$$\boxed{\vec{P} = m\,\vec{g}}$$

Conditions initiales

- Vitesse initiale V_0 et un angle initial α
- Hauteur initiale z_0



$\vec{g}$ -> champ de pesanteur terrestre obtenu d'après la loi de la gravitation (voir la suite)

1. Exemples de lois fondamentales …

Le principe fondamental de la dynamique (PFD)

- Aussi appelée seconde loi de Newton (mais ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)

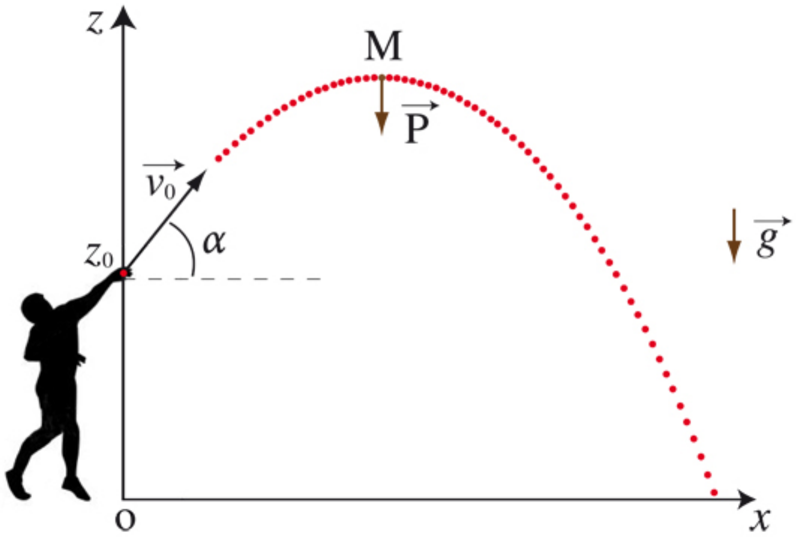
-> Appliquée à un projectile : la force est le poids $\vec{P}$

$$\boxed{\vec{P} = m\,\vec{g}}$$

$$\boxed{\text{donc RFD: } \vec{P} = m\vec{a} \;\Rightarrow\; \vec{a} = \vec{g}}$$

-> La résolution de la RFD donne alors la solution (analytique ou numérique)

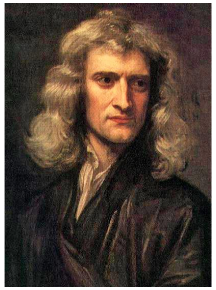
Trajectoire = parabole



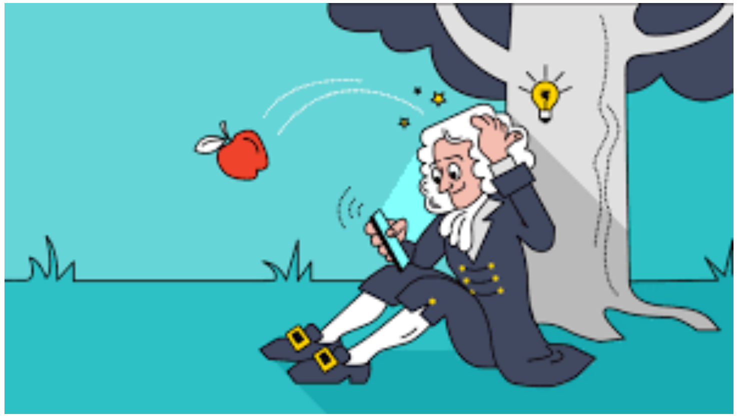
g = 9,8 m/s/s

1. Exemples de lois fondamentales …

La loi (fondamentale) de la gravitation universelle



Isaac Newton
(1687)



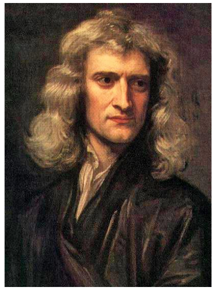
Version romancée …

1. Exemples de lois fondamentales …

<u>La loi (fondamentale) de la gravitation universelle</u>

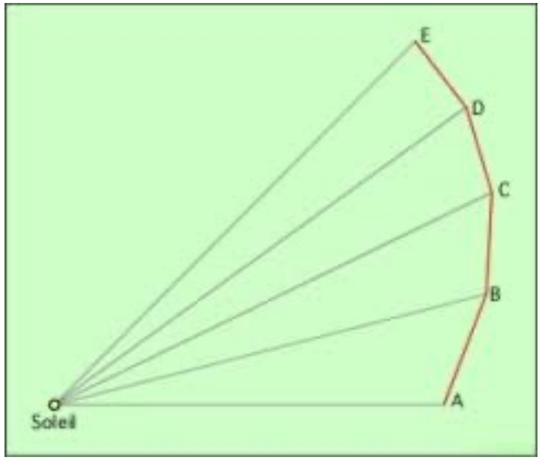
- Force subie par une planète (initialement de Mars) <u>à cause du Soleil</u>

Version romancée …



Isaac Newton
(1687)

Observations de Tycho Brahé ->



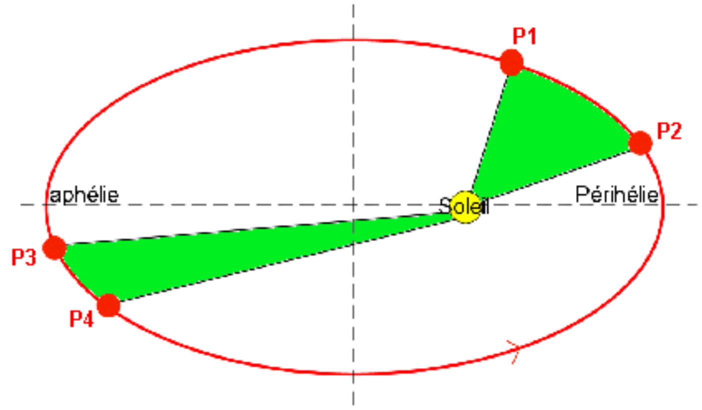
Version réaliste …
Décomposition du mouvement de Mars autour du Soleil

1. Exemples de lois fondamentales …

La loi (fondamentale) de la gravitation universelle

- Force subie par une planète (initialement de Mars) à cause du Soleil

- Cette force se traduit par les lois empiriques (observationnelles) de Kepler
- Ellipses (1ère loi)



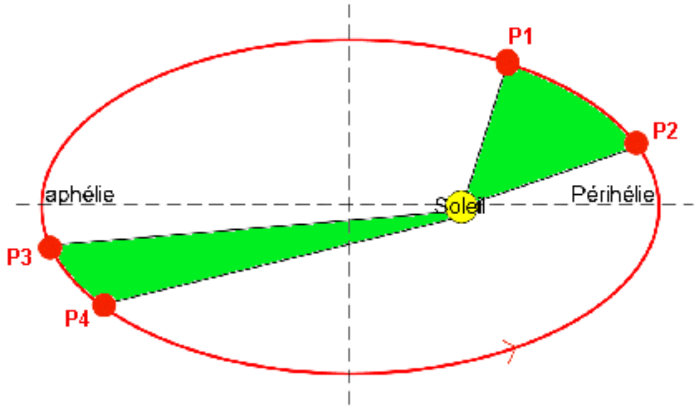
1. Exemples de lois fondamentales …

La loi (fondamentale) de la gravitation universelle

- Force subie par une planète (initialement de Mars) à cause du Soleil

- Cette force se traduit par les lois empiriques (observationnelles) de Kepler
- Ellipses (1ère loi), loi des aires (2nde loi)

Traduit la façon de décrire l'ellipse :
La planète balaye des aires égales en des temps égaux



Loi des aires

1. Exemples de lois fondamentales …

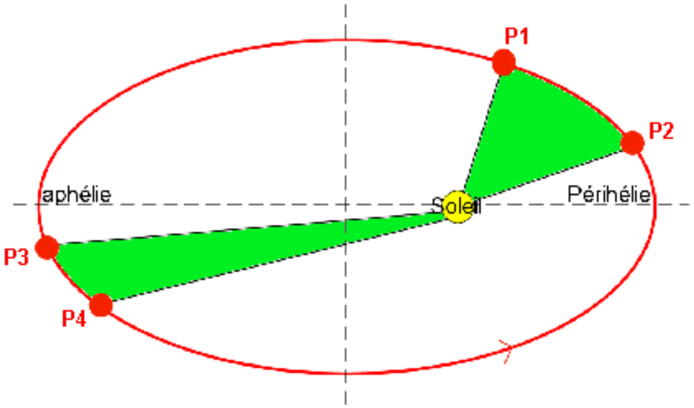
La loi (fondamentale) de la gravitation universelle

- Force subie par une planète (initialement de Mars) à cause du Soleil

- Cette force se traduit par les lois empiriques de Kepler
- Ellipses (1ère loi), loi des aires (2nde loi)

- Newton déduit l'expression de la force de façon à être en accord avec les lois (observationnelles de Kepler) et en utilisant le PFD

  -> Par exemple cette loi est attractive !



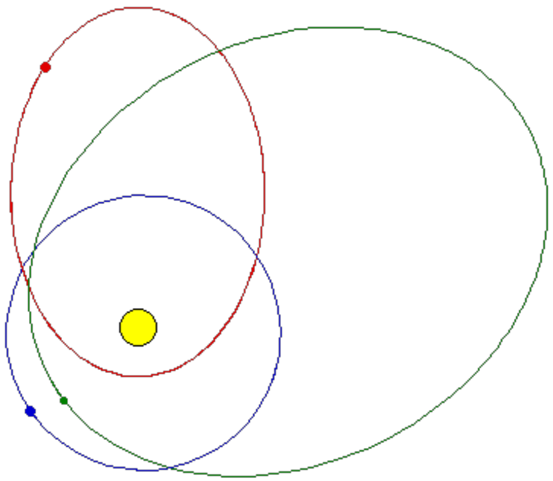
Loi des aires

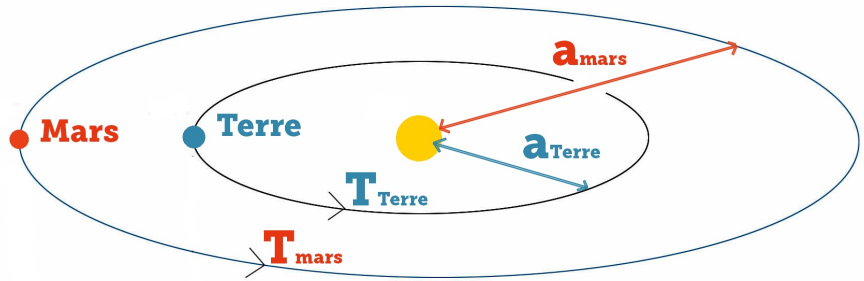
1. Exemples de lois fondamentales …

La loi (fondamentale) de la gravitation universelle

- Force subie par une planète (initialement de Mars) à cause du Soleil

- Cette force se traduit par les lois observationnelles de Kepler
- Ellipses ($1^{ère}$ loi), loi des aires (2^{nde} loi), $3^{ème}$ loi



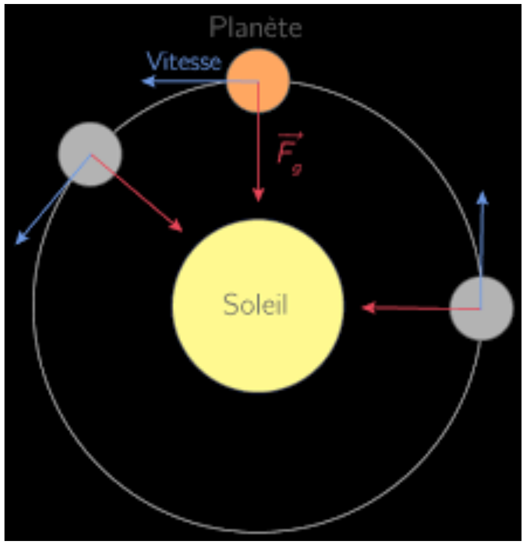


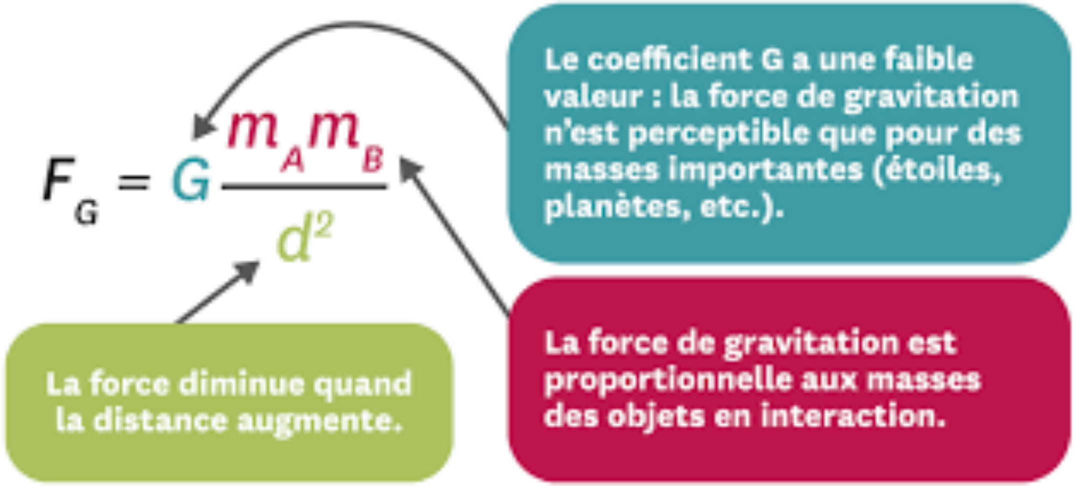
$$\boxed{\frac{a_{Terre}^3}{T_{Terre}^2} = \frac{a_{mars}^3}{T_{mars}^2} = Cste}$$

1. Exemples de lois fondamentales …

La loi (fondamentale) de la gravitation universelle

- Force subie par une planète (initialement de Mars) à cause du Soleil



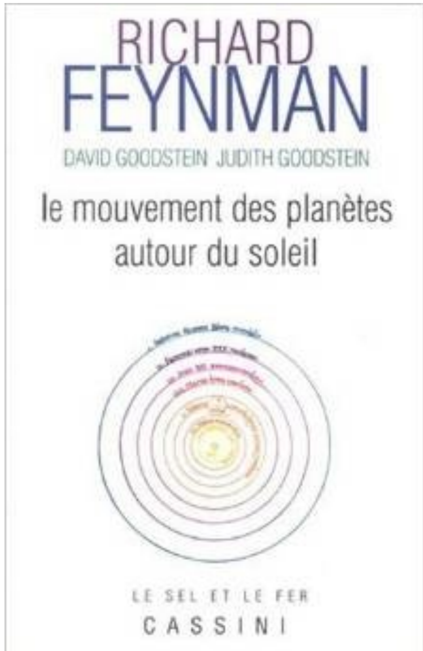


Cette loi est ensuite généralisée à tout corps ayant une masse

1. Exemples de lois fondamentales …

La loi (fondamentale) de la gravitation universelle

- Force subie par une planète (initialement de Mars) à cause du Soleil



à partir d'un cours
perdu puis retrouvé de R. Feynman
(prix Nobel de physique 1965
et fabuleux pédagogue)

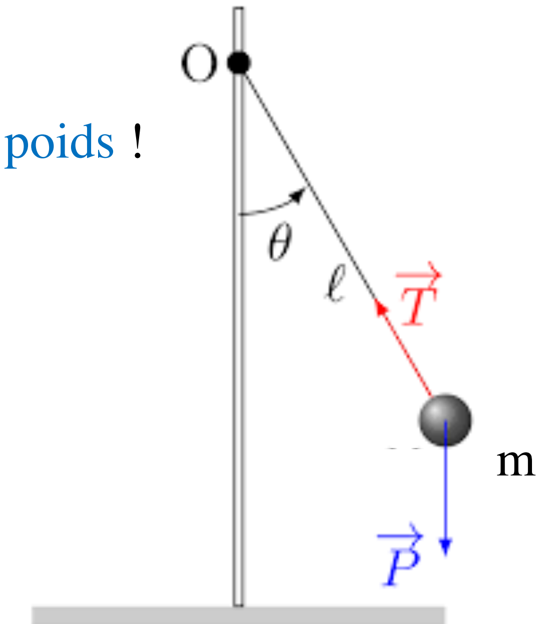
1918-1988

1. Exemples de lois fondamentales …

<u>Le principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

- Aussi appelée <u>seconde loi de Newton</u> (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)

-> <u>Appliquée au pendule</u> : les forces sont la tension du fil et le poids !
(frottements négligés)



Fil inextensible

1. Exemples de lois fondamentales …

Le principe fondamental de la dynamique (PFD)

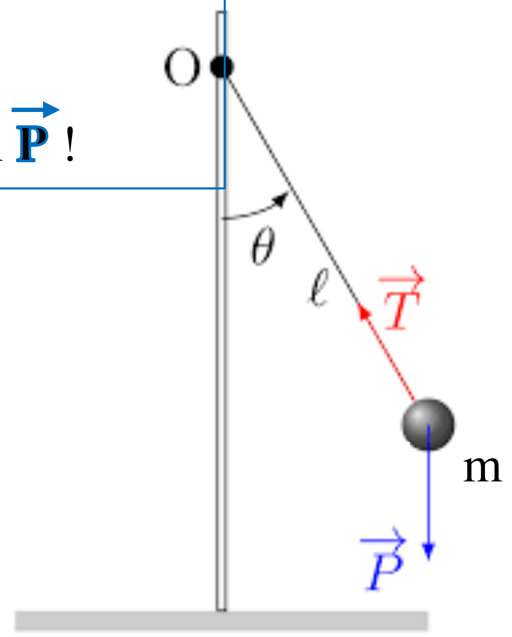
- Aussi appelée seconde loi de Newton (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)

-> Appliquée au pendule : la force est $\vec{\mathbf{T}}$ (tension du fil) mais aussi $\vec{\mathbf{P}}$!

$$\mathbf{m\vec{g} + \vec{T} = m\,\vec{a}}$$

-> La résolution de la RFD donne alors la solution (analytique ou numérique)

Trajectoire = ?



Fil inextensible

1. Exemples de lois fondamentales …

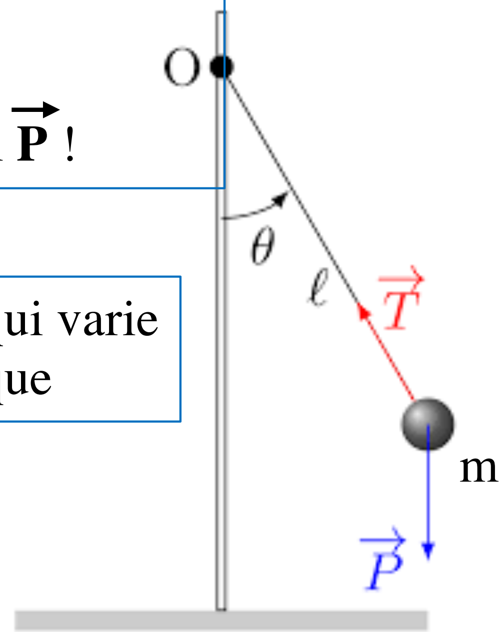
<u>Le principe fondamental de la dynamique</u> (PFD)

- Aussi appelée <u>seconde loi de Newton</u> (à ne pas confondre avec la loi de la Gravitation universelle …)

-> <u>Appliquée au pendule</u> : la force est $\vec{\mathbf{T}}$ (tension du fil) mais aussi $\vec{\mathbf{P}}$!

$$\boxed{m\vec{g} + \vec{T} = m\vec{a}}$$

Amplitude θ (t) qui varie de façon périodique



Fil inextensible

-> La résolution de la RFD donne alors la solution (analytique ou numérique)

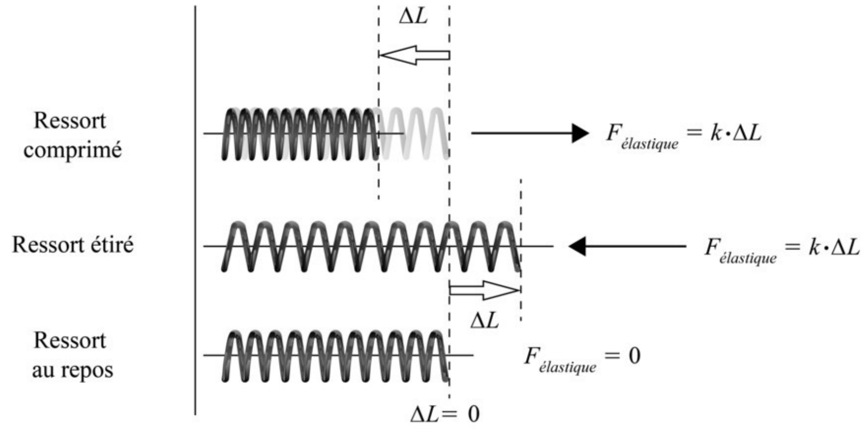
Trajectoire = cercle

1. Exemples de lois fondamentales …

<u>Exemple de loi non fondamentale -> oscillation d'un ressort</u>

- Force de rappel d'un <u>ressort (dit aussi oscillateur)</u>

$\boxed{\text{Force} = \text{k . élongation}}$



k: constante de raideur du ressort

1. Exemples de lois fondamentales …

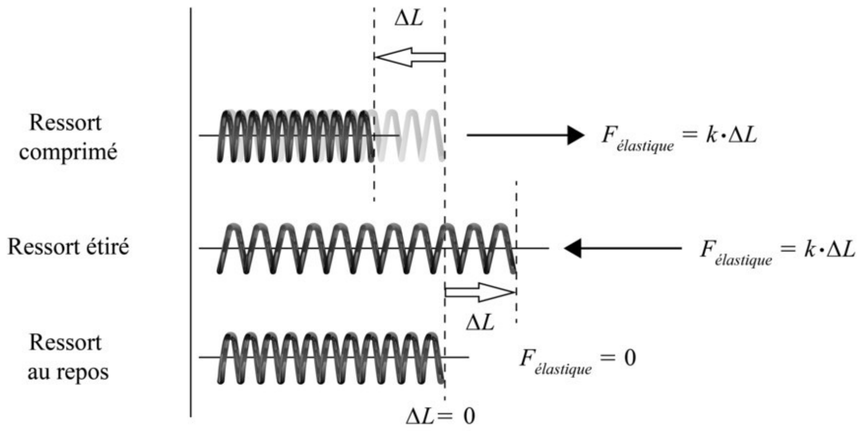
<u>Exemple de loi non fondamentale -> oscillation d'un ressort</u>

- Force de rappel d'un <u>ressort (dit aussi oscillateur)</u>

Force = k . élongation

-> La résolution du PFD donne
alors la solution (analytique ou numérique)

<u>Trajectoire = droite avec une amplitude</u>
<u>qui oscille périodiquement au cours du temps</u>



k: constante de raideur du ressort

Plan du premier cours

1. Exemples de lois fondamentales (ou pas) en physique

2. Notions de solution analytique et numérique

3. Un exemple de schéma numérique simple et ses limitations

4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

2. Notions de solution analytique/numérique

C'est quoi une solution analytique ?

- **Cas du projectile :** **parabole !**

(frottements négligés)

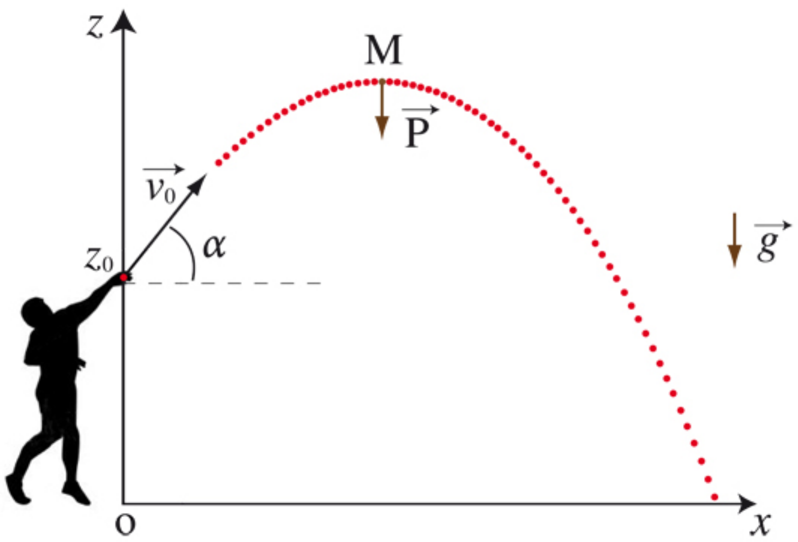
$$\boxed{\rightarrow \quad z(x) = A x^2 + B x + C}$$

Formule analytique simple

A, B, C déterminées par les conditions initiales
Obtenu en résolvant le PFD avec la **force = poids**

$$A = -\tfrac{1}{2} g/(v_0 \cos\alpha)^2$$
$$B = \tan\alpha$$
$$C = z_0$$

Rappel : droite -> $z = A x + B$



2. Notions de solution analytique/numérique

<u>C'est quoi une solution analytique</u> ?

- **Cas du <u>projectile</u> : parabole !**

(frottements négligés)

-> $z(x) = A x^2 + B x + C$

A, B, C déterminées par les conditions initiales

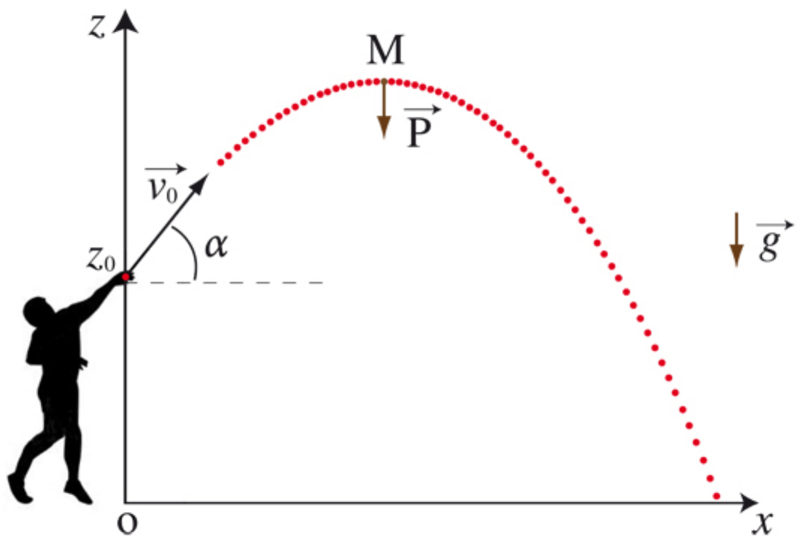
Obtenu en résolvant le PFD avec la **force = poids**

$z(t) = -1/2\, g\, t^2 + V_0 (\sin \alpha)\, t + z_0$
$x(t) = V_0 (\cos \alpha)\, t$

t : temps

<u>Rappel</u> : droite -> $z = A x + B$

Formule analytique simple



2. Notions de solution analytique/numérique

C'est quoi une solution analytique ?

- **Cas du projectile : parabole !**

(frottements négligés)

$$-> \quad z(x) = A x^2 + B x + C$$

A, B, C déterminées par les conditions initiales

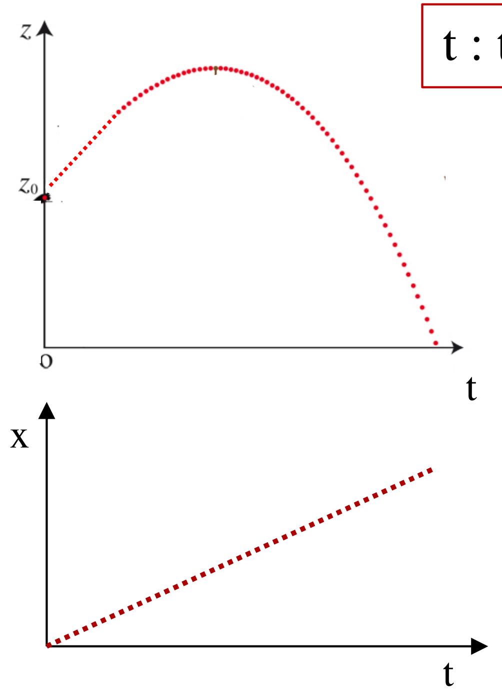
Obtenu en résolvant le PFD avec la **force = poids**

$$z(t) = -1/2\, g\, t^2 + V_0 (\sin \alpha)\, t + z_0$$
$$x(t) = V_0 (\cos \alpha)\, t$$

Rappel : droite -> $z = A x + B$

Formule analytique simple

t : temps

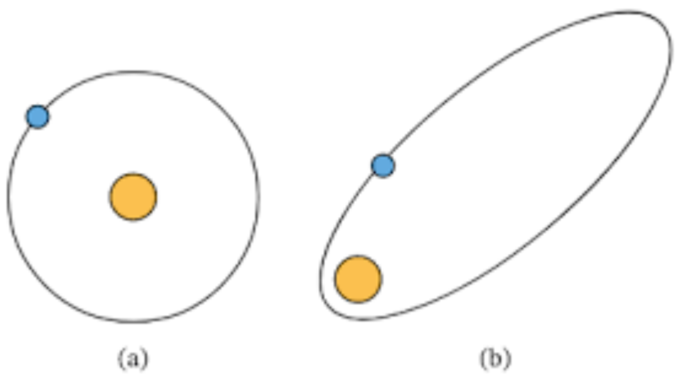


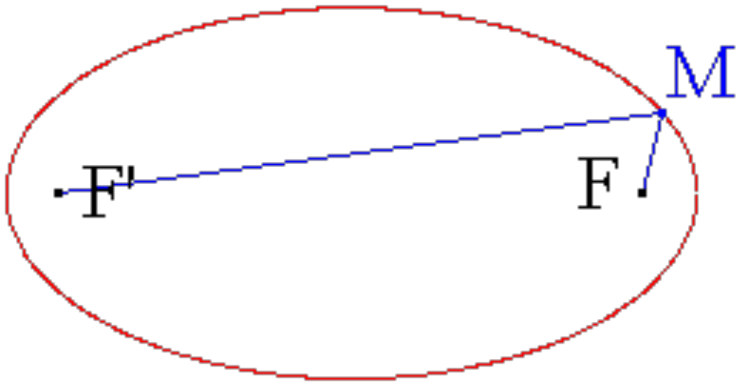
2. Notions de solution analytique/numérique

<u>C'est quoi une solution analytique</u> ?

- **Cas du mouvement des <u>planètes</u> : cercle, ellipse, hyperbole**

-> Formules analytiques existent …



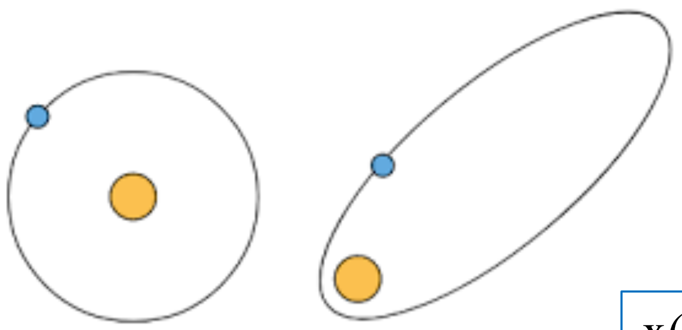


2. Notions de solution analytique/numérique

<u>C'est quoi une solution analytique</u> ?

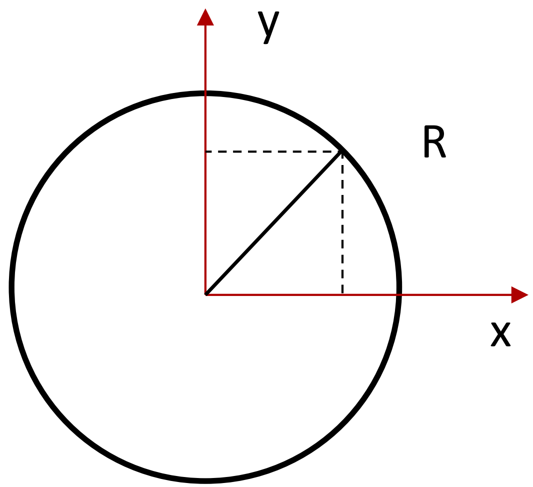
- **Cas du mouvement des <u>planètes</u> : cercle, ellipse, hyperbole**

-> Formules analytiques existent …



(a) (b)

x(t) et y(t) varient périodiquement avec t (cosinus et sinus)



$\boxed{x^2 + y^2 = R^2}$

Pythagore

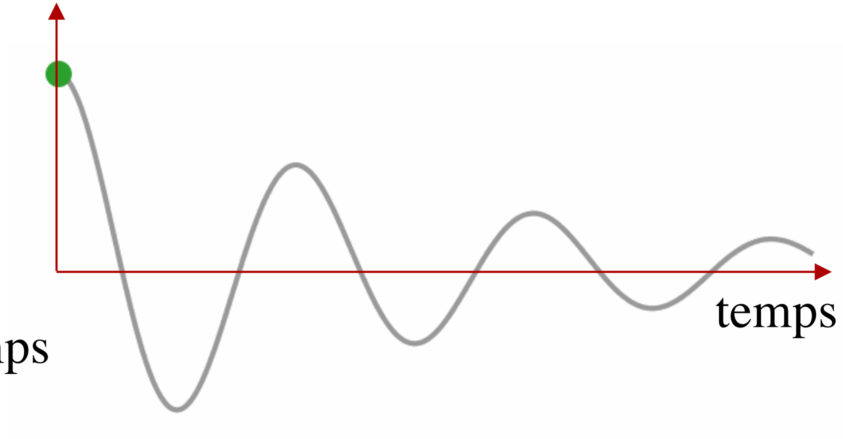
2. Notions de solution analytique/numérique

<u>C'est quoi une solution analytique</u> ?

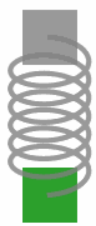
- **Cas de <u>l'oscillateur amorti</u> : trajectoire est une droite mais mouvement oscillant !**

-> Formules analytiques existent ... avec des cosinus et sinus pour l'amplitude !

Amplitude/repos
en fonction du temps



cas avec frottements



Masse suspendue

https://benmoseley.blog/wp-content/uploads/2021/08/oscillator.gif

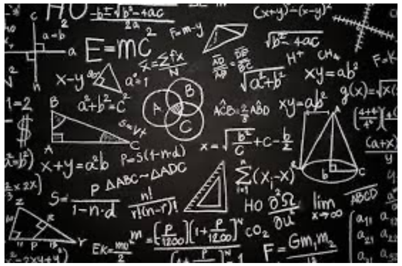
2. Notions de solution analytique/numérique

<u>C'est quoi une solution numérique</u> ?

- En absence de formules analytiques => construire la <u>trajectoire</u> quand même ! à partir de la force et de la RFD

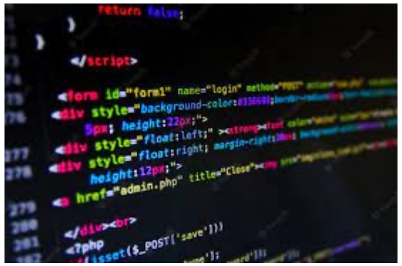
- On choisit de l'approximer à <u>différents instants bien choisis</u>
- On déduit en même temps la <u>façon de la décrire</u> (vitesses aux différents instants)
- On part de la <u>connaissance des conditions initiales</u>

PFD + …



+

Méthode numérique

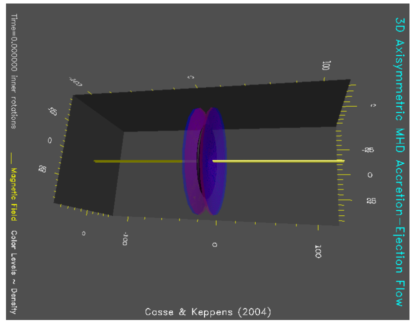


+

Programmation

=>

Visualisation



2. Notions de solution analytique/numérique

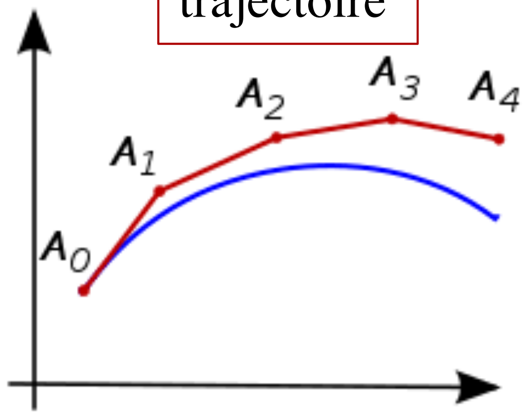
<u>C'est quoi une solution numérique</u> ?

- En absence de formules analytiques => construire la <u>trajectoire</u> quand même ! à partir de la force et de la RFD

- On choisit de l'approximer à <u>différents instants</u> bien choisis
- On déduit en même temps la façon de la décrire :<u>vitesse</u> aux différents instants
- On part de la connaissance des <u>conditions initiales</u> (CI)

trajectoire

Cas d'un <u>projectile</u>



- Vraie trajectoire en bleu
- Trajectoire numérique en rouge (erreur exagérée)
- La vitesse sera constante entre les points (lignes droites)

Plan du premier cours

1. Exemples de lois fondamentales (ou pas) en physique

2. Notions de solution analytique et numérique

3. Un exemple de schéma numérique simple et ses limitations

4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

3. Exemple de schéma numérique simple

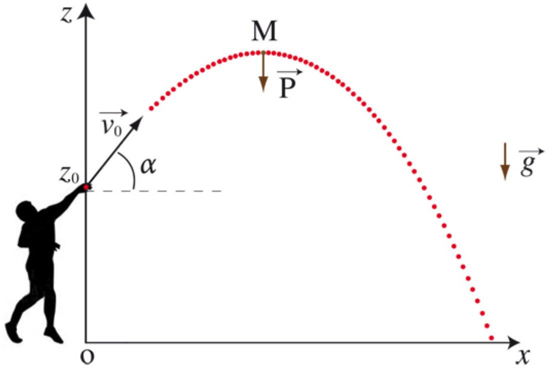
Le schéma d'Euler (méthode la plus simple et la moins précise)

- Exemple du projectile !

- Principe: les opérations mathématiques complexes sont remplacées par des opérations élémentaires
  -> additions, soustractions …
- On construit ainsi point par point la trajectoire depuis les CI

- Le grand nombre d'opérations (point fort de l'ordinateur) va compenser la simplicité

=> On définit un pas de temps entre les points : Δt



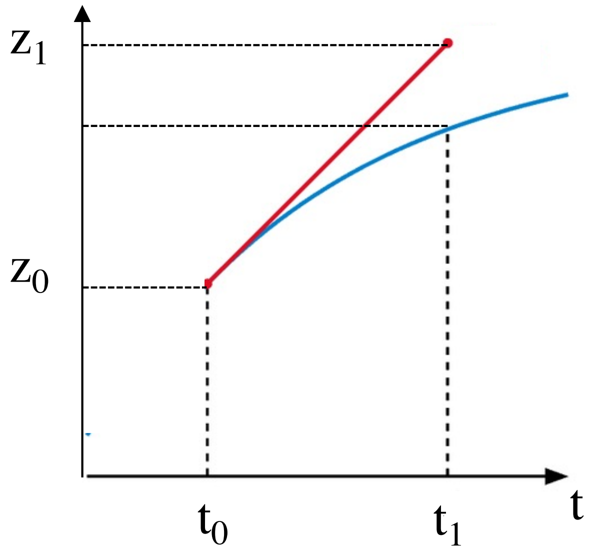
3. Exemple de schéma numérique simple

Le schéma d'Euler (méthode la plus simple et la moins précise)

- Exemple du projectile !

- On remplace l'intégration mathématique (obtenir la vitesse puis la trajectoire à différents instants par une extrapolation linéaire)

Par exemple, la position $\mathbf{z_1}$ est obtenue en 'visant' avec **la vitesse en** $\mathbf{z_0}$ et ainsi de suite … (même chose pour **x**)



il faut que le pas de temps $\mathbf{\Delta t = t_1 - t_0}$ soit très petit pour une précision maximale

$$z_1 = z_0 + (t_1 - t_0)\, v_0$$
$$v_1 = v_0 + (t_1 - t_0)\, F/m$$

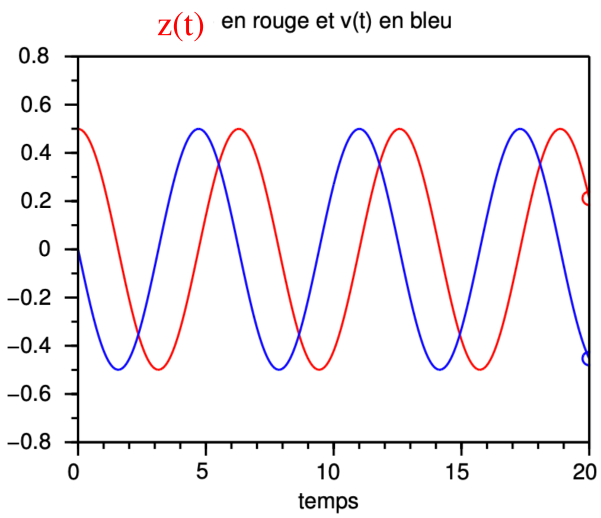
Puis z_2, v_2, …

A faire aussi pour la direction suivant x …

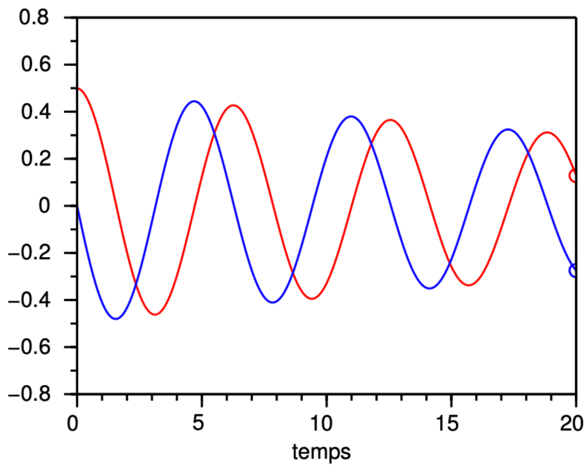
3. Exemple de schéma numérique simple

Le schéma d'Euler : ses limitations

- Exemple du ressort sans et avec frottements !
  et conditions initiales : $z_0 = 0.5$, $V_0 = 0$



Solution théorique sans frottements



Solution théorique avec frottements

3. Exemple de schéma numérique simple

<u>Le schéma d'Euler : ses limitations</u>

- Exemple du ressort <u>sans frottements</u> !

et conditions initiales : $z_0 = 0.5$, $V_0 = 0$

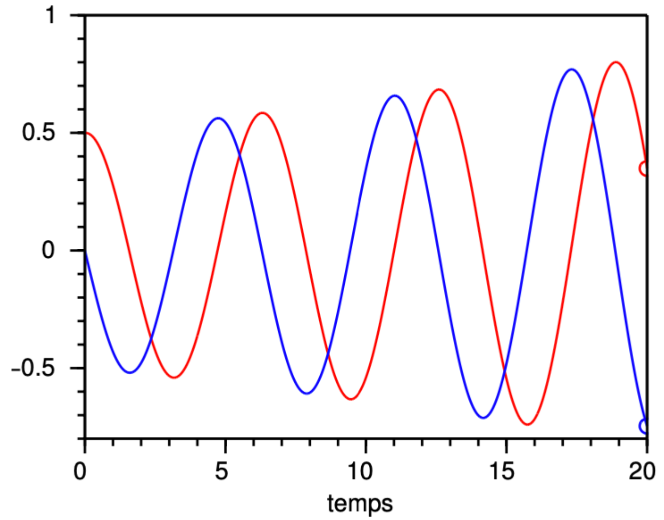
Amplitude augmente !

⇒ Méthode numérique amplifie la solution !

⇒ <u>le schéma d'Euler est instable</u>

⇒ Il existe de biens meilleurs schémas mais pas de schéma parfait (il y a toujours une imprécision) !

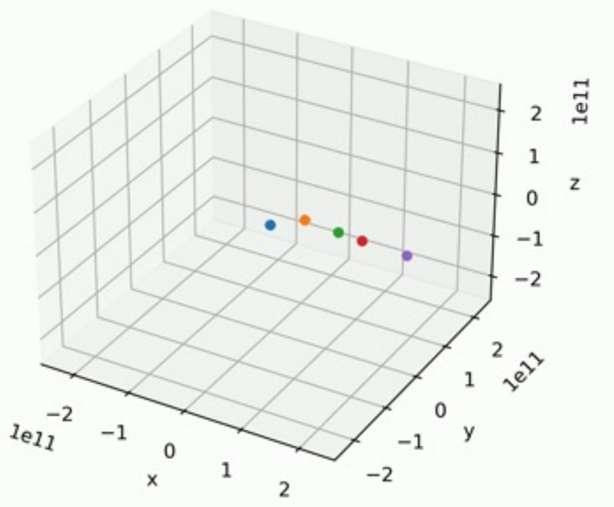
solution numérique <u>sans frottements</u> avec un pas de temps assez petit



4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

<u>Le problème à N corps en interaction gravitationnelle</u>

- Système planétaire (la méthode numérique utilisée est stable contrairement au schéma d'Euler)



Merci wikipédia

- Il faut construire point par point les trajectoires de chaque planète (1 équation PFD par planète)

1. Sous l'effet de la force de gravitation du Soleil
2. Sous l'effet des forces de gravitation des autres planètes

https://fr.wikipedia.org/wiki/Simulation_d%27un_système_à_N_corps#/media/Fichier:Simulated_trajectories_of_four_rocky_planets_with_dt_86400.gif

4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

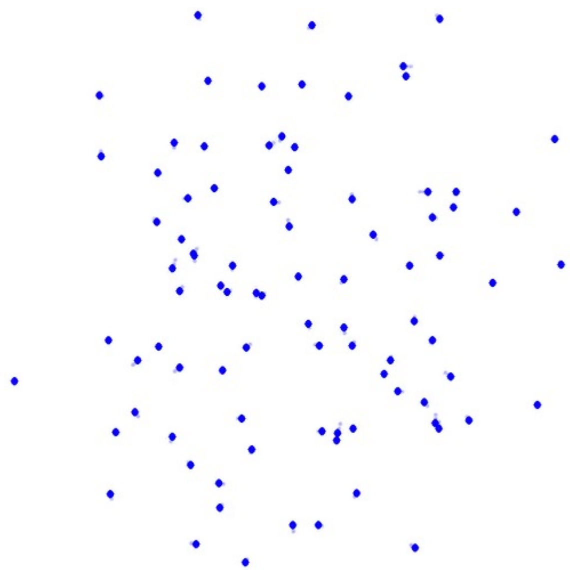
Le problème à N corps en interaction gravitationnelle

- Système amas d'étoiles (la méthode numérique utilisée est stable contrairement au schéma d'Euler)

- Il faut construire point par point les trajectoires de chaque corps (1 équation PFD par corps)

Sous l'effet des forces de gravitation des autres corps/étoiles

=> Limite évidente à cause du temps de calcul



https://medium.com/swlh/create-your-own-n-body-simulation-with-python-f417234885e9

4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

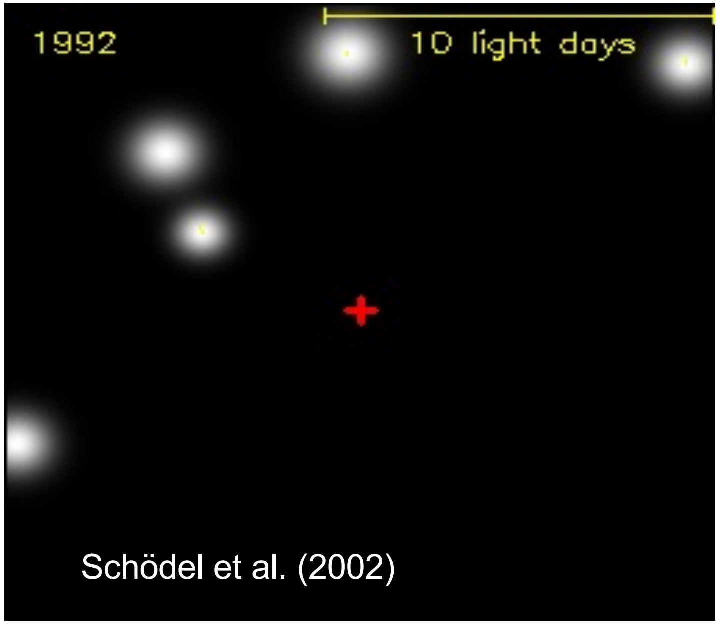
<u>Le problème à N corps en interaction gravitationnelle</u>

- Observations de trajectoires d'étoiles => déduire <u>la masse d'un objet au centre</u> de <u>notre Galaxie</u> (la voie lactée) de **3 millions de fois la masse du soleil** !

+ simulations numériques

=> Trou noir super-massif

https://webhome.weizmann.ac.il/home/tal/pp/pp.html



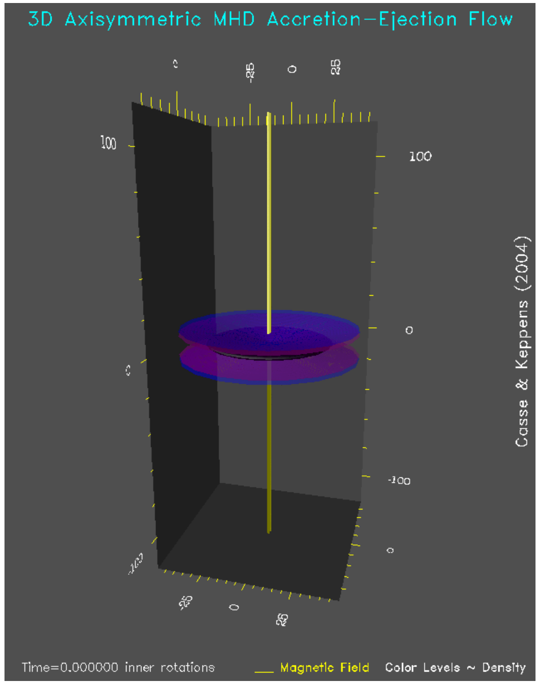
4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

<u>Problèmes de magnéto-hydrodynamique</u>

Disque de matière (fluide)
- mouvement azimutal + radial
- jets dans un ‘cylindre’

+ champ magnétique qui interagit avec le fluide

Equations de type PFD pour chaque ‘parcelle’ de fluide (avec interaction entre les parcelles)

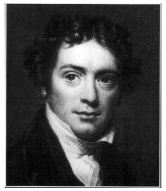


https://apc.u-paris.fr/~fcasse/Simu.html

Problèmes de magnéto-hydrodynamique


Newton

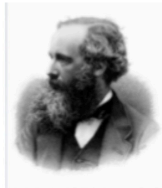
+


Faraday

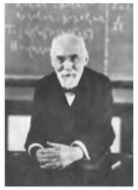
+


Ampère

+


Maxwell

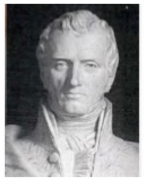
+


Lorentz

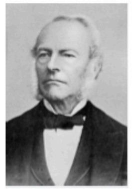
+


Ohm

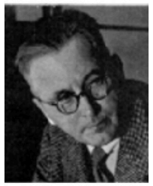
+


Navier

+


Stokes

+


Hartmann

+


Alfvén

= **Magnetohydrodynamics**

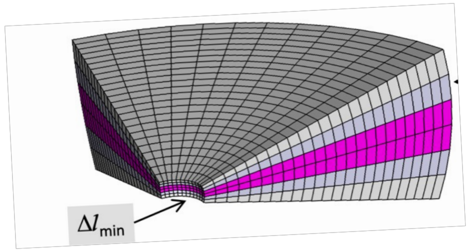
4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

<u>Problèmes de magnéto-hydrodynamique</u>

- Disque de matière (fluide)
  -> mouvement azimutal + radial
- jets dans un 'cylindre'

+ champ magnétique qui interagit avec le fluide

<u>Disque</u>



Equations de type PFD pour chaque 'parcelle' de fluide (avec interaction entre les parcelles)

- Conservation masse
- PFD masse
- PFD magnétique
- Conservation énergie

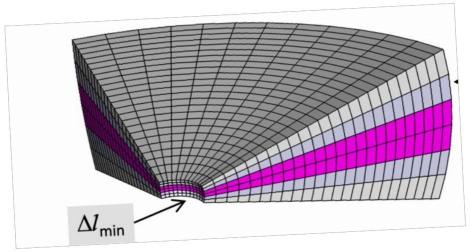
4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

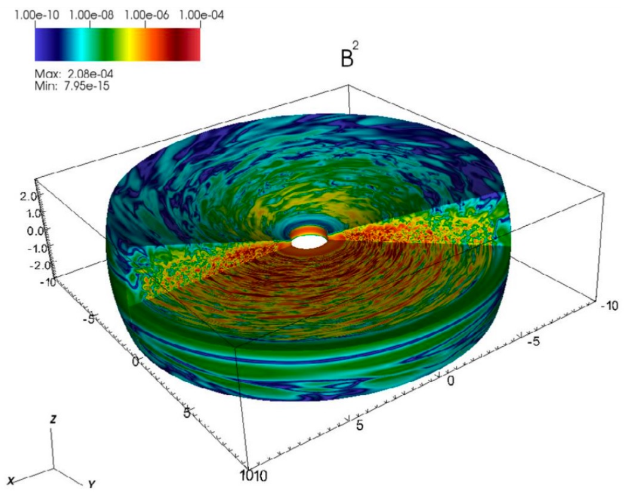
<u>Problèmes de magnéto-hydrodynamique</u>

- Disque de matière (fluide)
  -> mouvement azimutal + radial
- jets dans un 'cylindre'

+ champ magnétique qui interagit avec le fluide

<u>Disque</u>

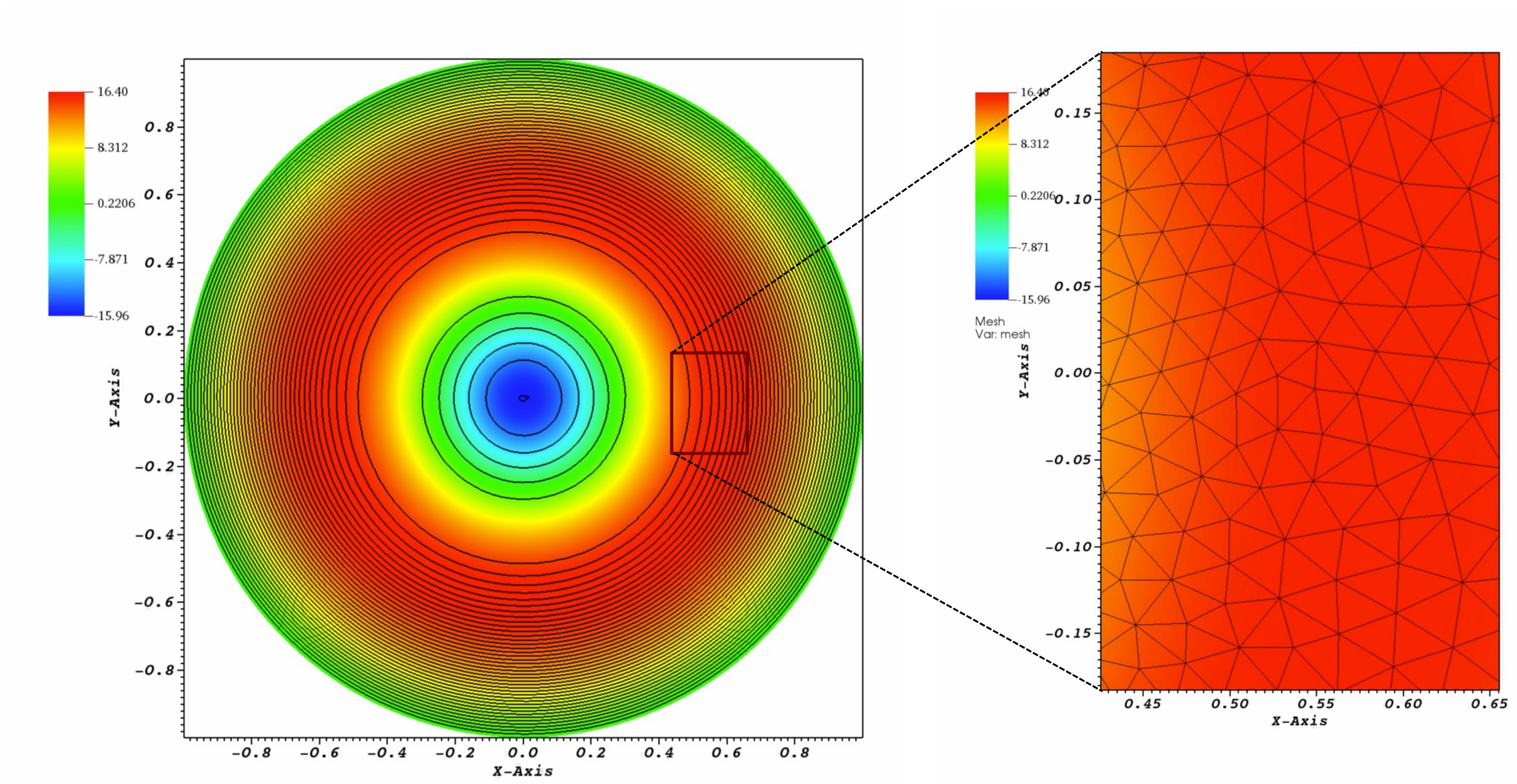




Equations de type PFD pour chaque 'parcelle' de fluide (avec interaction entre les parcelles)

Code de calcul

4. Illustration de simulations numériques en astrophysique



Lignes de champ magnétique + courant électrique (iso-valeurs)

Animations non disponibles

Exemple d’instabilités magnétiques dans un disque mince

4. Illustration de simulations numériques en astrophysique

Conclusions

On utilise un code de calcul dédié

1. Les simulations numériques classiques coutent cher en temps de calcul
$\Rightarrow$ Il faut un pas de temps petit (précision + stabilité)
$\Rightarrow$ Il faut un maillage spatial fin pour capturer les structures à petite échelle et qui s'adapte de façon dynamique si possible

2. Les données générées sont énormes en volume et complexes à visualiser

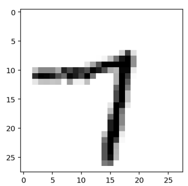
3. Un changement de conditions initiales => nouvelle simulation

Que peut apporter l'IA ?

Un aperçu du prochain cours :

II. C’est quoi l’intelligence artificielle (IA) ? Exemples

1. Histoire et origine de l’IA
2. Exemples d’utilisation de l’IA dans la vie courante
3. Exemples d’utilisation d’IA pour la reconnaissance d’écriture (chiffres)



?

-> Démo du fonctionnement d’un algorithme incluant l’apprentissage (réseau de neurones artificiels)