



Cours de physique générale: mécanique

Première année, section Chimie / Génie Chimique

Prof. Christophe Galland

Laboratory of Quantum and Nano Optics - EPFL

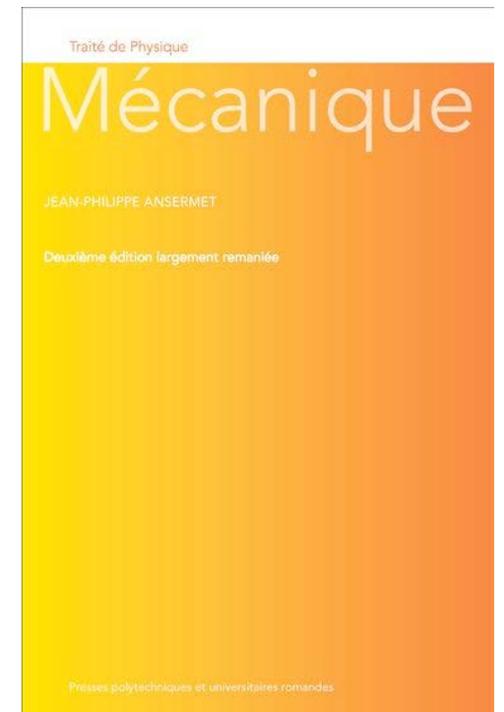
Site web du cours:

<https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=17026>

Site web du cours

<https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=17026>

- Connectez vous pour obtenir
 - l'organisation et les informations sur le cours
 - le planning des exercices et des cours
 - Les sujets des exercices, les corrigés
 - Les transparents du cours, les notes manuscrites
- Les liens vers les videos des cours donnés en auditoire
- Des références bibliographiques pour des compléments:
 - Livre de référence: Mécanique, Jean-Philippe Ansermet
 - Des liens vers des videos du MOOC [mécanique](#)



Cours

- En auditoire CE 3 lundi et mercredi
 - + Vidéos MOOC et d'autres professeur.e.s disponibles (cf. moodle)
- N'hésitez pas à poser des questions !
 - En **direct** ou avec l'outil **EdStem**

Exercices

- Séances d'exercice
 - Tutorat: 10:15 - 12:00 le mardi (4 salles, 10 assistant.e.s étudiant.e.s, AE)
 - Exercices en auditoire: 17:15 - 19:00 le mercredi (2ème heure)
- Tutorat par groupe
 - 2 ou 3 groupes par salle, chaque groupe encadré par un.e AE
- Nouveau: séances soutien inter-section tous les soirs
 - 17h30 - 19h00 lundi au jeudi (cf. moodle)

Exercices

- Exercices préparatoires
 - Les *exercices préparatoires* vous aident à assimiler ou à réviser les aspects techniques du cours (environ 30 minutes de travail pour la résolution)
 - Ils sont fournis avec un corrigé, et ne sont pas discutés lors du tutorat
- Problèmes
 - Les *problèmes* mettent en oeuvre la compréhension des concepts et requièrent de la réflexion et un sens physique
 - Les problèmes sont discutés en détails lors du tutorat
 - **Les problèmes reflètent le niveau d'exigence de l'examen**
 - Un corrigé des problèmes est fourni sur moodle après la séance d'exercice
- Exercices en auditoire
 - La séance du mercredi est dédiée soit à la discussion de points techniques du cours, soit à la présentation d'un exercice original, soit à un **mini-test**

Exercices et Problèmes

- Objectifs
 - Mettre en pratique les notions vues en cours
 - vous entraîner à la résolution de **problèmes complexes**, mettant en jeu non seulement les formules du cours mais de la réflexion physique
 - Evaluer votre niveau de compréhension, notamment en vue des examens
 - Poser des questions, échanger, réfléchir
 - Recevoir (et donner) aide, motivation et encouragements

Tests et Examen

- Mini tests écrits
 - 5 fois dans le semestre: toutes les 2 semaines à partir de semaine 5
 - Sous surveillance, en conditions d'examen (formulaire manuscrit uniquement)
 - Directement inspirés de sujets d'examen, représentant environ 1/3 d'un examen réel de 3h
 - Corrigés et noté par les AEs suivant le barème de l'examen
 - *Les notes aux mini tests n'ont pas d'impact sur la note du semestre (100% examen)*

Tests et Examen

- Aucune épreuve facultative
 - au sens de l'article 3 de l'ordonnance fédérale sur le contrôle des études
- Epreuve obligatoire sous forme d'examen écrit
 - Date décidée par le service académique, au mois de janvier
 - Durée de 3h
 - Conditions détaillées présentées plus tard, en particulier
 - Aucun équipement informatique ou électronique
 - Aucun document écrit sauf un formulaire **manuscrit, 1 feuille A4 recto-verso**
 - La note obtenue est la note finale

Recommandations

- **Travaillez régulièrement (i.e. quotidiennement)**
- Tirez le maximum de votre présence au cours: soyez attentifs, posez des questions
- Tirez parti des séances d'exercice pour approfondir, apprendre à poser et résoudre les problèmes. Préparez les séances d'exercice en relisant le cours avant la séance !
- Réagissez rapidement si vous avez l'impression de décrocher (demander aide au AEs, ami.e.s, profs, etc.)

Méthode de résolution

- Appliquez cette méthode aux problèmes, discutez-en avec vos tuteurs
- Gardez votre carte sur vous (en cas de besoin !)

1. Lire attentivement l'énoncé et appréhender le problème
2. Définir le(s) **système(s)** ; faire un **dessin**
3. Choisir un **référentiel** (= observateur)
4. Identifier (et dessiner) les **forces extérieures** appliquées sur chaque système
5. Lister les **lois applicables** et choisir la stratégie de résolution
6. Choisir les **variables de position** (= coordonnées)
7. Ecrire les **équations du mouvement** ; les résoudre
8. **Vérifier** la(les) solution(s) (dimensions et cas limites)

Physique

- Science de la « nature » : décrit les constituants du monde naturel et leurs interactions
- Recherche des points communs dans la diversité du monde naturel: les lois de la physique
 - Exemple: la Mécanique décrit aussi bien les collisions entre véhicules, les molécules d'un gaz ou les planètes et les galaxies
- Les lois de la physique s'expriment sous forme de relations mathématiques entre des grandeurs
 - Exemple: les lois de Newton de la Mécanique relient le mouvement des objets aux causes qui lui donnent naissance

Cours de physique générale, premier semestre

Mécanique newtonienne - 14 cours de 3h

1. Objectifs de la mécanique
2. Cinématique et dynamique du point matériel
3. Travail, forces conservatives, énergie
4. Gravitation, moment cinétique
5. Système de points matériels, lois de conservation
6. Cinématique et dynamique du solide indéformable
7. Mouvement relatif et changement de référentiel

Mécanique newtonienne

Trois grandes familles d'outils

- **Cinématique:** description mathématique du mouvement
- **Dynamique:** relation entre le mouvement et les causes (forces)
- **Statique:** description de l'équilibre des systèmes mécaniques



Lois de Newton Trois lois universelles

■ Lex Prima

« Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite à moins qu'une force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état »

$$\text{mouvement rectiligne uniforme} \Leftrightarrow \vec{F} = \vec{0}$$

■ Lex secunda

« Les changements dans le mouvement d'un corps (= l'accélération) sont proportionnels à la force et se font dans la direction de la force »

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

Demo: loi de Newton

<https://youtu.be/qawgh1F2MAM>

■ Lex tertia (action-reaction)

« A chaque action, il y a toujours une réaction égale et opposée; si un corps exerce une force sur un autre, cet autre corps exerce une force égale et opposée sur le premier »

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = - \vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

“Gravity explains the motions of the planets, but it cannot explain who sets the planets in motion.”

– Isaac Newton

Objectifs du cours

- Mettre un problème sous forme mathématique
 - Définir le problème, le modéliser
 - Choisir une description mathématique
 - Ecrire les équations régissant la physique
 - Résoudre les équation et interpréter la solution
- Développer un savoir faire technique et un esprit scientifique
 - Repérer le sens physique derrière les équations

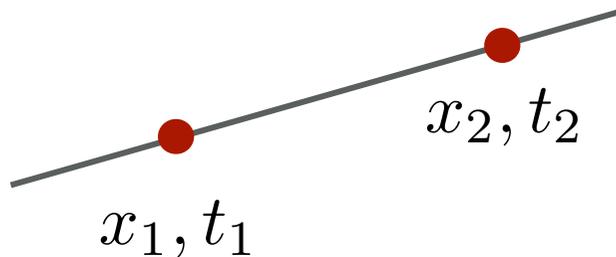
Description mathématique du mouvement

- Référentiel, repère
 - Ce par rapport à quoi on définit les positions (ex: le laboratoire, un solide, le soleil)
 - Quatre points non coplanaires définissant une origine et trois directions
 - Une horloge

- Système de coordonnées, vecteurs
 - Outil de description des positions des objets par rapport au référentiel
 - Vecteur: donnée d'une amplitude, d'une direction et d'un sens

Description mathématique du mouvement

- Vitesse moyenne, vitesse instantanée
 - Vitesse moyenne d'un point se déplaçant en lien droite sur l'axe x



$$v_{\text{moyenne}} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

- la position du point est une fonction du temps $x(t)$

$$x(t_1) = x_1, x(t_2) = x_2$$

- Vitesse instantanée à l'instant t_1

$$v(t_1) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x(t_2) - x(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{dx}{dt}(t_1) = \dot{x}(t_1)$$

Description mathématique du mouvement

- Accélération instantanée

$$a(t_1) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{v(t_2) - v(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{dv}{dt}(t_1)$$

$$a(t_1) = \frac{d^2x}{dt^2}(t_1) = \ddot{x}(t_1)$$

Vitesse: dérivée première de la position par rapport au temps
Accélération: dérivée première de la vitesse, dérivée seconde de la position, par rapport au temps

Loi physique: exemples

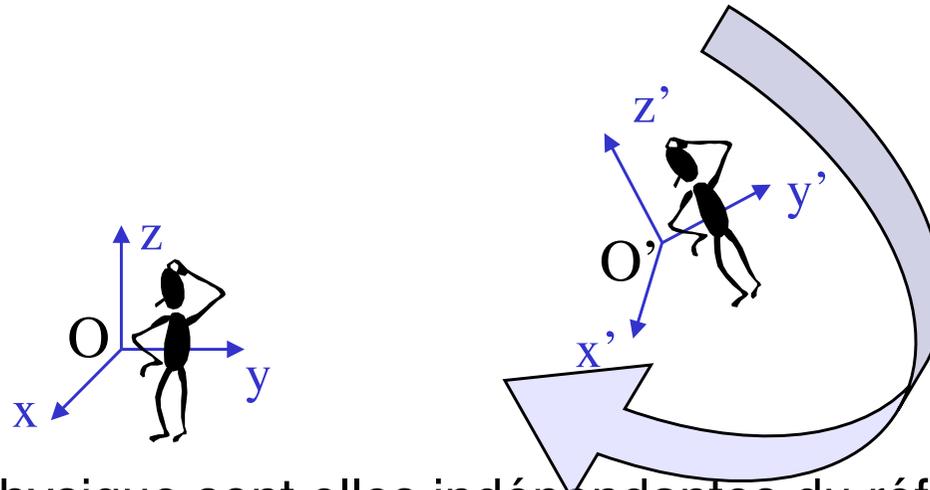
- Loi de composition des vitesses
 - Si je marche à une vitesse v_m sur un tapis roulant à la vitesse v_t ma vitesse par rapport au sol est

$$v_{\text{sol}} = v_m + v_t$$

- Valide uniquement dans une certaine gamme de vitesses
- Lois de conservation
 - Conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement, du moment cinétique
 - Les lois les plus fondamentales, valables dans toutes les situations avec des formulations mathématiques qui dépendent du contexte
 - Résultent de principes d'invariances (homogénéité du temps, de l'espace, isotropie de l'espace)

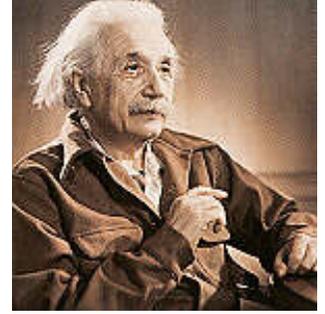
Loi physique: exemples

- Invariance par changement de référentiel: changement de $Oxyz$ à $Ox'y'z'$



- Les lois de la physique sont elles indépendantes du référentiel ?

Principe de Galilée: les lois de la physique sont les même pour deux observateurs en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre



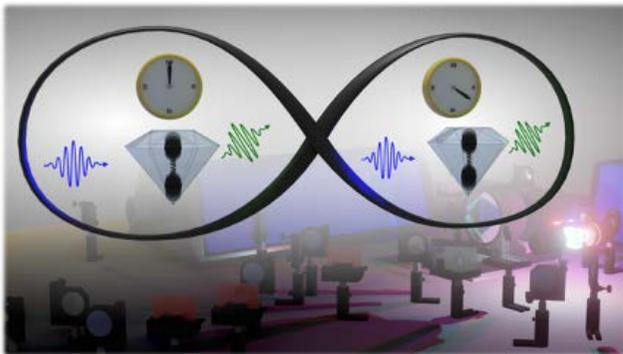
Limites des lois de la mécanique newtonienne

- Pour les objets atteignant des vitesses proches de celle de la lumière ($299'792'458 \text{ m.s}^{-1}$): on doit appliquer la ***théorie de la relativité restreinte***
 - On ne peut jamais dépasser la vitesse de la lumière, quel que soit le référentiel
 - Dans un référentiel en translation, les horloges battent plus lentement
 - Dans un référentiel en translation, les mètres mesurent des distances plus courtes
 - *Exemples*: physique des particules, transmission de signaux électromagnétiques, mesures de précision, astronomie
- Pour les objets soumis à des champs de gravitation intenses, on doit appliquer la ***théorie de la relativité générale***
 - la matière et l'énergie déforment l'espace temps: les horloges battent plus vite dans un champ de gravitation intense
 - *Exemples*: trous noirs, dynamique de l'univers dans son ensemble (cosmologie), mesures de précision

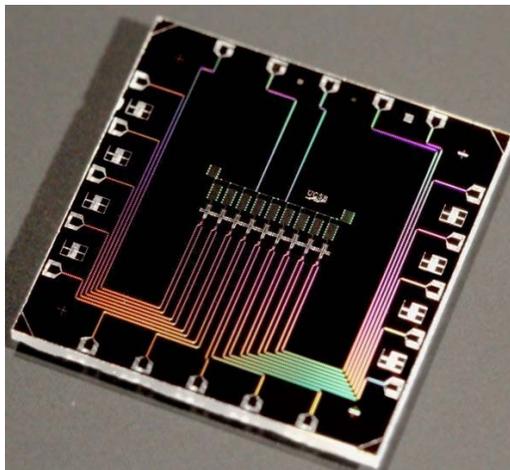
En général ces effets sont faibles: il faut 'travailler' pour réussir à les observer !

Limites des lois de la mécanique newtonienne

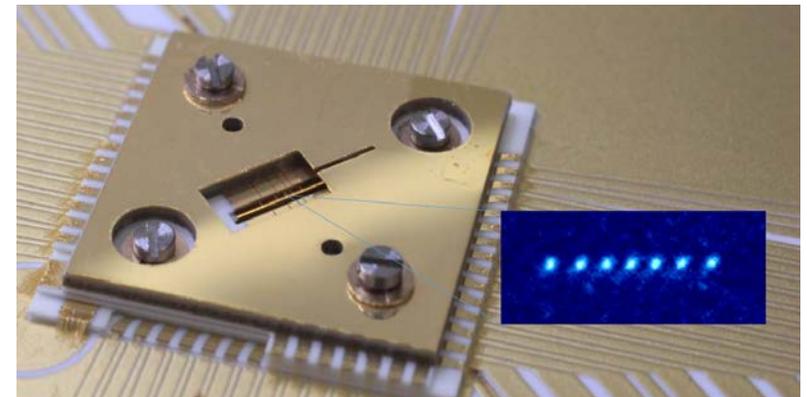
- Pour les objets de très faible masse (e.g. électron, molécule), on doit appliquer les lois de la **mécanique quantique**
 - Le concept de trajectoire n'a plus de sens
 - Les résultats de mesures acquièrent un caractère fondamentalement probabiliste
 - Les mesures effectuées sur un système le perturbent fondamentalement
 - Le « champ des possibles » est beaucoup plus grand: il y a beaucoup plus d'états possibles pour un système quantique que pour un système classique (principe de superposition d'états)
 - *Exemples:* atomes, électrons, particules élémentaires, molécules (chimie), ordinateur quantique



Molecular vibrations: LQNO, EPFL



Superconducting circuit: UCSB and Google



Trapped Ions: ETHZ, Home group

Première partie

Sensibilisation aux objectifs de la mécanique

- Deux exemples fondamentaux
 - Projectile dans un champ de pesanteur (semaine 1)
 - Oscillateur harmonique (semaine 2)
- But:
 - Réviser les notions d'équation différentielle et de dérivée
 - Prédire la position et la vitesse à partir d'une **loi physique** ($F = ma$) et des **conditions initiales**

Modèle du point matériel

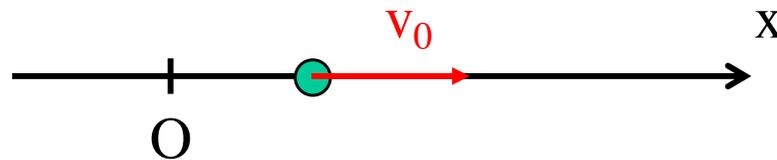
Point Matériel: système assimilé à un point géométrique auquel on attribue toute la masse du système, et dont l'état est décrit en tout temps par une position et une vitesse

- C'est un "modèle" simple qui permet de décrire fidèlement certains phénomènes (mais pas d'autres, à tester expérimentalement !)
- Exemples:
 - électrons, atomes, molécules (si on néglige rotations et vibrations), autres particules, projectiles,
 - planètes (quant au mouvement de leurs centres de masse)

Mouvement rectiligne uniforme

Mouvement d'un point matériel en ligne droite et à vitesse constante

- Dans un repère Ox , avec l'axe x associé à la trajectoire rectiligne. $x(t)$ est la position du point en fonction du temps



$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \dot{x}(t) = v_0 = \text{constante}$$

- Equation différentielle

Mouvement rectiligne uniforme

- Solution: équation horaire

$$x(t) = v_0 t + x_0$$

Condition initiale à $t = 0$

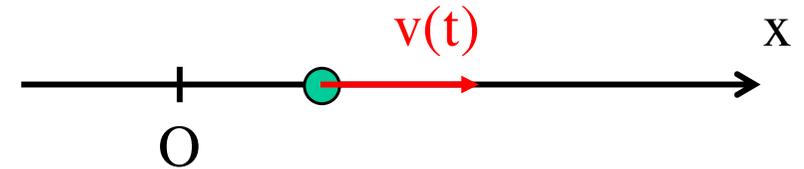


- Connaissant la position initiale, la solution prédit la position en tout temps.

Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MUA)

Mouvement d'un point matériel en ligne droite et à accélération constante

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}(t) = a_0 = \text{constante}$$



- Solution: équation horaire

$$x(t) = \frac{1}{2}a_0t^2 + v_0t + x_0$$

Vitesse initiale à $t = 0$

Position initiale à $t = 0$

Force de pesanteur

- Modèle:

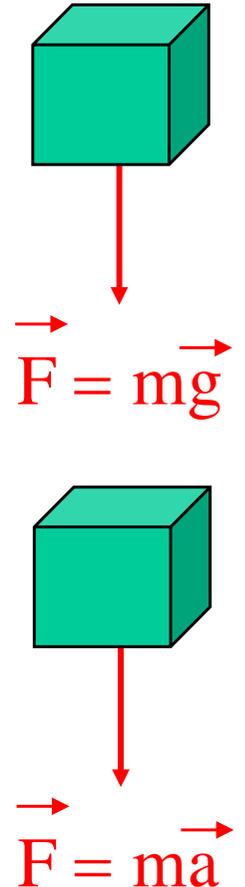
- Attraction terrestre donnant lieu à une force verticale proportionnelle à la masse
- On introduit une constante de gravitation $g \Rightarrow$ force selon z :

$$F = mg$$

- Application de la deuxième loi de Newton

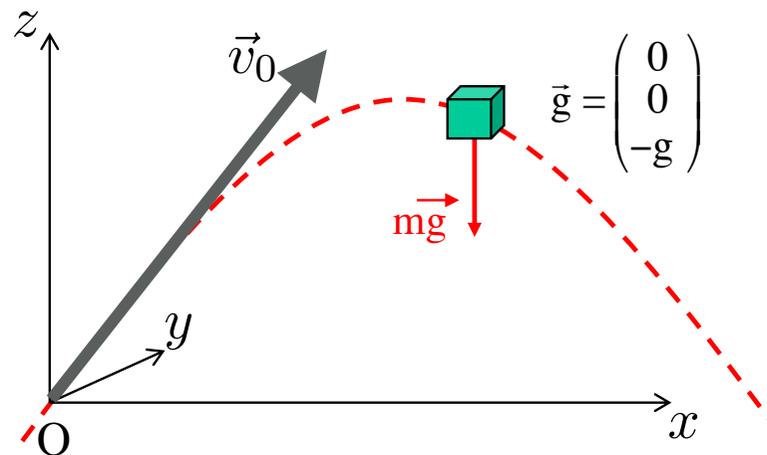
- Si le poids est la seule force appliquée à un point matériel
- Dans le vide les corps ont un mouvement uniformément accéléré (MUA) sous l'effet de la gravitation, i.e. selon z :

$$F = ma$$



Ex.: Projectile dans le champ de pesanteur

- On choisi un repère: axe z vertical, axe x dans la direction de la trajectoire, origine au point de départ du projectile



- Conditions initiales: position, vitesse

$$\vec{x}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{v}_0 = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ 0 \\ v_{0z} \end{pmatrix}$$

Ex.: Projectile dans le champ de pesanteur

- Application de la loi de Newton, projetée sur les trois directions

$$\begin{cases} m\ddot{x} = 0 & \Rightarrow x(t) = v_{0x}t + x_0 = v_{0x}t \\ m\ddot{y} = 0 & \Rightarrow y(t) = v_{0y}t + y_0 = 0 \\ m\ddot{z} = -mg & \Rightarrow z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0z}t + z_0 = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0z}t \end{cases}$$

- En éliminant t entre les deux équations pour x et z , on obtient l'équation d'une parabole dans le plan x,y

$$z = -\frac{1}{2}g \left(\frac{x}{v_{0x}} \right)^2 + v_{0z} \left(\frac{x}{v_{0x}} \right)$$

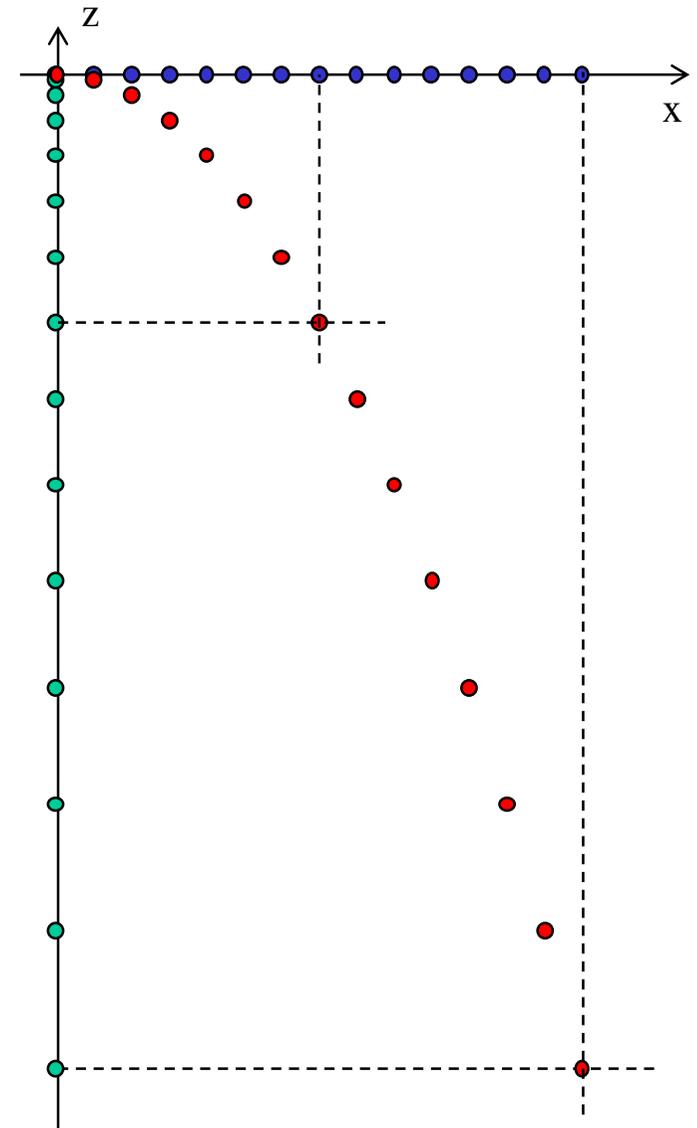
Projectile dans le champ de pesanteur

- Décomposition du mouvement suivant les deux directions
- Le mouvement peut être vu comme la superposition de deux mouvements:
 - un mouvement uniformément accéléré dans la direction z

$$z(t) = -\frac{1}{2}gt^2$$

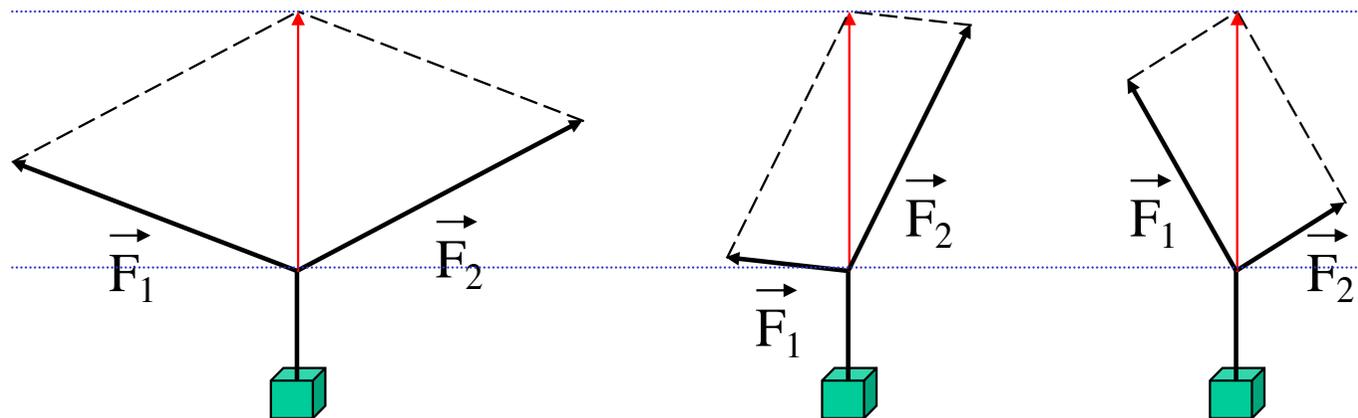
- un mouvement rectiligne uniforme dans la direction x

$$x(t) = v_{0x}t$$



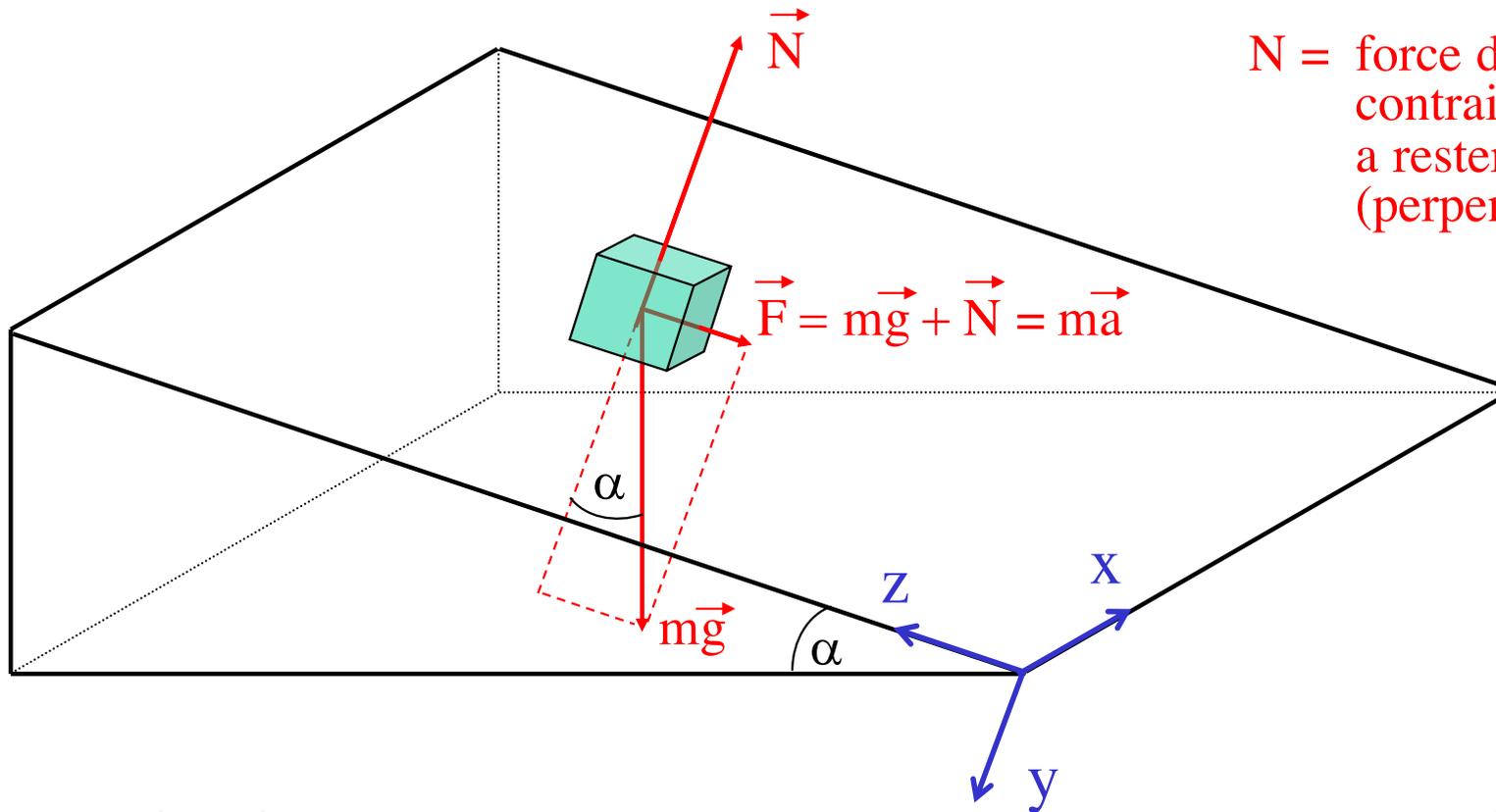
Résultante des forces

- On représente l'effet de plusieurs forces s'exerçant sur un point par une force unique
- Expérience de Stevin (1548 - 1620)
 - Une masse suspendue à deux fils obliques, à l'équilibre. On mesure la tension des fils
 - La résultante est verticale quelle que soit la direction des fils



$$\vec{F}_{\text{resultante}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Plan incliné sans frottements



N = force de « liaison » qui contraint le point matériel a rester sur le plan incliné (perpendiculaire au plan)

Projection sur axe x: $F_x = 0$

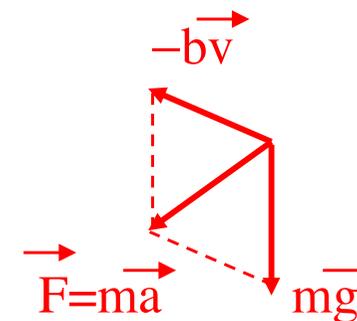
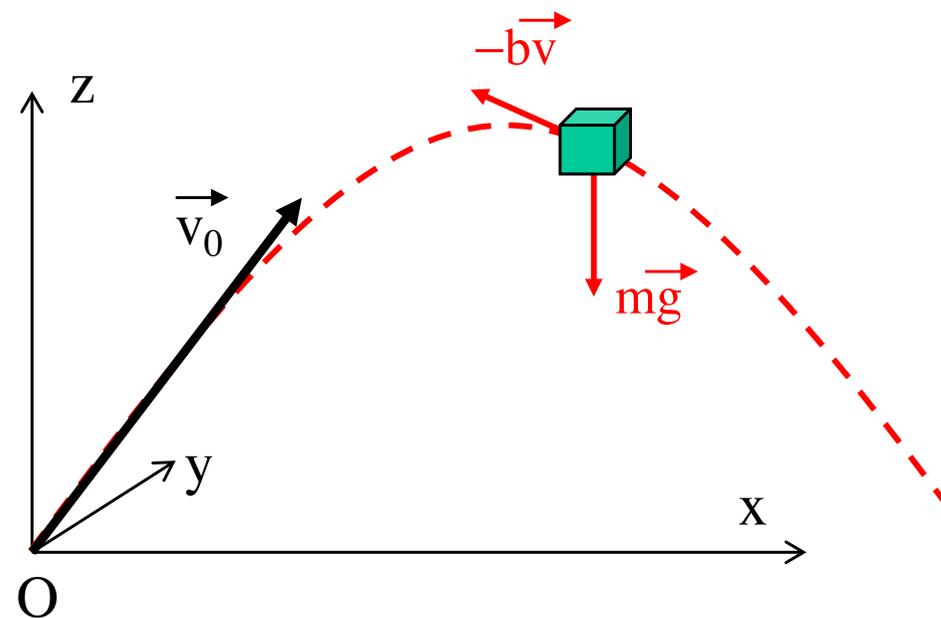
Projection sur axe y: $F_y = mg \cos\alpha - N = 0$

Projection sur axe z: $F_z = -mg \sin\alpha = ma_z$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \sin\alpha \end{pmatrix}$$

Mouvement balistique avec frottements

- Notre modèle balistique avec $F=mg$ est-il bon ?
 - $v_z(t)$ ne croît pas à l'infini !
- Modèle plus réaliste:
 - On tient compte de la résistance de l'air
 - Force de frottement opposée à la vitesse: $\vec{F}_{\text{frot}} = -b\vec{v}$, $b = \text{constante}$
- **Attention:**
 - Les forces s'additionnent comme des vecteurs
 - La 2ème loi de Newton s'applique en utilisant la somme vectorielle des forces (comme dans l'exemple précédent de la table à air)



Chute libre avec frottements

- Le même référentiel convient pour la description en présence de frottements
- Conditions initiales: position, vitesse (inchangées)

$$\vec{x}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{v}_0 = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ 0 \\ v_{0z} \end{pmatrix}$$

34

- Deuxième loi de Newton projetée sur les trois directions

$$m\ddot{x} = -b\dot{x} \quad \Rightarrow \quad x(t) = v_{0x}\tau (1 - e^{-t/\tau})$$

$$m\ddot{y} = -b\dot{y} \quad \Rightarrow \quad y(t) = 0$$

$$m\ddot{z} = -b\dot{z} - mg \quad \Rightarrow \quad z(t) = -g\tau t + (v_{0z} + g\tau)\tau (1 - e^{-t/\tau})$$

$$\text{avec } \tau = \frac{m}{b}$$

Chute libre avec frottements

- On déduit maintenant une vitesse limite de chute que le point atteint dans la direction z à très longs temps

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_z(t) = -g\tau = -\frac{mg}{b}$$

- La vitesse dépend maintenant de la masse, contrairement au cas sans frottements !
- Raffiner un modèle introduit de nouveaux paramètres. C'est l'expérience qui sert de référence !