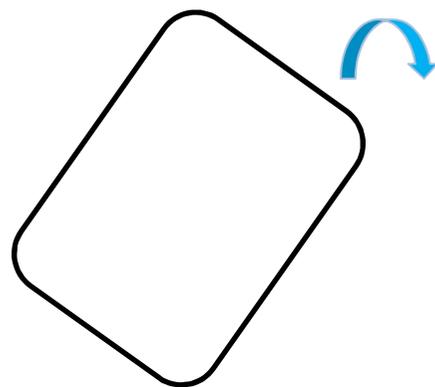


## L'histoire de la physique racontée par votre smartphone

Université Populaire d'Antony, le 22 septembre 2016

# Qu'est-ce que la physique ?

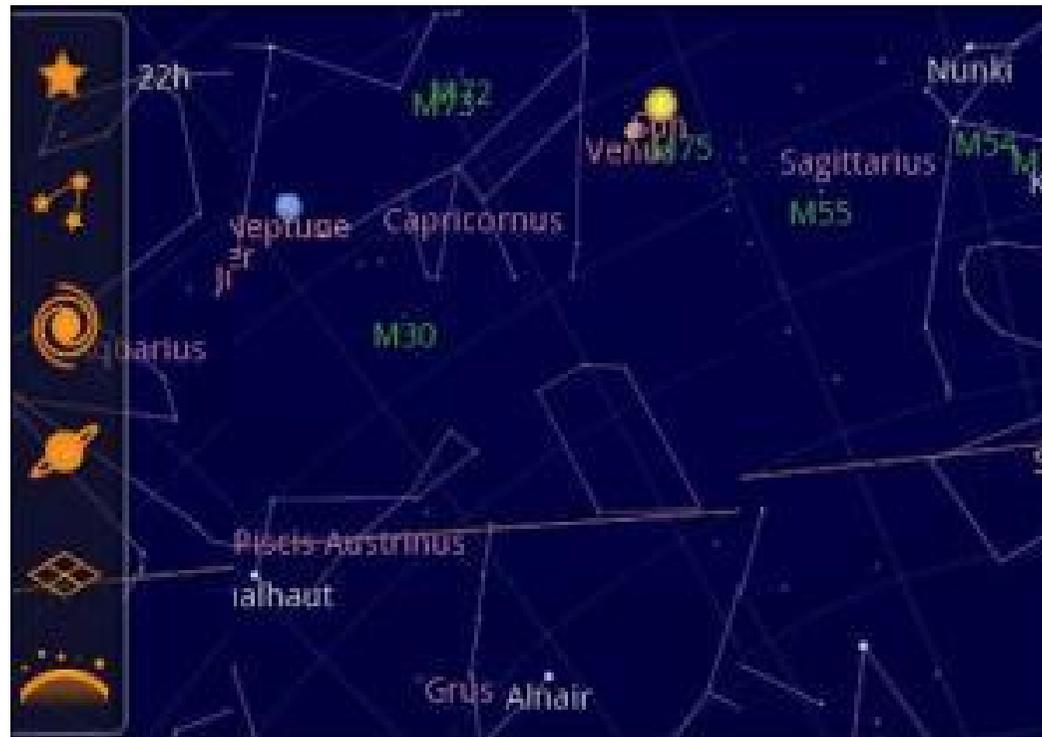
## 4 exemples



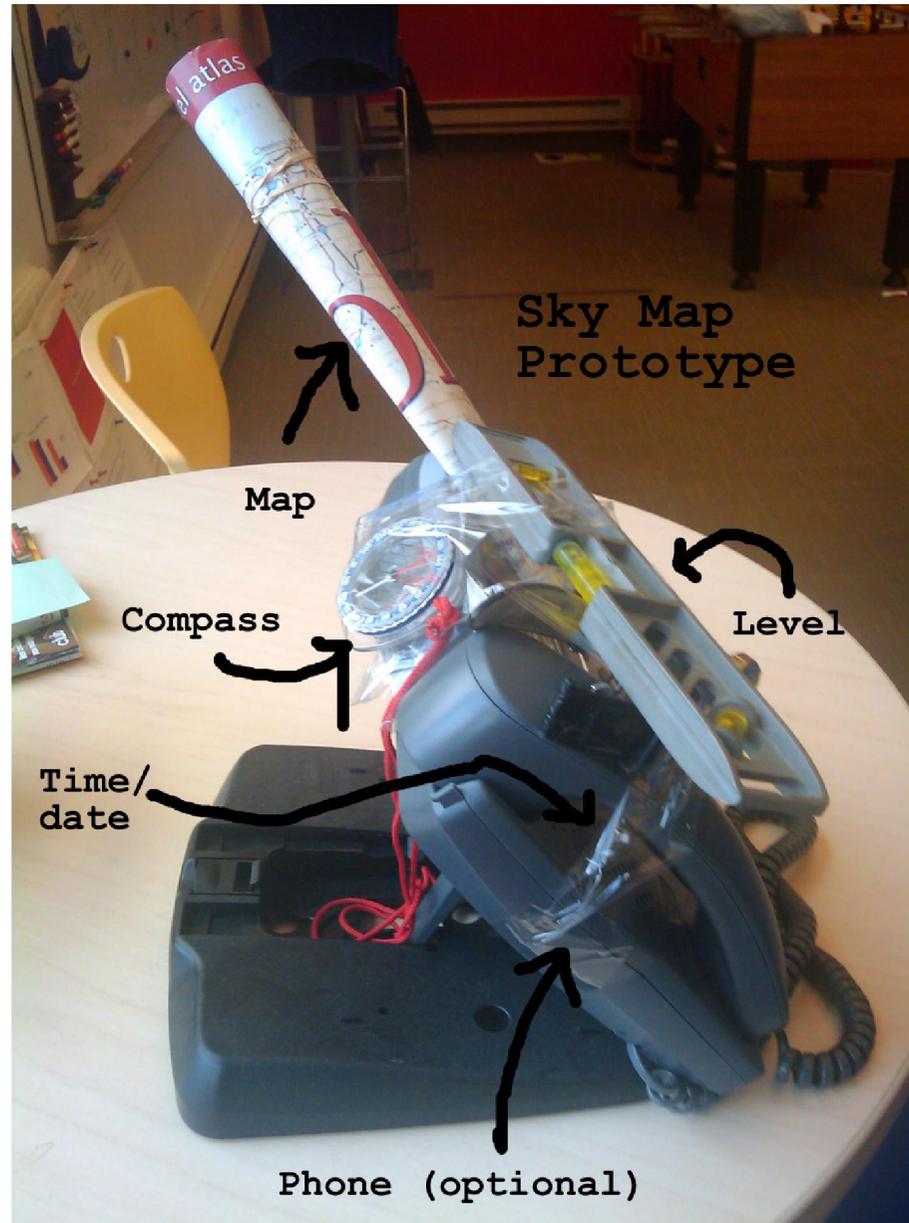
# Le smartphone : un formidable raconteur d'histoires

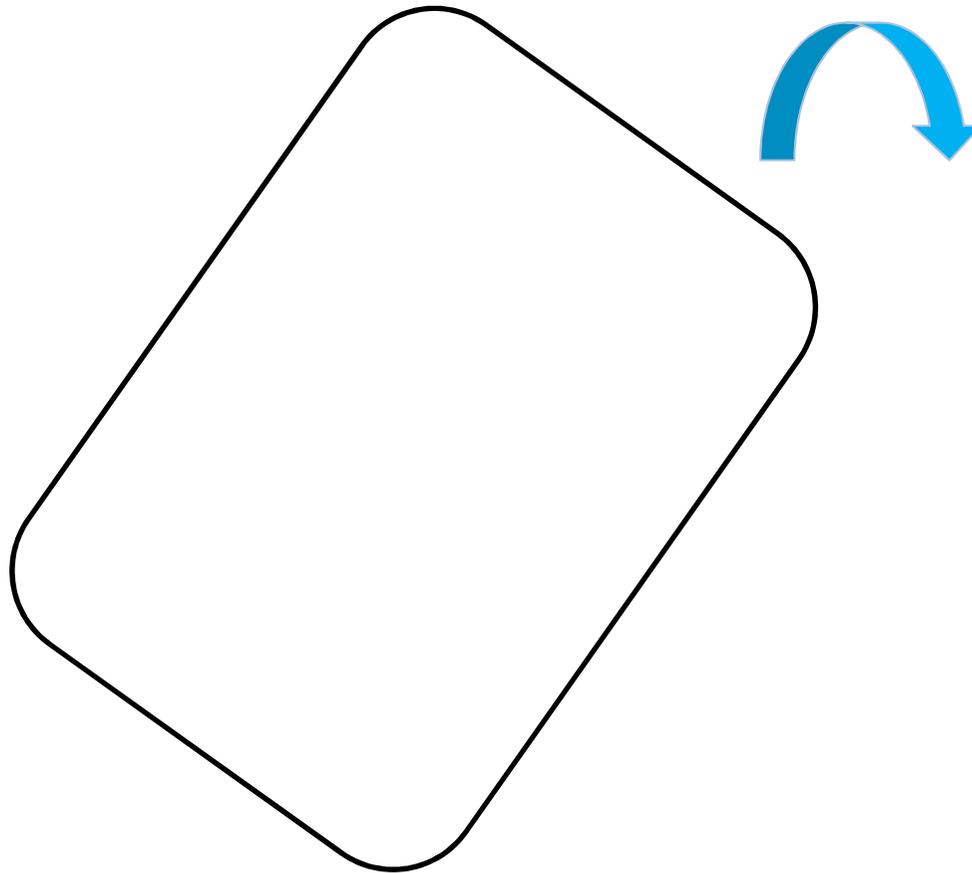


# Google Sky Map : un bref survol



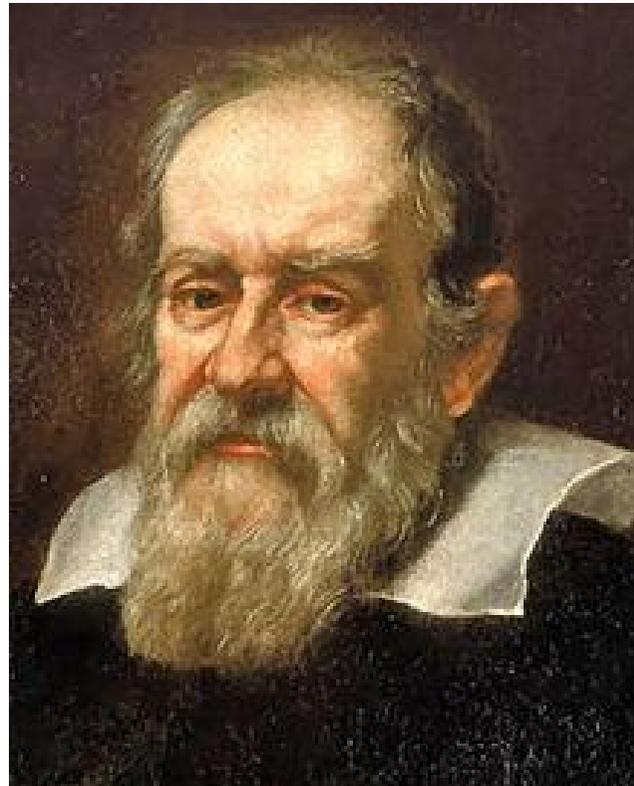
# Google Sky Map





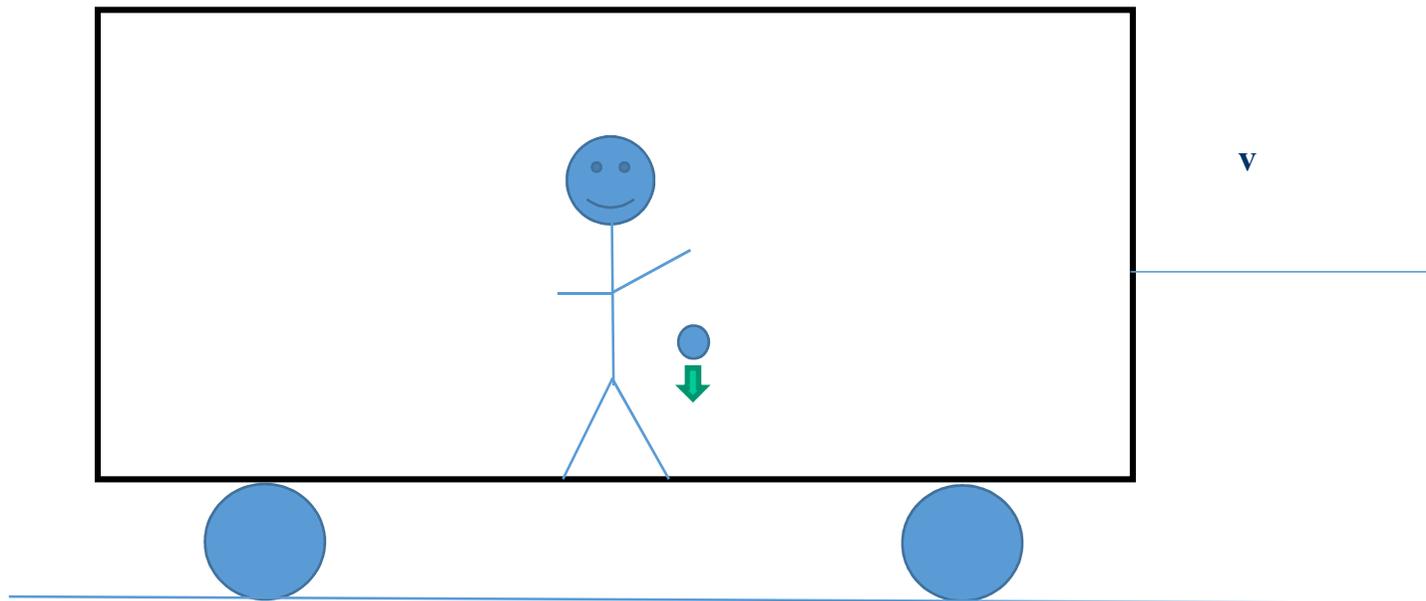


**Pourquoi Galilée (1564 - 1642) est-il considéré comme le père de la physique moderne ?**





## Principe de relativité :





### Loi de la chute des corps:

*« Tous les corps, la plume comme le plomb, ont même loi de chute. » (1602)*





## Loi de la chute des corps:





**APOLLO 15 :  
l'expérience de la plume et du marteau.**

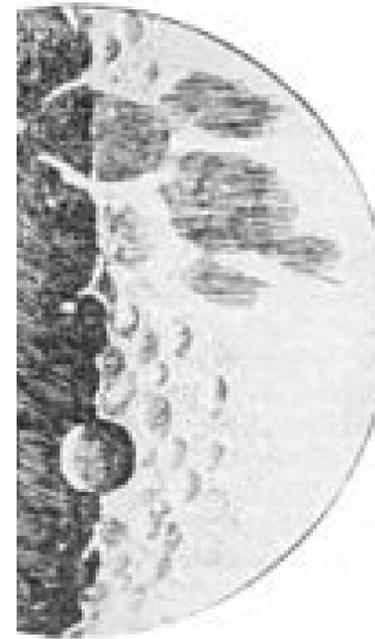




- ✓ **spéculations audacieuses**
- ✓ **expériences**
- ✓ **argumentation soignée**
- ✓ **utilisation des mathématiques**



## ✓ *La lunette*





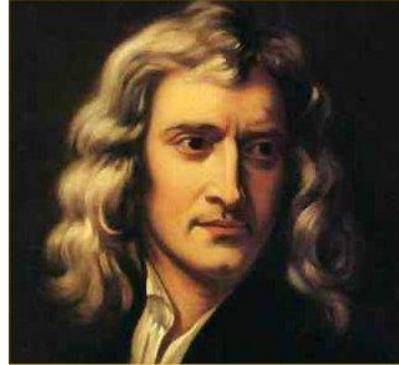


## **Le procès de Galilée (1633)**



# Galileo Galilei

## Io, Illégal, Agile



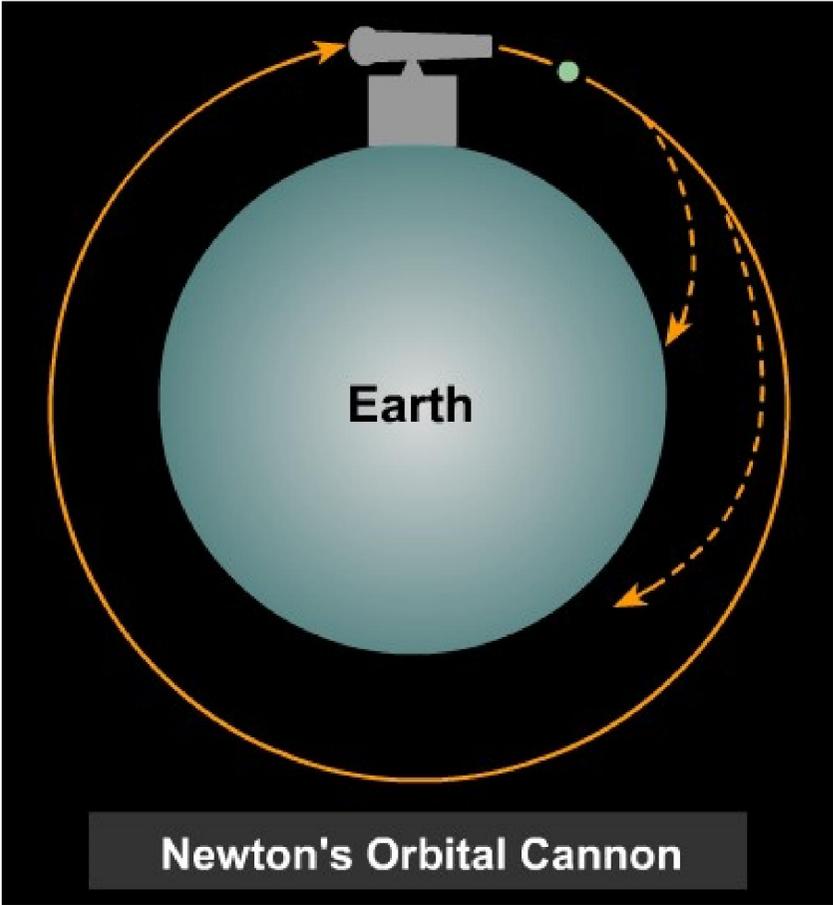
*« Si j'ai vu plus loin, c'est en montant sur les épaules de géants. »  
Newton (1642 – 1727)*

**2 géants:**

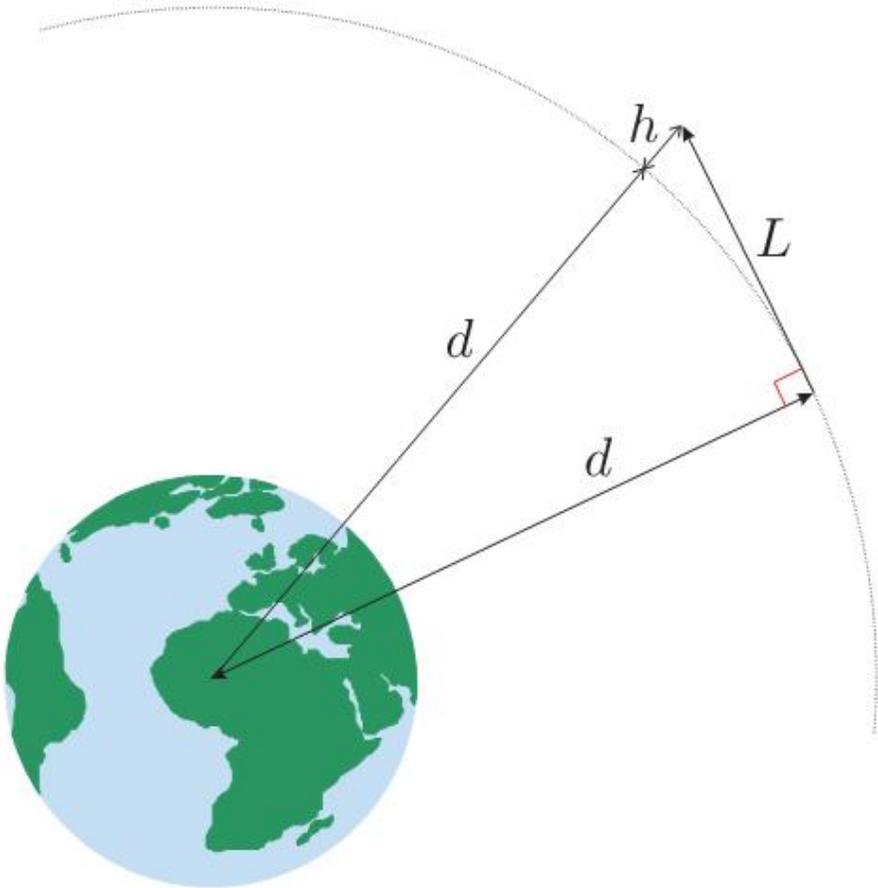
**1. Galilée**

**2. Kepler**

# La pomme de Newton

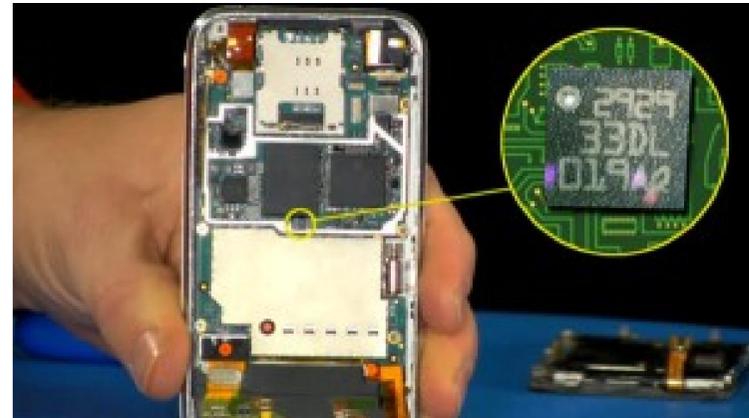
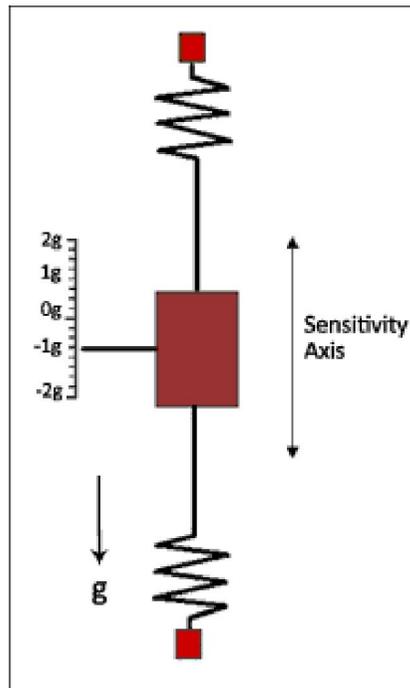


# La pomme de Newton



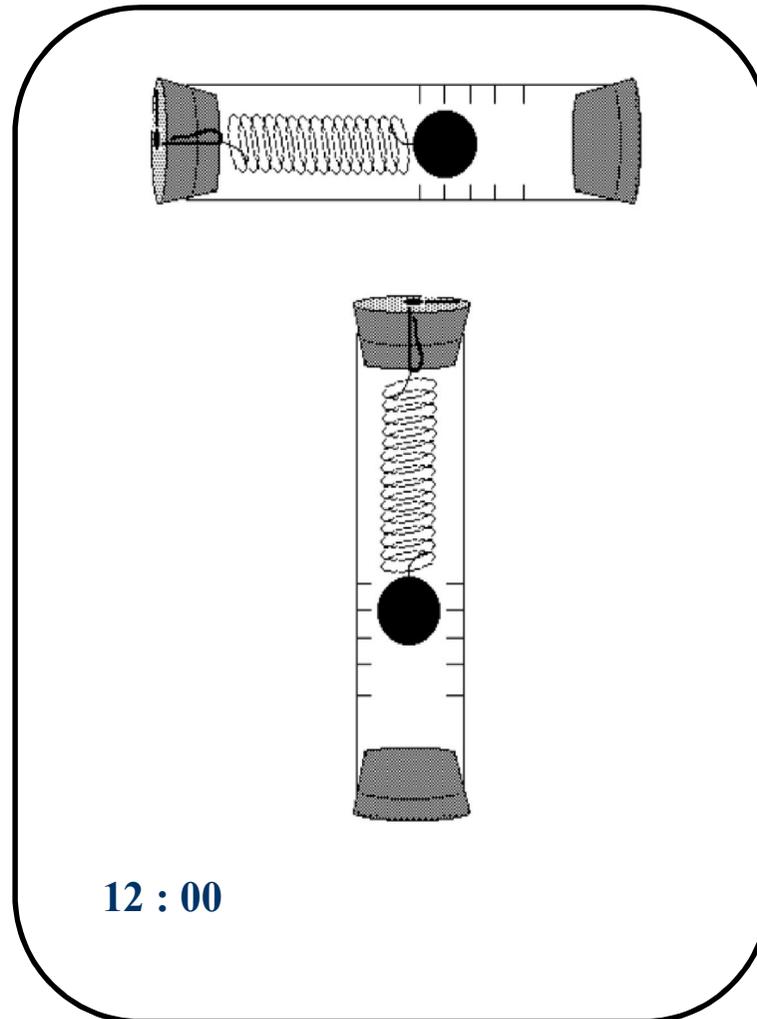


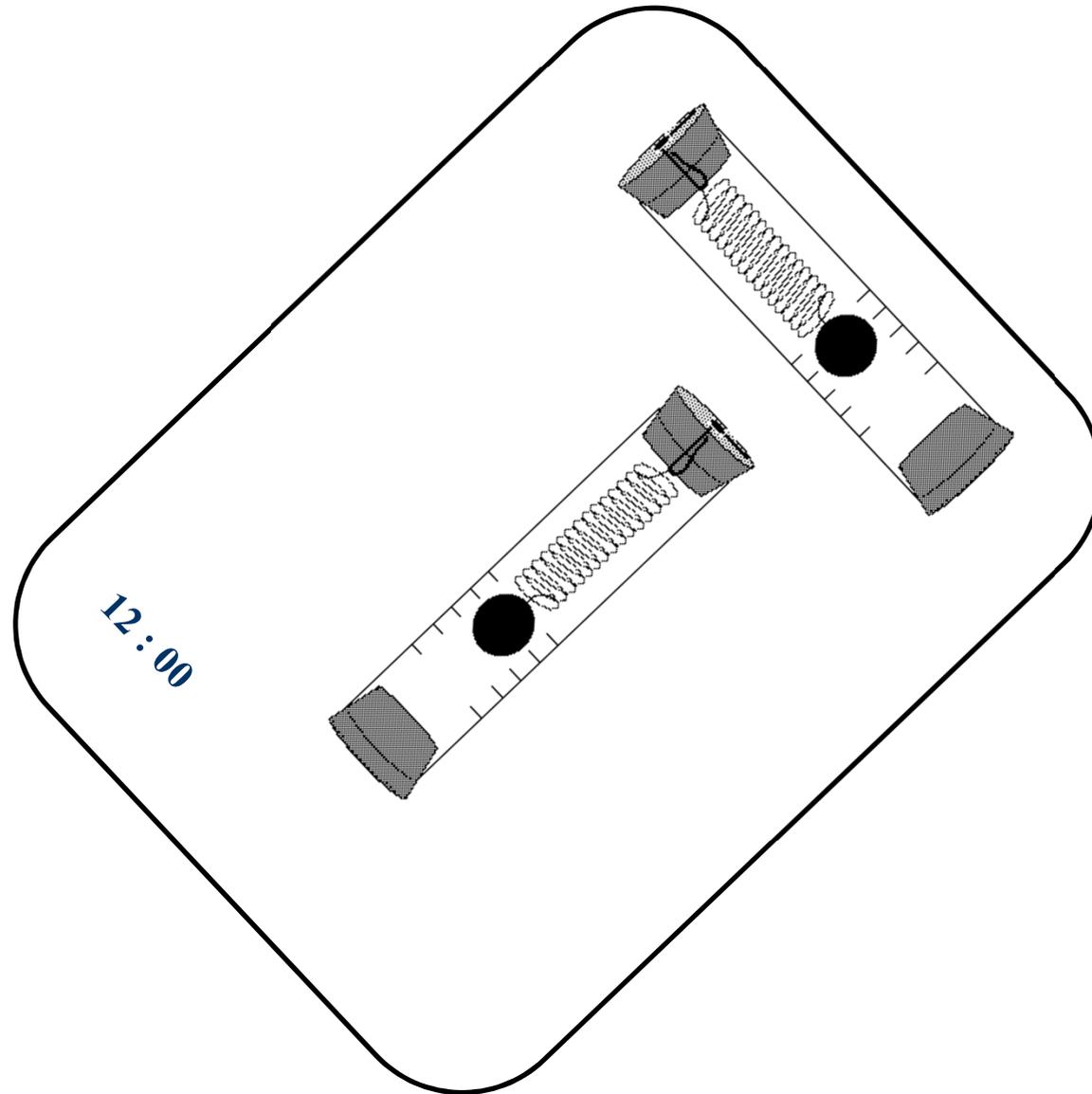
Pour un accéléromètre, la pesanteur est équivalente à une accélération comme une autre.

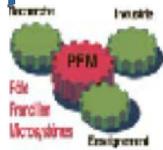


**Microsystème électromécanique (MEMS) :**

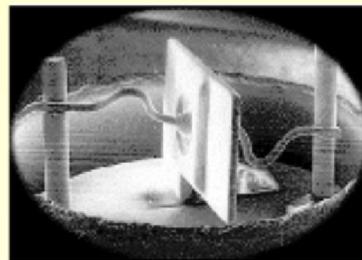
L'élément sensible est un système micro usiné sur silicium, constitué d'un peigne capacitif (condensateur à base de peigne) se déformant en fonction de l'action de la gravité.





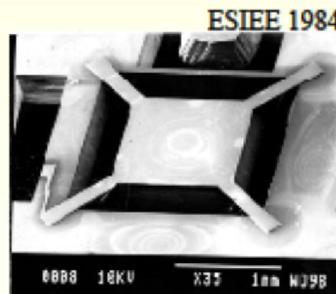


## Microsystème : une évolution progressive de l'électronique

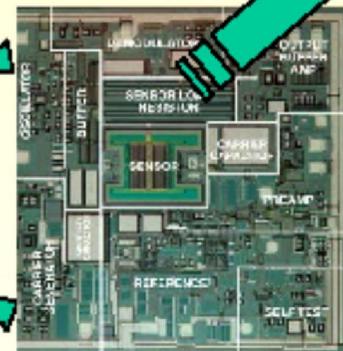


Transistor au germanium (en 1950)

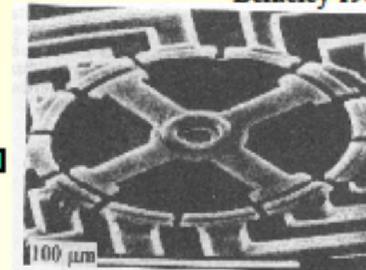
Traitement du signal



Capteur



Airbag ADXL (Analog Devices 2000)



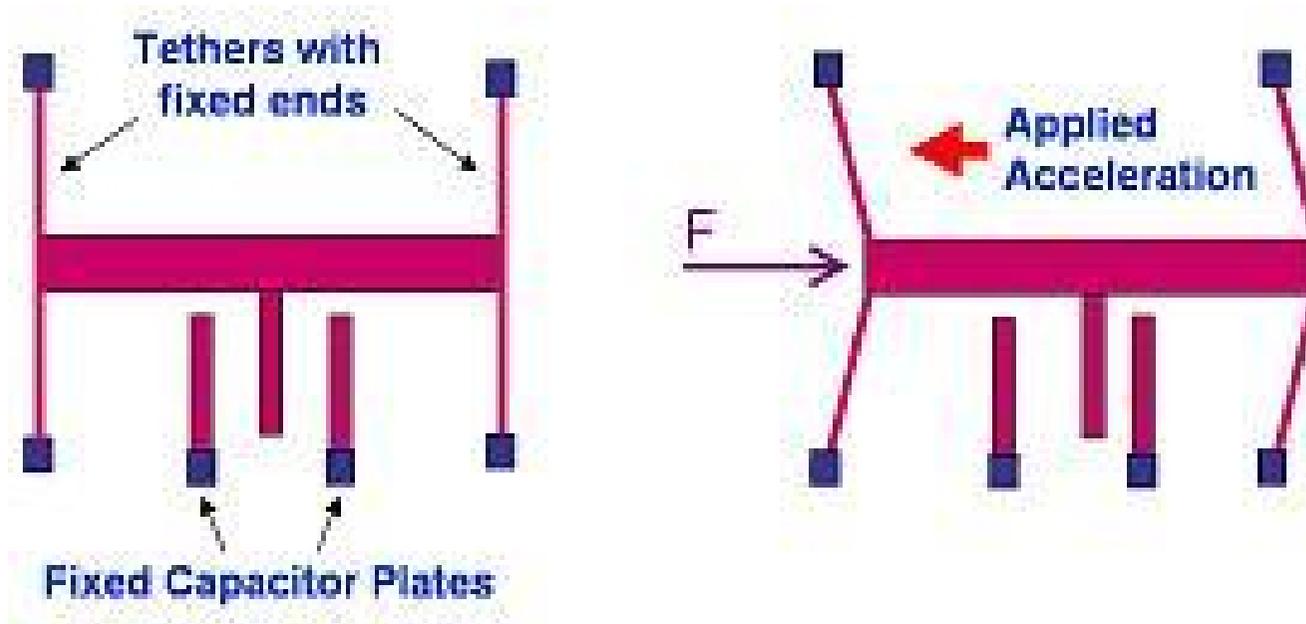
Berkeley 1988

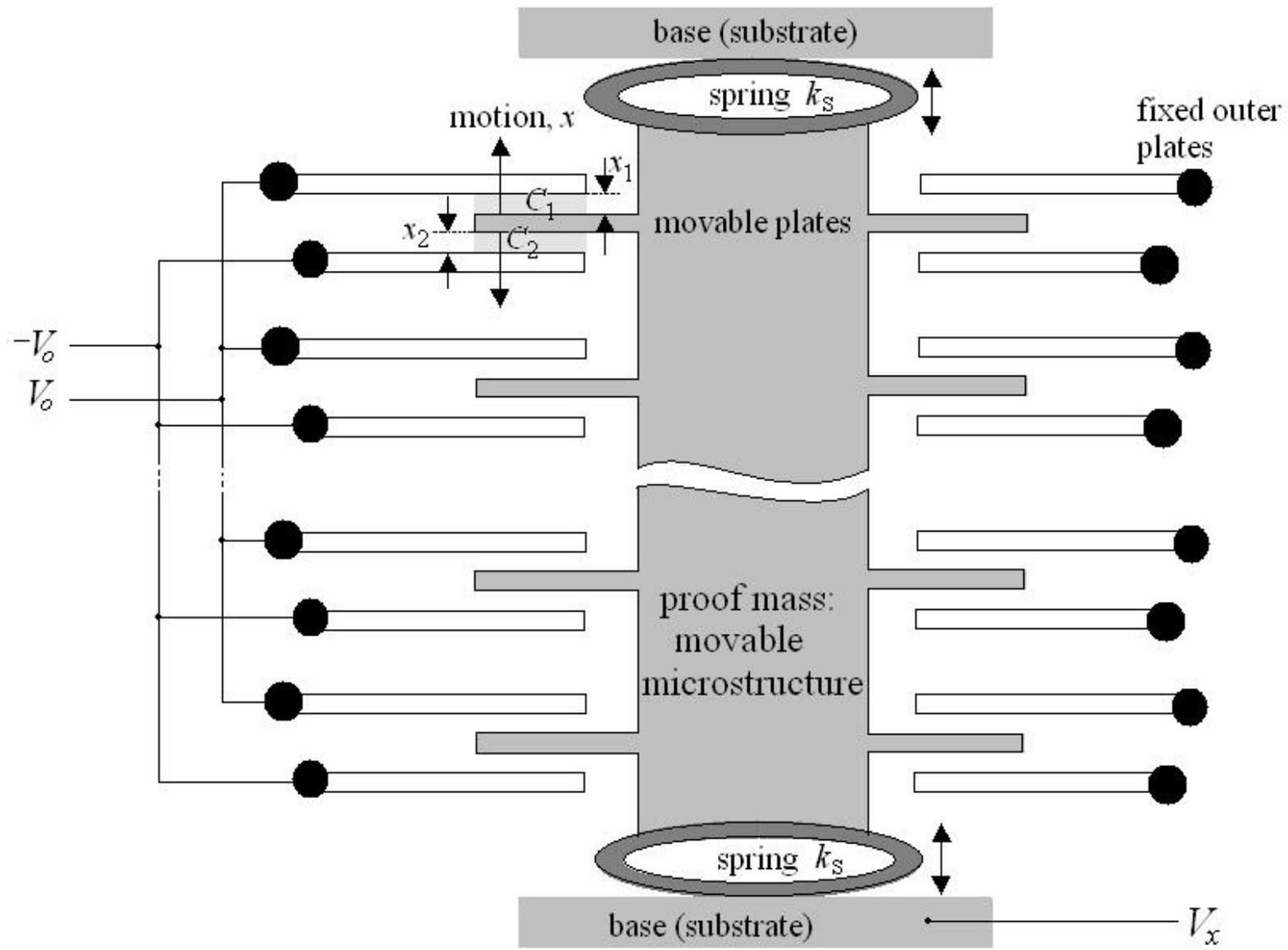
Actionneur

MEMS

Microsystème Electro Mécanique

Utilisation du Silicium pour intégrer des fonctions capteurs et actionneurs avec une électronique associée





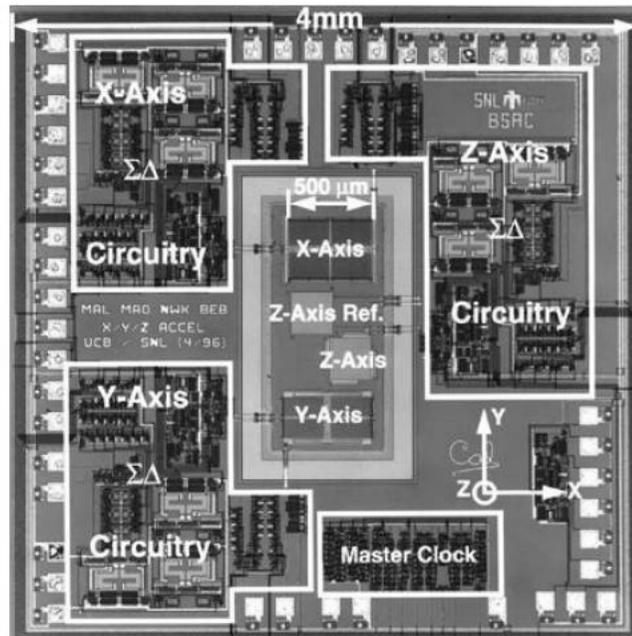


### **Capteur de déplacement capacitif:**

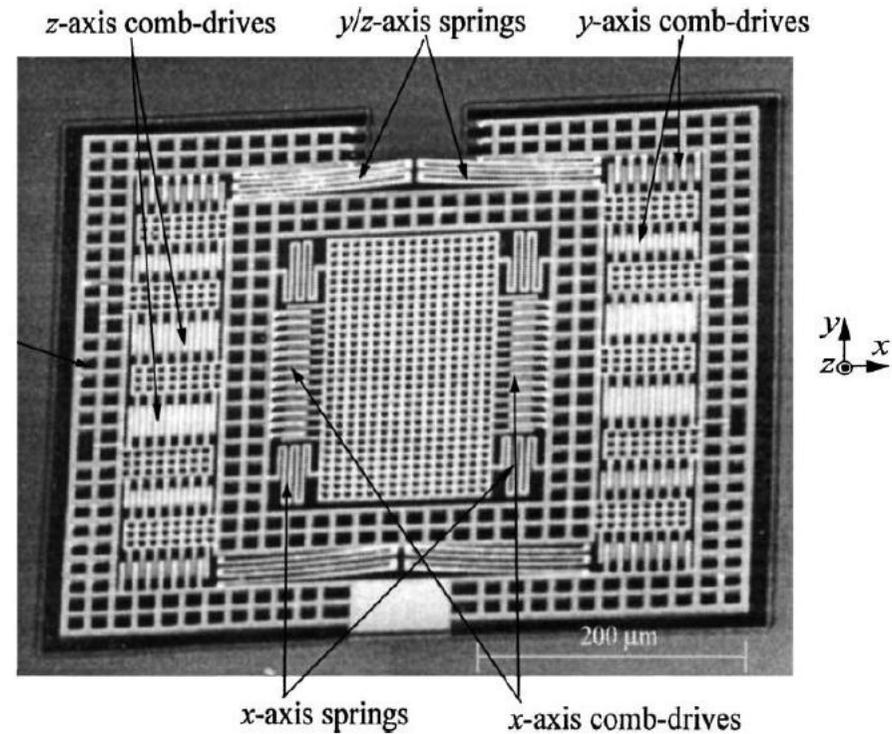
**La tension en volts dépend de la distance entre deux surfaces planes.**

**L'une de ces surfaces (ou les deux) est chargée avec un courant électrique.**

**Si la distance entre les plaques varie, la capacité électrique du système varie, ce qui peut être mesuré par une tension.**



a)



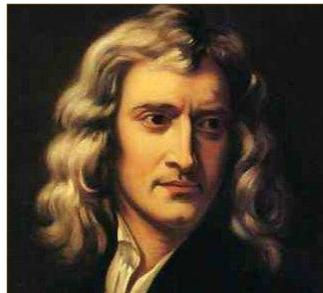
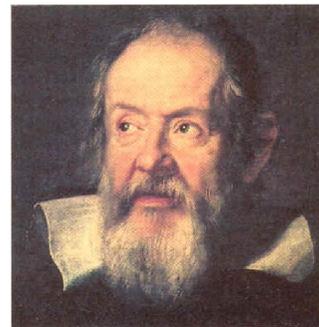
b)

- a) 3D accelerometer structure. It has three different sensors for x-/y-/z-axis acceleration and three different electronic circuitry for each axis.
- b) 3D accelerometer structure without electronics. All three sensors are linked with the same proof mass.



## Accélération / Gravitation

## Capacité / Condensateur







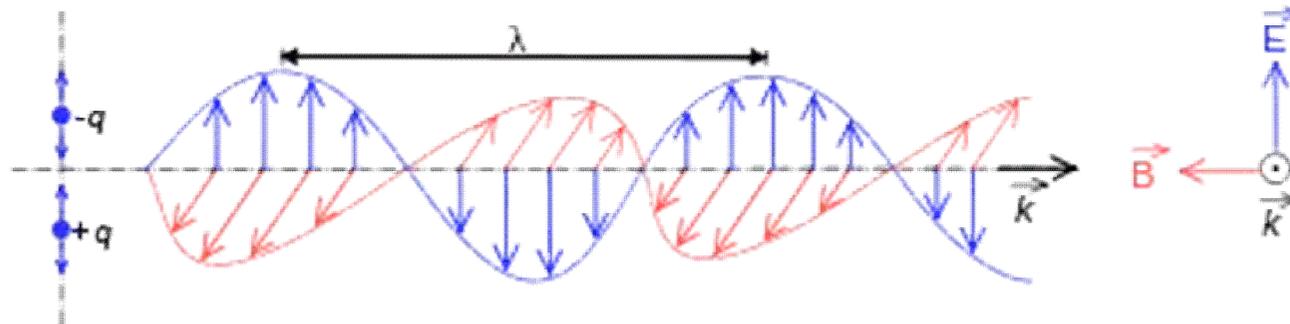
**James Maxwell entre 1855 et 1868 réalise la synthèse de tous les phénomènes connus en électromagnétisme.**

- ✓ **Concept de champ électromagnétique (physiquement réel)**
- ✓ **4 équations fondamentales**
- ✓ **Variation du champ électromagnétique en fonction des sources (charges fixes ou mobiles)**



## Nouvelles prédictions de la théorie de Maxwell :

1. L'oscillation de la charge produit un champ électrique variable, qui est toujours accompagné d'un champ magnétique variable.
2. Le champ électrique et le champ magnétique propagent une onde : il s'agit de l'onde électromagnétique.
3. La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est celle de la lumière.





**Hertz (1887) : produit des ondes électromagnétiques avec une bobine à induction**

**La célérité de ces ondes mesurée est proche de  $c$  (conformément à la théorie de Maxwell)**

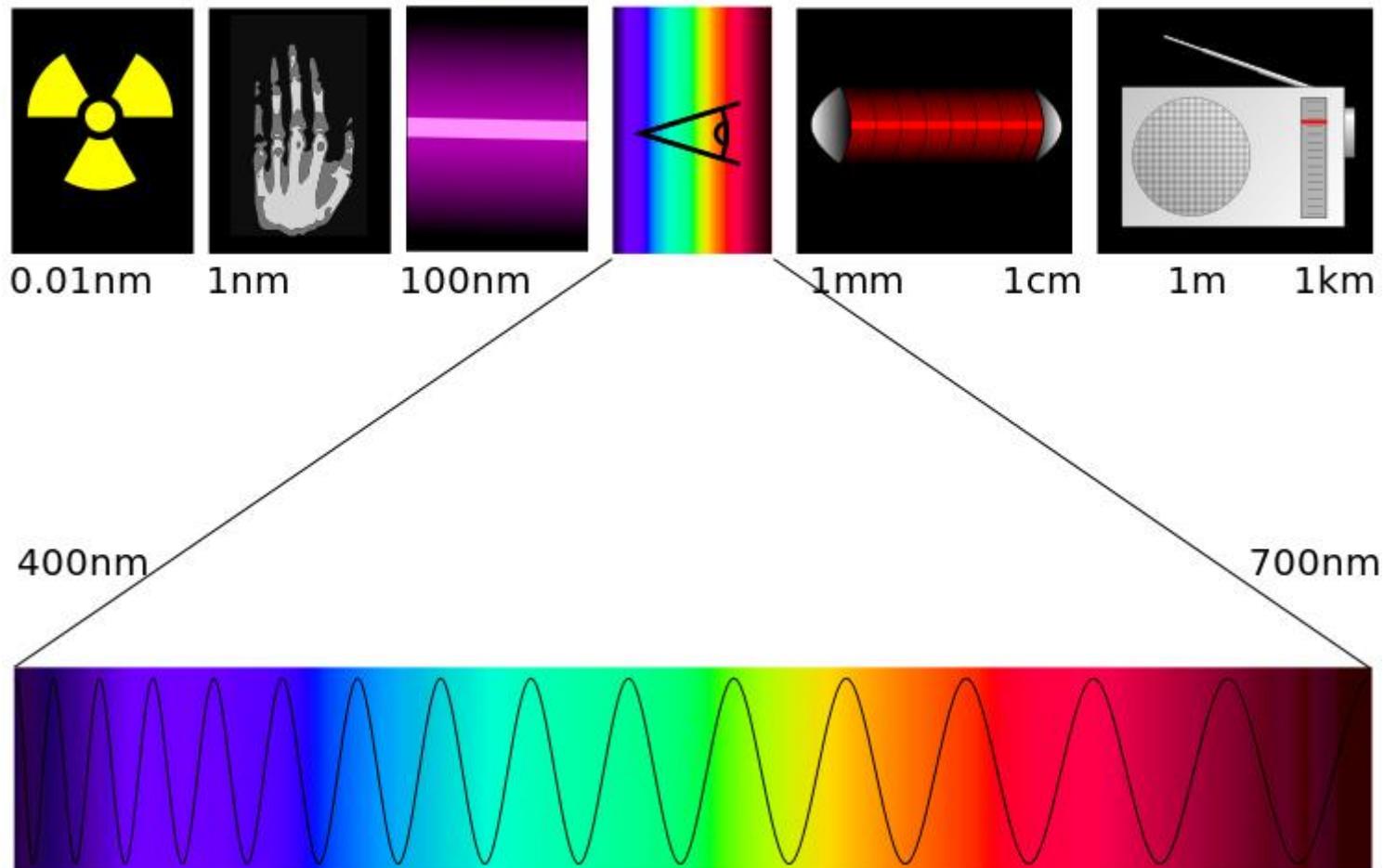


**La lumière visible est une onde électromagnétique mais toutes les ondes électromagnétiques ne sont pas visibles.**

**Maxwell a réussi à unifier par les mêmes lois physiques l'optique et l'électromagnétisme grâce à un nouveau concept, le champ (qui n'existait pas pour le physicien du début du XIX<sup>e</sup> siècle).**

**Le modèle mécanique (basé sur des forces agissant entre particules matérielles) a été remplacé par celui du champ.**

# Une brève histoire des ondes électromagnétiques





## Domaines du spectre électromagnétique

On découpe habituellement le spectre électromagnétique en divers domaines selon les longueurs d'onde et le type de phénomène physique émettant ce type d'onde:

**Ondes radio:** Oscillations d'électrons au sein d'un circuit électrique comme une antenne.

**Micro-ondes:** Oscillations d'électrons au sein de composants électriques spécifiques (comme une diode Gunn par exemple).

**Infrarouge:** Oscillations de particules, transitions d'électrons de valence au sein d'atomes ou de molécules.

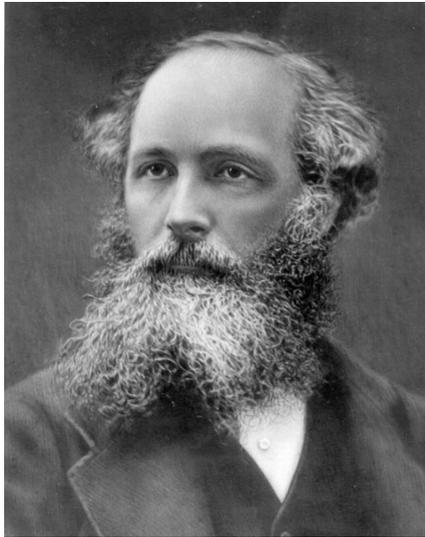
**Visible:** Transitions d'électrons de valence de haute énergie qui ont la particularité d'être détectées par l'oeil humain.

**Ultraviolet:** Transitions d'électrons de valence de plus haute énergie encore, et donc non observables par l'oeil humain.

**Rayons X:** Transitions d'électrons au sein d'un atome ou accélération d'électrons libres de haute énergie.

**Rayons gamma:** Décomposition radioactive d'un noyau instable, de façon spontanée ou sous l'effet d'une accélération au sein d'un accélérateur de particules.

## De Maxwell et Einstein à la localisation GPS



**4G**

**Wi-Fi**

**Bluetooth**

**GPS**



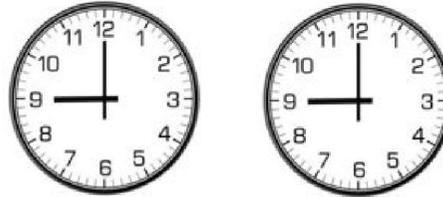
**Déroulons un exemple d'utilisation de Shazam :**

**Que se passe-t-il entre l'écoute du morceau de musique et son identification ?**

## Deux types de désynchronisation



Soient deux horloges H1 et H2 initialement synchronisées.



Si après les avoir éloignées l'une de l'autre, on les compare à nouveau et qu'on constate un décalage dans les temps indiqués, quelles causes possibles ?

✓ L'une des horloges (ou chacune d'elles) s'est dérégulée et ne mesure plus l'heure exacte.

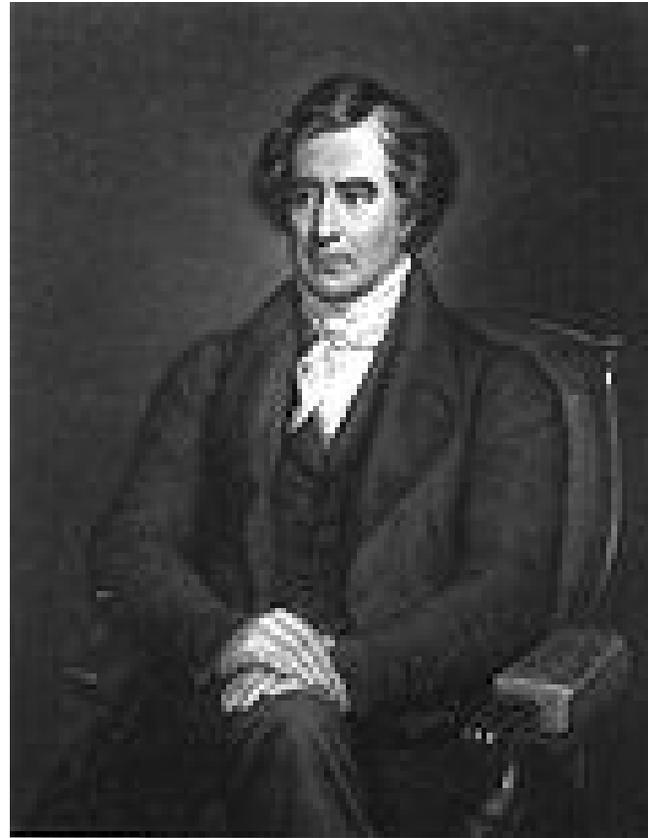
- Mauvaise synchronisation
- Rythmes différents au départ (inexactitude)
- Rythmes changeants (instabilité)

=> Effet classique: temps absolu + dérèglement d'horloge

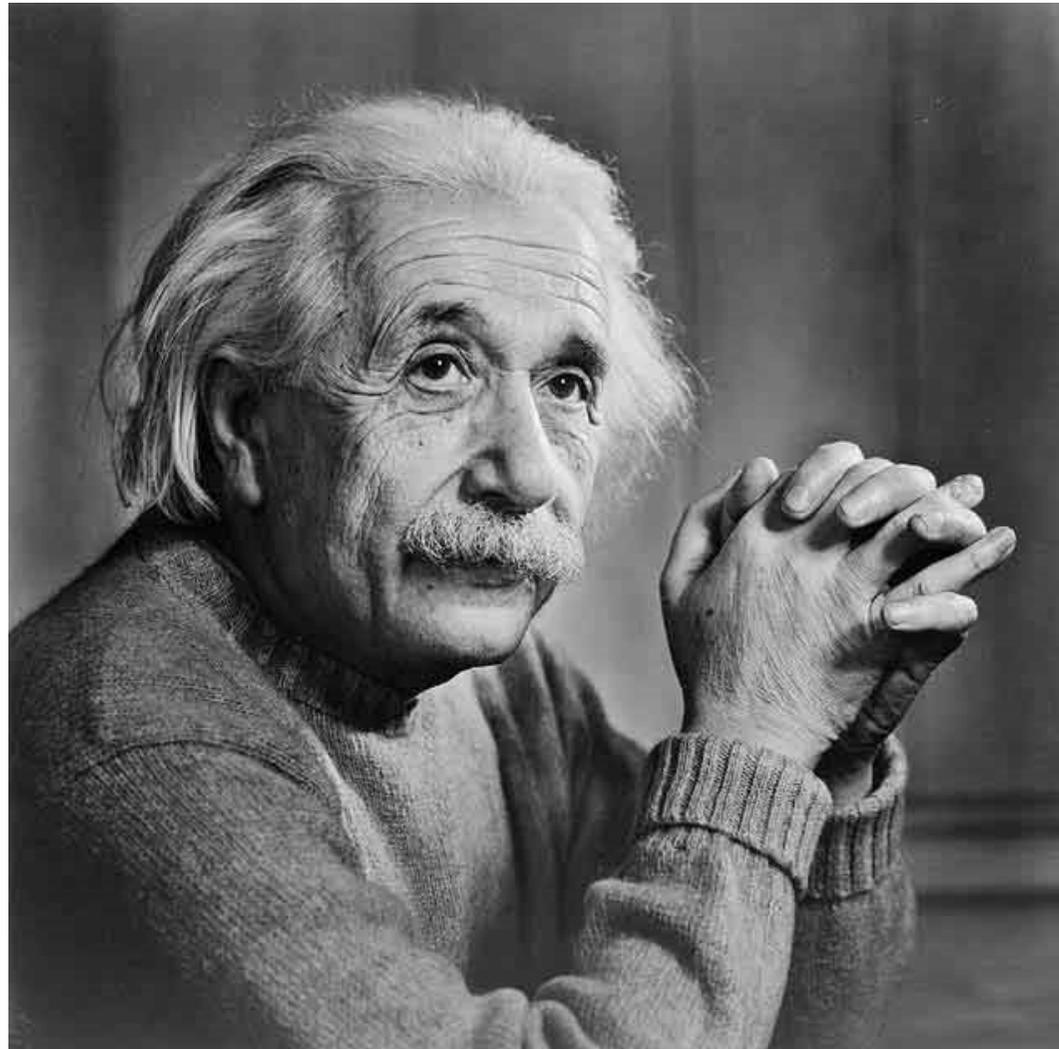
✓ Chacune des horloges fonctionne parfaitement et continue à mesurer correctement le temps écoulé.

=> Effet relativiste: temps relatif + pas de dérèglement d'horloge

## Les prismes de François Arago (1810)



## Albert Einstein (1879 – 1955)

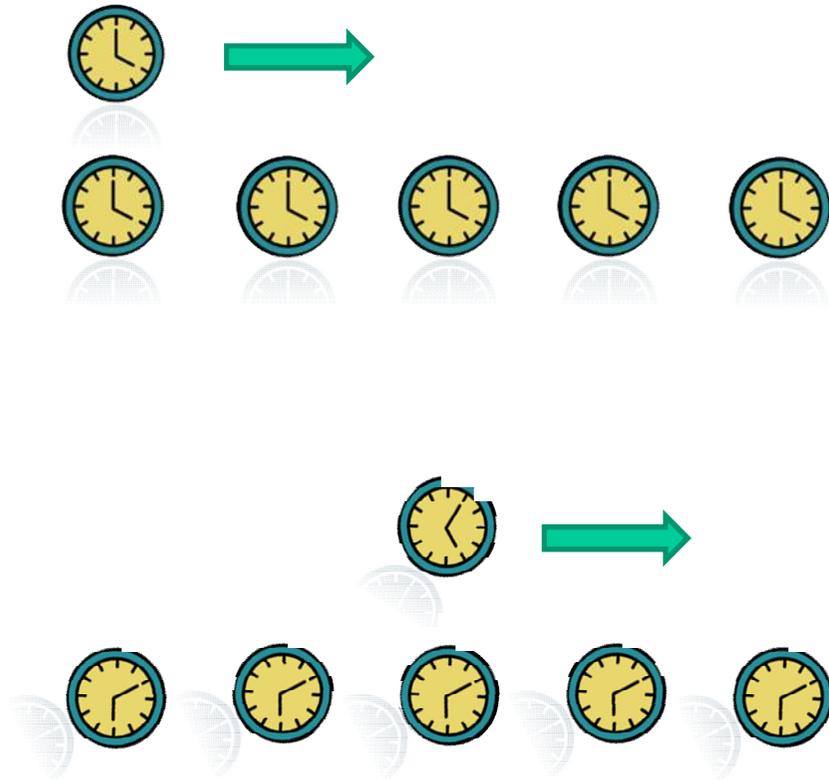




- ❑ Existence d'une vitesse limite : constante structurelle qui couple le temps à l'espace
- ❑ Valeur : environ 300000 km/s

➤ L'éther n'existe pas !

# Principes de la relativité restreinte





### § 4. La signification physique des équations obtenues pour les corps rigides et les horloges en mouvement

**Si au point A, il y a deux horloges synchronisées et si nous déplaçons l'une d'elles à une vitesse constante selon une courbe fermée qui revient en A, le déplacement étant complété en t secondes, alors à son arrivée en A, cette dernière retardera de  $[\frac{1}{2} t v^2/c^2]$  secondes sur l'horloge immobile.**

*Einstein*



Le *temps propre* est le temps cumulé mesuré par une horloge parfaite.

Une conséquence clé de la relativité:  
*la multiplicité des temps propres*



✓ *Le voyage de Paul à 90% de la vitesse  $c$*

**Paul part à bord d'une fusée très rapide qui fait un voyage aller-retour depuis la Terre tandis que son jumeau Pierre reste sur Terre.**

**Si le voyage dure 24 mois pour Paul, il durera 31 mois de plus pour son jumeau Pierre resté sur Terre.**

**Donc à son retour, Paul sera plus jeune que Pierre de 31 mois.**





*« Sans relation à rien d'extérieur, le temps absolu, vrai, mathématique, s'écoule uniformément et s'appelle la durée. »*

*Newton (1687)*

*« Si nous placions un organisme vivant dans une boîte ... on pourrait s'arranger pour que cet organisme, après un temps de vol aussi long que voulu, puisse retourner à son endroit d'origine, à peine altéré, tandis que les organismes correspondants, qui sont restés dans leur position initiale auraient depuis longtemps cédé la place à de nouvelles générations. Car pour l'organisme en mouvement, la grande durée du voyage était un court instant, à condition que le mouvement ait été effectué quasiment à la vitesse de la lumière. »*

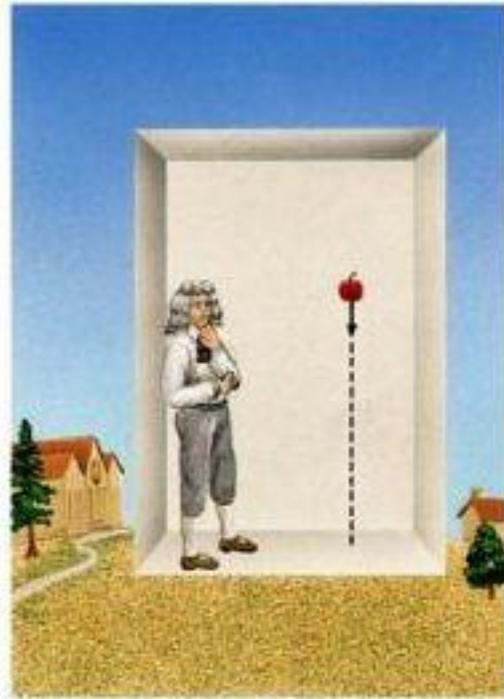
*Einstein (1911)*



**Géométrie spatiale**



**Chronogéométrie**



*Sommes-nous immobiles dans l'ascenseur qui baigne dans le champ de pesanteur terrestre ou sommes-nous en mouvement accéléré vers le haut ?*

*Réponse d'Einstein : il est localement impossible de faire une quelconque différence !*



*Comment passe-t-on du principe  
d'équivalence à l'effet Einstein ?*





**Paul séjourne une semaine à 5000 mètres d'altitude tandis que Pierre reste au niveau de la mer.**

**A son retour, Paul sera plus vieux que Pierre de 302 nanosecondes.**

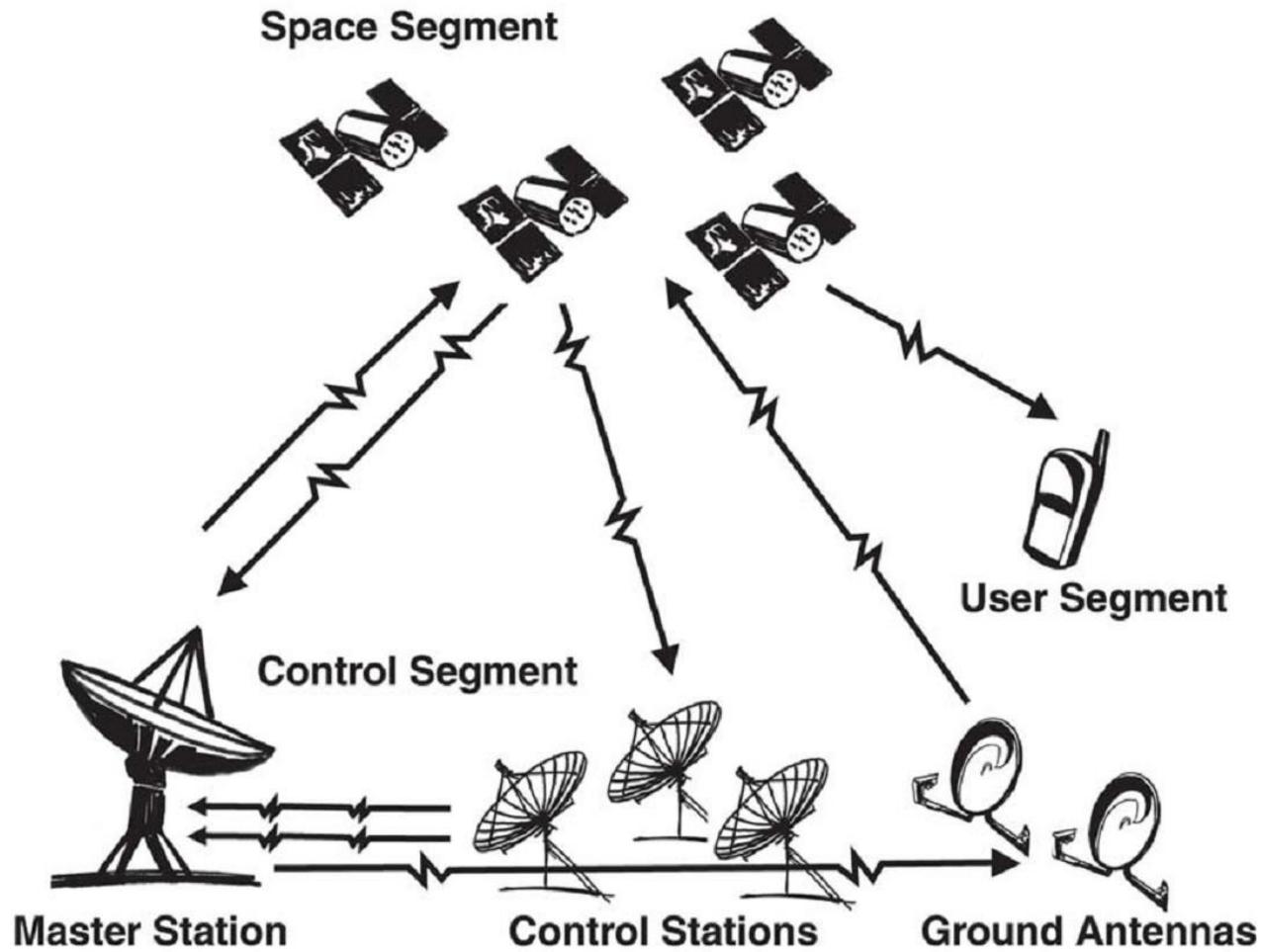




## *Expérience de Hafele et Keating (1971)*



# Le système GPS





**24 Satellites répartis en 6 plans inclinés**

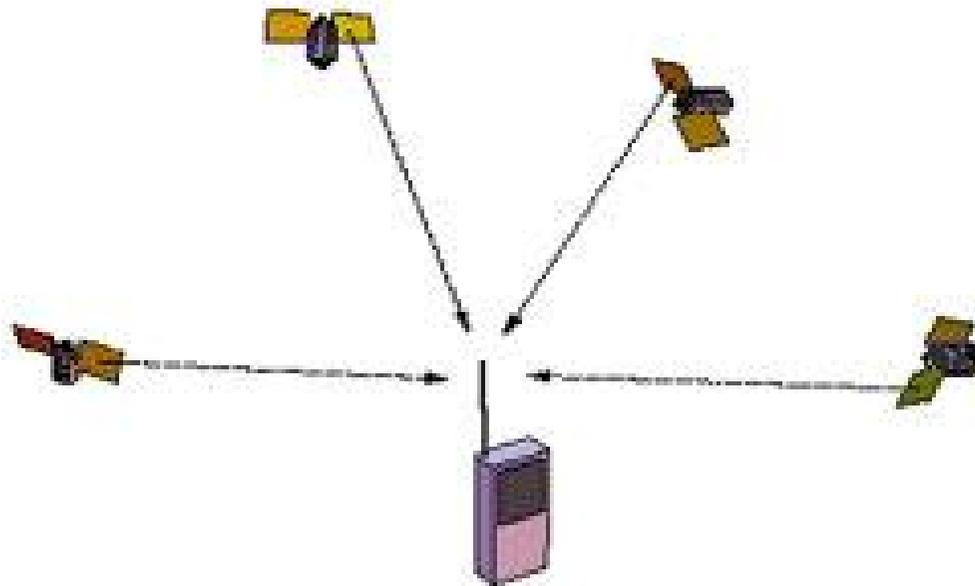
**Altitude de 20 000 km**

**Vitesse de 14 000 km/h**

**Au moins 4 satellites en visibilité en tout point du globe**



# Les principes de la localisation GPS





**On détermine sa propre position à partir de signaux provenant de positions connues.**

**1. La distance  $D$  entre la position de mon récepteur et l'émetteur (satellite) est donnée par :**

$$D = v \times \Delta t,$$

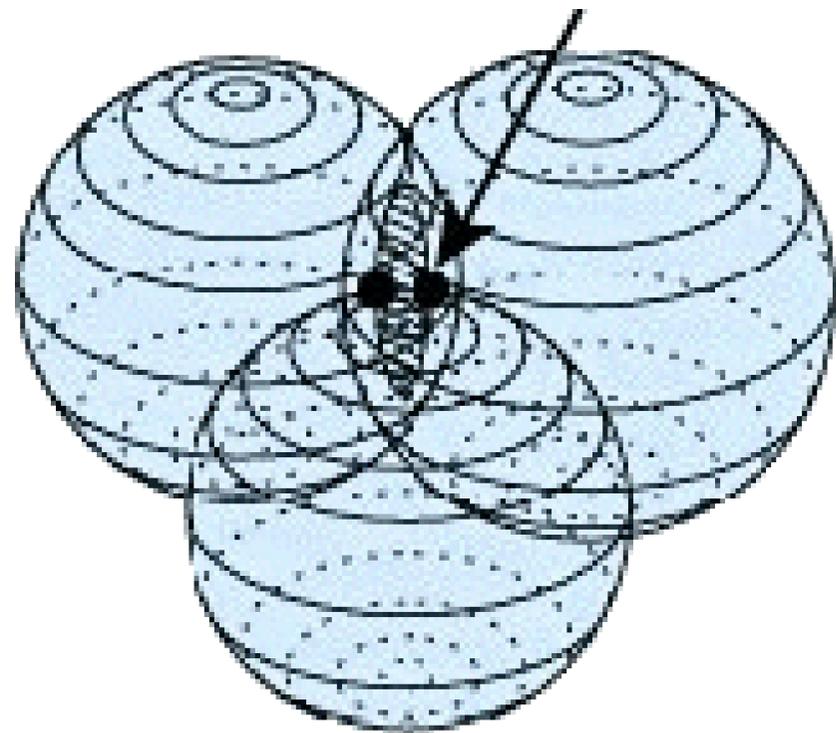
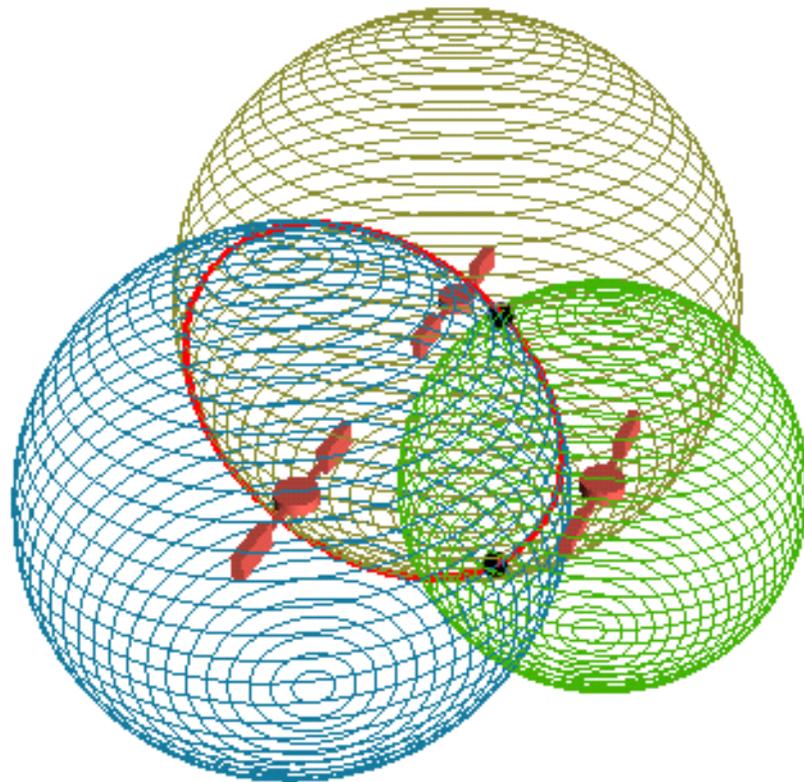
**où  $v$  est la vitesse du signal et  $\Delta t$  la durée du trajet du signal.**

**2. Comment connaît-on  $\Delta t$  ?**

**$\Delta t$  = différence entre l'instant où le signal est reçu et celui où il a été émis**

**3. Comment connaît-on la vitesse  $v$  du signal ?**

**$v$  = vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s dans le vide)**





**Pourquoi ne pas utiliser une simple horloge à quartz telle que celle qui équipe nos montres ?**

**Une montre à quartz va dériver de quelques secondes au bout d'un mois, donc typiquement de quelques dixièmes de seconde par jour.**

**Cela correspond à une erreur en position pour le récepteur GPS de  $c\Delta t$ , soit environ 100 000 kilomètres par jour !**

**En fait on a besoin d'une horloge qui soit capable de fournir une heure à quelques nanosecondes près.**



**L'horloge du récepteur GPS ne peut pas être aussi précise que celles à bord des satellites.**

**Comment faire pour connaître son erreur (retard ou avance) et la corriger ?**

**Il nous faut un quatrième satellite !**



Chaque horloge subit une dérive physique (qui n'a rien de relativiste), ce qui signifie que son taux d'avancement n'est pas exactement la valeur correcte.

1. Une horloge atomique se décale d'au moins 10 nanosecondes par jour.
2. Cela correspond à une erreur sur la position du récepteur GPS de  $c\Delta t$ , soit plusieurs mètres.
3. Il faut donc recalibrer les horloges régulièrement (plusieurs fois par jour) par les stations au sol.



- ✓ Désynchronisation des horloges des satellites due au mouvement ( $v = 14000$  km/h)
- ✓ Désynchronisation des horloges au sol due au mouvement ( $v = 1700$  km/h)
- ✓ Désynchronisation des horloges des satellites due à la gravitation ( $r = 26500$  km)
- ✓ Désynchronisation des horloges au sol due à la gravitation ( $r = 6378$  km)

**Au total ? Une avance de 38 microsecondes par jour.**

**Au bout d'une minute seulement, l'erreur serait de 8 mètres environ !**



- 1. L'heure d'émission du message envoyé par le satellite doit être corrigée en tenant compte de la désynchronisation relativiste de l'horloge (conséquence de la vitesse et de la gravitation)**
- 2. Le terme constant peut être compensé en décalant légèrement la fréquence des horloges atomiques embarquées.**
- 3. La correction correspondant au terme variable (excentricité des orbites) est appliquée par le récepteur GPS.**



**Pour le GPS, les effets relativistes sont à prendre en compte pour des vitesses d'environ 1 millionième de celle de la lumière !**

## De Maxwell et Einstein à la localisation GPS

