Naines blanches, pulsars et autres objets compacts

3. L'équilibre d'une étoile (compacte ou « ordinaire »)

Fabrice Mottez
LUTH, Observatoire de Paris, CNRS, et Univ. Paris Diderot

Festival d'Astronomie de Haute Maurienne, août 2007.

Des étoiles

Masse solaire : $M_s = 2\ 10^{30}$ kg
Masse stellaire : $4\ 10^{29}$ kg < M <100 M_s

Rayon solaire RS = 700 000 km.
Rayon stellaire : de 10km (étoile à neutrons) à qq 10 UA (supergéantes).

Densité du Soleil ρ_s~1 g cm-3 (comme l'eau)
Densité naine blanche $\rho \sim 10^{6}\ \rho_s$
Densité étoile à neutrons $\rho \sim 10^{15}\ \rho_s$
(plus que dans un noyau atomique !)

Température interne : qq MK
Température externe : qq 1000 K.

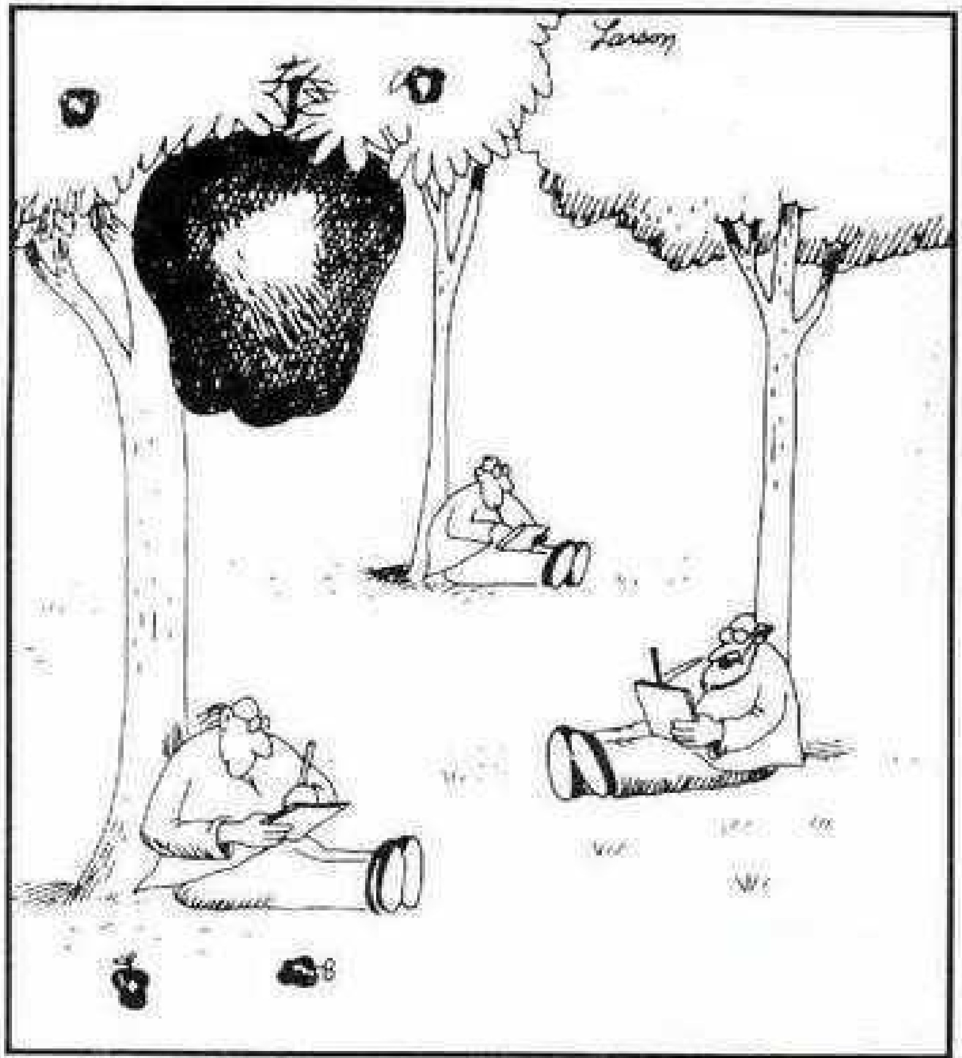
Amas ouvert d'étoiles NGC 1818 dans le grand nuage de Magellan.

Distance typique entre les étoiles : 1 pc.

Qu'est-ce qui fait tomber les pommes ?

Newton a montré que la force faisant tomber les pommes est aussi la force qui fait tourner les planètes.

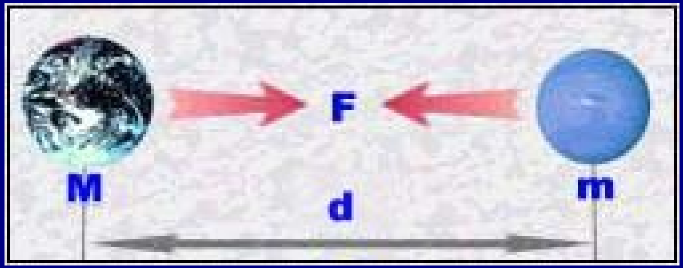
(C'était la première loi d'unification de la physique.)



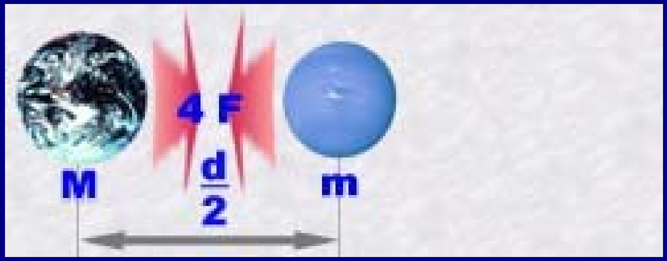
Non, rien pour le moment... Et toi, Newton ?

La gravitation, formule de Newton

- Force d'attraction entre objets ayant une masse.
- Newton : $F = G * M1 * M2/d^2$



Force gravitationnelle entre deux planètes.



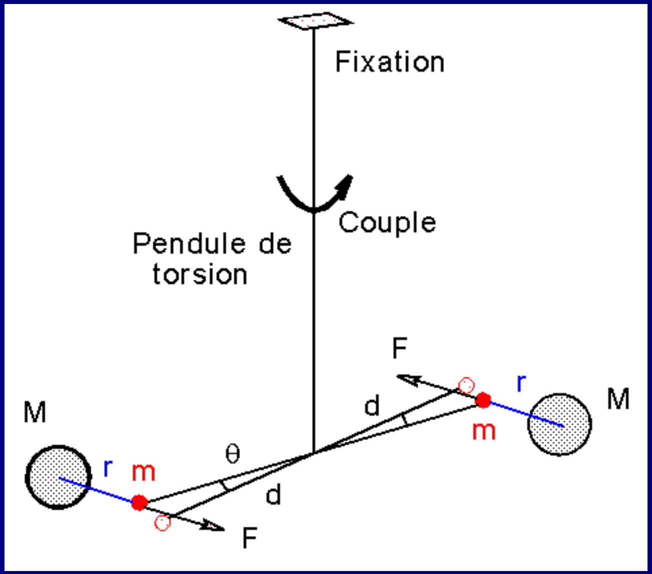
Si la distance est divisée par 2, la force est multipliée par 4.

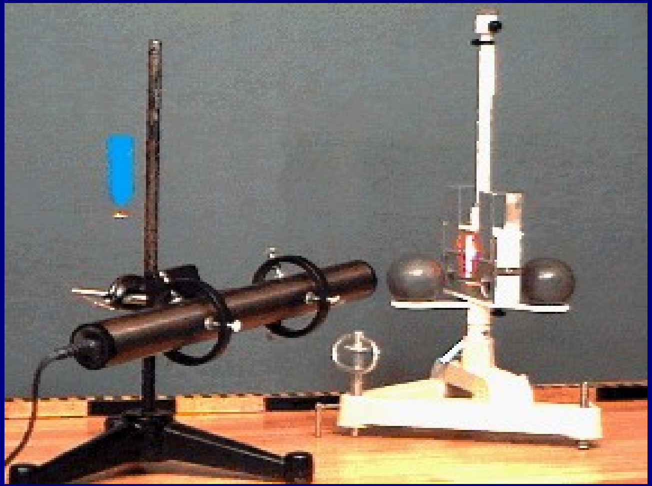
La première constante universelle: G

Mesure directe par Cavendish en 1798. Influence de 2 grosses boules de plomb (150kg) sur des petites billes, via pendule de torsion.

$G = 6{,}672\ 59 \times 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$

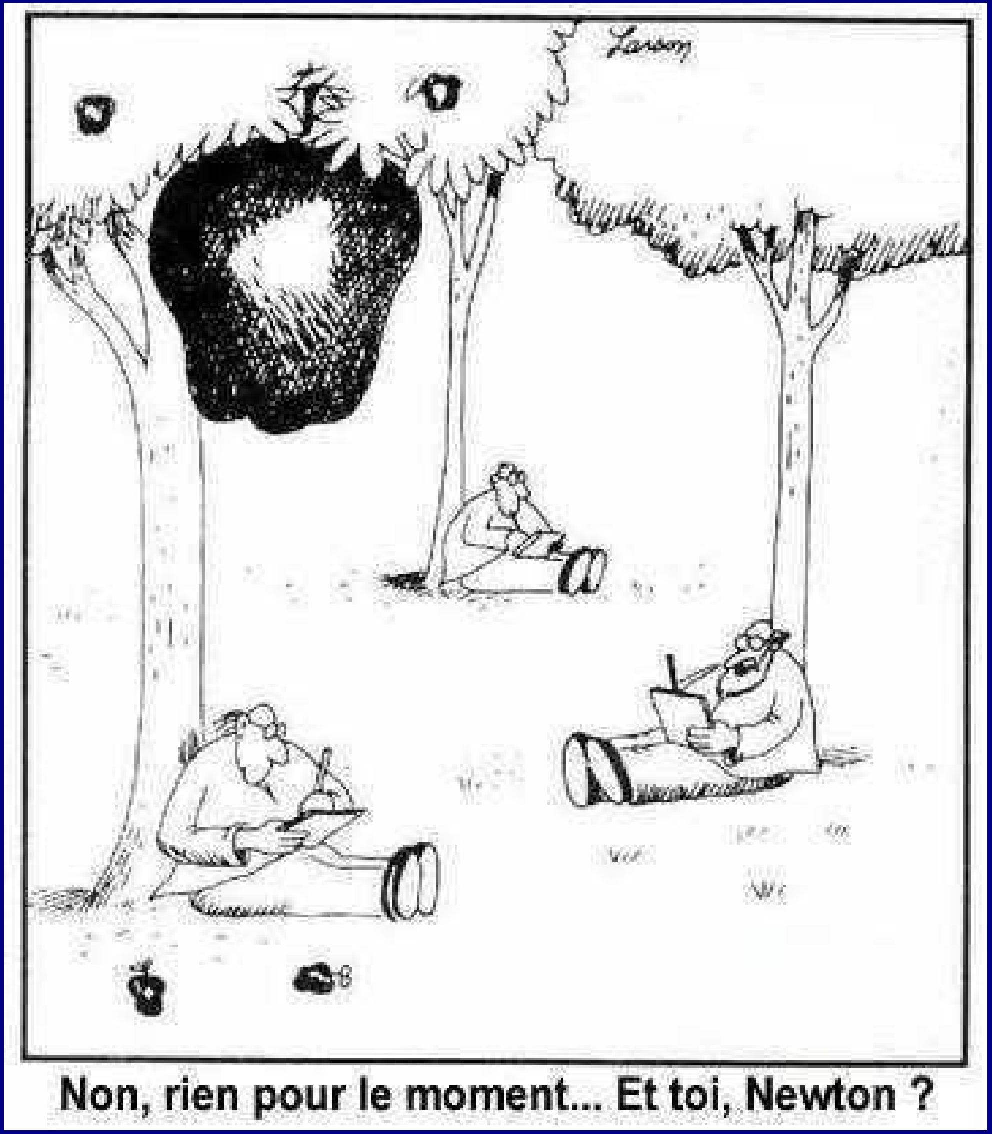
La force de gravitation est la plus faible de l'univers. On ne la ressent que lorsque l'effet des autres est quasi-nul. Se manifeste aux grandes échelles. Son domaine est réellement celui de l'astronomie.





Qu'est-ce qui fait tomber les pommes ?

La gravitation permet de considérer un astre comme un amoncellement de pommes s'attirant les unes les autres. On peut remplacer les pommes par d'autres objets pesants : atomes, molécules, électrons, protons et autres noyaux atomiques...
La gravitation peut donc expliquer la cohésion des astres.



La gravitation dans une étoile

- La gravitation agit à l'intérieur des astres et assure leur cohésion.
- Dans l'astre (supposé sphérique), la force de gravitation à la hauteur **r** s'appliquant à de la matière de masse **m** est causée par la masse **M(r)** contenue dans la sphère de rayon **r**.

$$\mathbf{F(r) = G\, m\, M(r) / r^2 = m\, g(r)}$$

La gravitation dans une étoile. Force par unité de volume.

- Les astronomes aiment bien les forces par unité de volume. Cela permet de décrire les choses « localement » aux alentours d'un petit volume.
- La force de gravitation $f = F/V$ par unité de volume $V = dS*dr$ fait intervenir la densité ρ de la matière.

$$f(r) = G\,\rho(r)\,M(r)\,/r^2 = \rho(r)\,g(r)$$

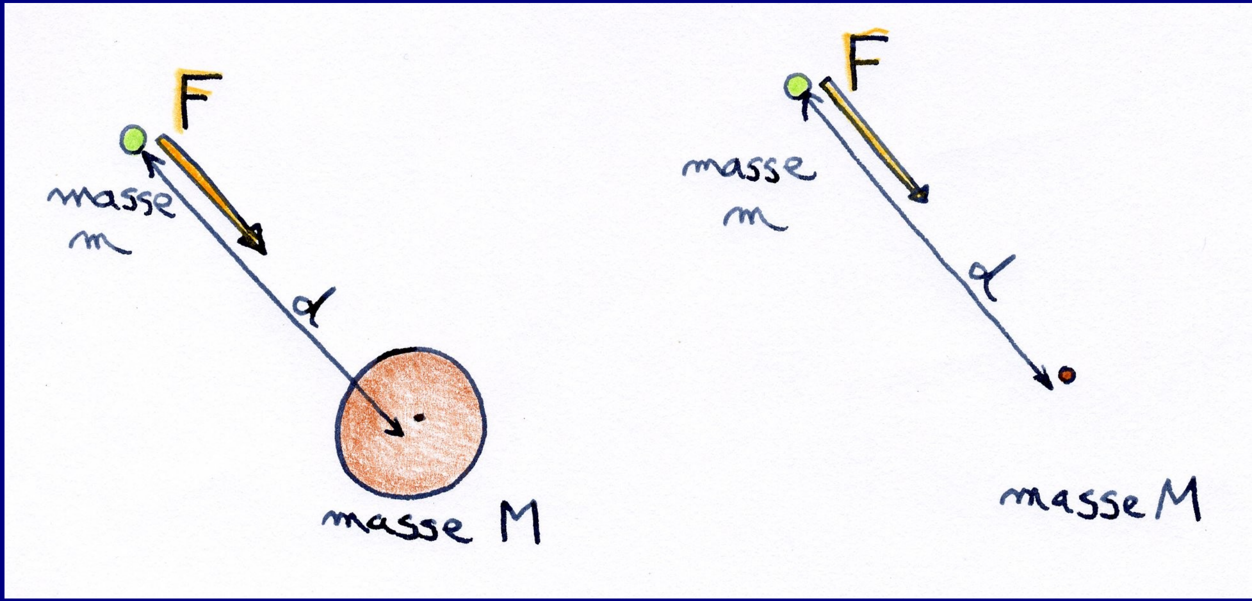
énergie gravitationnelle dans une étoile.

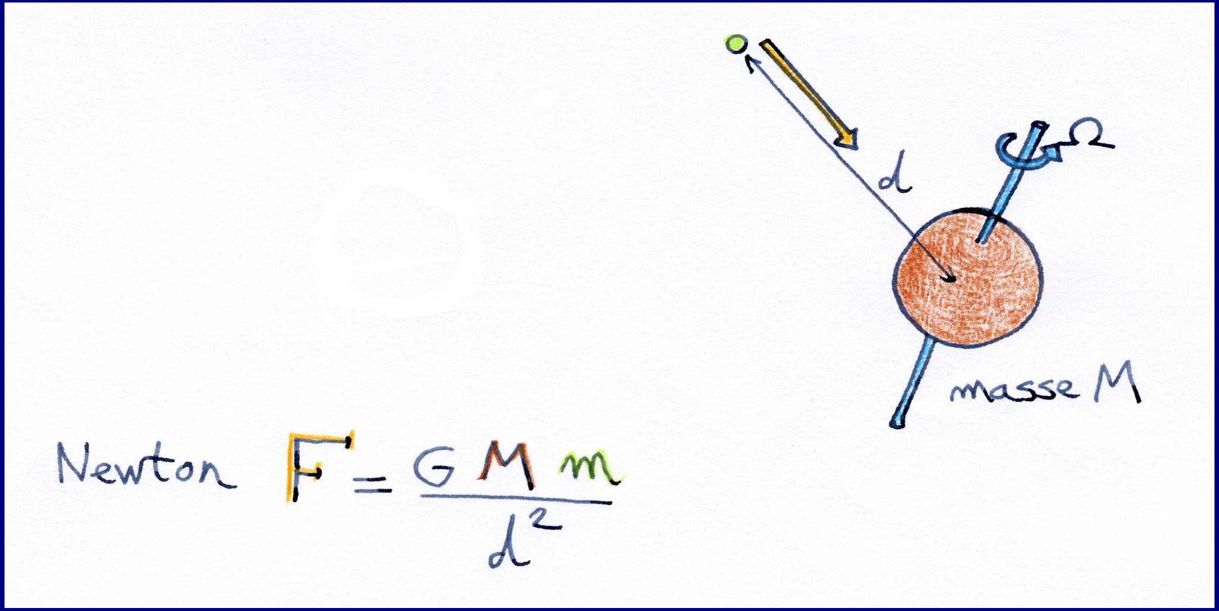
- Considérons le travail qu'il faut faire pour amener des particules loins les unes des autres, et les regrouper dans une étoile.
- On peut le calculer. C'est un travail négatif (c'est reposant).
- C'est l'énergie gravitationnelle de l'étoile.
- Pour une étoile de masse M et de rayon R de densité uniforme (pas réaliste) :

$$E= -(3/5)\ GM^2/R$$

- C'est irréaliste mais cela donne un ordre de grandeur. (On peut faire des calculs plus exacts.) Notons le signe « moins ».
- Les objets de faible énergie sont les plus stables. Les forces de gravitation tendent donc à concentrer les masses dans des petits objets...

La force gravitationnelle





La force gravitationnelle

La relativité générale

Einstein a repris la relativité Newtonienne pour la rendre compatible avec la théorie de la relativité restreinte. Il en est sorti, en 1915, une nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale.

Masses grave et inertielle

Loi Newtonienne de la gravitation :

Force = G M1* M2 / r^2

Loi du mouvement :

Force = M1 * accélération de l'objet 1 = M1* dV1/dt

Force = - M2 * accélération de l'objet 2

On constate l'identité des masses grave et inertielle. Est-ce une coïncidence ?

Masses grave et inertielle

Constatation d'Einstein : un individu ne peut pas discriminer si il est en chute libre (soumis à la gravitation) ou en apesanteur (soumis seulement à sa propre inertie)

Masses grave et inertielle

Question d'Einstein : et si les forces d'inertie et les forces gravitationnelles étaient la même chose ?

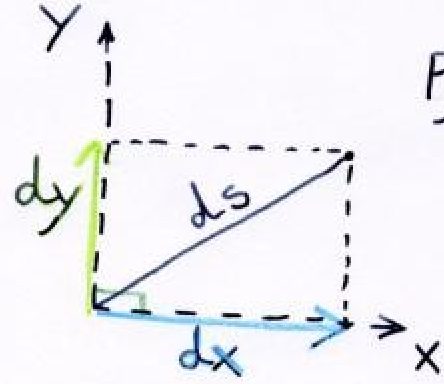
Masses grave et inertielle

Réponse d'Einstein : les forces d'inertie et de gravitation sont la même chose.

Mais alors, il faut considérer que l'effet des forces de gravitation n'est pas « d'attirer des corps » mais de déformer l'espace et le temps.

Au voisinage d'un objet massif, on ne peut plus calculer les distances et les intervalles de temps comme on le ferait dans le vide (i.e. Comme en mécanique Newtonienne).

La force gravitationnelle



Pythagore (dans le plan)

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

Pythagore dans l'espace

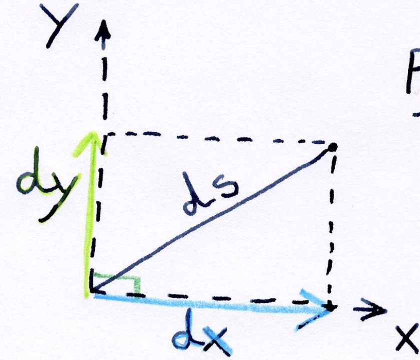
$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Pythagore dans l'espace-temps

[Einstein. Minkovski, 1905]

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

La force gravitationnelle



Pythagore
(dans le plan)

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

Pythagore dans l'espace

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

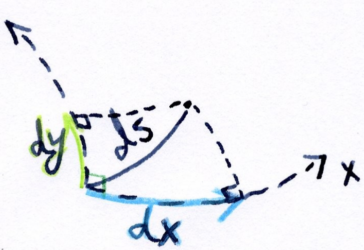
Pythagore dans l'espace-temps
[Einstein. Minkovski, 1905]

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Pythagore dans un espace-temps courbe

$$\boxed{ds^2 = g_{00}c^2dt^2 - g_{11}dx^2 - g_{22}dy^2 - g_{33}dz^2 \ldots}$$

les g_{ij} déterminent la "forme" de l'espace (sa métrique).



Les équations de la relativité générale permettent de connaître les g_{ij}

Les équations d'Einstein

Dans la famille des équations très compliquées et difficile a résoudre. En résumé :

Tenseur géométrique(g) = 8 π G c^{-4} Tenseur d'énergie

Le tenseur d'énergie contient les informations sur toutes les sources d'énergie existant : masse et vitesse, chaleur, pression, forces électromagnétiques etc.

Le tenseur géométrique dépend de six nombres « g » définis en chaque point et à chaque instant, qui servent à calculer les distances et les intervalles de temps.


$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{C^4} T_{\mu\nu}$
A. EINSTEIN

Les équations d'Einstein

Quel est le mouvement d'une particule soumise au champ de gravitation ?

Une telle particule est dite « libre »

Elle suit le plus court chemin dans l'espace-temps, en tenant compte de la géométrie définie par les nombres « g » eux même déduit des équations d'Einstein.

On appelle le plus court chemin (généralisation de la droite dans l'espace ordinaire) une « géodésique » .

Les équations d'Einstein

...mouvement d'une particule soumise au champ de gravitation

Même une particule sans masse, comme le photon (porteur de lumière), suit une géodésique. Une particule sans masse est donc sensible aux forces de gravitation.

C'est une grande différence, en pratique, par rapport à la théorie de Newton.

Un exemple : la lumière qui ne peut s'échapper des trous noirs.

Quand les trajectoires Newtoniennes se distinguent-elles des géodésiques de la relativité générale ?

• Effets subtils dans le système solaire (Mercure).
• Effets subtils au passage dans le voisinage d'objets massifs: étoiles, galaxies, planètes même... On y reviendra.
• Effets extrêmes au voisinage d'objets très denses (étoiles à neutrons, trous noirs).
• Effets extrêmes dans des étoiles très denses ou très chaudes.
• Effets extrêmes lorsque l'univers était beaucoup plus dense que maintenant (Big bang)

Dans bien des cas la mécanique Newtonienne suffit :

• trajectoires d'étoiles dans les galaxies,
• de nuages de gaz interstellaires,
• matière inter-galactique...(?)

La force gravitationnelle selon Einstein : relativité générale.

Gravitation à la Newton :

espace plat (le plus simple)

et équation reliant les

forces au mouvement :

Forces (toutes) = masse × accélération

Gravitation à la Einstein :

espace déformé par les masses

et la répartition de l'énergie. (défini par $\boxed{ds^2}$)

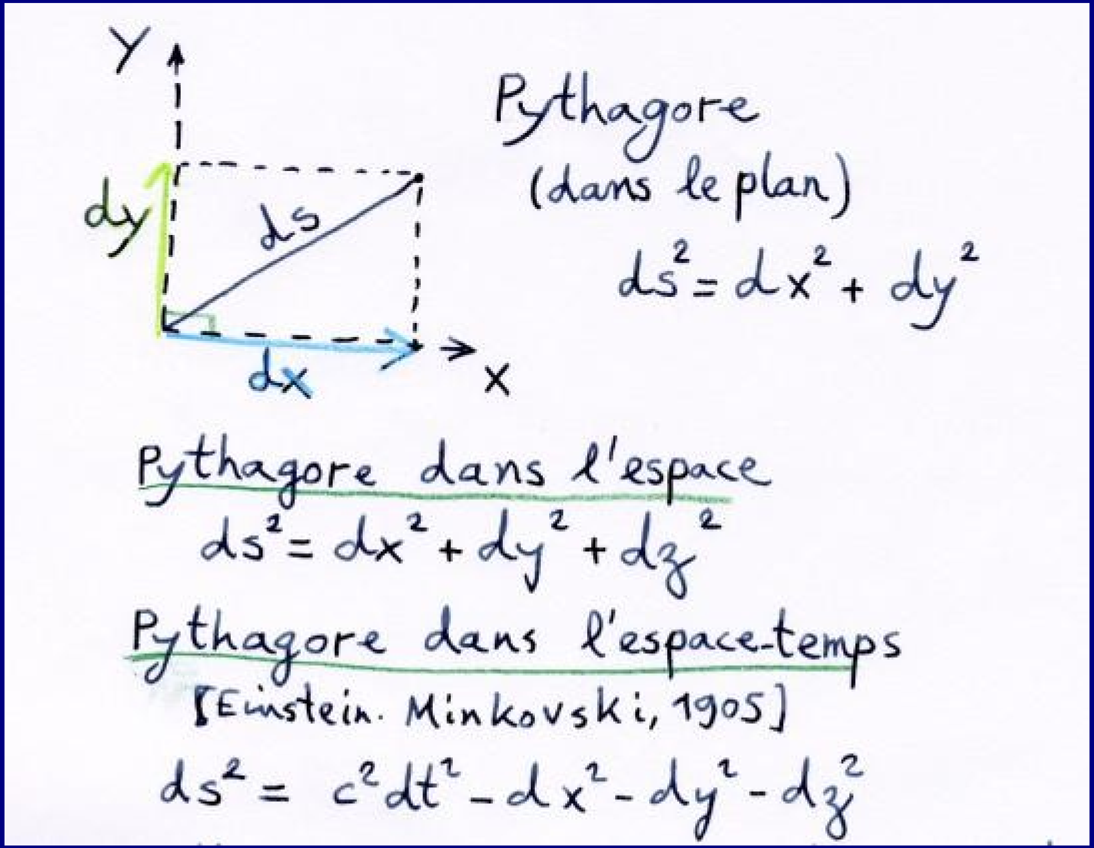
Mouvement : les trajets les

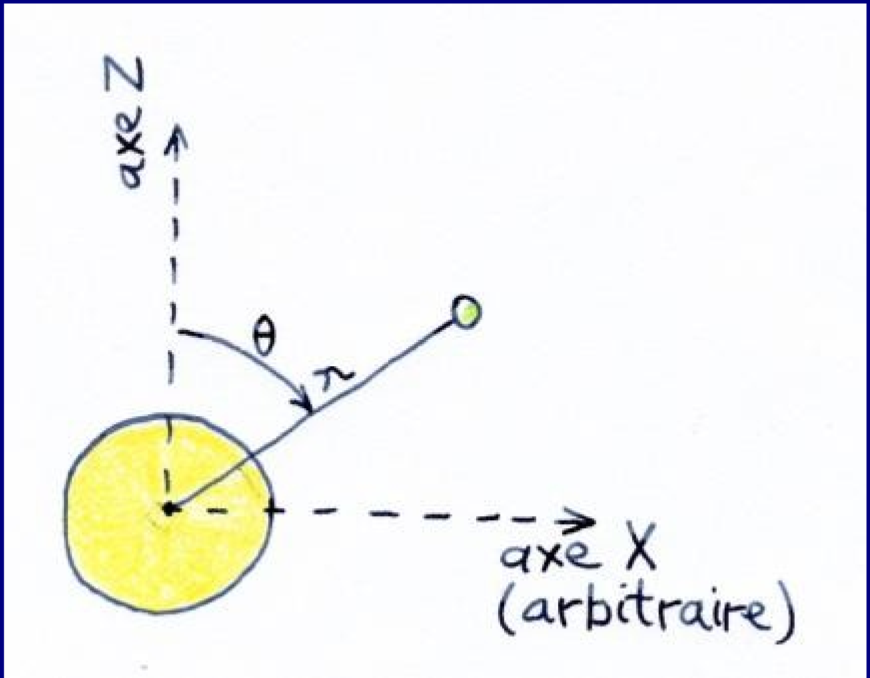
plus courts dans cet espace.

Trajet le plus court : celui qui

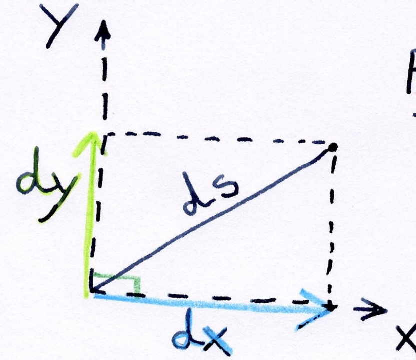
minimise $\boxed{ds^2}$

La force gravitationnelle





La force gravitationnelle



Pythagore (dans le plan)

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

Pythagore dans l'espace

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Pythagore dans l'espace-temps

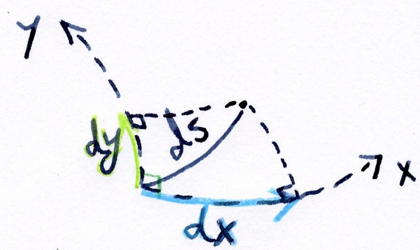
[Einstein. Minkovski, 1905]

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Pythagore dans un espace-temps courbe

$$\boxed{ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 - g_{11} dx^2 - g_{22} dy^2 - g_{33} dz^2 \dots}$$

les g_{ij} déterminent la "forme" de l'espace (sa métrique).

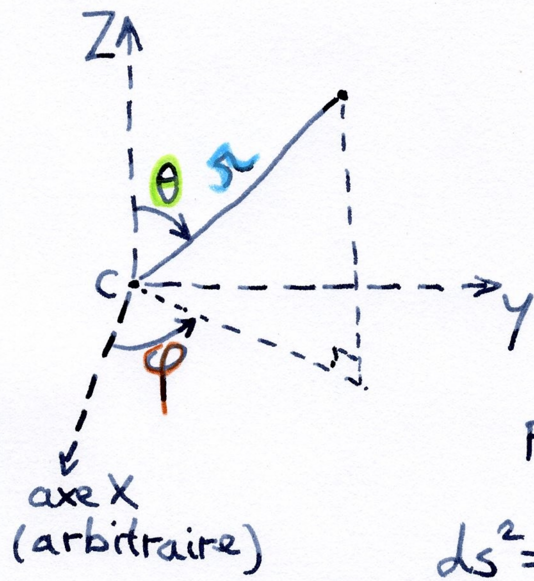


Les équations de la relativité générale permettent de connaître les g_{ij}

Pythagore

Cas de la symétrie sphérique

* ETOILE *



r : distance radiale

θ : co-latitude ...

φ : azimut, longitude ...

Petit déplacement

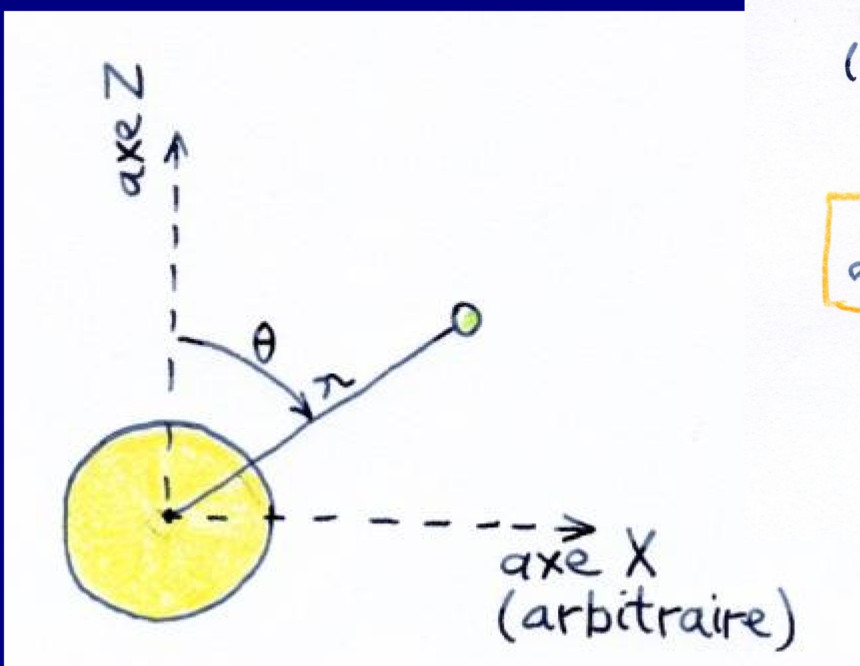
$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

devient

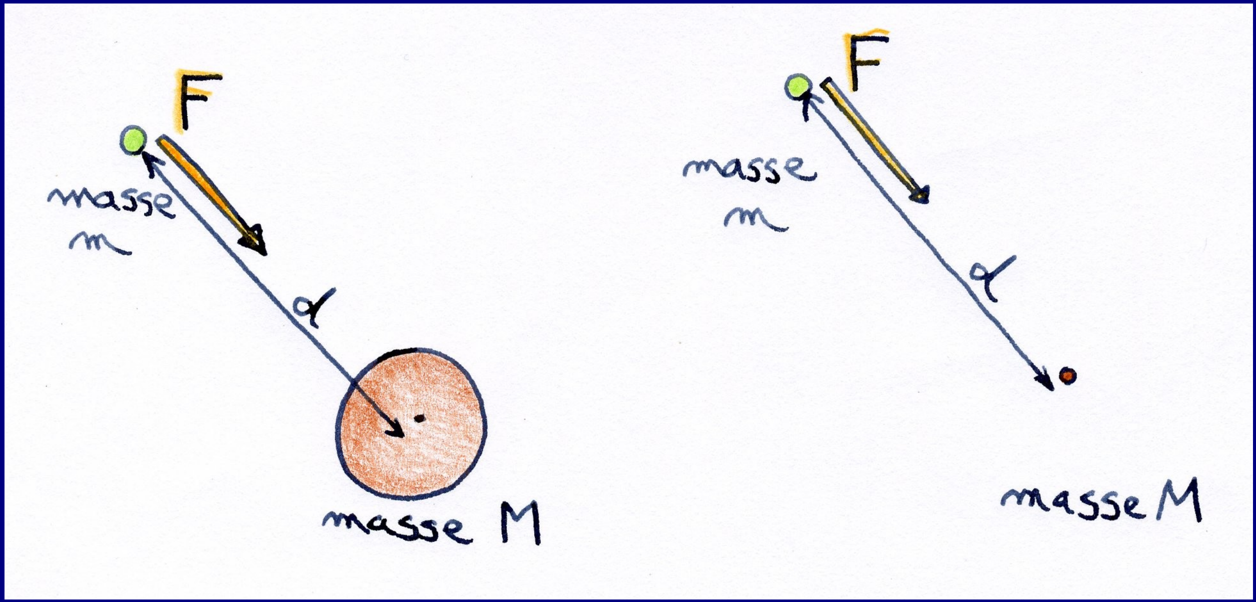
$$\boxed{ds^2 = dr^2 + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta \, d\varphi^2\right)}$$

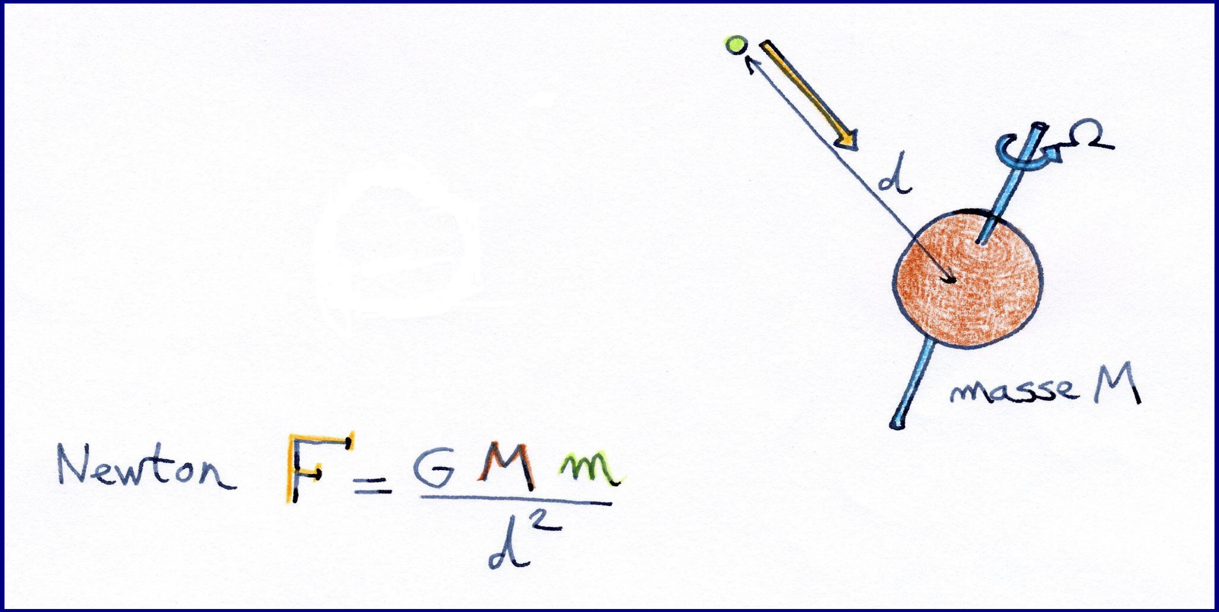
dr^2 : déplacement radial

$r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta \, d\varphi^2)$: déplacement angulaire



La force gravitationnelle





Solution relativiste pour une étoile

Solution valable à l'extérieur de l'étoile (dans le vide alentour)

Pour une étoile qui ne tourne pas (ou pas très vite).

métrique

$$ds^2 = -(\Delta \text{distance})^2 + c^2(\Delta \text{temps})^2$$

Newton, espace "plat"

$$ds^2 = -\underbrace{dr^2}_{\text{déplacement radial}} - r^2 \underbrace{\left(d\theta^2 + \sin^2\theta \, d\varphi^2\right)}_{\text{déplacement angulaire}} + c^2 dt^2$$

Schwarzschild, masse centrale M

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1 + a/r} - r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta \, d\varphi^2\right) + \left(1 + \frac{a}{r}\right) c^2 dt^2$$

avec $a = -\dfrac{2GM}{c^2}$

Estimer l'importance des effets relativistes

Rayon de Schwarschild :

$R_S = GM / c^2$

Paramètre de relativité de l'étoile :

$\Xi = R_S / R$

métrique

$$ds^2 = -(\Delta \text{distance})^2 + c^2(\Delta \text{temps})^2$$

Newton, espace "plat"

$$ds^2 = -\underbrace{dr^2}_{\text{déplacement radial}} - r^2 \underbrace{\left(d\theta^2 + \sin^2\theta \, d\varphi^2\right)}_{\text{déplacement angulaire}} + c^2 dt^2$$

Schwarzschild, masse centrale M

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1 + a/r} - r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta \, d\varphi^2\right) + \left(1 + \frac{a}{r}\right)c^2 dt^2$$

avec $a = -2\dfrac{GM}{c^2}$

Estimer l'importance des effets relativistes

Rayon de Schwarschild :

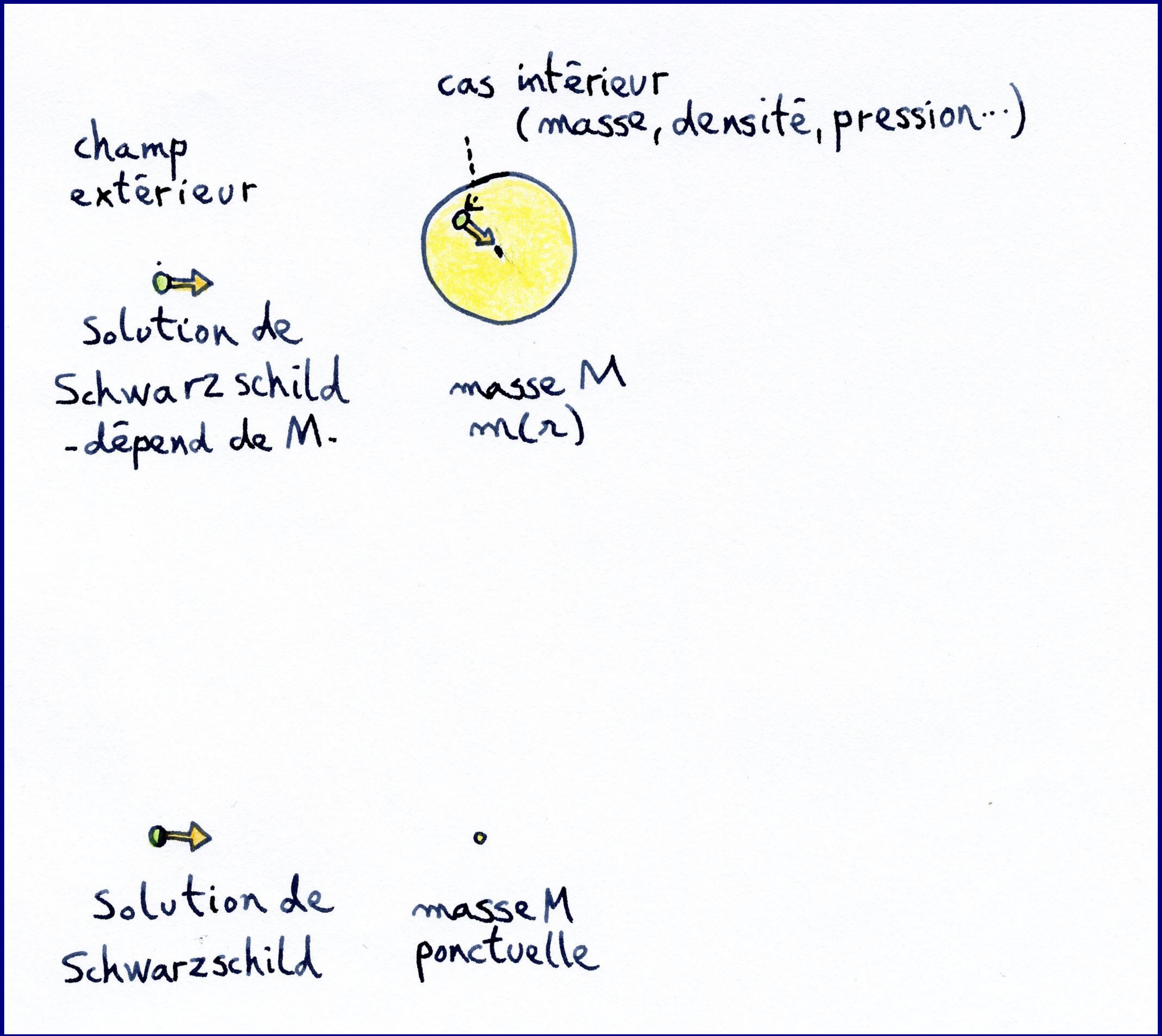
$R_S = GM / c^2$

Paramètre de relativité de l'étoile :

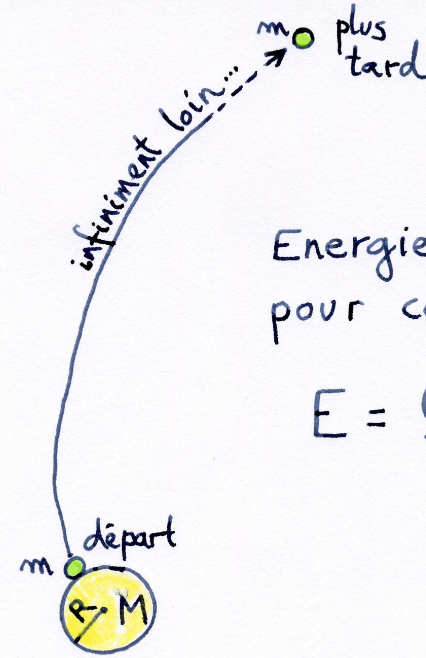
$\Xi = R_S / R$

astre	contre-poids de la gravitation	masse M $[M_\odot]$	rayon R [km]	densité ρ $[\mathrm{kg\,m^{-3}}]$	paramètre de relativité Ξ
Terre	forces électromag. (structure cristalline)	3×10^{-6}	6×10^3	5×10^3	10^{-10}
Soleil	pression thermique pression de radiation	1	7×10^5	10^3	10^{-6}
naine blanche	press. de dégéneresc. des électrons (Pauli)	0.1 à 1.4	$\sim 10^4$	$\sim 10^{10}$	10^{-4} à 10^{-3}
étoile à neutrons	interaction forte entre les baryons	1 à ~ 3	~ 10	$\sim 10^{18}$	~ 0.2
trou noir stellaire	pas de contre-poids	$>\sim 3$	9 $(M = 3\,M_\odot)$	0	1
trou noir massif	pas de contre-poids	$\sim 10^9$	20 UA	0	1

La force gravitationnelle



La force gravitationnelle



Energie nécessaire pour ce voyage *

$$E = \frac{G M m}{R}$$

Energie disponible avec la masse m < mc^2

Impossible de s'échapper totalement de l'astre (R, M) si

$$mc^2 < \frac{G M m}{R}$$

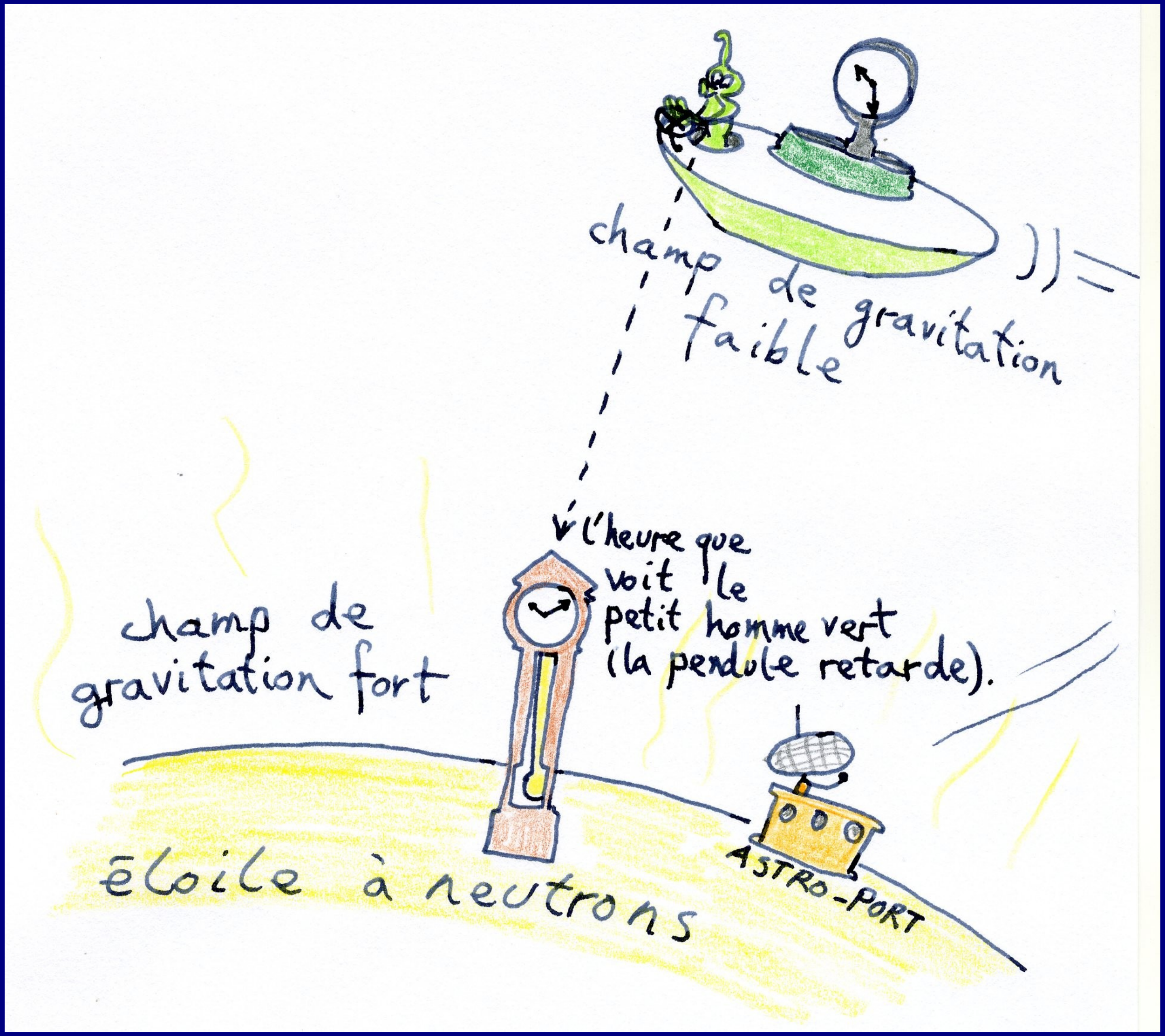
$$R < \frac{GM}{c^2} = \text{rayon de Schwarschild}$$

La force gravitationnelle

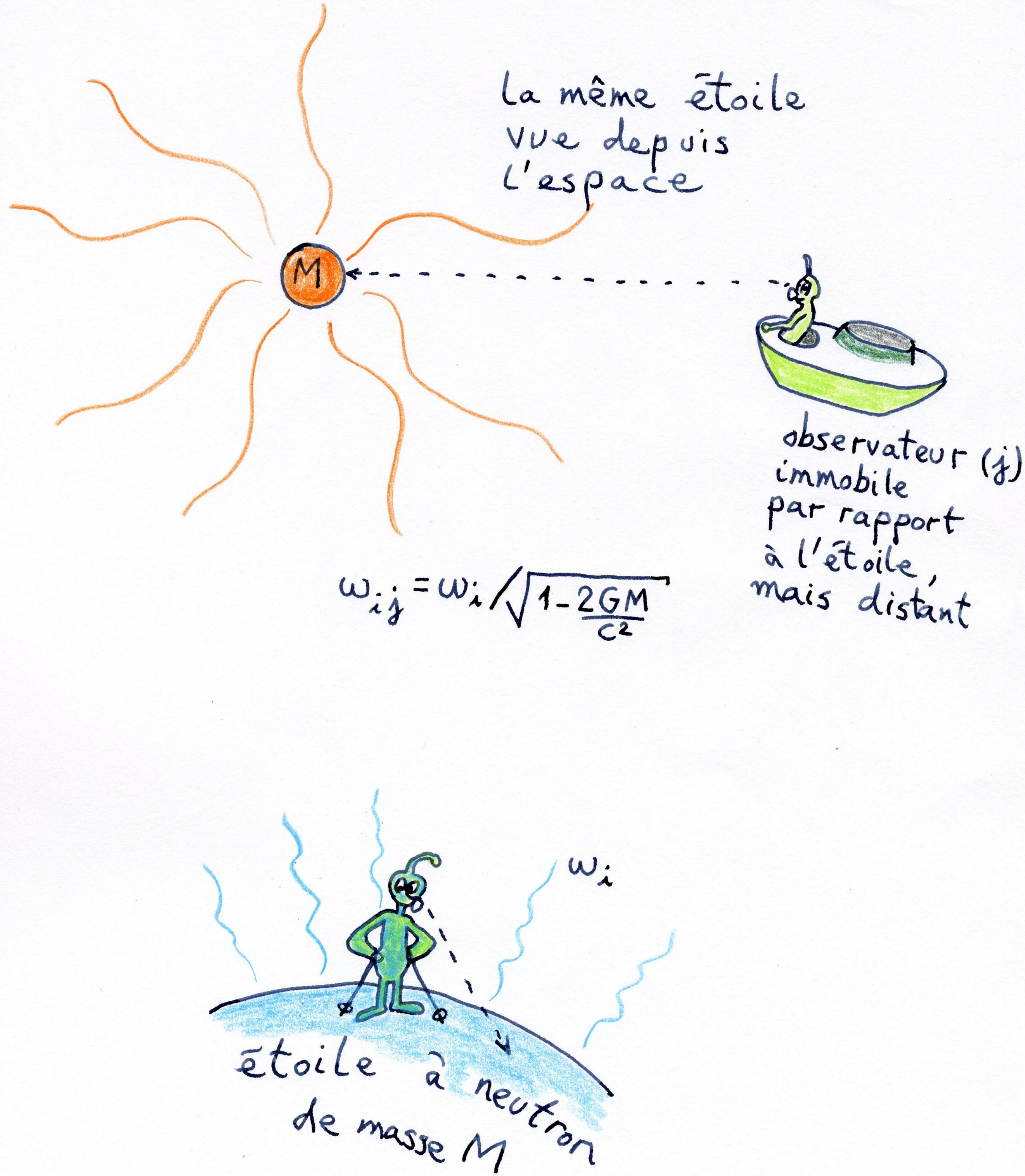
L'écoulement du temps dépend du champ de gravitation.

C'est vrai même sur Terre.

Global Positioning System: Pour des mesures précises, il faut recaler chaque jour les horloges à bord des satellites du GPS.



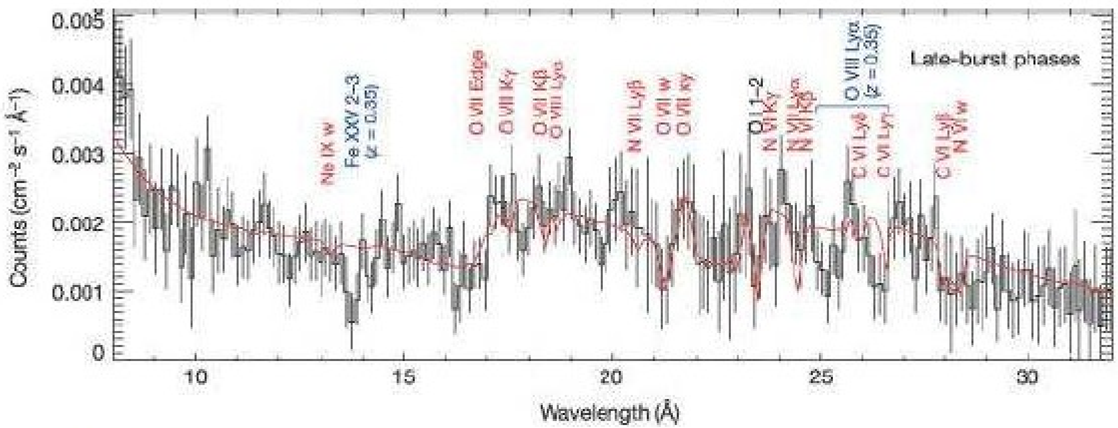
Redshift gravitationnel



Redshift gravitationnel dans le proche voisinage d'une étoile à neutrons.

Observations d'effets relativistes forts

Mesure à l'aide du satellite XMM-Newton du **décalage spectral gravitationnel** (effet Einstein) de raies du fer et de l'oxygène à la surface d'une étoile à neutrons



Décalage spectral mesuré:

$$z = \frac{\lambda_\infty - \lambda}{\lambda} = 0.35$$

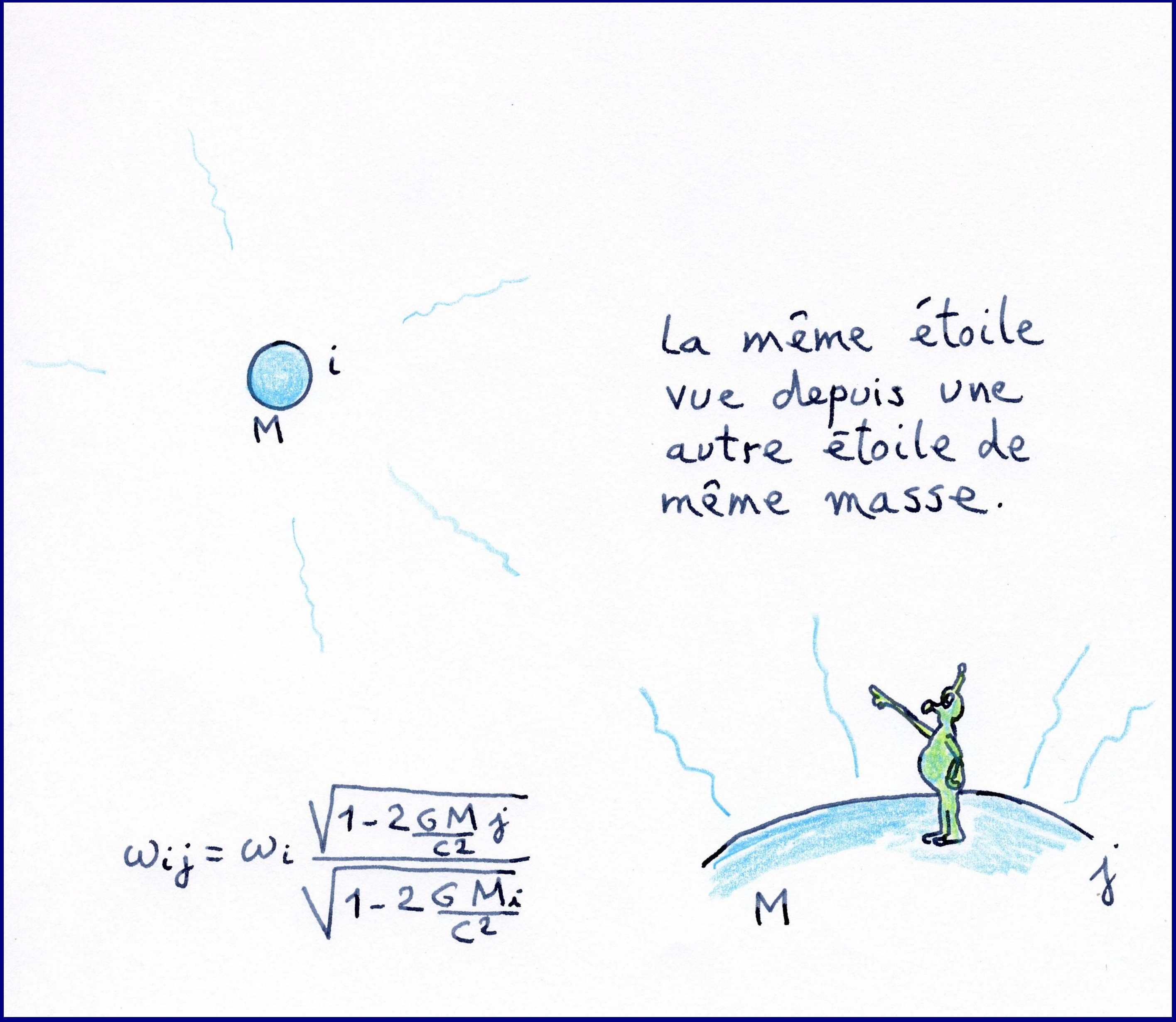
NB: $z_{\text{Doppler}} \sim 10^{-3}$

LMXB EXO0748-676 [Cottam, Paerels & Mendez, Nature **420**, 51 (2002)]

$$z = (1 - 2\Xi)^{-1/2} - 1 = 0.35 \quad \Longrightarrow \quad \Xi = \frac{GM}{c^2 R} = 0.23$$

[Eric Gourghoulon, transparent présenté aux « mercredis de l'Observatoire (de Paris)]

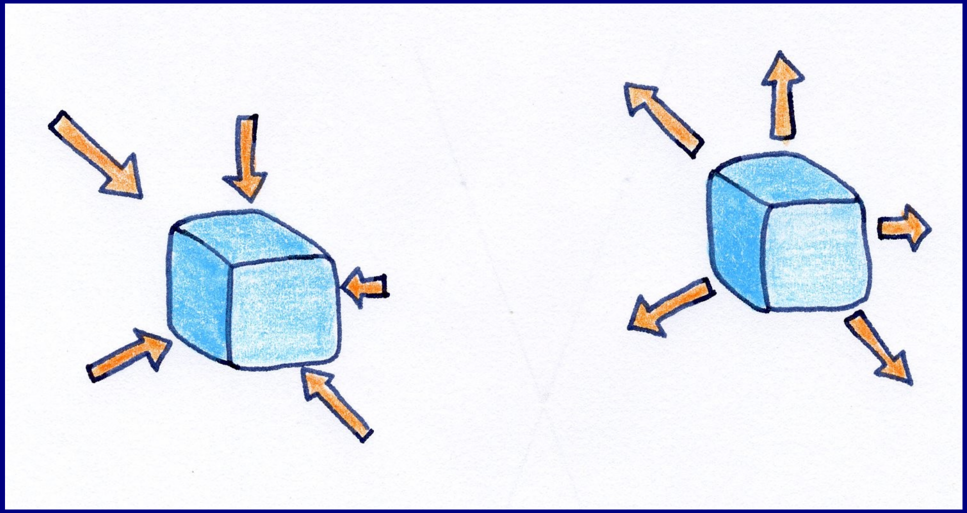
Redshift gravitationnel



L'équilibre hydrostatique

- Comment un astre, ou une partie d'un astre, s'organise en fonction de la distance au centre
- Pourquoi les astres ont-ils un volume non nul ?
- Parce qu'il existe d'autres forces que la gravitation.
- Hydrostatique : on néglige le mouvement, et on cherche l'équilibre entre les forces.
- Quelles sont les forces, à part la gravitation ?

Les forces de pression

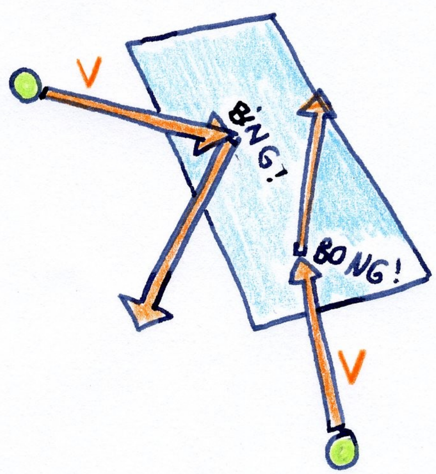


Les forces de pression

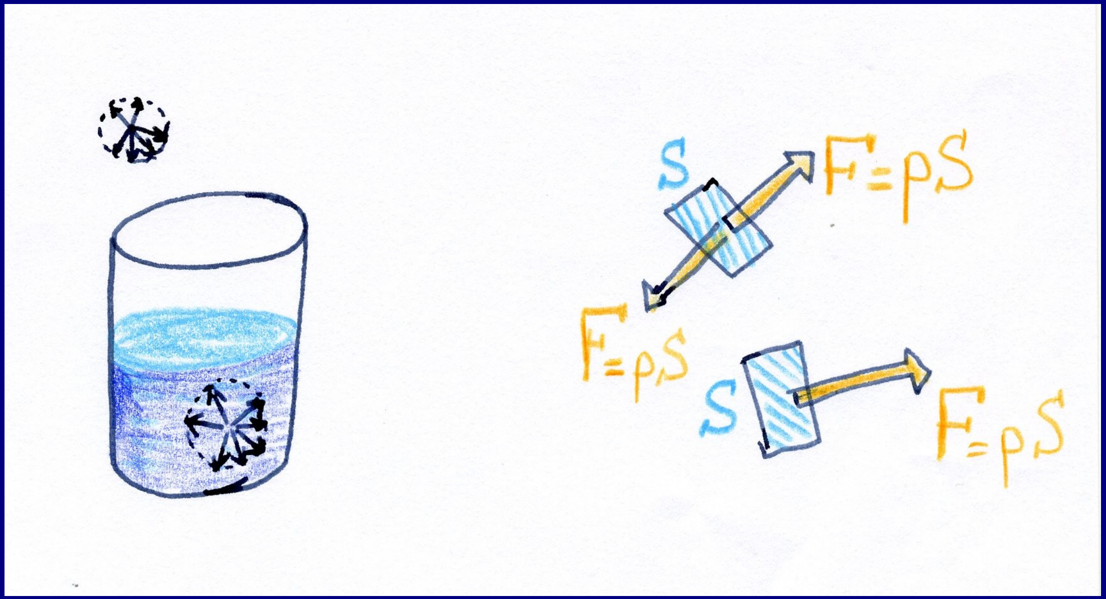
Expérience mentale

- Introduire un écran (microscopique)
- Considérer les variations de $m\vec{V}$ des particules (qui rebondissent toutes).
- Additionner le tout
- Diviser par la durée de l'expérience et par la superficie S de l'écran.

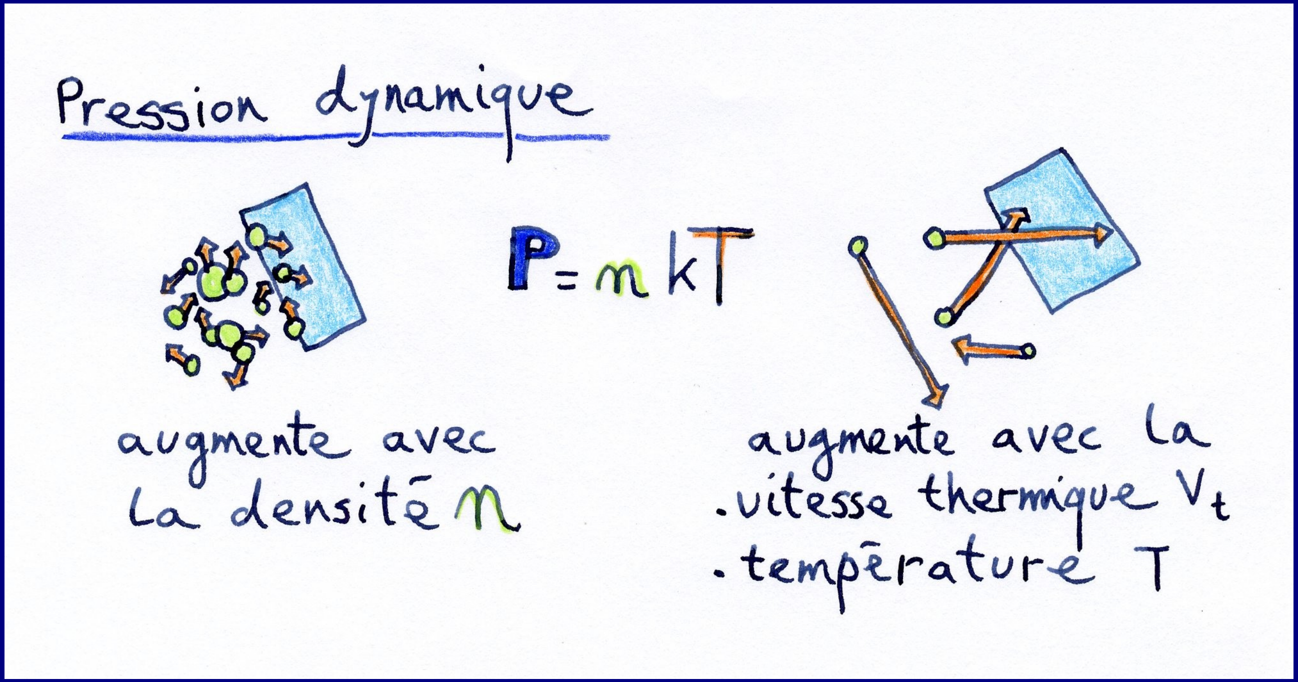
on obtient la pression (dynamique).



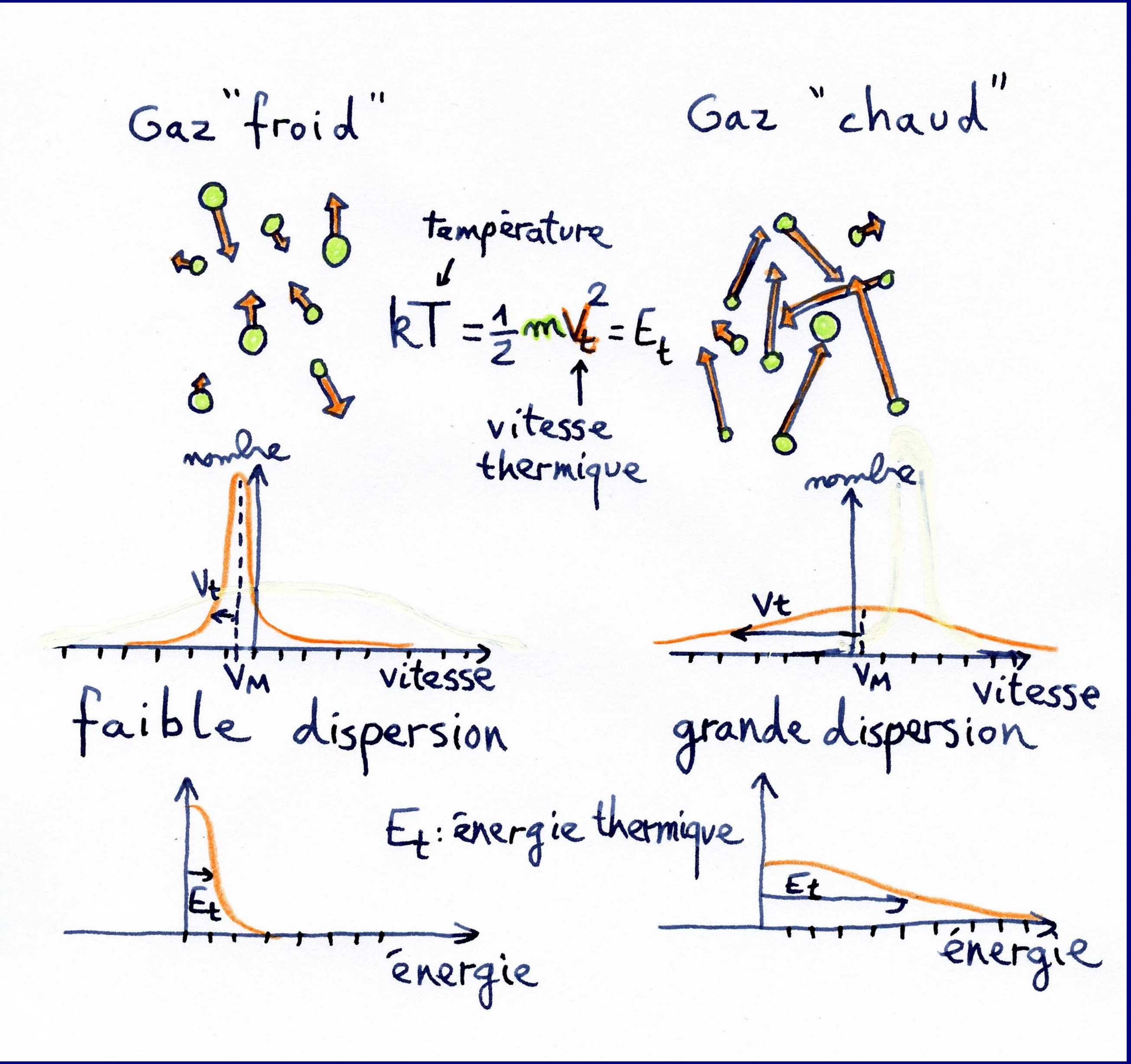
Les forces de pression



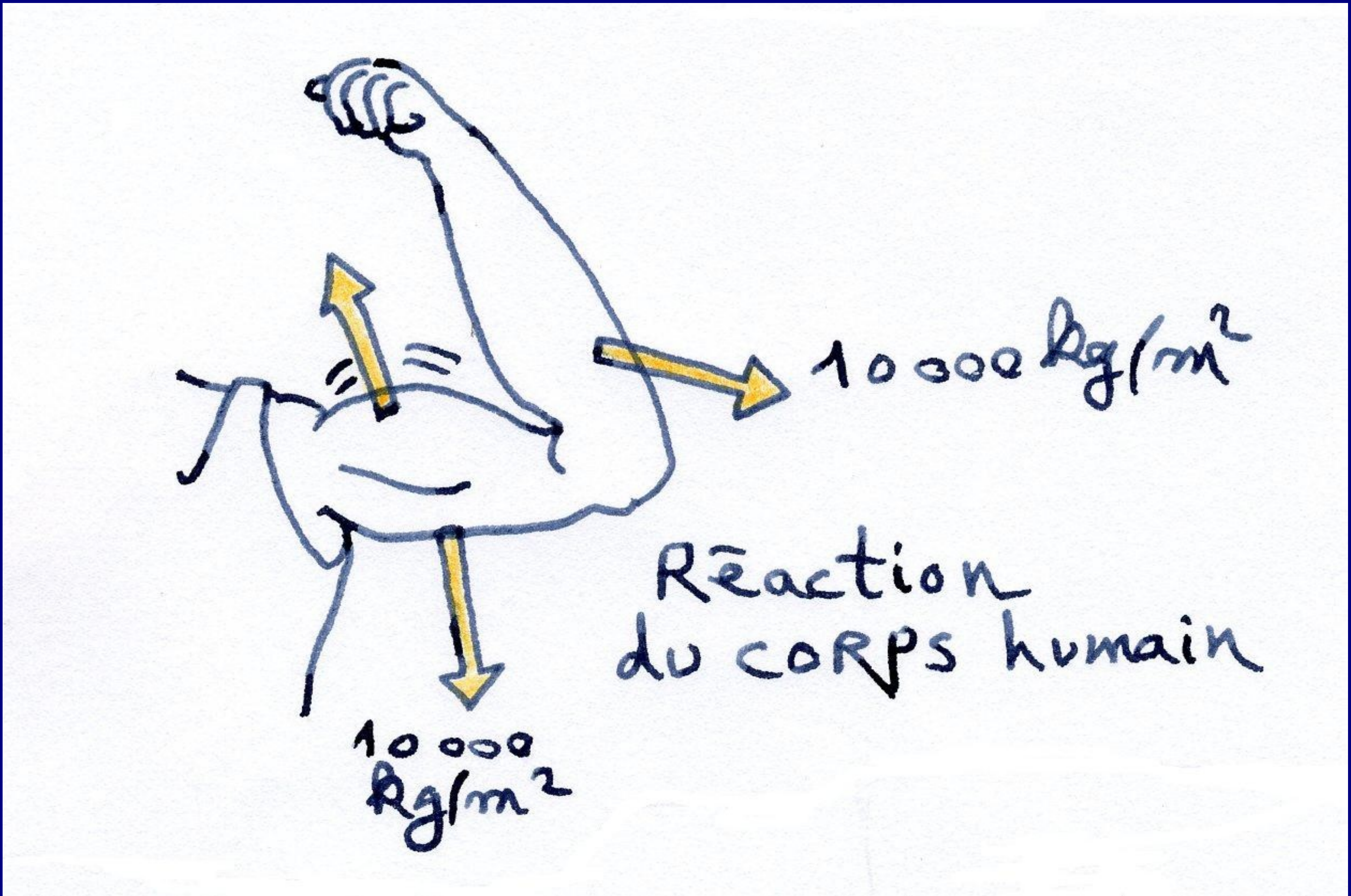
La pression dans un gaz parfait



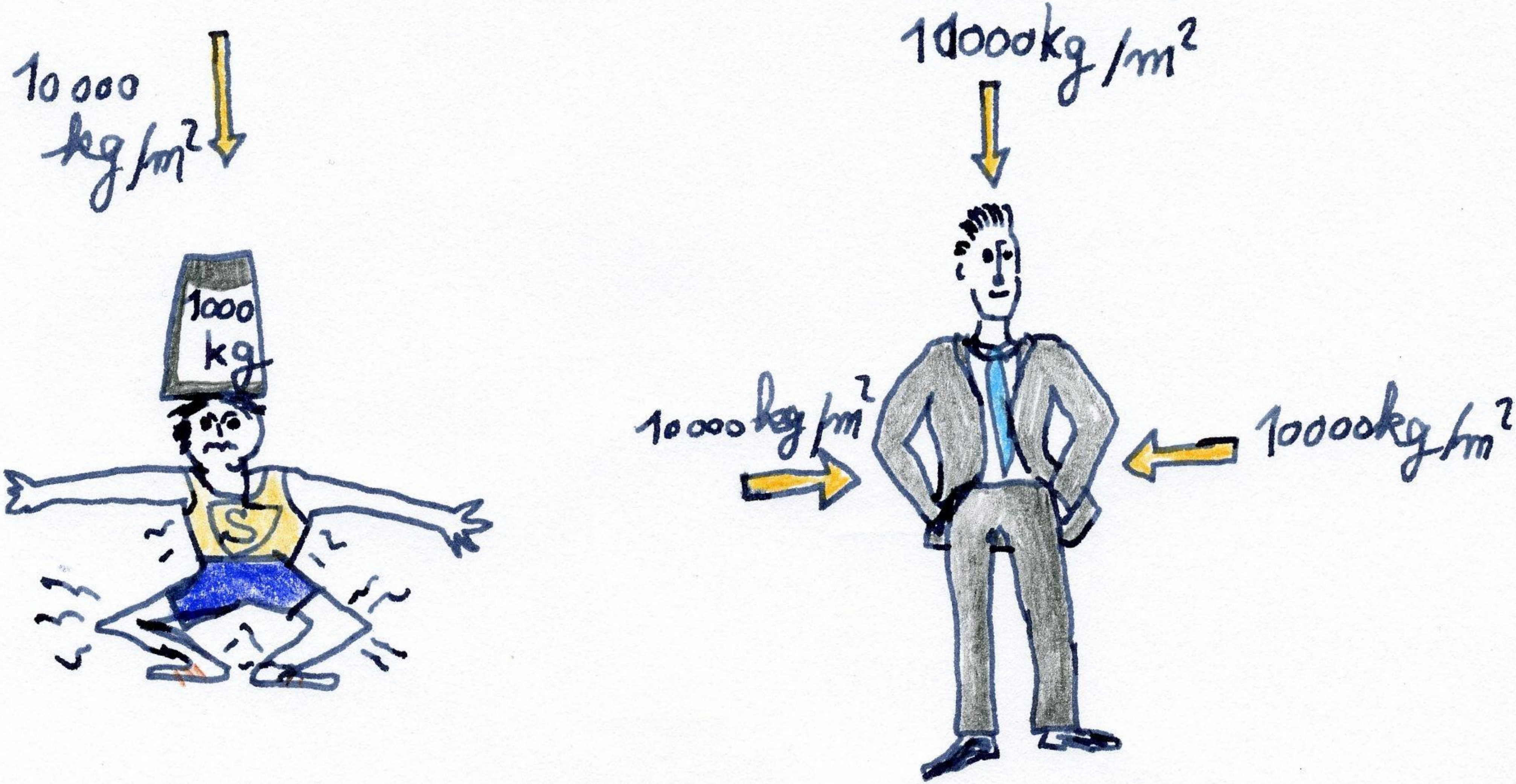
La température d'un gaz



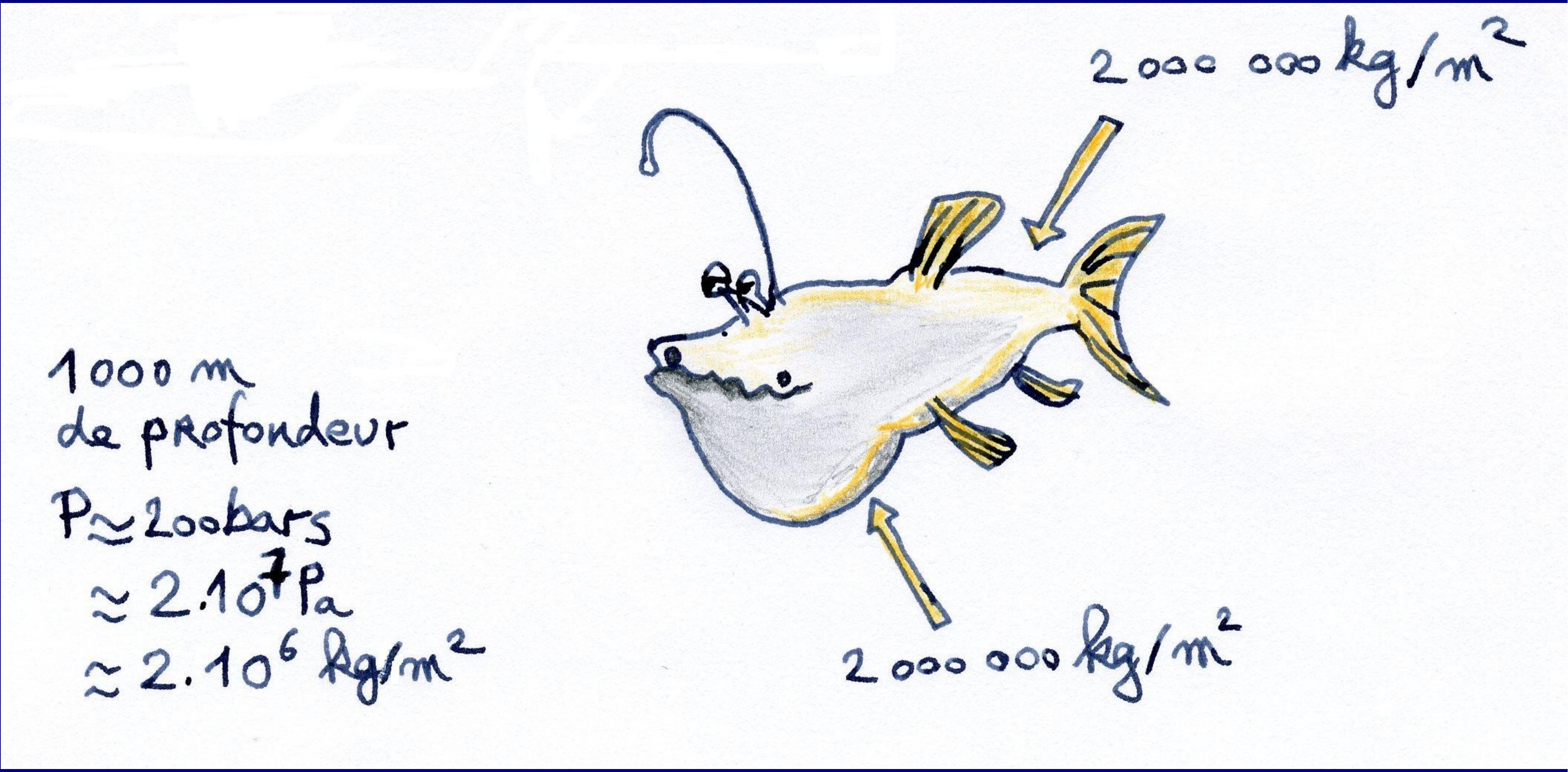
Les forces de pression



Les forces de pression



Les forces de pression



L'équilibre hydrostatique dans un salon de coiffure subaquatique.

Les deux demoiselles flottent sous l'eau sans nager : équilibre hydrostatique.

Au dessus de leur tête, quelques kilogrammes d'eau. Elles n'ont pas besoin de porter cette eau car de l'eau en dessous porte l'eau du dessus

Néanmoins, pour porter cette eau du dessus, l'eau du dessous exerce une force.

L'équilibre hydrostatique dans un salon de coiffure subaquatique.

La force exercée par l'eau du dessous pour porter l'eau du dessus ne s'exerce pas que vers le haut.

On la sent bien dans les oreilles, c'est la pression.

Effet de cette pression : supporter le poids d'une colonne d'eau.
Poids = surface*hauteur*densité de l'eau* gravitation
P= S*h*ρ*g.

L'équilibre hydrostatique dans un salon de coiffure subaquatique.

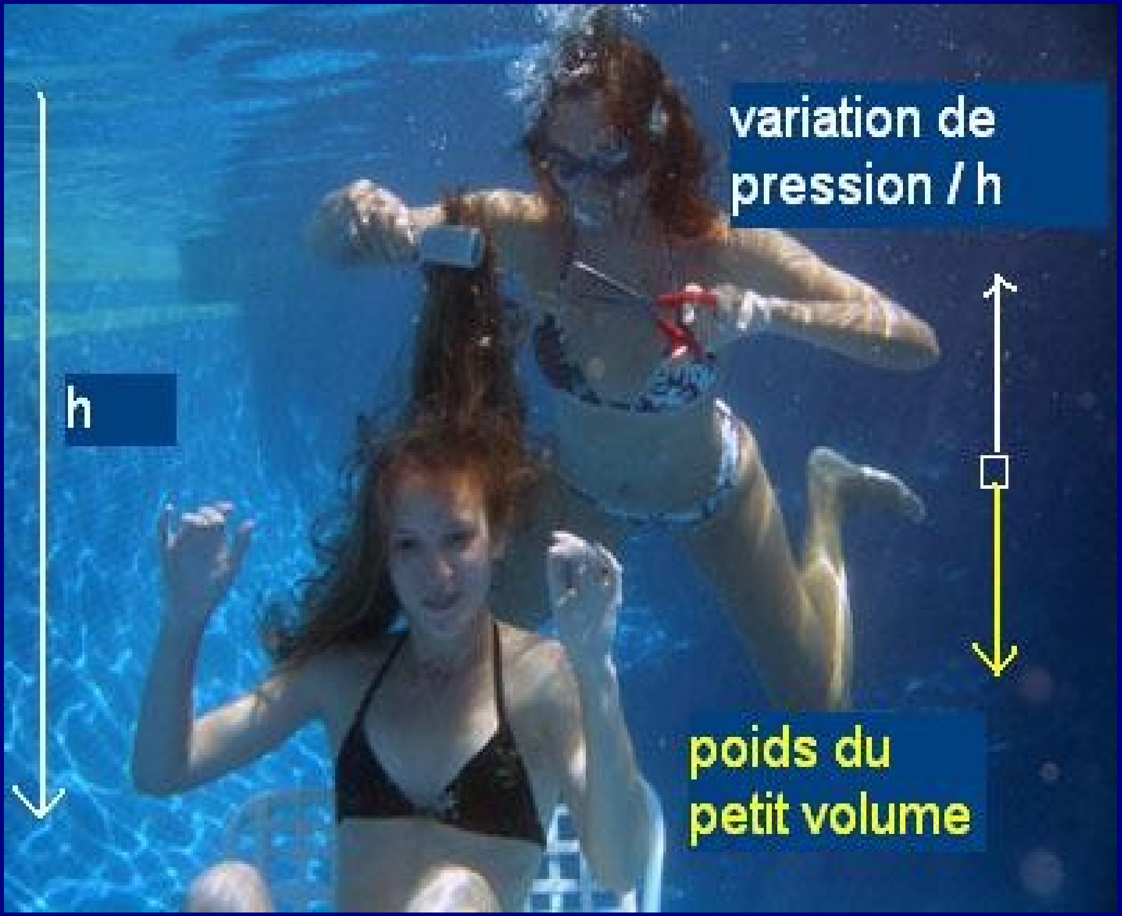
Poids=P= S*h*ρ*g.

pression = force/ Surface :

pression=p=h*ρ*g.

quelle est la force par unité de volume (qui s'applique à un petit cube d'eau) ?

équilibre en s'enfonçant d'une profondeur **dh** (d signifie petite variation)
dPoids = dP=dh*ρ*g
la pression varie d'autant.
dp/dh= dP/dh=ρ*g



L'équilibre hydrostatique dans un salon de coiffure subaquatique.

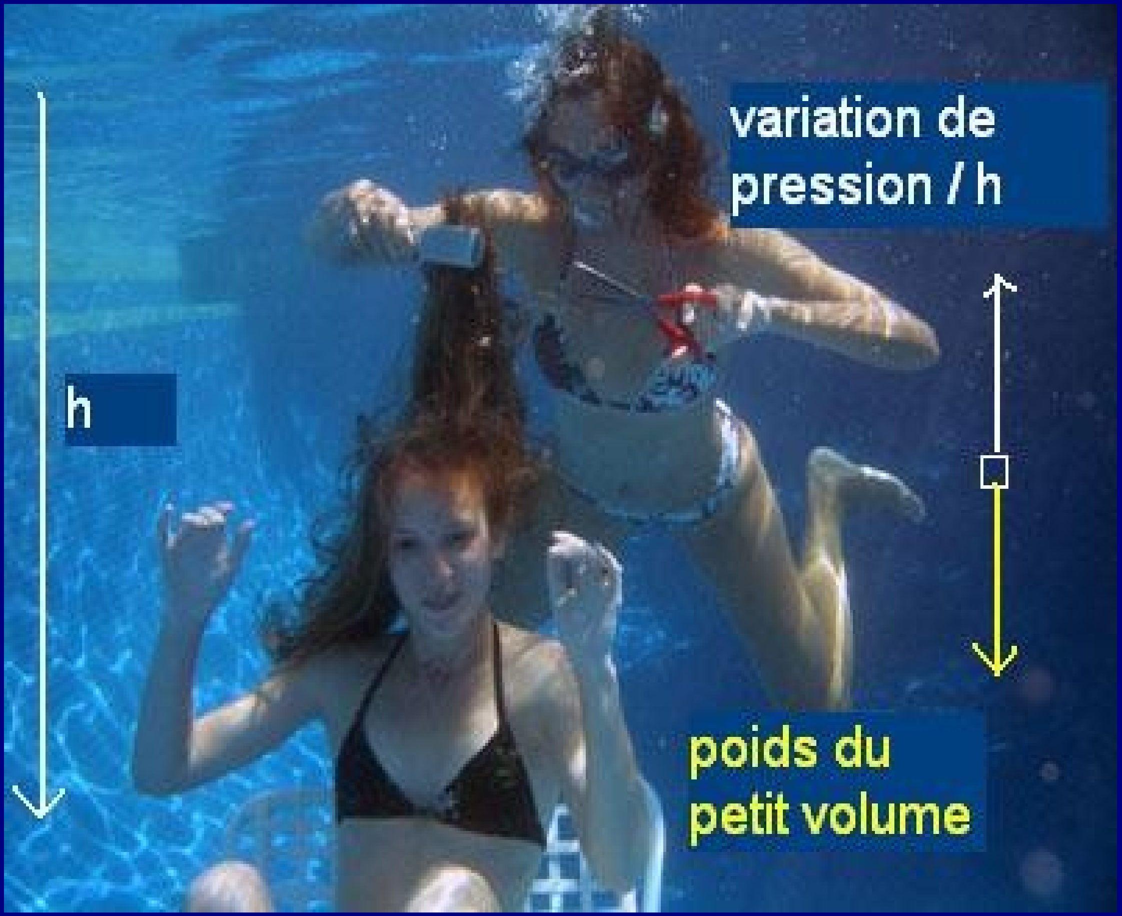
La force de pression en force par unité de volume

$dp/dh = dP/dh = \rho * g$

dp/dh= poids du petit volume d'eau.

L'aptitude de l'eau à réagir au poids de la colonne d'eau au dessus dépend des propriétés de l'eau : sa densité, sa température, ce qui est mélangé à l'eau (sel ou autres produits chimiques) etc.

Dans le cas de l'eau, la densité et la température varient très peu en fonction de la pression. Ce n'est pas le cas de tous les fluides.



La pression sur les parois d'une piscine.

La pression augmente avec la profondeur.
Si la densité est quasi-constante (cas de l'eau), elle augmente proportionnellement à la profondeur.

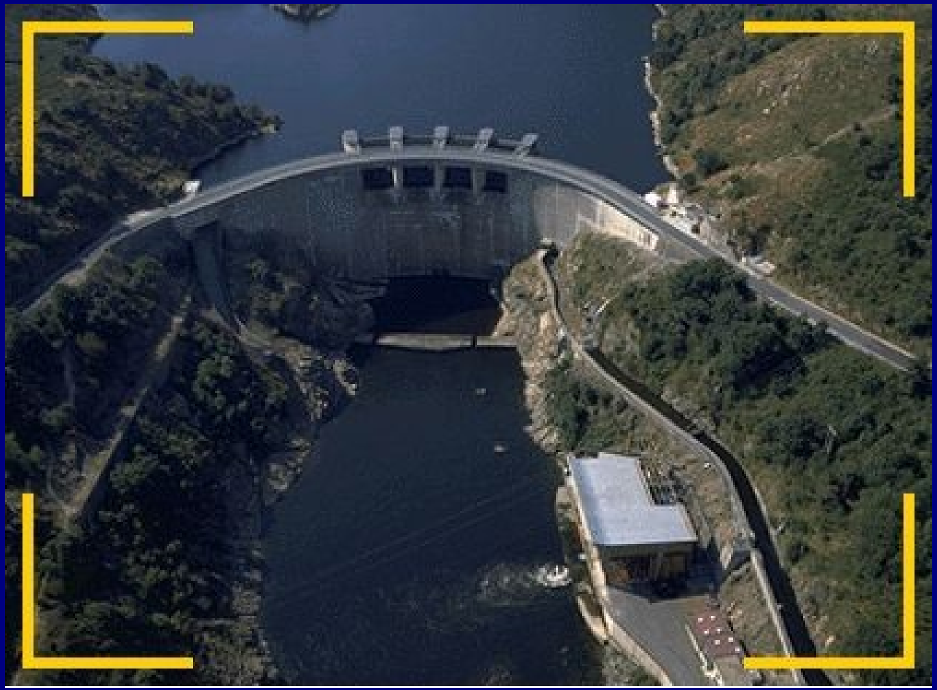
Elle s'exerce dans toutes les directions.

En fait c'est sa variation qui exprime la force exercée.
Dans le cas des parois de la piscine
Force/volume de paroi= dp/dr=h ρ g.
(d'un coté il y a **p_0+h ρ g**, de l'autre **p_0**)

Attention, ici **r** est dans la direction horizontale. La résistance de la paroi ne doit dépendre que de la hauteur de la piscine, pas de son diamètre.

La pression sur les parois d'un barrage.

La pression augmente avec la profondeur.
Si la densité est constante (cas de l'eau), elle augmente proportionnellement à la profondeur.



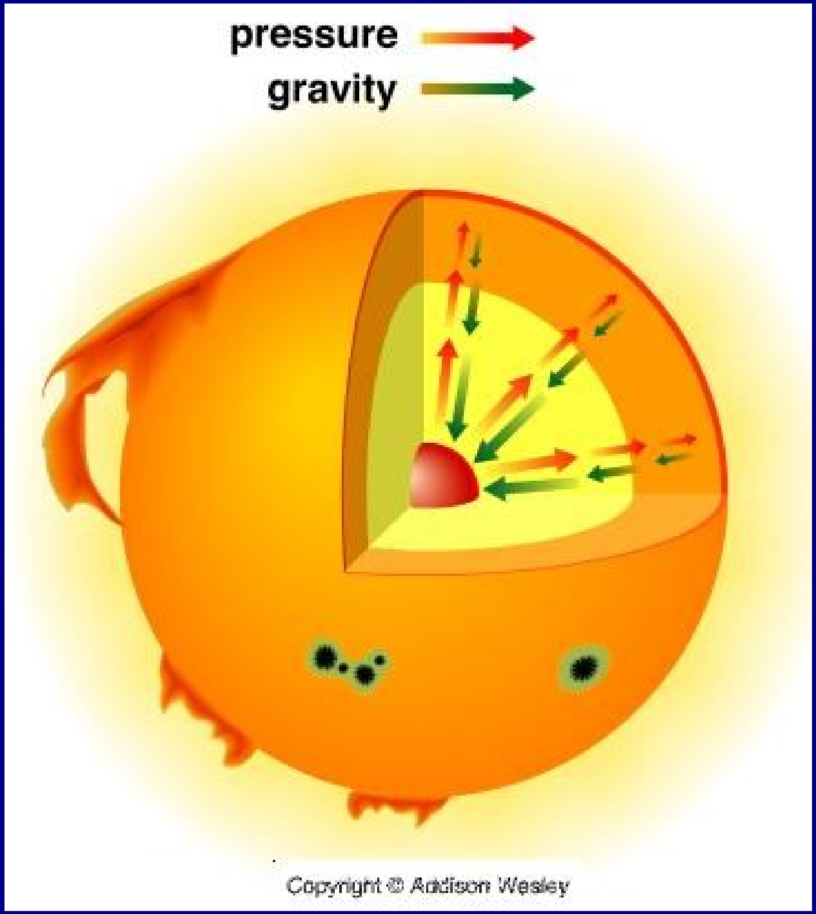
En fait c'est sa variation qui exprime la force exercée.
Dans le cas des parois de la piscine
Force/volume de paroi= dp/dr=$h\ \rho\ g$.
Attention, ici **r** est dans la direction horizontale. La résistance de la paroi ne doit dépendre que de la hauteur du barrage, pas de la surface du lac de barrage.

[barrage du Mont Cenis]

Cas d'une étoile

C'est la même chose :
le poids de la colonne de matière s'accroît avec la profondeur.
Cet accroissement de poids est compensé par un accroissement de pression.

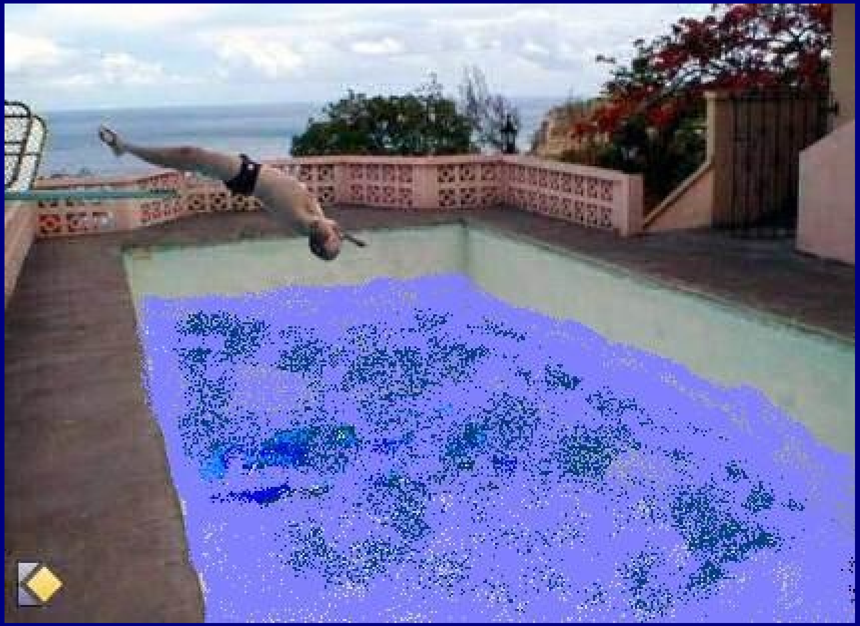
La pression s'exerce aussi dans toutes les directions, mais elle ne varie que en fonction de la profondeur.



(sur le schéma on aurait pu mettre des flèches rouges dans tous les sens, mais il n'y a que dans la direction verticale qu'elles ne se compensent pas.

Comment la matière ne se laisse-t-elle pas écraser ?

Pourquoi l'eau ne s'aplatit pas sous son propre poids ?
Auquel cas on ajouterait de l'eau, mais la hauteur de la piscine augmenterait peu...



Une piscine remplie d'eau quasiment incompressible.

Comment la matière ne se laisse-t-elle pas écraser ?

Pourquoi l'eau ne s'aplatit-elle pas sous son propre poids ?
Auquel cas on ajouterait de l'eau, mais la hauteur de la piscine augmenterait peu...

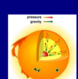
C'est dû à la physique microscopique de l'eau.

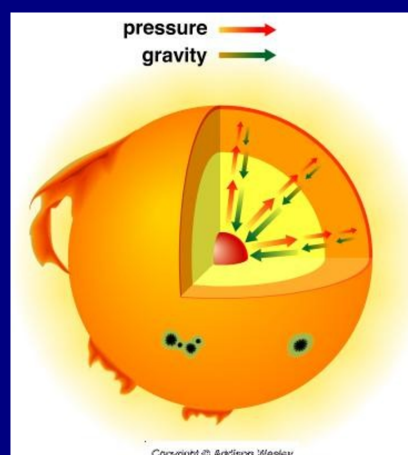
L'eau est constituée de molécules. Ces molécules, dès qu'elles sont proches les unes des autres se repoussent. C'est l'effet de forces électriques de répulsion entre leur électrons. Ces forces de répulsion sont à l'origine de la pression dans l'eau.

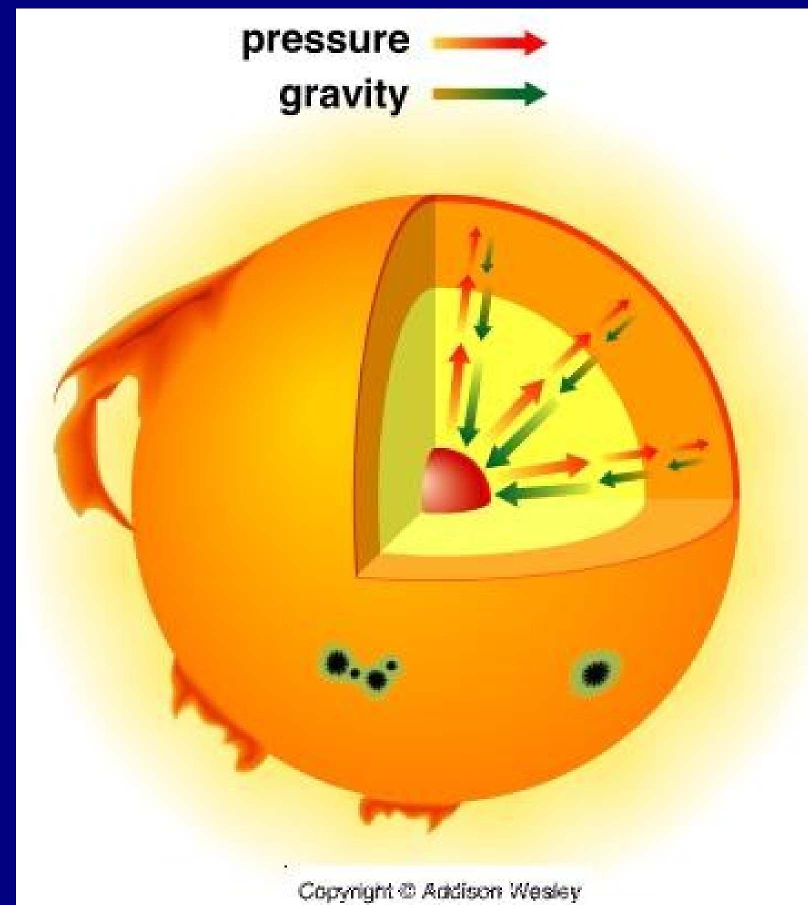
La piscine remplie avec la même masse d'eau, si l'eau était compressible

Des étoiles de même masse.

Dans une étoile, il n'y a pas d'eau, mais de la matière aux propriétés bien différentes. Si la matière constituant une étoile se comprime facilement (forces de pression moindres à masse égale), à masse égale, l'étoile est plus petite.







Matière plus compressible.

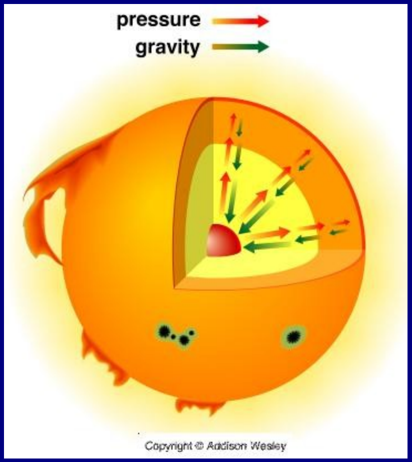
Matière moins compressible.
A masse égale, l'étoile est plus grande.

L'équilibre des étoiles.

On peut mettre en équations l'équilibre d'une étoile soumise aux forces de gravitation et de pression.
Ces équations ont-elle une solution ? Autrement dit, une étoile peut-elle être en équilibre quelle que soit la matière qui la compose ?

En fait, cela dépend de la relation entre la pression et la densité.
Dans les étoiles « ordinaires », la pression dépend de la densité et la température. Dans les étoiles très denses, cette relation est souvent de la forme

$$P = n^{\gamma}.$$



Tant que $\gamma > 4/3$, il existe une solution d'équilibre.
Sinon... l'étoile s'effondre.

Une question fondamentale

Pour comprendre la nature de l'équilibre d'une étoile, il est primordial de comprendre comment la pression dans la matière de l'étoile dépend des divers paramètres.

En d'autre termes, comment la matière augmente sa température et/ou diminue son volume sous l'effet du poids qui l'écrase ?

Une question fondamentale

Pour comprendre la nature de l'équilibre d'une étoile, il est primordial de comprendre comment la pression dans la matière de l'étoile dépend des divers paramètres.

Cela dépend de quoi est constituée la matière.

Le photon

Particule élémentaire

Vecteur des interactions électromagnétiques, notamment de la lumière.

Masse : nulle

Vitesse : c ~300 000 km/s~3 10^8 m/s

Caractérisé par une direction et un sens de propagation, une polarisation (droite ou gauche), et

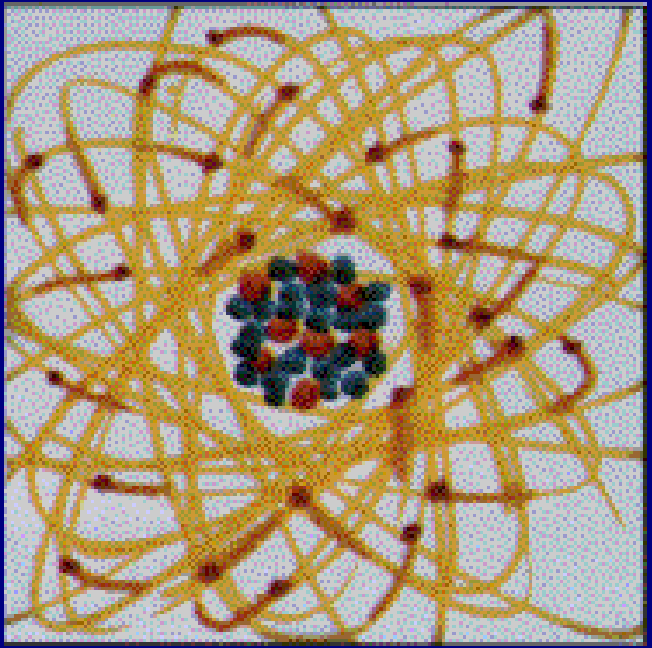
une fréquence ou une longueur d'onde ou une énergie ou une quantité de mouvement (couleur).

Extrêmement abondant dans l'univers.

Télescope U1 VLT.

Laser (labo USAF)

L'électron



Particule élémentaire

Famille des leptons (le plus léger ayant une charge électrique).

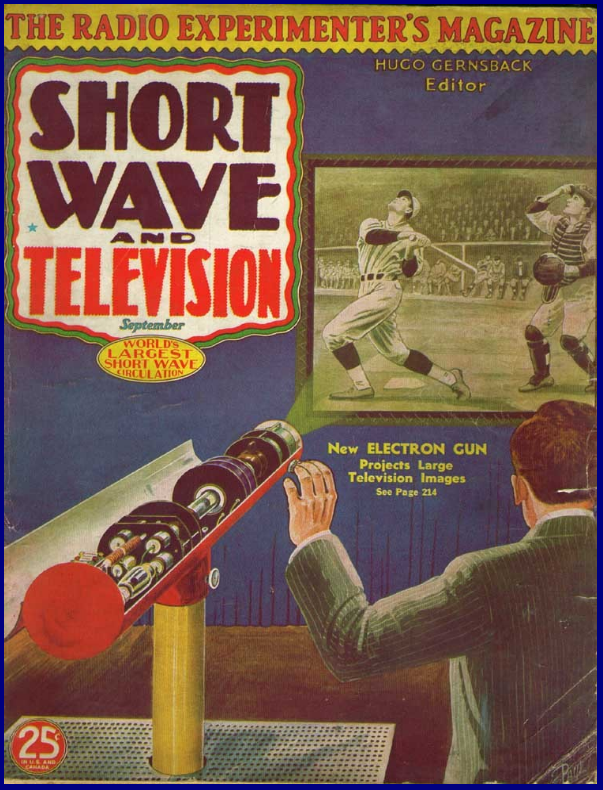
Masse :m_e 0,9 10^{-30} kg.

Charge électrique : e=1,6 10-19 C.

Sur terre, la plupart sont piégés à la périphérie des atomes. Sont la monnaie d'échange des réactions chimiques.

Existent à l'état libre dans les plasmas et les conducteurs électriques.

Extrêmement abondant dans l'univers.



Le proton

Particule élémentaire

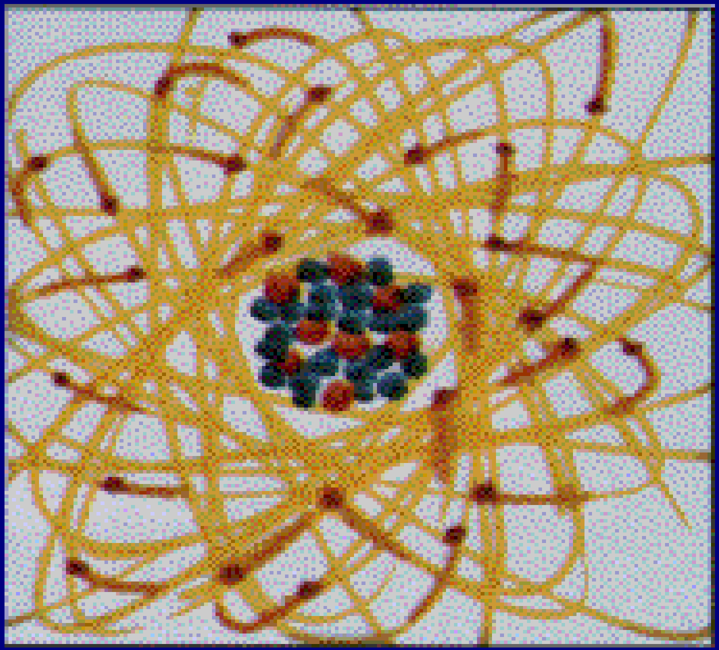
Famille des hadrons (le plus léger).

Masse :m_p = 1836 m_e = 1,67 10^{-27} kg.

Charge électrique : e=1,6 10-19 C.

Sur terre, la plupart sont piégés dans les noyaux atomiques. Dans l'espace, existent à l'état libre.

Extrêmement abondant dans l'univers.



Des noyaux atomiques

Constitués de nucléons : protons et de neutrons

(neutrons et protons sont des hardons.)

Masse :~A m_p = A 1,67 10^{-27} kg, où A est le nombre de nucléons

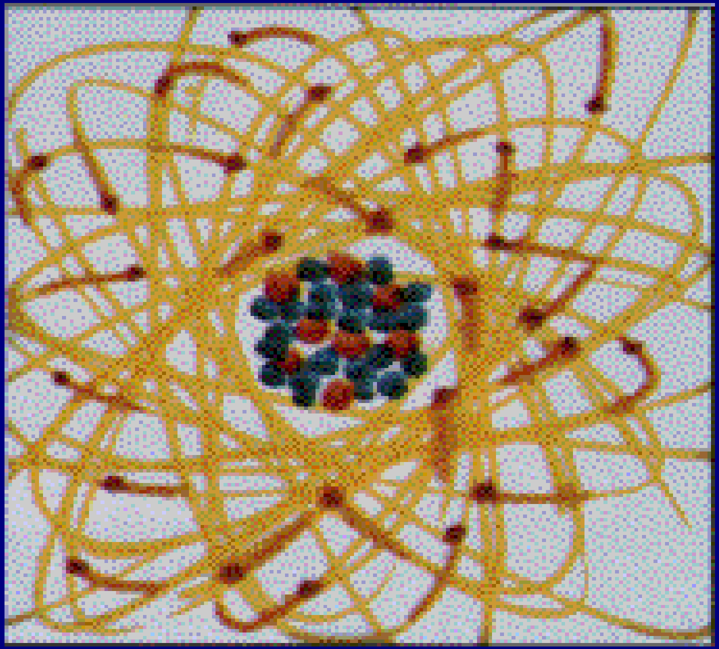
Charge électrique : e=1,6 10-19 C.

Densité : 10^{38} nucléons cm^{-3}

Densité de masse : 2. 10^{14} g cm^{-3}.

C'est énorme.

La cohésion est assurée par l'interaction forte.



Le neutrino

Particule élémentaire. Famille des leptons.

Masse :quasi nulle. Non mesurée.

Charge électrique : nulle.

Sur terre, ne font que passer. Produits lors de la désintégration radioactive beta.

N'est sensible qu'à l'interaction faible. Passe muraille. Presque rien ne l'arrête.

Produit au cours de certaines réactions nucléaires, notamment dans les étoiles et lors de l'explosion de supernovae.

Extrêmement abondant dans l'univers.

L'atome d'hydrogène

L'atome le plus simple.

Noyau : un proton.

Périphérie : un électron.

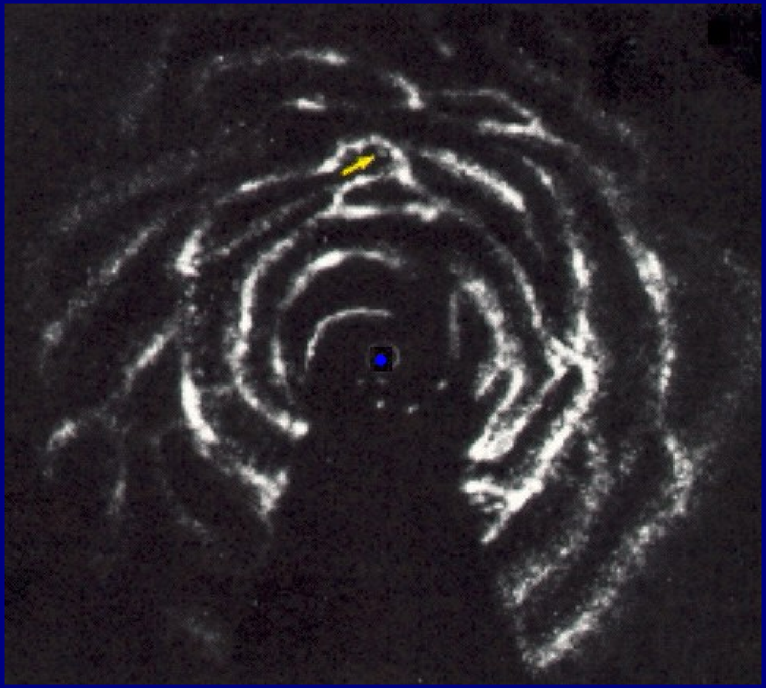
Masse : A peu près celle du proton.

Charge électrique : nulle. Mais moment électrique non nul.

L'atome le plus répandu dans l'univers.

En nombre 10 atomes d'hydrogène pour un d'hélium. En masse : 75% d'hydrogène.

L'atome d'hydrogène émet des radiations observables. Notamment des émissions radio caractéristiques à 21 cm (radioastronomie).



Répartition des nuages HI (21cm) dans notre galaxie.

Les paramètres fondamentaux de la pression.

- La nature de la matière : lumière, matière avec une masse, neutrinos...
- pour de la matière pesante : nature des interactions (chimiques/electromagnétiques, nucléaires faibles ou fortes), température, densité.
- pour de la lumière : spectre (ensemble des fréquences/énergies des photons), transparence/opacité du milieu
- neutrinos : énergie et nature des neutrinos.

L'exemple simple du salon de coiffure subaquatique.

L'eau réagit à la pression (extérieure) en s'adaptant d'un façon très simple : elle ne se comprime pas :

sa densité ne dépend pas de la force avec laquelle on appuie sur l'eau.

Equation d'état : densité=constante.

En échange : la pression est imposée seulement par les conditions « extérieures » (ici le poids de la colonne d'eau et de l'air au dessus).

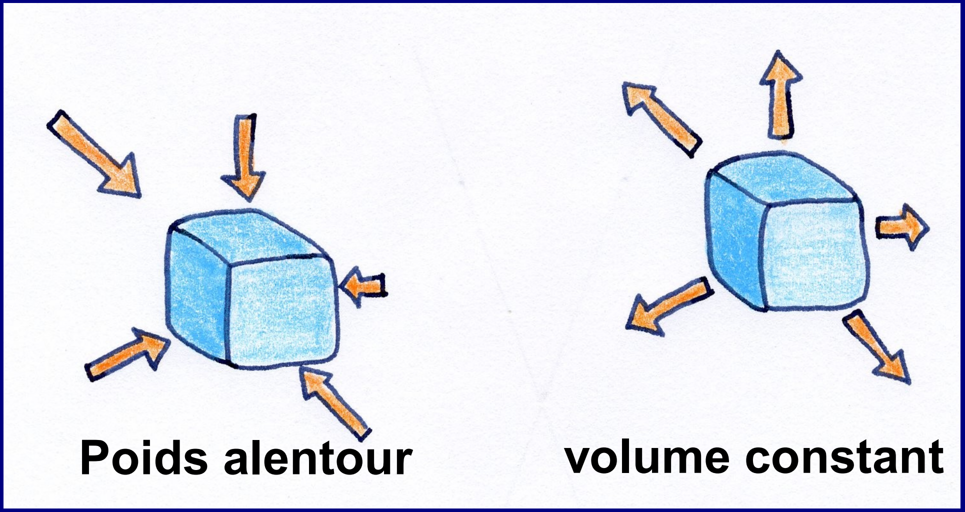
L'exemple simple du salon de coiffure subaquatique.

L'eau réagit à la pression (extérieure) en s'adaptant d'un façon très simple : elle ne se comprime pas :

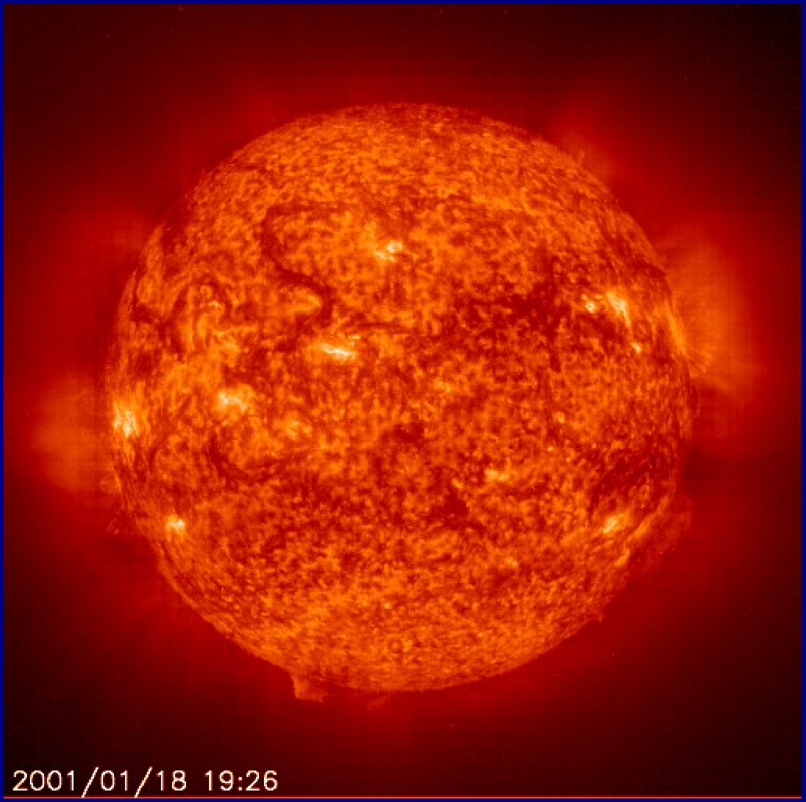
sa densité ne dépend pas de la force avec laquelle on appuie sur l'eau.

Equation d'état : densité=constante.

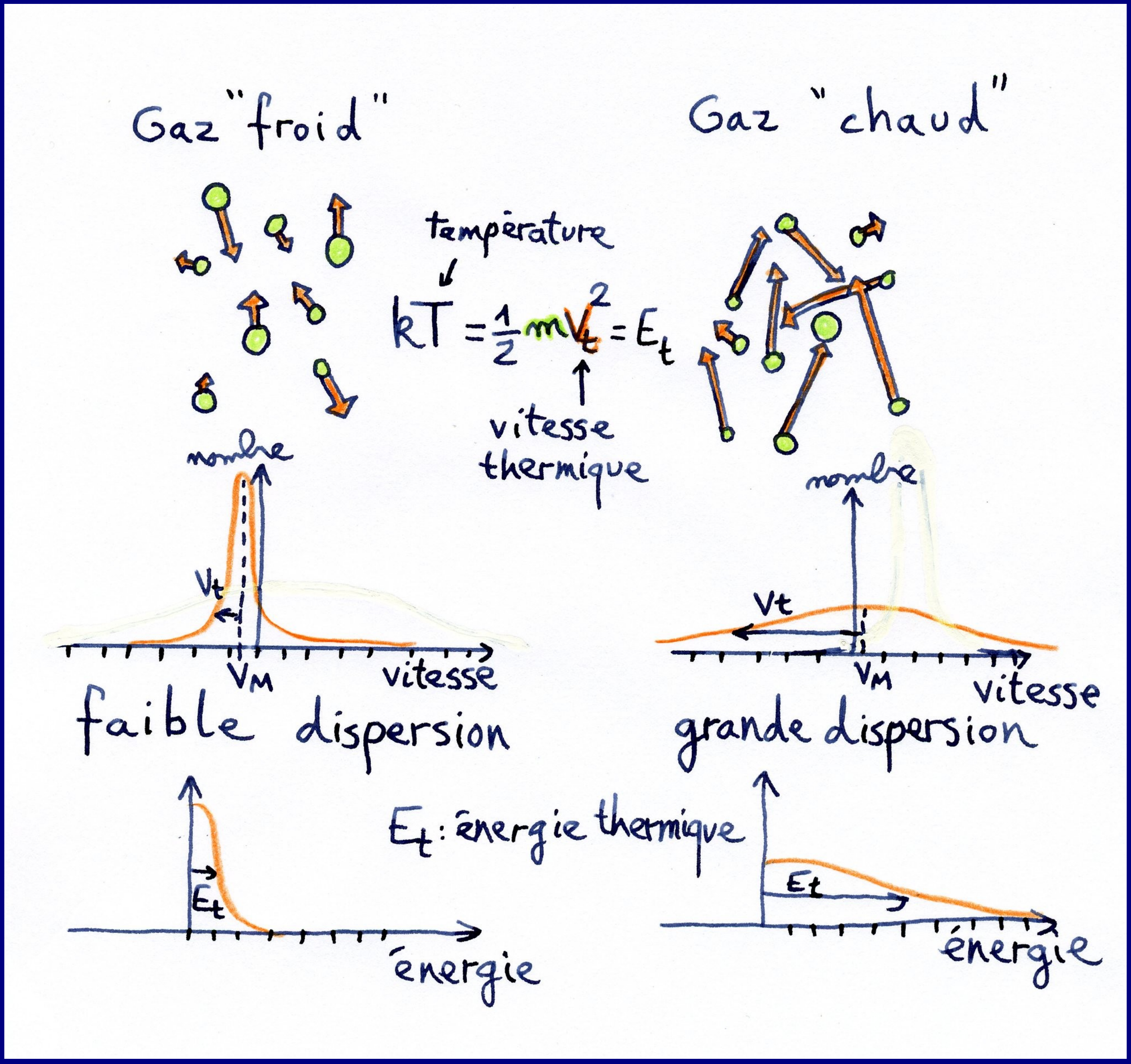
En échange : la pression est imposée seulement par les conditions « extérieures » (ici le poids de la colonne d'eau et de l'air au dessus).



Cas d'un gaz



Temperature d'un gaz.

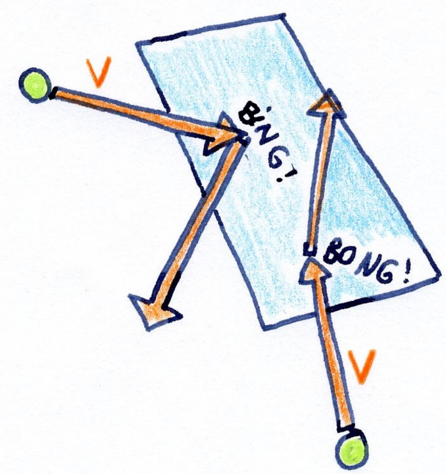


Les forces de pression

Expérience mentale

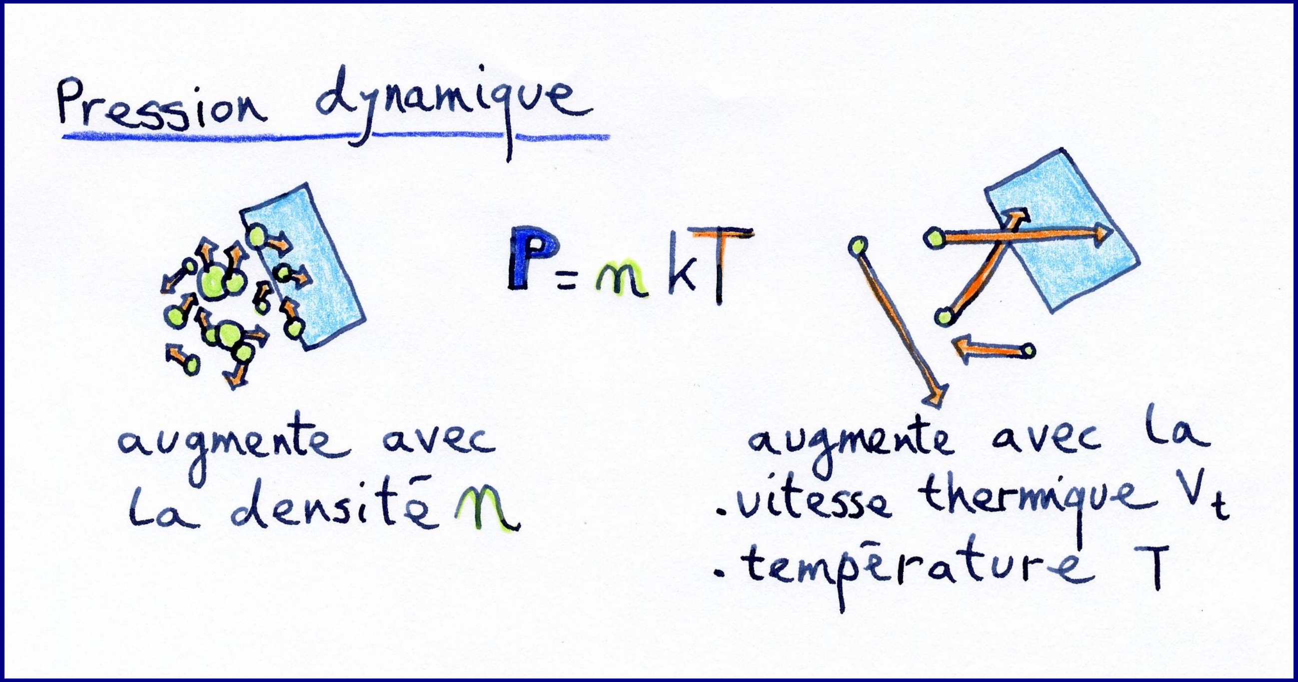
- Introduire un écran (microscopique)
- Considérer les variations de $m\vec{V}$ des particules (qui rebondissent toutes).
- Additionner le tout
- Diviser par la durée de l'expérience et par la superficie S de l'écran.

On obtient la pression (dynamique).



Pression d'un gaz parfait.
description simple d'une situation ordinaire.

On considère des particules « libres » se propageant en ligne droite, sans collisions les unes avec les autres.

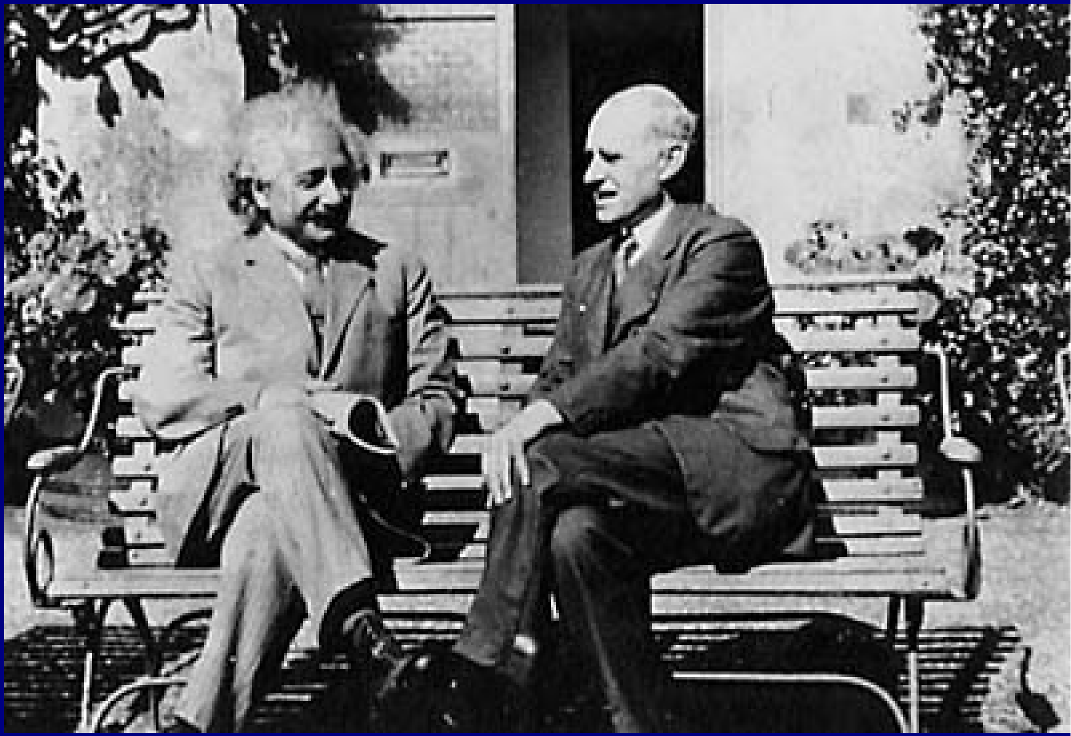


équilibre hydrostatique.

- premiers modèles de structure interne des étoiles, Helmohltz, Kelvin, Lane, Ritter.
- Eddington calcule des équilibres (vers 1910-1920) :
  - l'intérieur est ionisé,
  - peut être décrit comme un gaz parfait.
  - le centre est à quelques millions de Kelvin.
- Eddington fait une théorie (juste) de la pulsation des variables Céphéides.
- Ces théories n'incluent pas (à cette époque) d'explication sur la source d'énergie des étoiles, mais décrivent le reste.

Sir Arthur Eddington (1882-1944).

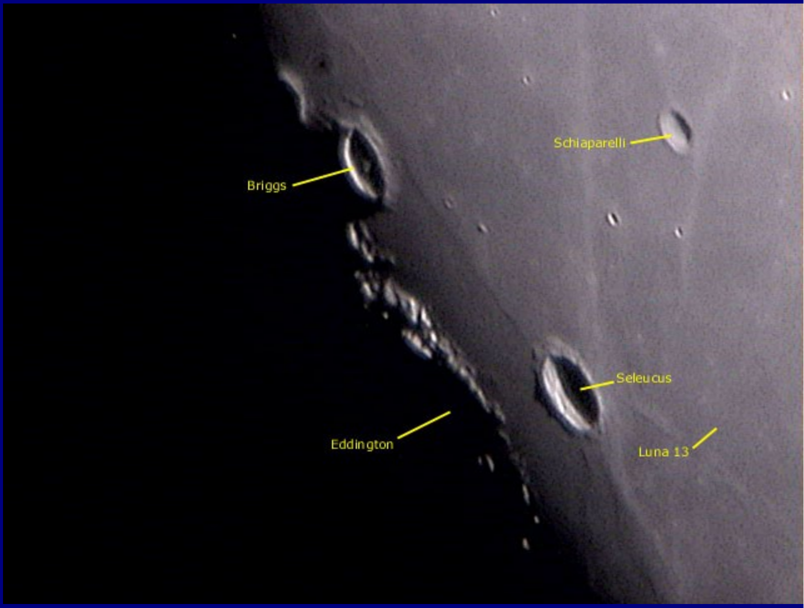
- Chaire d'astronomie (Trinity college) et directeur de l'observatoire de Cambridge.
- Le premier à introduire la théorie de la RG en astronomie. Eclipse Soleil en 1919. Grand porte parole des idées d'Einstein.
- Théories sur l'intérieur des étoiles. « Internal constitution of the stars » (1926).
- Contributions à la théorie de la RG.
- Luminosité d'Eddington (on y reviendra).



Sir Arthur Eddington (1882-1944).

- Quaker, anti-militariste.
- 1914-1918 :Parvient (vient d'avoir la chaire à Cambridge) à ne pas aller à la guerre.
- C'est à cette époque qu'il apprend les travaux d'Einstein (allemand).
- Eclipse 1919 : mauvais temps, mauvaises images. Biaise les résultats en faveur de la théorie d'Einstein.
- Vers 1930, cherche comme Einstein une théorie ultime unifiant RG et mécanique quantique.
- Passion pour les constantes fondamentales. Dérive vers la numérologie. Ses collègues ne le suivent pas.

Sir Arthur Eddington



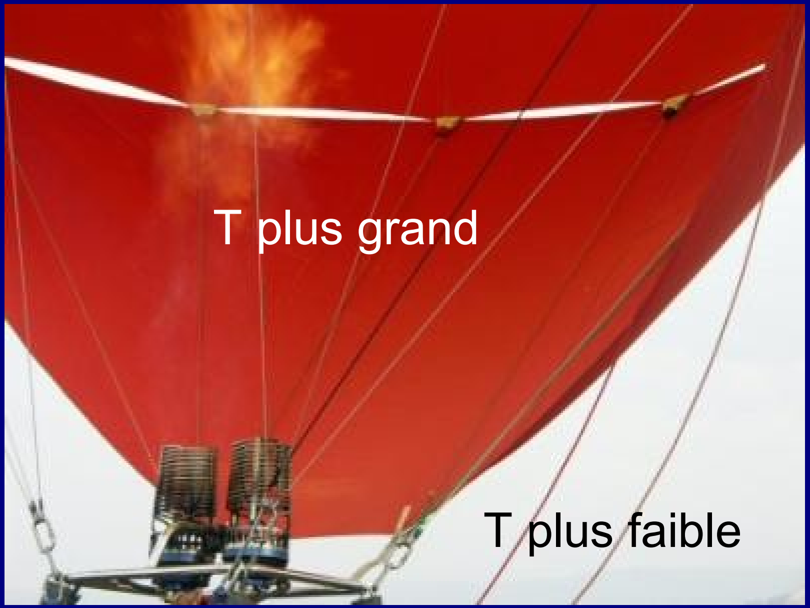
- I believe there are 15 747 724 136 275 002 577 605 653 961 181 555 468 044 717 914 527 116 709 366 231 425 076 185 631 031 296 protons in the universe and the same number of electrons.
  [(136 x 2^{256}) Tarner lecture 1938]

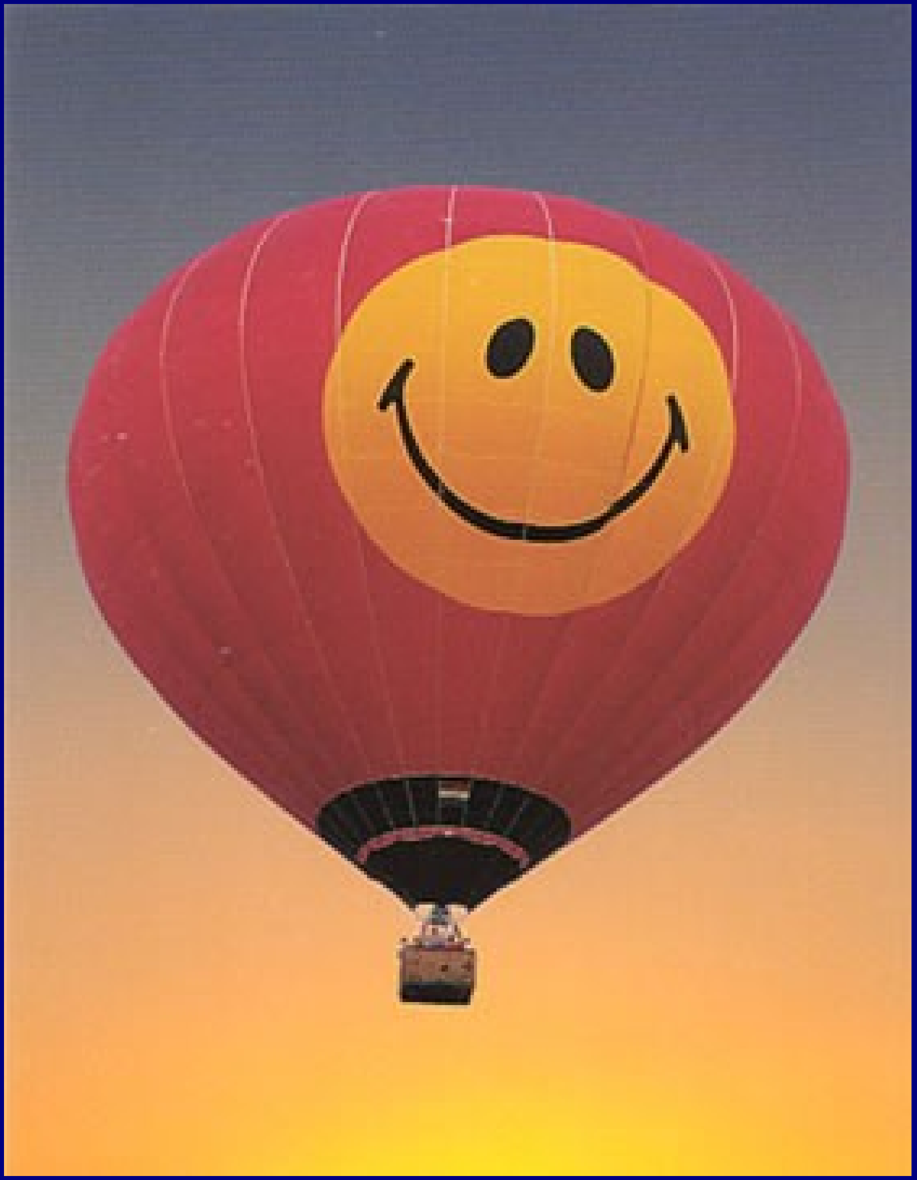
- Schrödinger's wave-mechanics is not a physical theory, but a dodge -- and a very good dodge too.
  Nature of the Physical World (Cambridge 1928)

- The solution goes on famously; but just as we have got rid of all the other unknowns, behold! *V* disappears as well, and we are left with the indisputable but irritating conclusion: 0 = 0. This is a favourite device that mathematical equations resort to, when we propound stupid questions.
  The Nature of the Physical World

- It is also a good rule not to put overmuch confidence in the observational results that are put forward until they are confirmed by theory.

Pression dans les gaz parfaits
Montgolfière

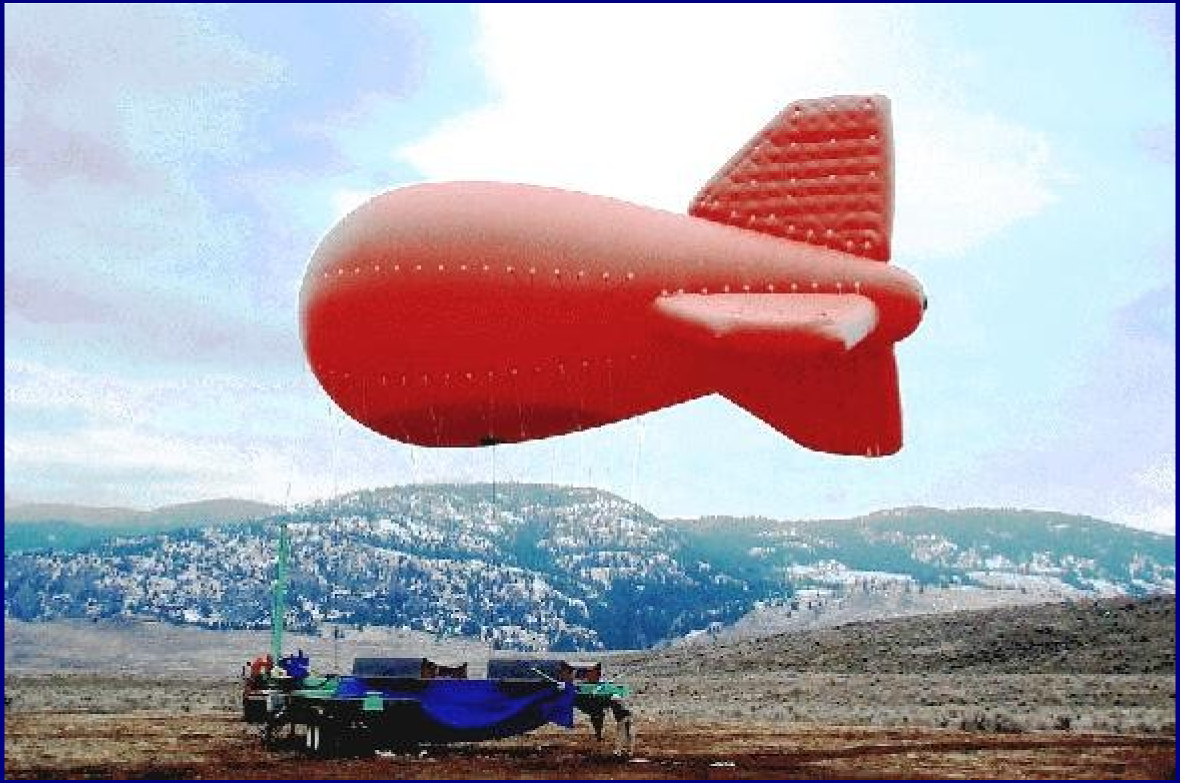




P dehors = P dedans
T dedans > T dehors donc
n dedans < n dehors

le gaz de la Montgolfière est moins lourd,
Archimède fait le reste...

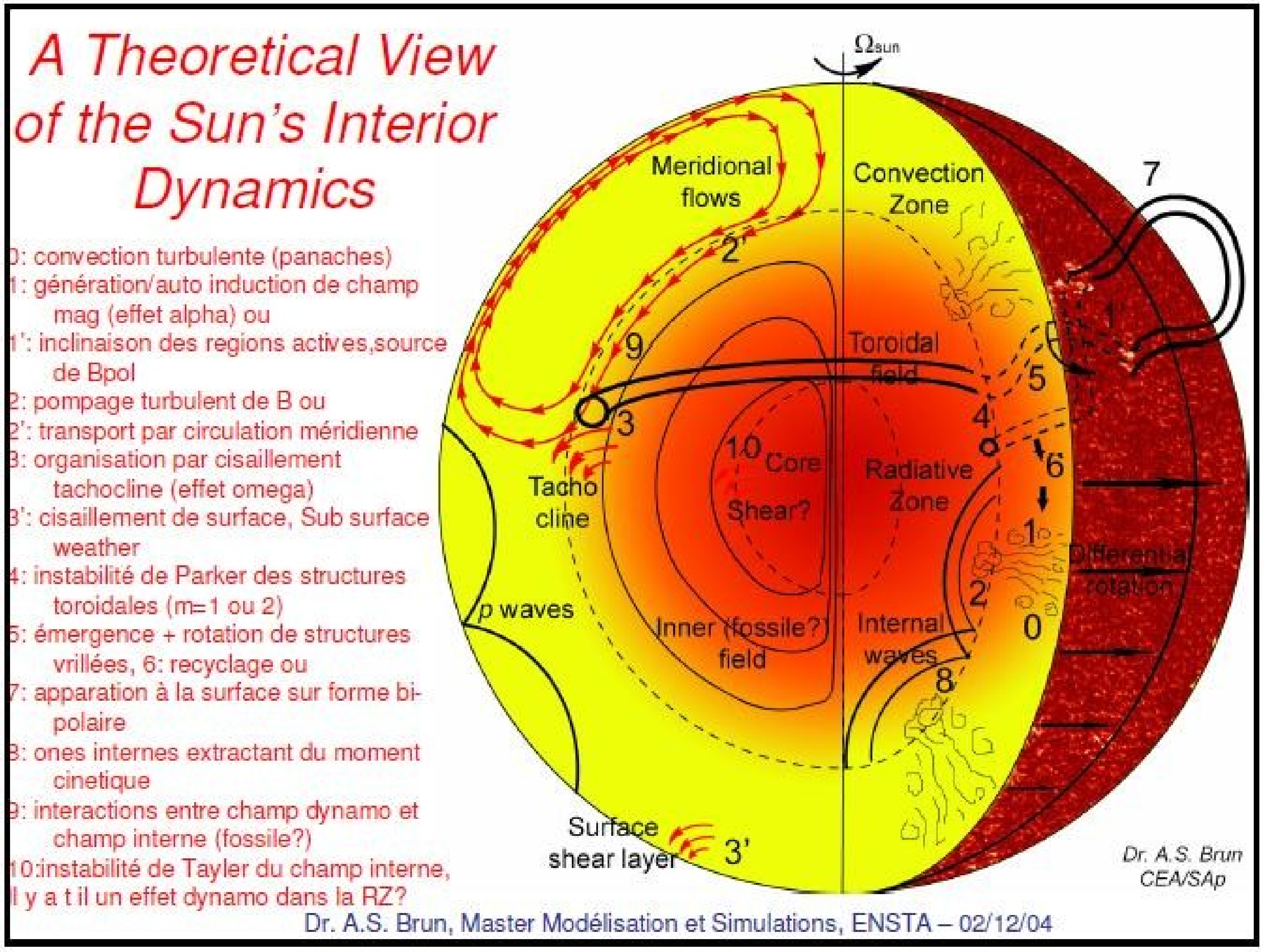
Pression dans les gaz parfaits, aérostat



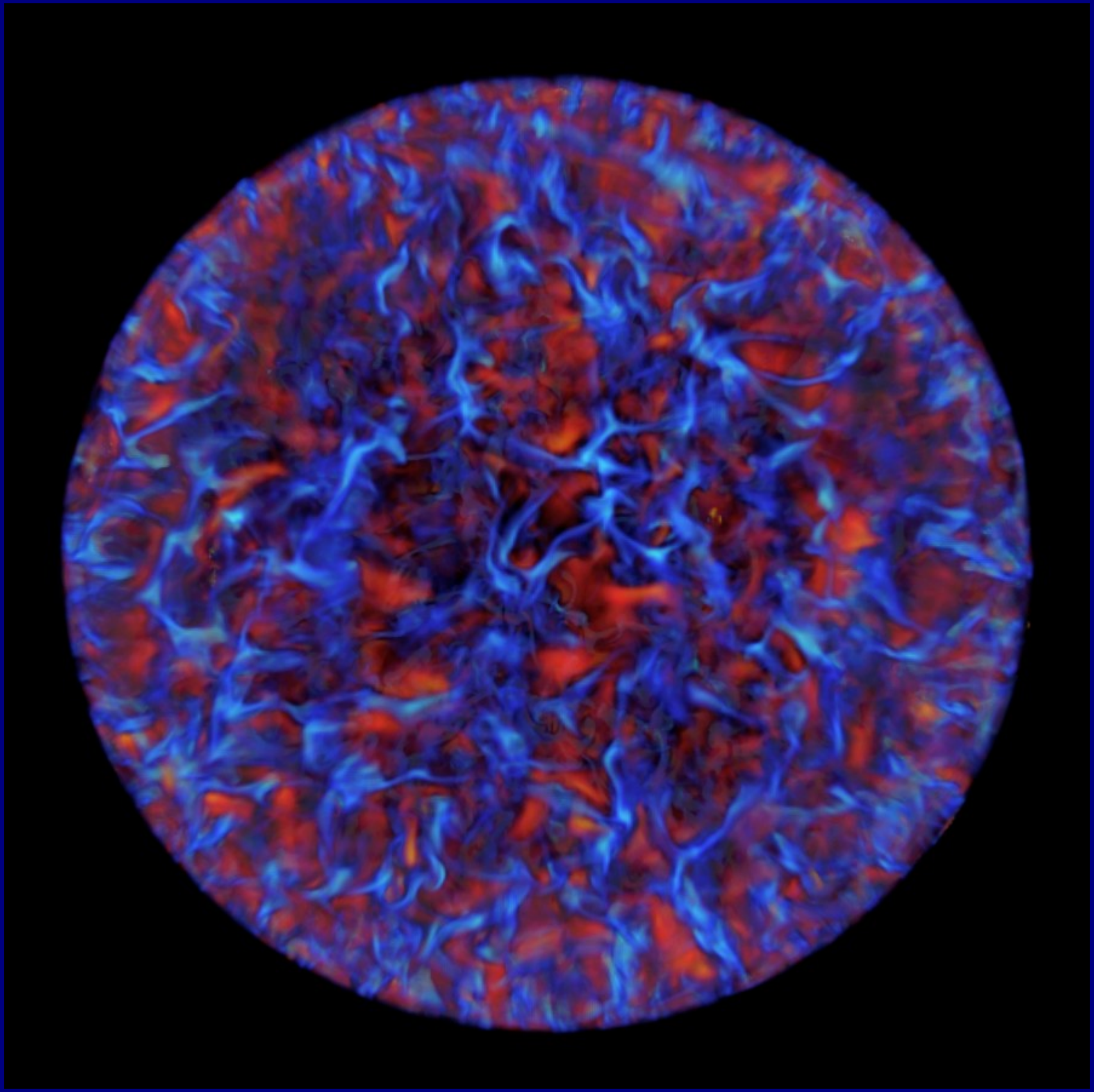
P dehors = P dedans
T dedans = T dehors donc
n dedans = n dehors
mais la masse de chaque particule est plus faible

le gaz du ballon est moins lourd,
Archimède fait le reste...

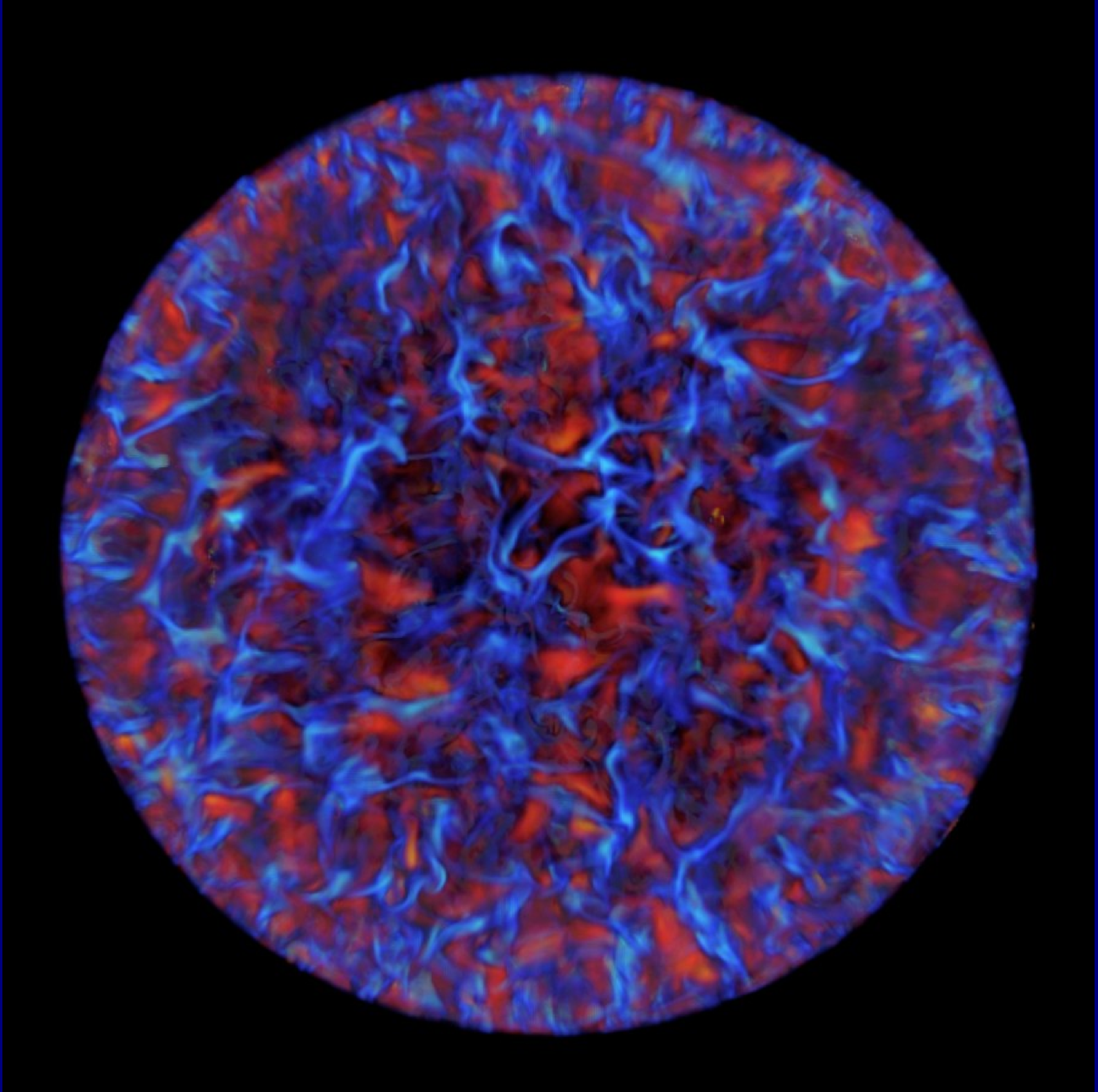
Dans l'intérieur d'une étoile, l'équilibre n'est pas forcément hydrostatique.



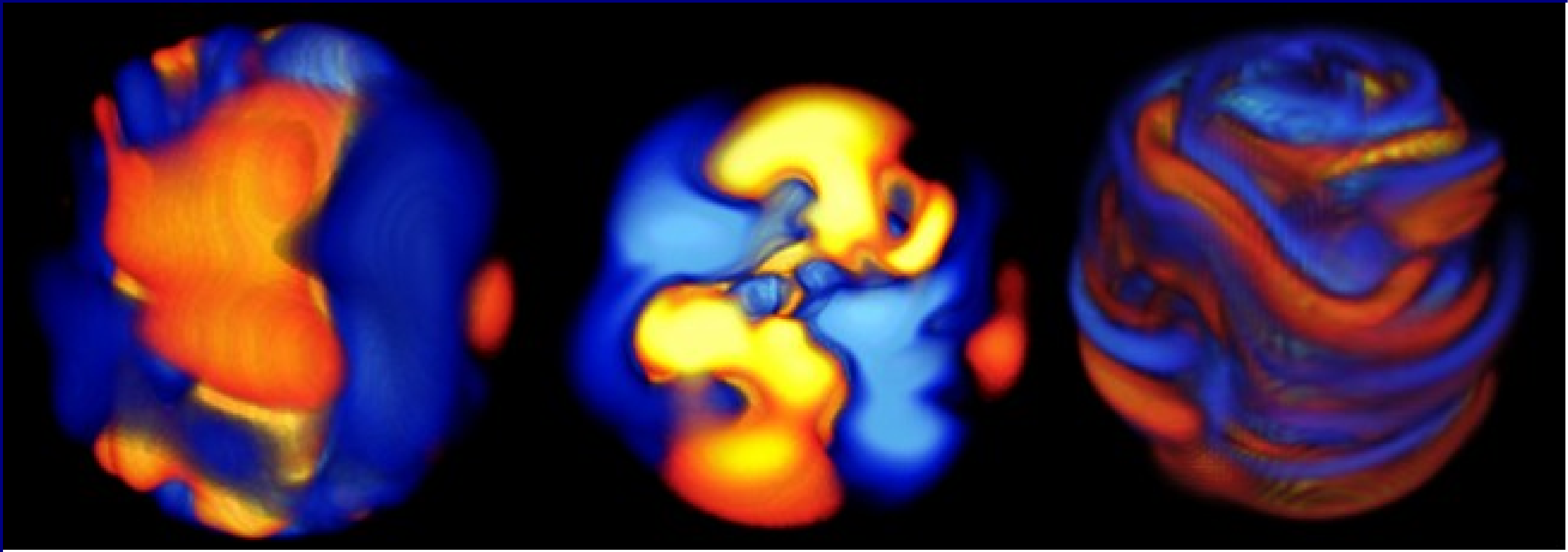
Convection



Convection dans le Soleil, vitesse radiale, simulation (code ASH) Sacha Brun, CEA
En rouge, ça monte, en bleu ça descend.



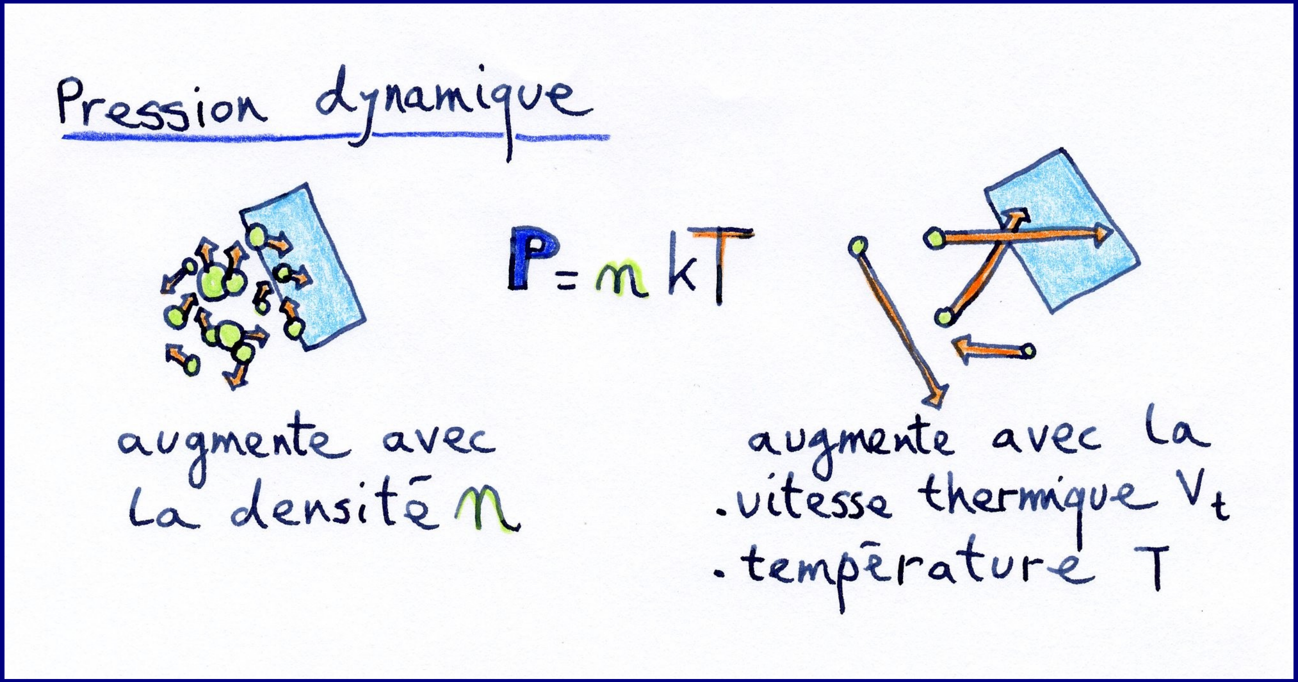
Convection



Convection dans une étoile de classe A, de masse $M=2\ M_S$, vitesse radiale(a,b) et champ magnétique(c), [simulation (code ASH) Sacha Brun, CEA]

Peut-on considérer que toutes les étoiles sont formées d'un gaz parfait ?

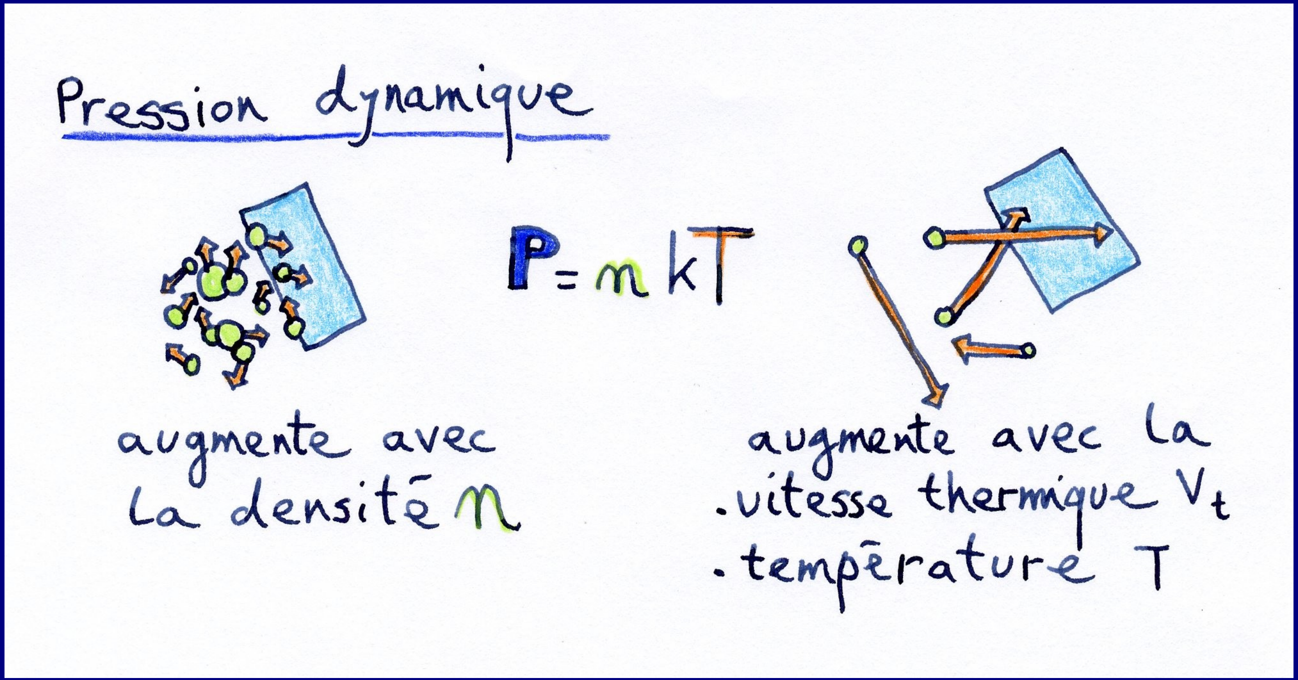
Pression d'un gaz parfait.



peut-on accroître indéfiniment cette pression ?

peut-on augmenter indéfiniment la densité ?

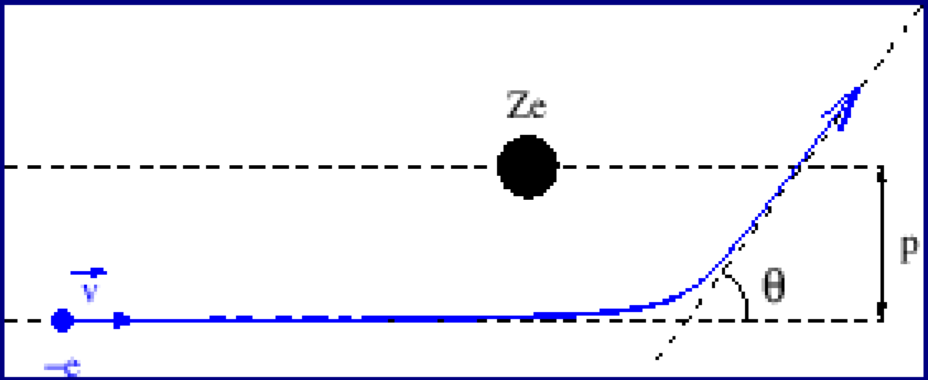
Pression d'un gaz parfait.



Si on augmente la densité, les collisions augmentent
et changent le comportement du fluide. Ex: cas de l'eau.

Pression d'un gaz parfait dans une étoile.

Le gaz dans une étoile est constitué de particules chargées (noyaux d'atomes, électrons...). Plasma.
Collisions : interaction électriques (dites Coulombiennes).



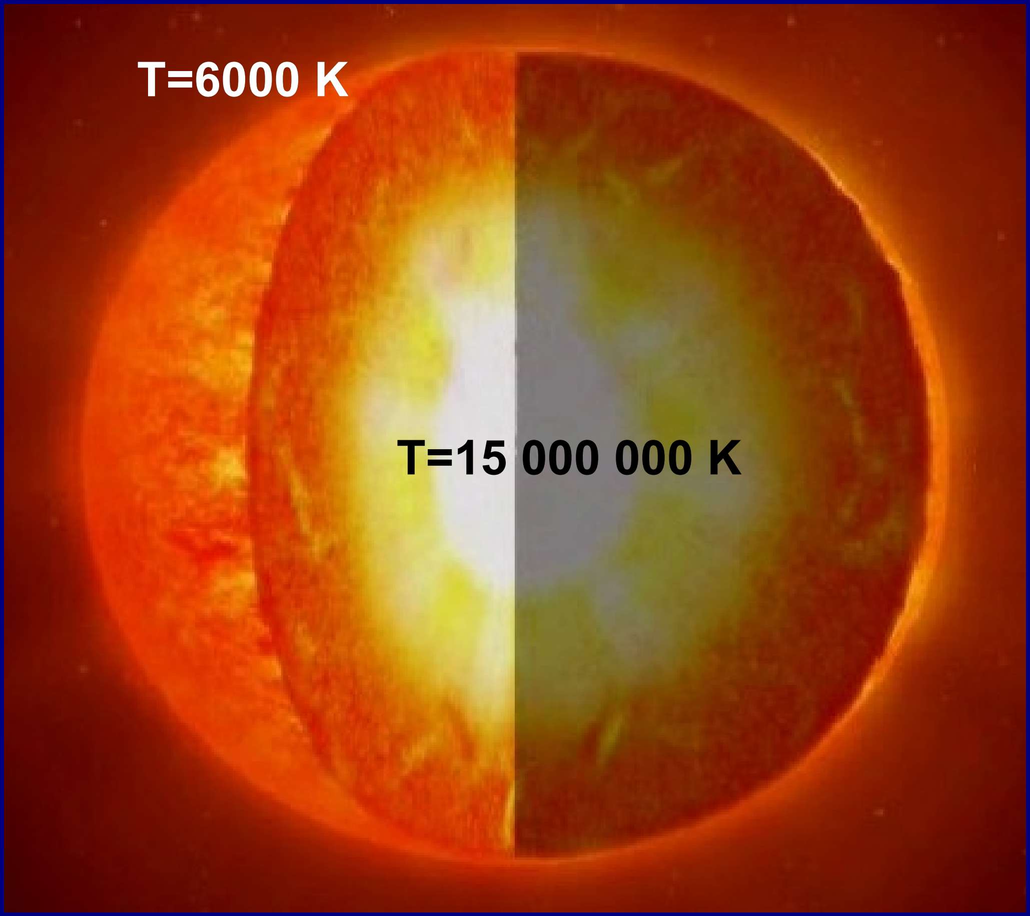
La collision est forte si

- la distance « p » est petite
- l'écart de vitesse entre le projectile et la cible est faible.

Pression d'un gaz parfait dans une étoile.

Les collisions entre particules (chargées) y sont rares.

En effet...



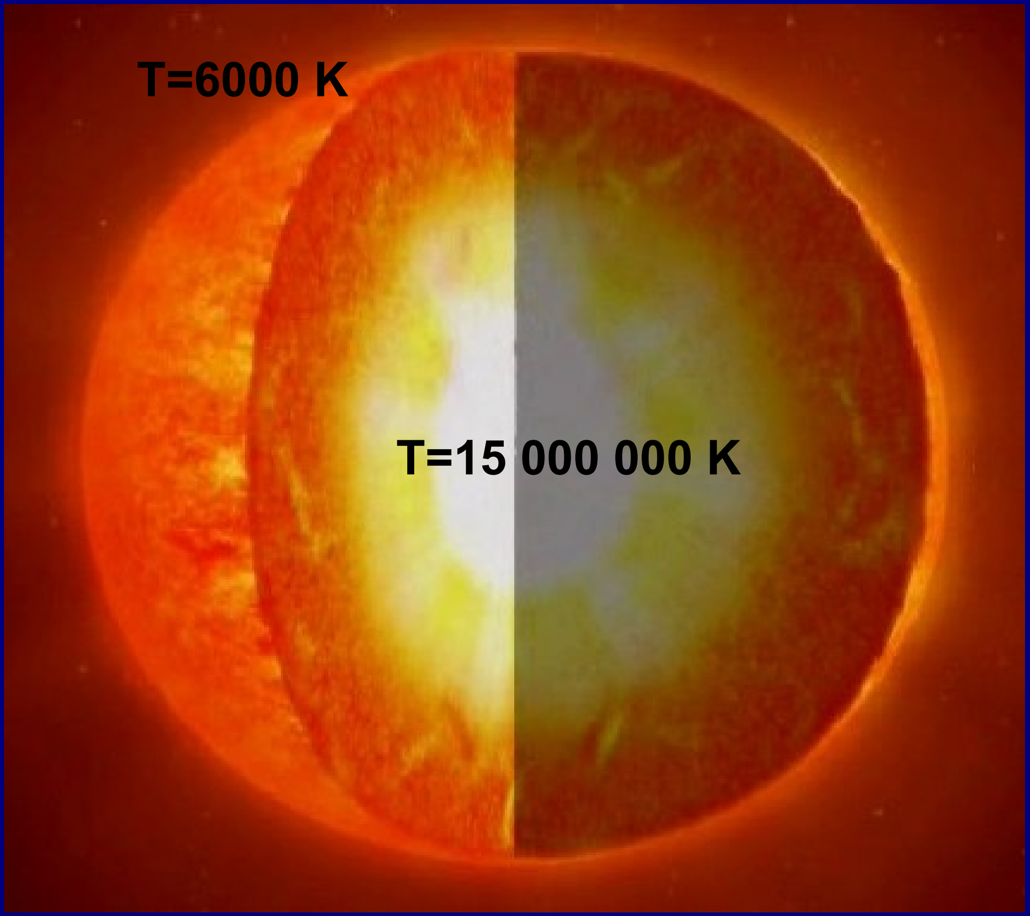
les collisions sont fortes si

- la distance « p » est petite
- l'écart de vitesse entre le projectile et la cible est faible.

...et l'écart de vitesses augmente avec la température.

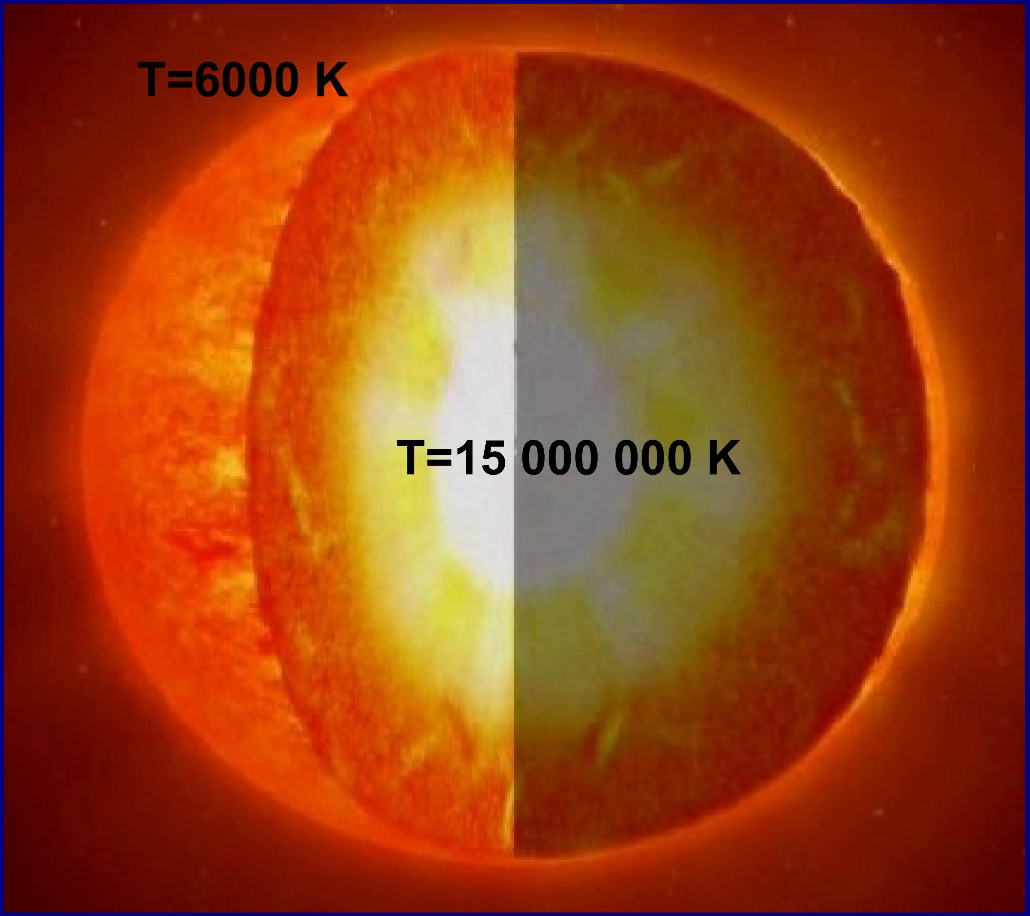
Pression d'un gaz parfait dans une étoile.

L'équation des gaz parfaits fonctionne bien dans les étoiles,
mais pour des raisons différentes que dans les gaz
« familiers » comme l'air.

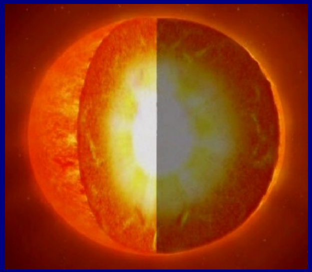


Pression d'un gaz parfait dans une étoile.

La chaleur produite par les réactions nucléaires permet de garder une température suffisante (dans toute l'étoile) pour que la pression des gaz parfaits compense l'écrasement du au poids de sa propre matière.



Mais si l'étoile est très dense ?



Est-ce possible ?
Oui, si les réactions nucléaires cessent.