

2.4.5 Postulat fondamental de la Relativité générale

Postulat

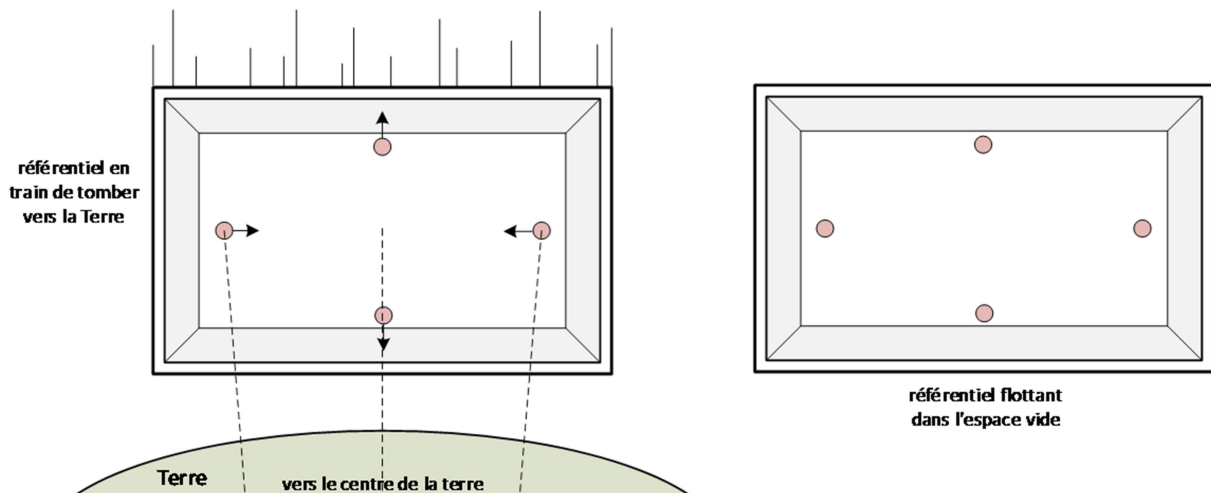
La géométrie de l'espace-temps est déformée par la présence de masses et d'énergie, d'où un effet gravitationnel sur les mouvements, les durées, etc.

Cette déformation est un étirement, une contraction ou une torsion qui varie d'un point (événement) de l'espace-temps à un autre, donc d'un lieu à un autre et d'un instant à un autre.

Dans l'espace-temps déformé par un champ de gravitation la vitesse de la lumière dépend des coordonnées et de l'observateur ; la longueur d'onde d'un rayonnement peut s'allonger ou raccourcir selon le lieu et l'instant.

Réalité de l'attraction gravitationnelle

Considérons dans la figure ci-dessous deux référentiels (par exemple liés à des ascenseurs).



Dans chacun des référentiels il y a 4 billes situées près des parois, du plafond et du plancher, comme sur le référentiel de droite qui flotte dans un espace sans attraction gravitationnelle.

Dans l'ascenseur de droite, qui ne subit pas de gravitation, les 4 billes ne subissent aucune force : elles restent immobiles par rapport à la cabine.

Si l'ascenseur de gauche tombe, attiré par la pesanteur terrestre :

- La bille près du plancher est plus proche du centre de la Terre que le centre de gravité de l'ascenseur : elle est donc attirée plus fort que lui et subit donc une force vers le bas, qui la plaque contre le plancher ;
- La bille près du plafond est plus éloignée du centre de la Terre que le centre de gravité de l'ascenseur : elle est donc attirée moins fort que lui et subit donc une force vers le haut, qui la plaque contre le plafond.

L'effet combiné de ces deux forces est appelé "effet de marée", parce que sur la Terre il explique les marées qui montent en deux points opposés alignés avec le

centre de la Terre, et descendent en deux points à 90° de cette ligne (cet effet théorique est modulé par la forme des côtes et de leur plancher océanique).

- Les billes de droite et de gauche sont attirées vers le centre de la Terre dans des directions qui ne sont pas tout-à-fait parallèles, chacune formant un petit angle avec la verticale. Elles ont donc tendance à se rapprocher du centre de l'ascenseur.

Conclusion : la gravitation est bien réelle.

2.4.5.1 La gravitation ralentit le temps

Source : [B217] page 244 note 8

Le temps est ralenti d'autant plus que la gravitation est intense

Plus un champ de gravitation est intense, plus le temps y est ralenti. Ainsi, puisqu'en plaine on est plus près du centre de gravité de la Terre qu'en montagne, le champ gravitationnel y est plus fort et le temps s'y écoule moins vite : une horloge en plaine va plus lentement qu'une horloge en montagne, la première prend sur la seconde un retard tel que :

$$t_{montagne} - t_{plaine} = \frac{gh}{c^2} t_{plaine}$$

où :

- g est l'accélération de la pesanteur, 9.81m/s^2 ;
- h est la différence d'altitude en m ;
- c est la vitesse de la lumière, $3 \cdot 10^8\text{m/s}$.

Exemple : pour une différence d'altitude de 1000m et une durée $t_{plaine} = 1\text{an}$ on trouve $t_{montagne} - t_{plaine} = 3.4 \mu\text{s}$ (3.4 microsecondes). L'influence de la gravitation sur le temps est donc minuscule dans ce cas.

La différence de vitesse d'écoulement du temps entre le sol et un avion a été mesurée en 1972 : voir [B218].

Ralentissement du temps à l'approche d'un trou noir

Lorsqu'en venant de loin un observateur A approche à vitesse constante de l'Horizon des événements d'un *trou noir*, un observateur lointain immobile B le voit aller de moins en moins vite, car le champ de gravitation du trou noir de plus en plus fort pour A en ralentit le temps. Quand A atteint l'horizon son temps vu par B s'arrête, il paraît immobile.

Un corps en chute libre va vers un endroit où le temps passe plus lentement

Dans un champ gravitationnel un corps libre suit une géodésique ; il va naturellement vers un endroit où le temps passe plus lentement.

2.4.6 La gravitation n'est pas due à la matière, mais à son énergie potentielle

Source : [B4] page 237

Une expérience de pensée

Considérons, dans un espace vide, une boîte aux parois parfaitement réfléchissantes, contenant de la matière et de l'antimatière tenues à distance grâce à des pièges magnétiques. Une particule extérieure est lâchée au repos, à une très grande distance de la boîte. Le champ gravitationnel de la matière et de l'antimatière accélère la particule vers la boîte, et la particule gagne de l'énergie cinétique en s'approchant. Juste au moment où la particule dépasse la boîte, on éteint les pièges magnétiques, ce qui permet à la matière et à l'antimatière de s'annihiler mutuellement, pour produire des photons ; toute la masse est transformée en rayonnement et celui-ci reste dans la boîte, piégé par les parois réfléchissantes.

Si la *masse* était la source du champ gravitationnel, alors comme les photons ont une masse nulle, la boîte ne produirait plus aucun champ gravitationnel. La particule extérieure pourrait alors emporter jusqu'à l'infini l'énergie cinétique qu'elle a gagnée en s'approchant. En d'autres termes, cette expérience permettrait d'envoyer des particules à l'infini avec une énergie créée à partir de rien, ce qui violerait le principe de conservation de l'énergie.

Conclusions

- Ce n'est pas la matière qui produit le champ gravitationnel, c'est l'énergie potentielle qu'elle contient. Cette énergie est celle de la force de gravitation, pas celle de la force électromagnétique, de la force nucléaire ou de la force faible. (Voir *Les 4 forces fondamentales de la nature*).
- Même en l'absence de "matière" visible, l'énergie correspondante produit la gravitation ; exemples : les trous noirs, la matière noire et l'énergie noire de l'Univers. (Voir *Proportions de matière baryonique, matière noire et énergie noire.*)

2.4.7 Equation d'Einstein

La Relativité générale décrit la courbure de l'espace-temps en tout point où agit une masse gravitationnelle. Voici l'équation d'Einstein, qui calcule cette courbure en fonction de sa matière-énergie :

$$G^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\mu\nu}$$

où :

- $G^{\mu\nu}$ est un tenseur (tableau de 4 lignes x 4 colonnes) décrivant la courbure de l'espace-temps en un point. Nous définirons « tenseur » un peu plus bas ;
- G est la constante universelle de gravitation ;
- c est la vitesse de la lumière ;
- $T^{\mu\nu}$ est un tenseur décrivant la densité et le flux de matière-énergie en ce point.

Cette équation de tenseurs représente un système de 10 équations habituelles.

Elle constitue, avec l'équation de calcul des géodésiques d'un espace-temps en tout point, l'essentiel de la Relativité générale ; cette dernière permet de calculer le déplacement d'un corps libre dans l'espace-temps.

[B4] page 8 résume la théorie de la Relativité générale en citant John Archibald Wheeler :

« L'espace-temps dit à la matière comment se déplacer ;
la matière dit à l'espace-temps comment se courber. »

Interprétation de l'équation d'Einstein

Pour que l'équation d'Einstein soit une loi physique, c'est-à-dire une formule de calcul valable dans tout l'espace-temps, elle doit être indépendante du référentiel de cet espace-temps déformé par la présence de masses, c'est-à-dire de la position de son origine et de l'orientation de ses axes. C'est pourquoi c'est une égalité de *tenseurs*, notion que nous allons définir en quelques étapes.

Critiques du modèle statique d'Univers résultant de l'équation d'Einstein

Cette équation décrit la géométrie de l'Univers résultant de la présence de matière-énergie à *un instant donné*.

- La première critique de ce modèle d'Univers de 1915 est son caractère statique : Einstein n'y a pas étudié d'évolution (comme Friedmann l'a fait en 1922-1924) ; en particulier, il avait délibérément exclu l'expansion découverte par Hubble en 1929, en choisissant une valeur de la constante cosmologique qui stabilise la géométrie de l'Univers, empêchant toute expansion ou contraction.
- La seconde critique est son instabilité : Einstein y a défini arbitrairement la cosmologique produisant une gravitation et une pression négatives compensant exactement la gravitation et permettant à l'espace-temps d'être plat (euclidien). Or cette solution est instable : une variation même infime de cette constante au commencement de l'Univers aurait été très amplifiée par la suite et aurait fait basculer la géométrie de l'espace de plat à hyperbolique (voué à se dilater) ou à sphérique (voué à se contracter).

La solution choisie par la nature pour éviter l'instabilité est l'inflation, qu'Einstein n'a pas prévue bien qu'elle résulte de son équation, comme on l'a vu par la suite. Voir *Problème de l'espace plat, c'est-à-dire de courbure nulle*.