

# Voyage Pour Proxima

Comprendre Einstein  
plus vite que la lumière !



La relativité en  
bande dessinée  
(20 planches)

Jeu inclus :

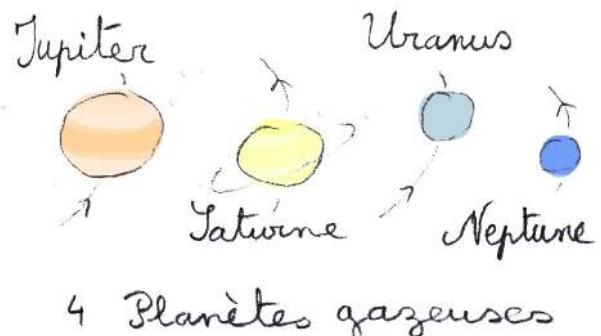
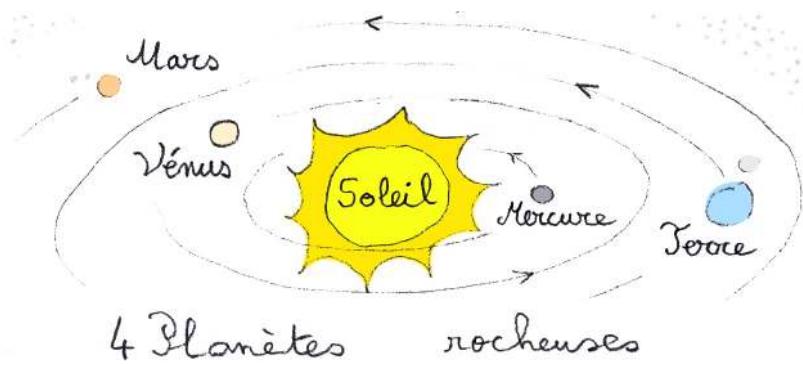
Course  
pour Proxima

Un jeu de plateau  
à découper soi-même.  
Les joueurs doivent aller à  
Proxima et revenir sur Terre.  
Le joueur qui revient le plus  
jeune a gagné !





Nous vivons sur la Terre, petite boule fragile qui tourne autour de son étoile : le Soleil. Au total, huit planètes gravitent autour de notre Soleil.

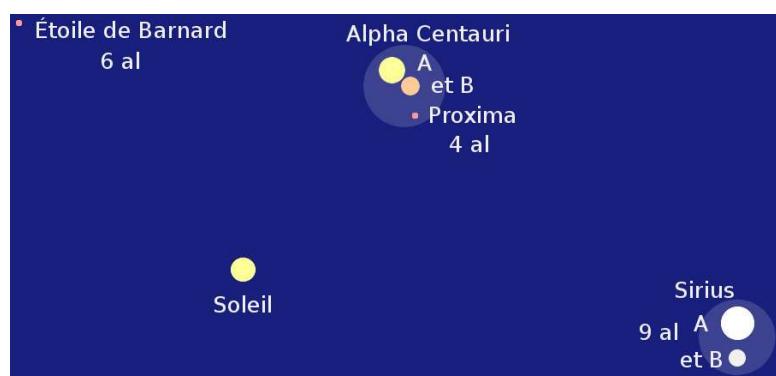


Et toutes les autres étoiles que nous voyons la nuit sont elles aussi des «Soleils» bien plus éloignés de nous autour desquels gravitent d'autres planètes. Celles-ci sont appelées exoplanètes et les astronomes en découvrent toujours plus de nouvelles. Très probablement celles-ci abritent différentes formes de vies. Ces étoiles sont des centaines de milliards et appartiennent à notre galaxie : la Voie Lactée. Nous voyons par une nuit bien noire sans nuages la tranche de notre galaxie. Ci-dessous une représentation de la Voie Lactée telle qu'elle serait vue de l'extérieur.

Proxima est l'étoile la plus proche de notre système solaire. Proxima est une petite étoile, bien plus petite que le Soleil, c'est une naine rouge. Elle fait partie du système stellaire Alpha du Centaure constitué de deux autres étoiles qui ressemblent elles, au Soleil. L'ensemble est à quatre années-lumière de la Terre. Nous avons déjà découvert une planète autour de Proxima dans la zone habitable.

Nous avons représenté ci-dessous les étoiles qui nous sont les plus proches. En astronomie, nous utilisons souvent l'année-lumière comme unité de distance (notée a.l. sur le dessin).

Cette distance correspond à celle parcourue par la lumière dans le vide pendant un an.



Étoiles les plus proches de notre Soleil.



Nick Risinger / NASA / ESA

*Une vue d'artiste de notre galaxie. Le cercle blanc montre l'emplacement de notre Soleil et de ses étoiles voisines.*

La lumière émise par Proxima met quatre années pour nous parvenir. Et la lumière va vite, plus d'un milliard de km/h, ainsi Proxima est à plus de 40 000 milliards de kilomètres de nous.

Nous pouvons voir le système stellaire d'Alpha du Centaure le soir dans le ciel étoilé de l'hémisphère Sud. En effet, l'étoile Alpha Centauri A est la quatrième étoile la plus brillante du ciel nocturne. Sur la photo, l'étoile la plus brillante, à gauche, est Alpha Centauri.

En fait, ce n'est pas une étoile mais un couple d'étoiles, c'est une étoile double avec les composantes A et B qu'on ne peut pas distinguer séparément à l'œil nu.

Sur l'image en bas de la page, l'étoile est placée au niveau du genou avant gauche du Centaure ! Proxima n'est pas pour sa part visible à l'œil nu, elle est située un peu plus bas, au tiers du chemin entre le genou et le sabot.

Bien sûr ce n'est que de l'imaginaire projeté dans le ciel, mais ça aide à repérer Alpha Centauri sur la photo. Les constellations elles-mêmes n'ont un sens physique que très limité. Les étoiles d'une constellation semblent proches les unes des autres mais ce n'est qu'une impression vu depuis la Terre. En fait, elles peuvent être très éloignées, ce n'est qu'une question d'alignements fortuits.

Par exemple, page 6, nous avons représenté les étoiles principales de la constellation de la petite ourse, aussi appelée la petite casserole. Il est intéressant de savoir reconnaître cette constellation dans le ciel de



Logiciel Stellarium



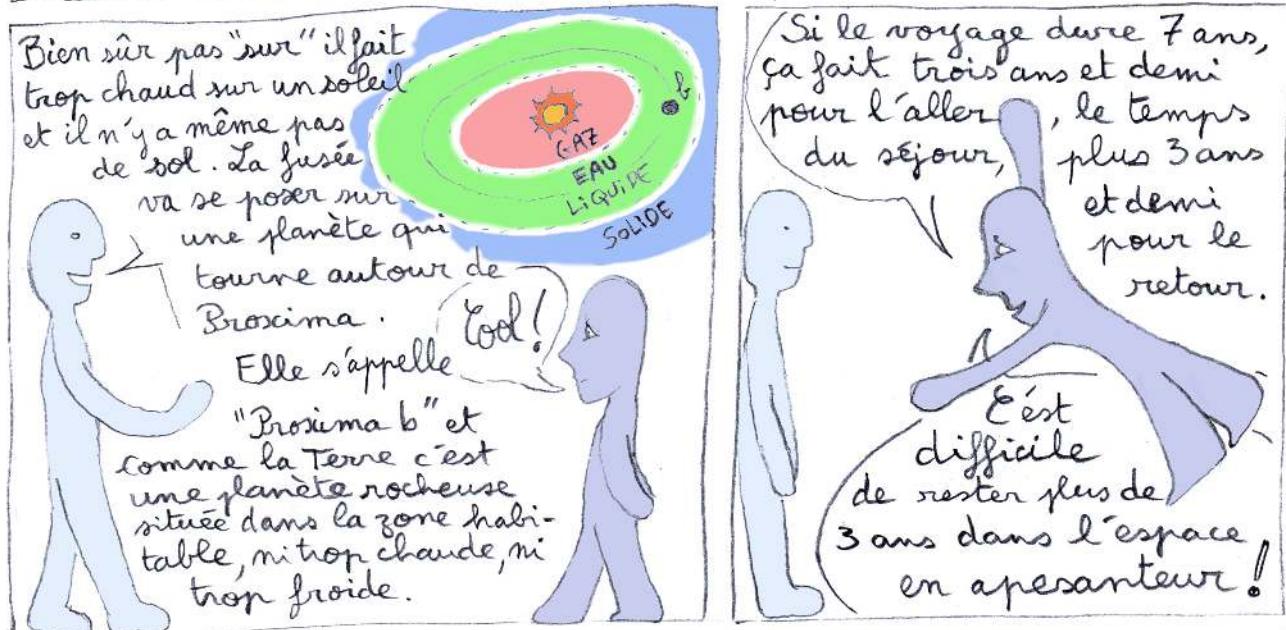
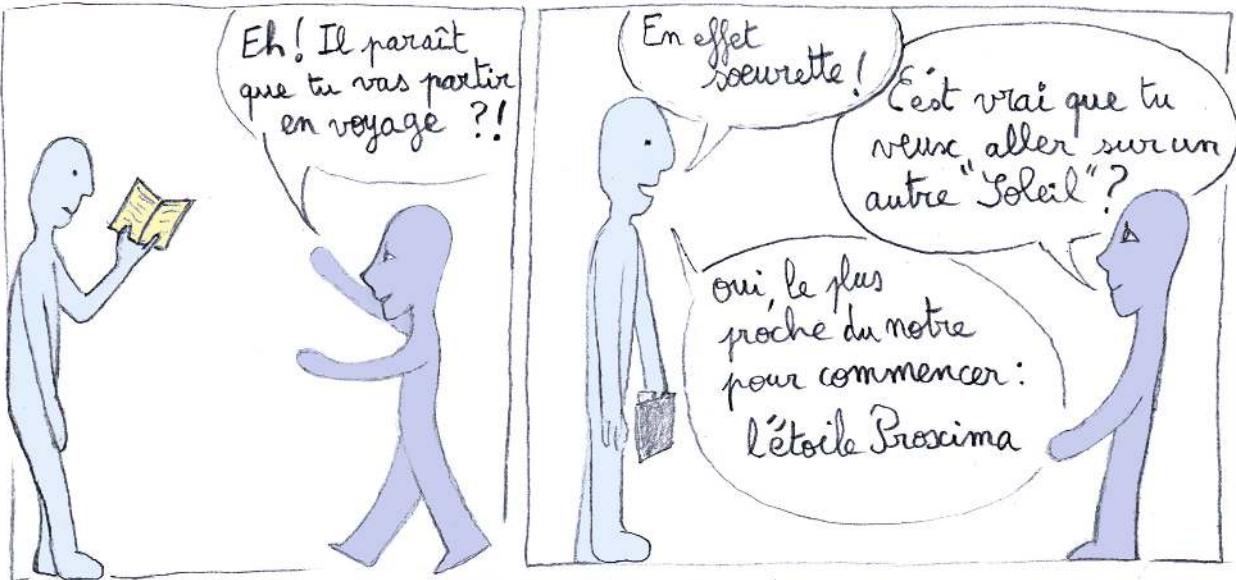
**Constellations visibles depuis l'hémisphère sud :** Le Centaure à gauche, et la Croix du Sud, représentée sur de nombreux drapeaux comme celui de l'Australie ou du Brésil, en haut à droite.

l'hémisphère Nord car l'étoile polaire montre la direction du Nord. C'est l'étoile au bout du manche de la casserole. Dans cette constellation, une étoile est à moins de cent années-lumière alors qu'une autre est presque à 500 a.l. Vues d'une autre étoile, ces étoiles ne sont plus "proches" et forment une autre figure.

Quand on regarde le ciel étoilé, on peut avoir l'impression qu'il y a comme une voûte céleste, une toile, sur laquelle des points lumineux sont déposés. Nos yeux ont un pouvoir séparateur limité. Au-delà d'une certaine différence d'angles, on ne peut plus faire de distinction. Cet angle et la distance entre nos deux yeux donnent parfois l'impression d'une demi-sphère avec toutes les étoiles placées à la même distance.

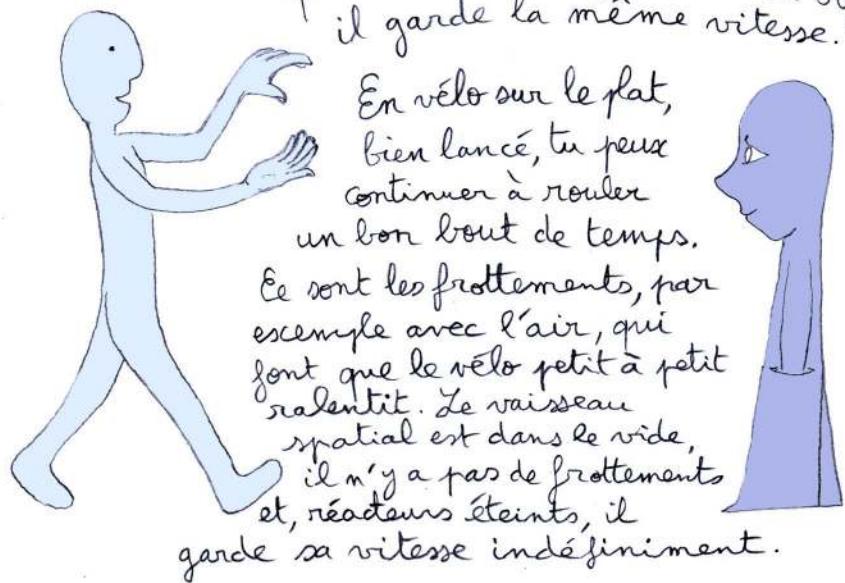
#### **La constellation du Centaure :**

L'étoile Alpha du Centaure est aussi nommée Rigel Kentarus. Proxima est invisible à l'œil nu ; sa position est indiquée par le cercle rouge.





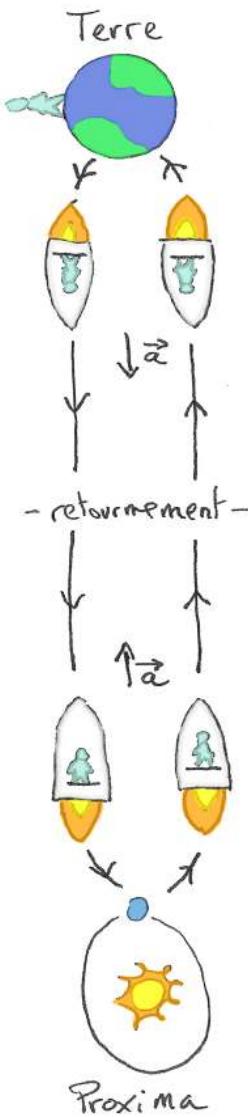
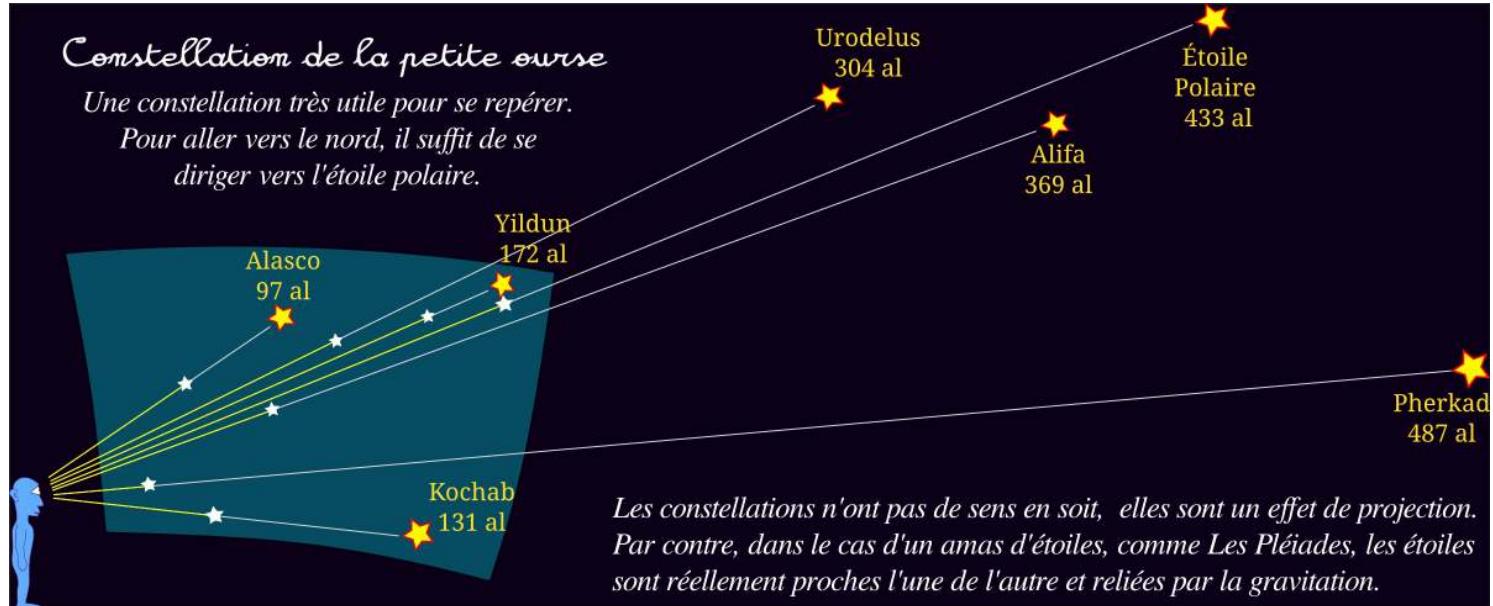
Non, c'est le principe d'inertie quand rien n'agit sur un objet il garde la même vitesse.



## Constellation de la petite ourse

Une constellation très utile pour se repérer.

Pour aller vers le nord, il suffit de se diriger vers l'étoile polaire.



Nous voulons aller sur Proxima et revenir sur Terre. Pour cela, nous utilisons un vaisseau spatial uniformément accéléré par sa propulsion. L'accélération du vaisseau crée une pesanteur artificielle qui permet aux humains à bord de supporter ce voyage de plusieurs années.

Pour le voyage complet il y aura quatre phases distinctes : une première accélérée, après retournement du vaisseau, une deuxième décélérée jusqu'à l'arrivée sur Proxima, puis les deux phases inversées pour le retour.

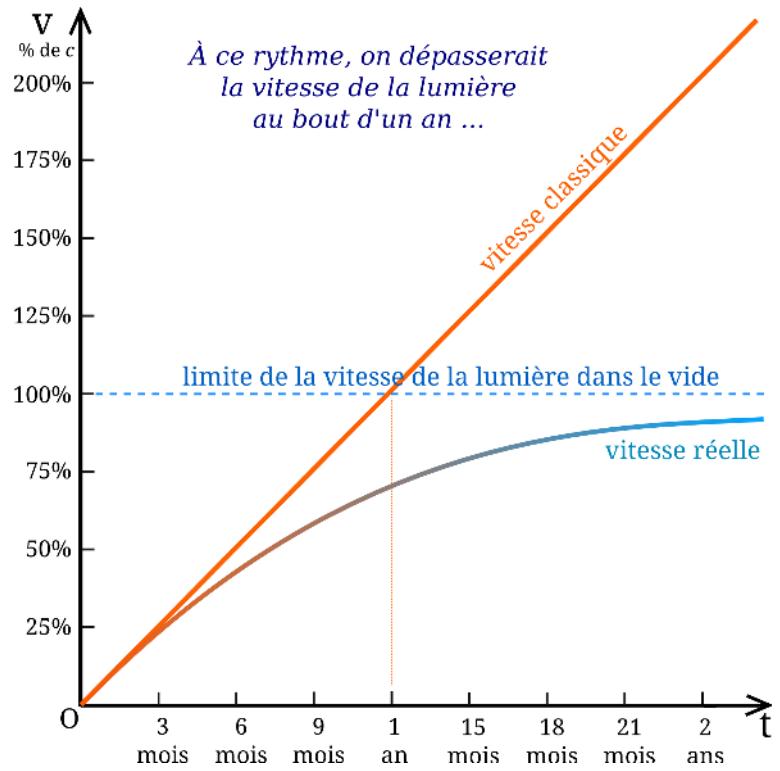
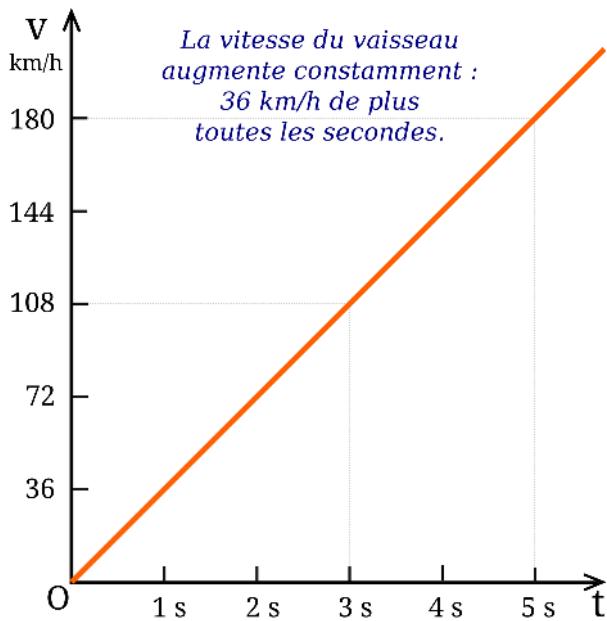
Lorsque les spationautes sont dans la station spatiale internationale, ils sont en apesanteur. Si nous considérons un vaisseau spatial immobile dans l'espace interstellaire, les spationautes seront aussi en apesanteur. Il en sera de même si le vaisseau a une vitesse constante, selon un mouvement en ligne droite.

Maintenant si le vaisseau est accéléré, les occupants seront continuellement plaqués vers l'arrière du vaisseau, comme les passagers d'une voiture qui accélère fortement au feu vert sont plaqués au fond de leur siège. L'accélération de la pesanteur vaut environ  $10 \text{ m/s}^2$ , ce qui correspond à une augmentation de vitesse de 10 mètres par seconde, toutes les secondes. Ainsi, en démarrant avec une telle accélération notre vaisseau acquiert une vitesse de 36 km/h en une seconde, 72 km/h en 2 secondes et une vitesse de plus de 100 km/h en 3 secondes<sup>1</sup>. Si on accélérât comme ça pendant un an on devrait atteindre la vitesse de la lumière ! On dépasserait ensuite cette vitesse, or il est maintenant montré que la vitesse de la lumière est une limite indépassable. La théorie classique a été remplacée par celle de la relativité restreinte qui colle parfaitement aux observations expérimentales.

Nous avons représenté sur les graphiques, page suivante, l'évolution de la vitesse au cours du temps pour un mouvement accéléré. Tant que la vitesse est faible devant celle de la lumière, la vitesse augmente régulièrement, mais lorsque l'on s'en rapproche, la vitesse augmente de moins en moins pour tendre vers la vitesse limite.

**Un voyage aller-retour en 4 étapes :** la poussée des réacteurs donne une accélération qui plaque les passagers au sol et crée une pesanteur. À mi-chemin il faut décélérer, sinon on passerait devant Proxima à toute allure !

<sup>1</sup> Une voiture à essence atteint difficilement une telle accélération mais les voitures électriques les dépassent largement : 0 à 100 km/h en 1,5 seconde en 2016, soit une accélération moyenne près de deux fois supérieure à celle de la pesanteur.



Dans le vaisseau, l'accélération reste constante et on profite en permanence d'une pesanteur artificielle. Par contre, vu depuis la Terre, il y a un effet de perspective et le vaisseau semble accélérer de moins en moins, avec une vitesse chaque fois plus constante et proche de celle de la lumière.

Nous allons étudier les conditions requises pour effectuer ce voyage. À la lumière des connaissances actuelles, nous commençons par étudier les caractéristiques théoriques idéales du voyage (étapes du voyage et durées, dans ce premier tome), pour ensuite parcourir les aspects et défis techniques (mode de propulsion et carburant).

Les résultats sont surprenants, il nous faudra considérer la dilatation du temps et le voyageur mettra moins de temps qu'un photon pour faire l'aller-retour...

Nous sommes tous imprégnés des concepts de la mécanique classique. Que nous ayons étudié la physique ou pas. Depuis tout petit, nous expérimentons un espace

tridimensionnel totalement déconnecté de l'écoulement du temps. La relativité restreinte met à mal cette vision. Cela peut être une idée inconfortable pour nous d'imaginer le temps se dilater et interagir avec le mouvement des objets. Si nous nous déplaçons au quotidien à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, ce ne serait pas pratique pour les rendez-vous et l'organisation sociale. Nous serions nés dans un tel monde, nous nous serions adaptés et tout cela nous semblerait naturel. Ainsi, pour nous amuser et aussi ébranler nos habitudes nous allons décrire dans le prochain chapitre, différentes illusions de la vie quotidienne. Après cette petite pause récréative, suivie d'un historique, nous aborderons les concepts de la relativité restreinte.

En fait il n'y a pas d'illusions, de magie ou de paradoxes. Ce sont simplement nos habitudes de penser et de voir qui restreignent notre imagination et nous empêchent d'envisager de nouveaux concepts. La science provoque une évolution sociale chaque fois plus rapide et pour suivre le rythme des changements nous devons être chaque fois plus ouvert, réactif et éveillé pour nous adapter positivement. Le monde évolue rapidement et nous devons développer notre esprit critique et d'interaction pour être constructif.

# Des temps singuliers

Je n'arrive pas à comprendre comment le temps du voyage peut être différent pour le voyageur et ceux qui restent sur Terre.

structure classique de l'espace et du temps:



Espace



Temps

Le temps s'écoule tel un fleuve, toujours du passé vers le futur.

Rien ne le perturbe. Nous habitons au bord du fleuve et nous regardons le temps passer.

Le temps est un, il est le même pour tous !!

C'est une idée profondément inscrite en nous. C'est lié à notre culture. Le temps est présupposé unique et universel alors qu'en fait il est différent pour chacun de nous.

Le mieux serait de faire des expériences pour le prouver. Personnellement, une fois mes horloges réglées, je n'ai de différences entre l'heure de ma montre, celle de mon réveil-matin, sur ma voiture ou sur internet. Il y a une légère dérive sur un an, mais je pense que c'est aléatoire et dû à la qualité des appareils.

Dérives-  
Précisions:  
montre à  
quartz:  
995 minutes  
par an.  
horloge  
atomique:  
quelques  
nanosecondes  
par an.

Tu as raison. Par contre avec des horloges atomiques on mesure clairement différences, surtout si les ont des mouvements rapides par rapport aux autres. Ces horloges sont des horloges milliardième de seconde. On peut étudier le mouvement qui vont

vites qui s'approchent du milliard de km/h.

gasp !!

On s'est rendu compte que le temps s'écoulait à des rythmes différents selon que l'on est immobile ou en mouvement. Pas facile alors de mettre un ensemble d'horloges à la même heure.

À moins de pouvoir se déplacer instantanément d'une horloge à l'autre !

Avec une vitesse infinie, comme dans les films où le héros arrête le temps et se déplace dans un monde figé.

Je m'arrive  
toujours pas à  
comprendre,  
je trouve ça  
INACCEPTABLE  
comme  
idée !!



Dans la nature il existe une vitesse limite, maximale et indépassable. L'expérience a été faite avec des électrons, on a beau leur fournir une énergie gigantesque leur vitesse plafonne. On a refait l'expérience un nombre incalculable de fois avec toutes sortes d'objets.

On a mesuré la dilatation du temps et la contraction des longueurs.



En effet !

Mais ce n'est pas réel  
c'est juste vu d'où  
je suis. Oui !



Ecoute, c'est un effet de perspective.  
Tu vois quand je tourne cette règle,  
d'où tu es, elle te semble plus  
courte ...



C'est pareil étendi à l'espace-temps,  
quand tu bouges par rapport à une  
règle ou une horloge, les distances  
semblent plus courtes et les temps  
plus longs.

Ah, d'accord !!

Une autre image: soit un large fleuve, comme l'Amazone, la vitesse d'écoulement du fleuve représente celui du temps. Placé sur la berge, le courant est très rapide



Si maintenant je suis sur une barque emportée par le courant, le fleuve ne bouge plus par rapport à moi: le temps s'est arrêté.



super!  
J'ai compris !!

Si je remonte le fleuve avec un moteur le courant semble moins rapide, je ralenti mon temps.

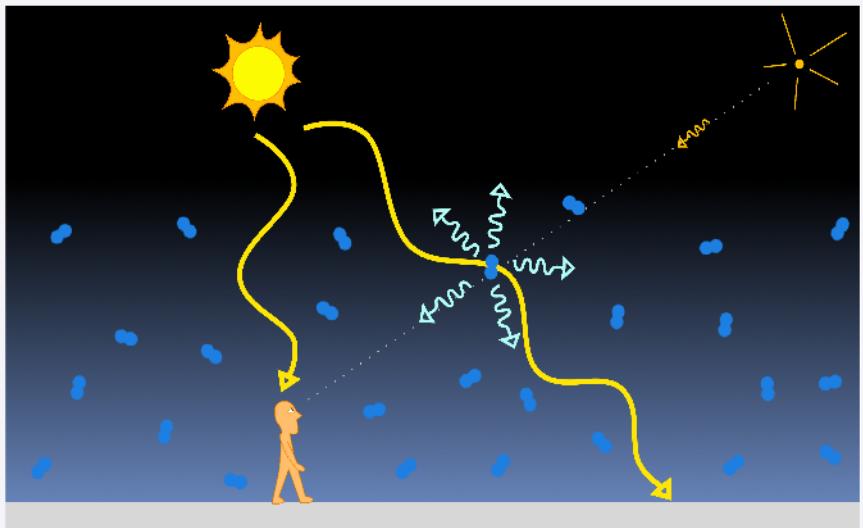


## COMPLÉMENTS SUR LA LUMIÈRE :

### Pourquoi ne voit-on pas les étoiles en plein jour ?

Les molécules de l'atmosphère diffusent une partie du rayonnement solaire. L'atmosphère émet ainsi de la lumière et masque le faible flux lumineux émis par les étoiles lointaines. Par exemple, sur la plage, l'été, ébloui en plein Soleil, vous aurez du mal à savoir si une lampe torche est allumée ou éteinte alors qu'en pleine nuit il n'y aura pas de doute et ce sera la lampe qui vous éblouira.

Sur la Lune, il n'y a pas d'atmosphère et l'on voit en même temps que le Soleil toutes les autres étoiles. Aussi, pour ne pas être gênés par l'atmosphère pour voir les étoiles, des télescopes, comme Hubble, sont envoyés dans l'espace.



### Pourquoi le ciel est bleu ?

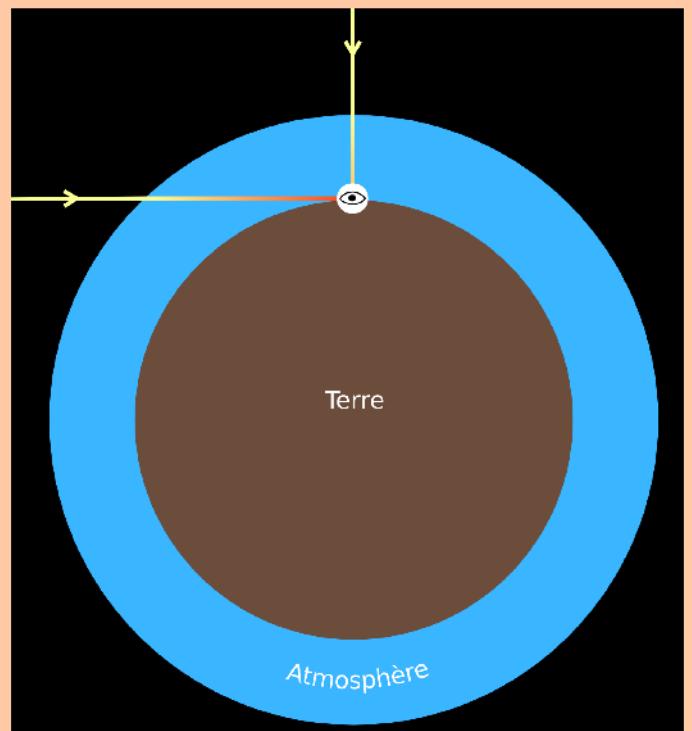
Pour simplifier nous pouvons considérer la lumière blanche émise par le Soleil comme la somme de lumière bleue et de lumière rouge. Les molécules de l'air diffusent majoritairement le rayonnement bleu plus énergétique ce qui explique la couleur bleue du ciel. C'est aussi pour cette même raison que la mer est bleue.

**ROUGE et BLEU → BLANC**

### Pourquoi le Soleil est rouge quand il se couche ?

L'atmosphère a une épaisseur moyenne de 10 km. Ainsi vers midi la lumière du soleil traverse une couche d'air sur une dizaine de kilomètres avant de parvenir au sol. Une petite partie de la composante bleue est diffusée et le Soleil nous apparaît jaune soit légèrement rougi comparé à sa couleur vue depuis l'espace. Au coucher du Soleil les rayons solaires sont rasants et traversent l'air sur plusieurs centaines de kilomètres d'où la couleur rouge du Soleil à son coucher.

Tous les astres sont rougis vers l'horizon. Suivant les conditions météorologiques, la Lune qui se lève est plus ou moins rousse, et plus élevée, elle devient argentée.



## Nous pouvons aller plus vite que la lumière ... mais pas dans le vide !

C'est la vitesse de la lumière dans le vide  $c$  qui ne peut être dépassée. Dans un milieu transparent les photons interagissent avec la matière et sont ralentis à une vitesse  $v$  plus petite que  $c$ .

L'indice lumineux est défini comme le rapport de la vitesse dans le vide par la vitesse dans la matière. Cet indice  $n$  est nécessairement supérieur à 1 et par définition vaut 1 pour le vide. Pour un verre d'indice 1,5 la vitesse de la lumière ne vaut plus "que" 200 mille kilomètres parcourus par seconde au lieu de 300 000 km/s dans le vide. Dans un matériau encore plus dense, comme le diamant, d'indice 2,4 , elle tombe à 125 000 km/s.

Ce changement de vitesse explique la réfraction, déviation des rayons d'un milieu à l'autre. La lumière suit le chemin le plus court en temps, pas en distance. Ainsi, pour aller plus vite, il est parfois intéressant de faire un détour. Quand il y a un changement d'indice, les rayons ne vont plus en ligne droite. Ci-dessous, nous avons une rampe d'embarquement. Contrairement aux apparences, on vérifie à marée

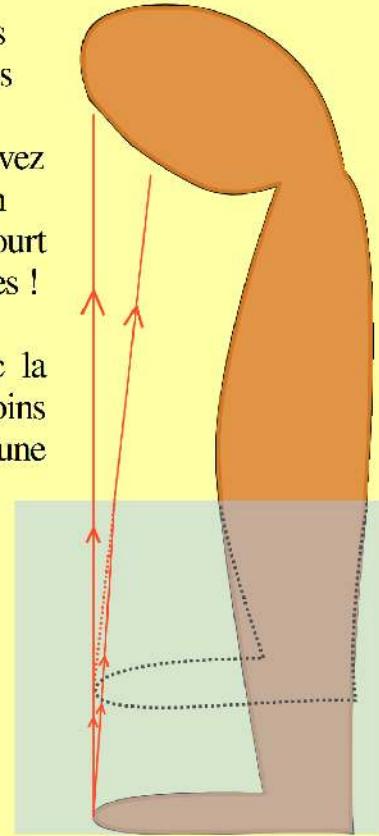


basse qu'elle est bien droite avec une pente constante. La lumière est déviée quand elle passe de l'eau à l'air. Notre œil fait comme si les rayons lumineux allaient en ligne droite et on est alors parfois trompé.

Quand vous regardez vos pieds dans l'eau vous avez l'impression d'être court sur pattes !

De plus, cette vitesse diminue aussi avec la fréquence de l'onde lumineuse : le bleu va moins vite que le rouge. En effet, plus une onde a une fréquence élevée et des photons énergétiques, plus elle interagit avec la matière et est freinée.

Par contre, dans le vide toutes les ondes électromagnétiques vont exactement à la même vitesse (ondes radio, infra-rouge, visibles, ultra-violettes, rayon X et gamma).

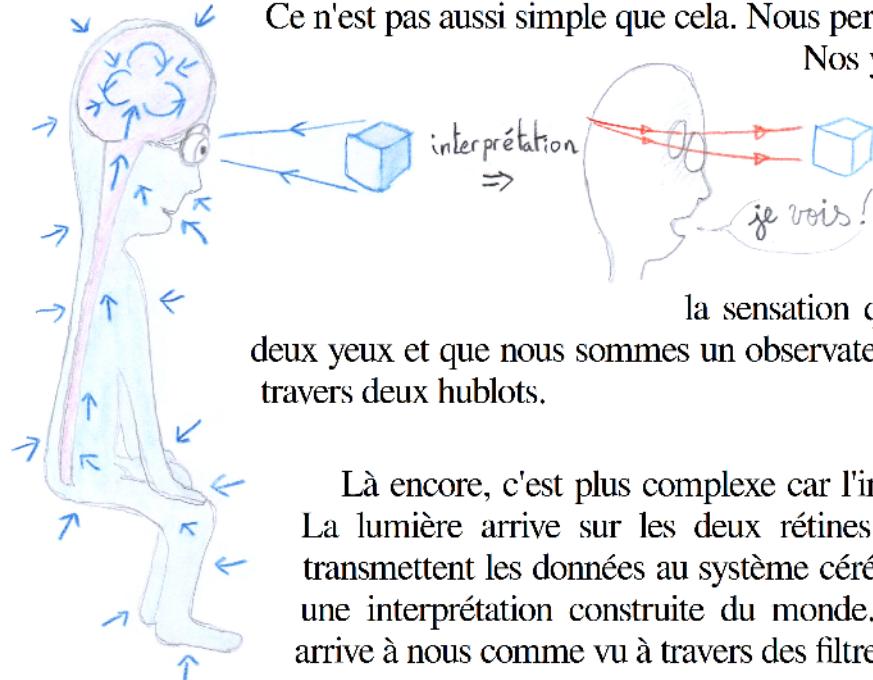


Dans le langage de la vie quotidienne on se place du point de vue humain et l'on restreint le terme "lumière" à sa partie visible par notre œil. Par abus de langage, nous utiliserons dans cet ouvrage le terme lumière pour toutes les ondes électromagnétiques. Aussi, lorsque nous parlerons de la propagation de la lumière sans spécifier le milieu, cela pourra sous-entendre une propagation dans le vide. En physique tout est matériel, ce qui n'empêche pas d'opposer parfois lumière et matière. Dans le langage courant, la lumière est souvent associée à l'esprit. En physique, les lois sont partout et on ne considère pas d'esprit.

En physique, nous croyons que le monde existe et qu'il est cohérent. Il ne s'agit pas d'un monde chaotique et brisé mais d'une réalité organisée qui obéit à des lois.

Ce monde est-il simplement celui que l'on voit depuis notre naissance ?

Ce n'est pas aussi simple que cela. Nous percevons le monde à travers d'étroites fenêtres.



Nos yeux ne reçoivent que la lumière visible, nos oreilles ne perçoivent qu'un certain intervalle de fréquence... De plus, nos observations ne se font que dans une petite zone de l'univers et nous sommes limités par notre vécu. Nous pouvons avoir la sensation que nous percevons le monde à travers nos deux yeux et que nous sommes un observateur qui, d'un point, voit le monde extérieur à travers deux hublots.

Là encore, c'est plus complexe car l'information passe d'abord par notre cerveau. La lumière arrive sur les deux rétines constituées de cellules, des neurones qui transmettent les données au système cérébral, et finalement ce que nous "voyons" est une interprétation construite du monde. Nous avons conceptualisé le monde et il arrive à nous comme vu à travers des filtres.

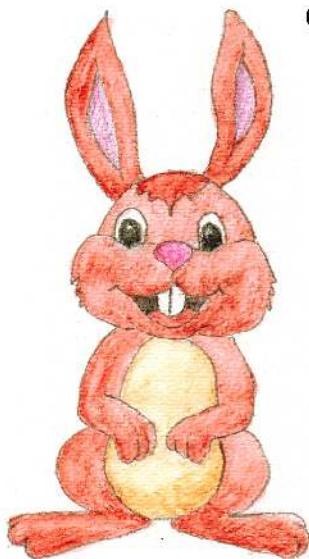
Nous pourrions croire que nous voyons les choses telles quelles, mais ce n'est pas vrai. Elles sont interprétées et il y a un traitement de l'information. Il est facile de le démontrer. Prenons par exemple la photo d'un visage. Vous tenez la photo dans vos mains et vous voyez bien spontanément le visage d'une personne. Les mains vers l'avant, les oreilles vers l'arrière et vous pouvez même ressentir une expression et une émotion de la personne. Ce n'est que pure illusion ! Il n'y a personne en face de vous. Si vous regardez le livre par la tranche, vous tournez la photo d'un quart de tour, et vous vous rendez compte que "la personne" est complètement plate !

Le fait d'avoir deux yeux permet au cerveau d'interpréter, à partir des deux images plates sur chaque rétine, un volume. Mais ici, même avec une seule image, il vous force à voir un volume. Si vous fermez un œil vous verrez toujours la photo en 3D. Seriez-vous capable de voir la photo telle quelle, sans interprétation et relief, avec seulement des zones de couleurs différentes ? C'est très difficile car notre mécanisme de conceptualisation est très puissant. Il s'enclenche automatiquement et nous pouvons facilement nous faire piéger.

L'impression d'être placé sur un axe du temps est aussi une construction bien utile. Mais en fait, le passé est dans notre mémoire, et le futur dans notre imagination. Seul le présent semble exister. C'est le principe de causalité qui nous permet d'ordonner nos expériences selon une chronologie.



Elon Musk en 2008. Son objectif : une mission habitée sur Mars.



Ceci n'est pas un lapin.

C'est ce mécanisme d'interprétation mis en place chez le tout petit qui nous permet d'évoluer dans le monde, et c'est bien pratique. Certes, il ne s'agit pas du monde véritable, mais il est suffisant pour nos besoins.

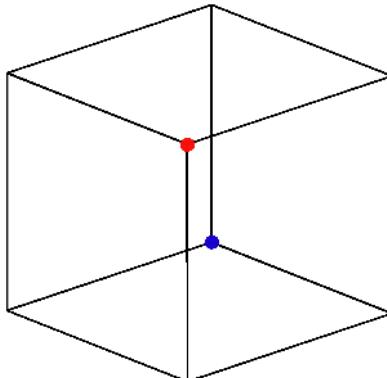
Les scientifiques conçoivent et utilisent des instruments de mesure qui permettent d'élargir chaque fois plus nos fenêtres d'observation.

Nous avons alors une nouvelle interprétation, plus large, de la réalité. Quand nous comparons cette nouvelle vision à notre vision quotidienne, nous pouvons être surpris.

En particulier, quand nous expliquons les concepts de la relativité restreinte, il est fréquent que les personnes aient du mal à y croire, ça ne semble pas logique, ça a l'air impossible ; ce qui est vrai, interprété par notre monde quotidien. Pourtant, dans un monde plus large qui inclut notre monde personnel, c'est bien exact.

Nous allons maintenant prendre quelques exemples simples pour illustrer davantage et nous amuser un peu !

### Dessin



Que voyez-vous ?

Le dessin étant réalisé sur une feuille à deux dimensions, vous devriez voir un objet à deux dimensions : un hexagone avec des lignes qui partent de trois sommets pour se retrouver au point rouge et trois autres qui se retrouvent au point bleu.

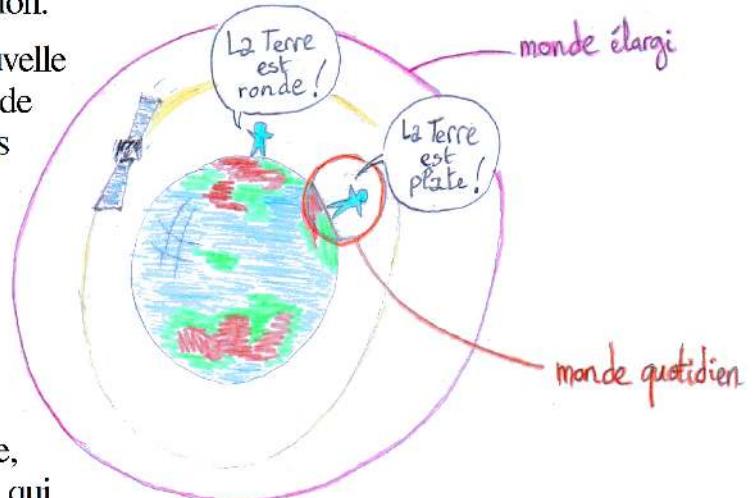
Il est aussi possible que vous voyiez quelque chose qui n'existe pas : un cube, avec le point rouge vers l'avant et le point bleu vers l'arrière. Jouons avec nos illusions : pourriez-vous maintenant voir un cube avec le point bleu vers l'avant et le point rouge vers l'arrière ?

Ensuite alternez mentalement cinq fois d'un cube à l'autre. L'exercice peut s'avérer difficile mais ayez confiance, avec de l'entraînement on y arrive !

« On ne voit jamais le temps, mais on voit les choses changer »

Carlo Rovelli

**L'espace et le temps sont des concepts**



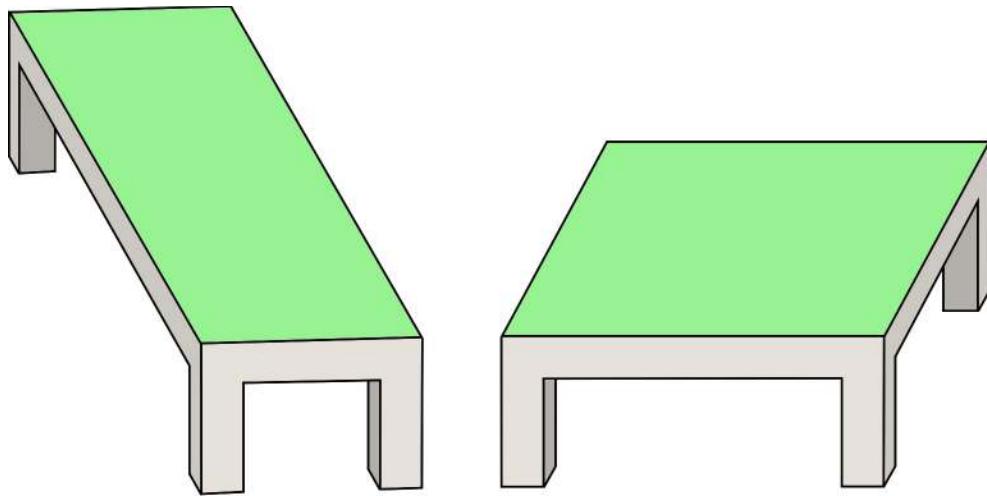
## ***Le muselet***

Une autre expérience amusante. Le muselet est la sorte de cage métallique en fil de fer qui entoure le bouchon d'une bouteille de cidre ou de champagne. Il est constitué d'un petit anneau et d'un grand anneau. Prenez le tortillon entre le pouce et l'index en plaçant le petit anneau en bas. Fermez un œil. En regardant les deux anneaux, forcez-vous alors à imaginer que c'est le petit anneau au lieu du grand qui est en haut. Une fois que vous avez réussi, commencez à tourner lentement l'ensemble. Il se peut que vous ayez alors une expérience déconcertante !



## ***Deux tables***

Sur les deux tables représentées, que pensez-vous des deux formes colorées en vert ? Sont-elles identiques ou y en a-t-il une plus longue ?

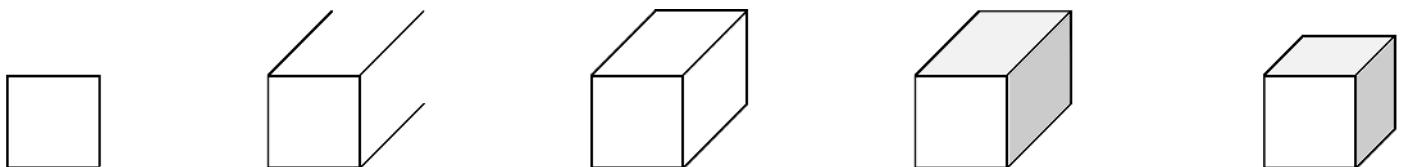


En fait, les formes sont parfaitement identiques. Pour vous en convaincre, vous avez en page 76 un plateau à découper. Vous pouvez le superposer sur le plateau d'une table, puis le déplacer sur la deuxième et comparer.

Cela semble impossible, d'où provient cette illusion ? Celui de droite semble presque carré alors que celui de gauche semble nettement allongé. Il s'agit d'une représentation d'objets à trois dimensions sur une feuille à deux dimensions.

Par exemple, quand je veux représenter en perspective cavalière un cube sur une feuille de papier, je peux commencer par représenter un carré puis, de la même longueur que les cotés, placer trois traits parallèles inclinés "vers le fond" et finalement compléter par deux autres traits. On peut même griser les différentes zones pour représenter les ombres propres. En procédant ainsi, nous ne voyons pas un cube mais un pavé

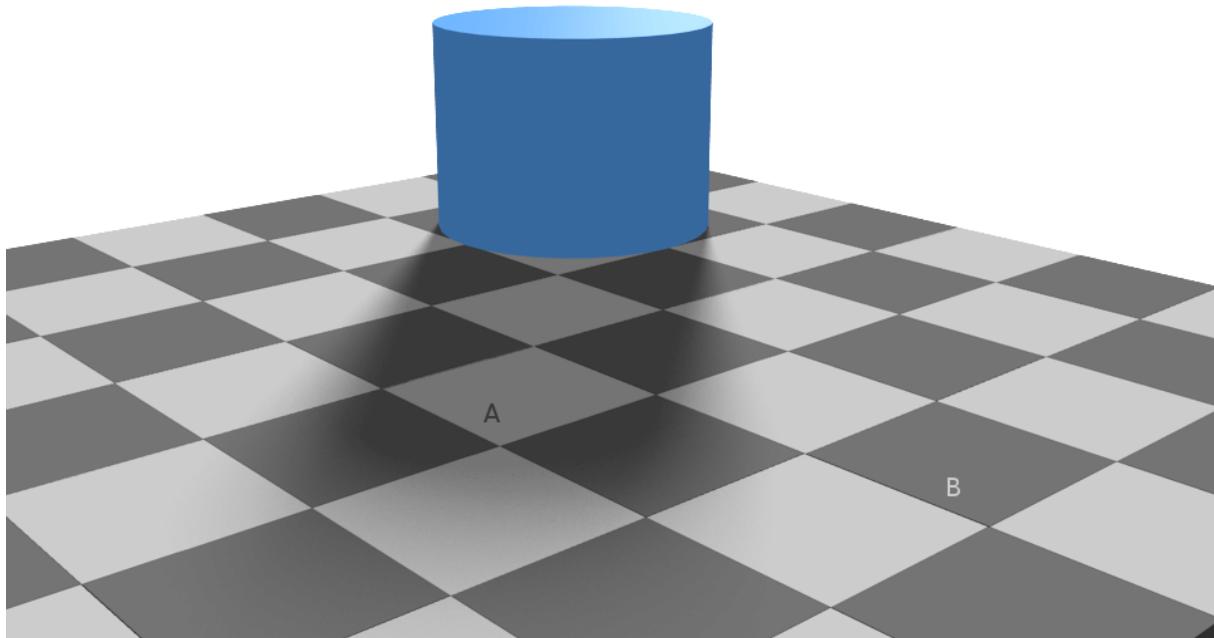
allongé vers le fond. Pourtant nous avons bien pris la même longueur pour chacun des cotés. Pour obtenir un effet de perspective adéquat, il faut raccourcir les trois traits vers le fond. Là, ça ressemble à un cube !



Quand notre cerveau pense voir des objets tridimensionnels, il rallonge les traits supposés vers le fond. Le cerveau compense ainsi ce que nous observons conformément à sa conception du volume. Ici, sur la table de droite, la largeur du plateau est mentalement rallongée car elle est vers le fond : on se rapproche alors d'un carré. Sur la table de gauche, c'est la longueur qui est vers le fond et le rectangle est perçu encore plus long.

### ***Illusion de contraste***

Soit un cylindre sur un échiquier. Nous comparons une case blanche dans l'ombre du cylindre avec une case noire hors de l'ombre. Que pensez-vous des niveaux de gris des cases A et B ?

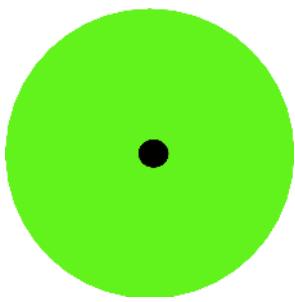


En page 76 vous pouvez découper une copie de la case B et la déplacer de B en A pour comparer les gris. Résultat : c'est le même gris ! Cela semble incroyable.

L'illusion fonctionne sur deux mécanismes. D'une part, pour compenser l'obscurité des zones placées dans l'ombre, notre cerveau les éclaircit : la case A semble plus claire que la B. D'autre part, par effet de contraste, notre cerveau évaluant les niveaux de gris en fonction de leurs environnements, la case A étant entourée de cases noires semble plus claire. Et le contraire pour la case B. Les deux effets vont dans le même sens et sont ainsi intensifiés.

### ***Illusion de couleur***

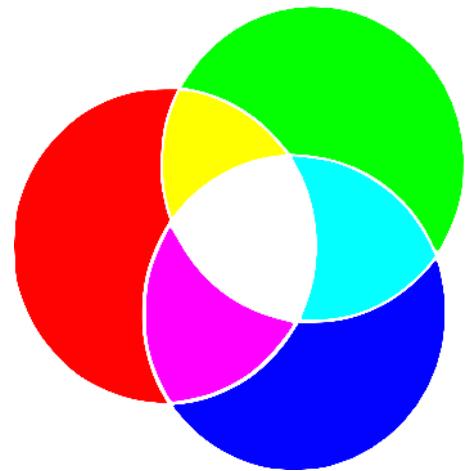
Page suivante, fixez le point noir au milieu du rond vert sans bouger pendant plus de trente secondes. Toujours sans bouger la tête ni les yeux, déplacer le livre pour maintenant fixer le point noir de droite.



Que voyez-vous ? Normalement vous voyez apparaître un rond rose, pourtant le fond est blanc. Vous voyez la couleur complémentaire du vert, car en fixant longtemps le rond vert vous avez fatigué les cônes de votre rétine qui détectent le vert, et après, sur fond blanc les cônes rouge et bleu sont plus performants, et l'addition du rouge et du bleu donne le magenta que vous percevez. Vous pouvez aussi fixer votre regard sur une plante verte et vous pourrez voir apparaître un pourtour rose. En reprenant l'expérience avec des ronds de différentes couleurs, on observe les différentes couleurs complémentaires.

Il existe trois couleurs primaires qui permettent, en les combinant, d'obtenir toutes les couleurs visibles. Mais pourquoi *trois* couleurs de base ?

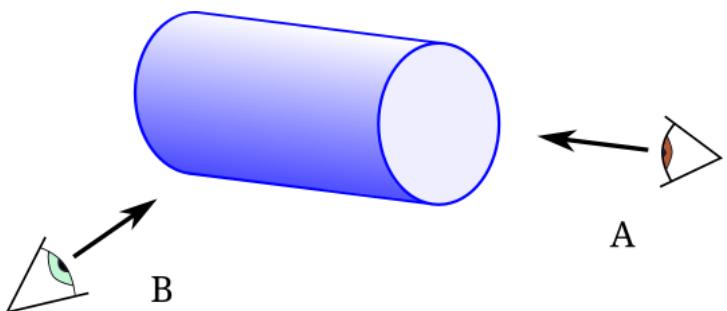
Nous captions la lumière grâce aux cellules présentes sur notre rétine et il se trouve que nous avons trois types de cellules, appelées cônes, pour le rouge, le vert et le bleu. Dans l'état des connaissances actuelles, d'autres animaux comme les oiseaux possèdent quatre types de cônes et ont donc quatre couleurs primaires. C'est le cas de la plupart des oiseaux qui sont tétrachromates et possèdent ainsi un espace chromatique à quatre dimensions. Les chats ne perçoivent, eux, que deux couleurs primaires, ils sont dichromates et ne voient pas le rouge. Il semble aussi que certains poissons et insectes voient l'ultraviolet et certains reptiles, l'infrarouge.



*Synthèse additive des couleurs chez l'humain (trichromatisme)*

## Observateurs

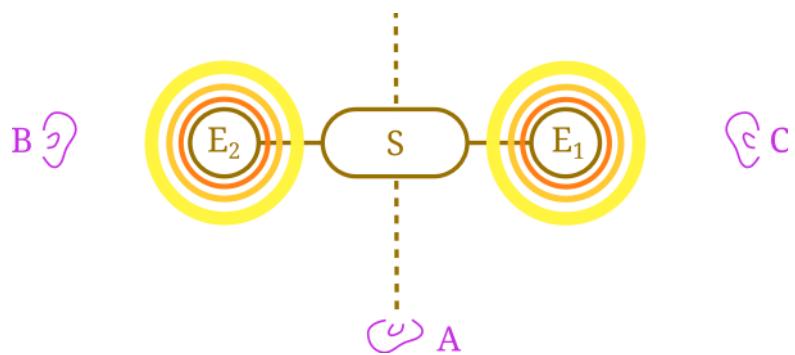
Nous avons montré qu'en tant qu'observateur, nous interprétons le monde. Si, maintenant, différents observateurs observent un objet, ils peuvent en avoir des perceptions différentes. L'observateur A, par exemple, voit un disque et l'observateur B un rectangle. Les perceptions 2D des deux observateurs paraissent en contradiction. Chacun a son vécu et sa représentation du réel. Considérons maintenant une réalité universelle pour tous et un espace unique et absolu. Nous faisons l'hypothèse d'un espace avec une dimension supplémentaire. Dans ce nouvel espace 3D on peut considérer que A et B observent un cylindre sous deux angles différents. Nous passons d'un espace perçu personnellement et a priori différent pour chaque individualité à un espace partagé, indépendant et qui pourrait même exister par lui-même sans nécessiter l'existence de l'humain.



Nous pourrions aussi avoir un seul observateur et effectuer une rotation dans l'espace du cylindre, le rectangle se transformera alors en cercle !

## Illusion temporelle

Nous pouvons fabriquer un système avec deux bras identiques de manière à s'assurer que les deux émetteurs  $E_1$  et  $E_2$  émettent des signaux simultanément (bips sonores ou flashes lumineux). Nous considérons trois observateurs : un en A, sur le plan de symétrie de  $(E_1E_2)$ , et deux autres B et C placés symétriquement sur l'axe  $(E_1E_2)$ .



Chaque observateur vit sa temporalité personnelle. Mais nous pouvons aussi concevoir un temps partagé. Quand nous discutons avec un ami de nos expériences individuelles et communes, la causalité semble persister entre nos lignes de temps entremêlées. D'un temps personnel, nous concevons un temps humain partagé et social. De là, il n'y a qu'un pas vers un temps indépendant qui possède une réalité propre : un temps physique. Temps qui pourrait même s'écouler à l'identique pour tous : le temps absolu.

$E_1$  et  $E_2$  émettent des ondes sonores comme décrit précédemment. L'observateur A entendra les deux bips en même temps et pensera que les bips sont émis simultanément. Par contre B et C ne seront pas d'accord avec A, ni entre eux. De part le retard dû, par exemple, aux distances différentes  $E_1B$  et  $E_2B$ , B entendra d'abord le bip de  $E_2$ . Il dira que l'émission du bip de  $E_2$  se produit avant celle de  $E_1$ . Et C dira que  $E_1$  bipe avant  $E_2$ . Les trois observateurs ne sont pas d'accord, ils voient la même situation et l'interprètent différemment. La situation semble paradoxale, contradictoire. Nous avons là, une illusion temporelle. Pour les tables, nous avions un effet de perspective spatial qui nous trompait, ici il y a un effet de perspective temporel dû à la vitesse de propagation d'un signal dans un espace et un temps absolus.

Si les signaux émis étaient lumineux, la situation serait de prime abord simplifiée. Comme la vitesse de la lumière est bien plus grande que celle du son, les trois observateurs tomberaient d'accord sur la simultanéité de l'émission des flashes. Mais s'ils se mettaient en tête d'utiliser des chronomètres très précis (comme des horloges atomiques), leurs interprétations entreraient à nouveau en contradiction. Ainsi, pour percevoir directement la réalité des émissions simultanées quelque soit le point d'observation, il faudrait des signaux qui se propagent instantanément, soit avec une vitesse infinie, dans des espaces et temps absolus.

Les scientifiques ont mesuré la vitesse d'une multitude d'objets dans la nature et ils ont observé une vitesse limite. Aucune particule, énergie ou information ne peut se déplacer au-delà de la vitesse de la lumière dans le vide. Cela semble étrange. Pourquoi en est-il ainsi ? Pourquoi cette zone interdite ?

Lors d'un orage nous voyons l'éclair puis, plus tard, nous entendons le tonnerre. Les deux événements ne semblent pas simultanés pourtant le flash et le choc sonore sont produits au même moment au point d'impact de l'orage.

Pour un orage à un kilomètre la lumière met 3 millionièmes de seconde pour parvenir à l'observateur, un temps négligeable devant ceux du système nerveux qui réagit sur les dixièmes de seconde. Le son lui, en comparaison, est très lent, il met 3 secondes pour parcourir un kilomètre. Pour connaître la distance d'un orage, après avoir vu l'éclair vous comptez jusqu'à entendre le tonnerre. Il faut compter un kilomètre supplémentaire toutes les trois secondes comptées.

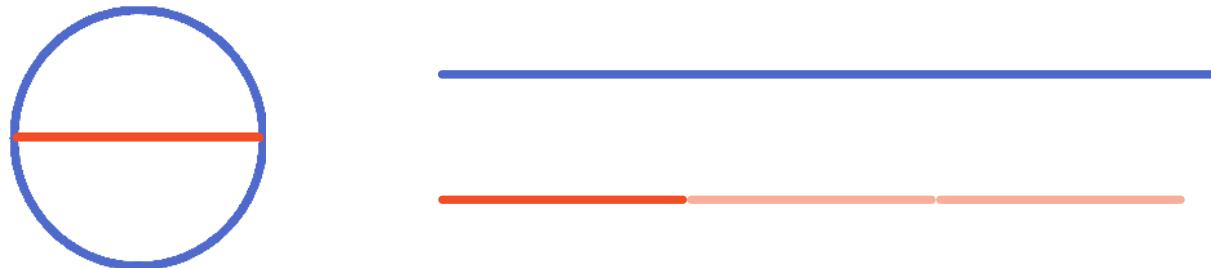
A priori, la nature réalise tout ce qui est possible. Rien ne s'oppose dans notre cadre à aller au delà. Faut-il alors remettre en cause le cadre ? Il y aurait donc une vitesse limite absolue liée à la structure de l'espace et du temps. Cette vitesse serait en quelque sorte la vitesse infinie. Mais alors, des événements simultanés pour certains observateurs ne le seraient plus pour d'autres. Cela semble à nouveau étrange, notre dispositif est clairement conçu pour émettre des signaux simultanés. Faut-il remettre en cause le caractère absolu de l'espace et du temps ?

## Espaces

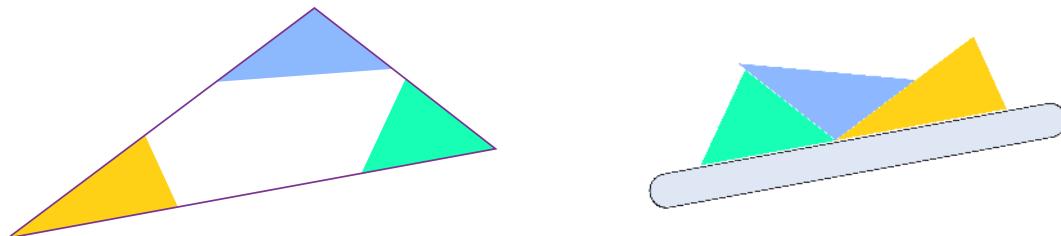
Nous allons ici mettre de côté le temps et jouer avec l'espace. Nous allons nous intéresser à son nombre de dimensions et à ce qu'on appelle sa courbure et sa topologie.

Nous expérimentons dans notre quotidien un espace à trois dimensions. En effet, pour positionner un objet dans l'espace, trois coordonnées sont nécessaires et suffisantes. Par exemple, pour aller chercher un trésor, il suffit que l'on indique combien de pas à faire dans la direction Est-Ouest, puis dans la direction Nord-Sud, et finalement à quelle profondeur ou hauteur il se trouve.

Pour sa part, la courbure indique si l'espace est plat ou courbe. C'est une notion un peu plus subtile. Prenons un cercle, par exemple le contour d'une roue de vélo, avec une ficelle vous mesurez le périmètre de la roue puis son diamètre. Ensuite avec une calculatrice vous divisez la valeur trouvée pour le périmètre par celle du diamètre. Vous pouvez faire cette expérience avec tous les cercles que vous voulez, vous trouverez toujours le même résultat : un peu plus que 3. C'est le fameux nombre pi,  $\pi=3,14\dots$



C'est le résultat pour un espace plat, dans un espace courbe on trouve une valeur supérieure ou inférieure à pi. Vous pouvez aussi utiliser la technique du triangle, si l'espace est plat la somme des trois angles du triangle donne un angle plat.

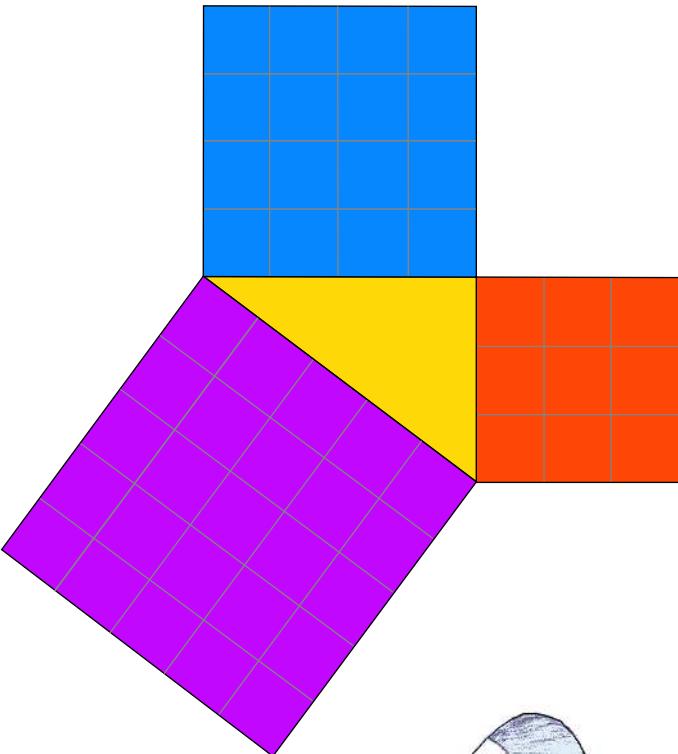


Aussi pour un triangle rectangle en espace plat, le théorème de Pythagore est vérifié ; dans un triangle avec un angle droit la surface du carré construit sur le plus grand côté est égale à la somme des surfaces des deux autres carrés (dessin page suivante). Le plus grand côté d'un triangle rectangle est celui opposé à l'angle droit et il porte le nom d'*hypoténuse*.

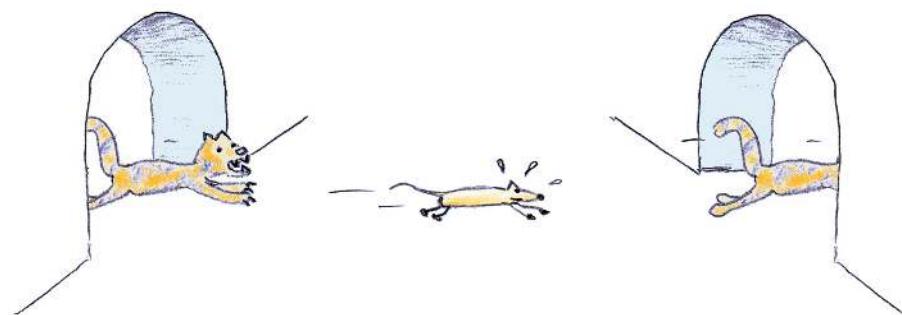
Habituellement, on imagine les espaces infinis. On pourrait aller dans chaque direction aussi loin que l'on veut et toujours découvrir de nouveaux mondes. On aurait alors un espace de volume infini et on ne pourrait jamais tout explorer. Nous

*Deux choses sont infinies : l'Univers et la bêtise humaine. Mais, en ce qui concerne l'Univers, je n'en ai pas encore acquis la certitude absolue.*

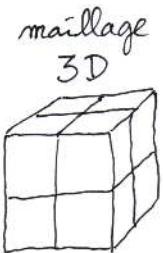
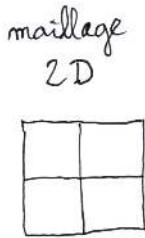
*Albert Einstein*



pouvons aussi considérer ce que l'on appelle d'autres topologies. On peut avoir un espace fini et ne pas s'en rendre compte. Par exemple, si on parvient sur un bord on se retrouve automatiquement de l'autre côté. Vous pouvez marcher parfaitement droit devant vous tout en tournant en rond !



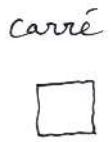
Morale :  
Ne pas négliger la  
structure  
topologique  
de l'espace.



maillage  
4D

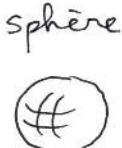
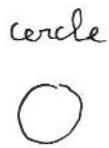
?

.



hypercube

?



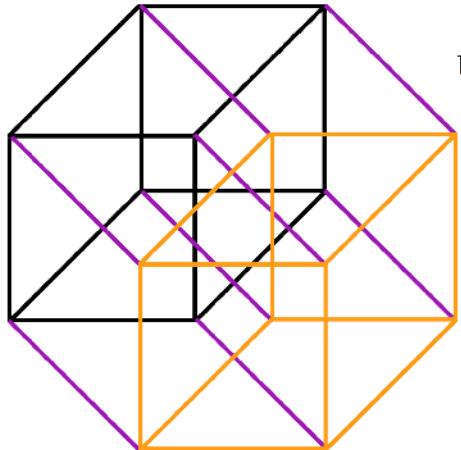
hypersphère

?

.

fond vers l'avant. Continuons ainsi avec la quatrième dimension d'espace dirigée de *kata* vers *ana* (il faut bien inventer de nouveaux noms) et perpendiculaire aux trois autres dimensions.

Construisons maintenant un hypercube. Pour construire un cube on était parti d'un carré, et pour construire un hypercube on part d'un cube et de chaque sommet part un trait dirigé selon la quatrième dimension :



Un carré est délimité par son périmètre constitué de quatre côtés. Un cube est délimité par une surface constituée de six faces carrées. Un hypercube est délimité par un volume constitué de huit cubes.

Arrivez-vous à voir les huit cubes de l'hypercube ?

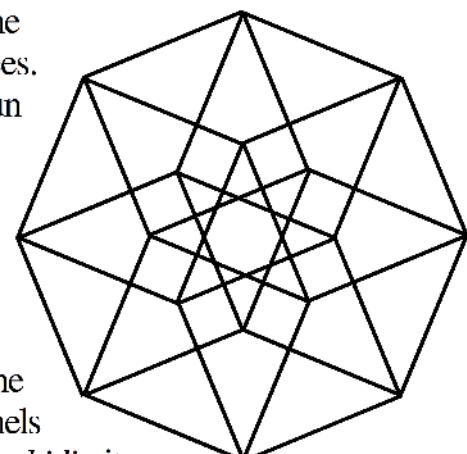
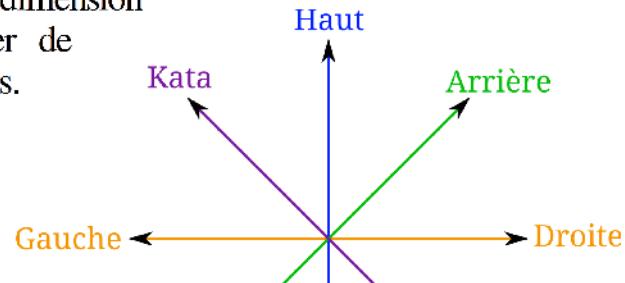
Nous pouvons aussi nous représenter les choses en raisonnant avec une dimension en moins. Supposons qu'au lieu d'être des êtres tridimensionnels nous soyons des êtres bidimensionnels. Nous les appellerons des *bidiz*. Un *bidi* vit dans un monde 2D, il n'a, depuis toujours, vécu que dans ce monde et n'a aucun sens lui permettant de prendre conscience d'une réalité tridimensionnelle.

Imaginons des *bidiz* qui vivent sur une sphère. Nous *tridiz*, êtres 3D, nous voyons qu'ils vivent à la surface d'une boule. Mais eux, peuvent-ils s'en rendre compte ?

Augmentons maintenant le nombre de dimensions. Pourrions-nous imaginer un espace à 4 dimensions ? Nous représentons ci-contre un objet 2D, son équivalent 3D puis à vous d'imaginer son équivalent 4D.

Vous n'y arrivez pas ? C'est normal, ce n'est pas parce que c'est impossible, mais parce que nous n'avons pas de vécu correspondant. La raison est peut-être que nous n'avons pas de sens permettant d'y accéder. Ceci dit, nous avons précédemment fait remarquer que la vision est fondamentalement bidimensionnelle et que le volume est une conceptualisation, alors pourquoi pas aussi conceptualiser une quatrième dimension ?

Nous avions représenté sur une feuille la troisième dimension inclinée, sachant que cette dimension est en fait perpendiculaire aux deux autres et dirigée du



Précisons tout d'abord que les bidiz sont curieux, aiment l'aventure et adorent expérimenter. Si le rayon de la sphère n'est pas trop grand par rapport à leur taille, ils pourraient s'en rendre compte assez rapidement. Tout d'abord, supposons qu'un bidi marche tout droit, après peu de temps il repassera au même endroit. Nous pouvons imaginer que les bidiz émettent et reçoivent des ondes bidimensionnelles pour interagir sur leur Univers boule. Un bidi pourrait voir son dos en regardant au loin !

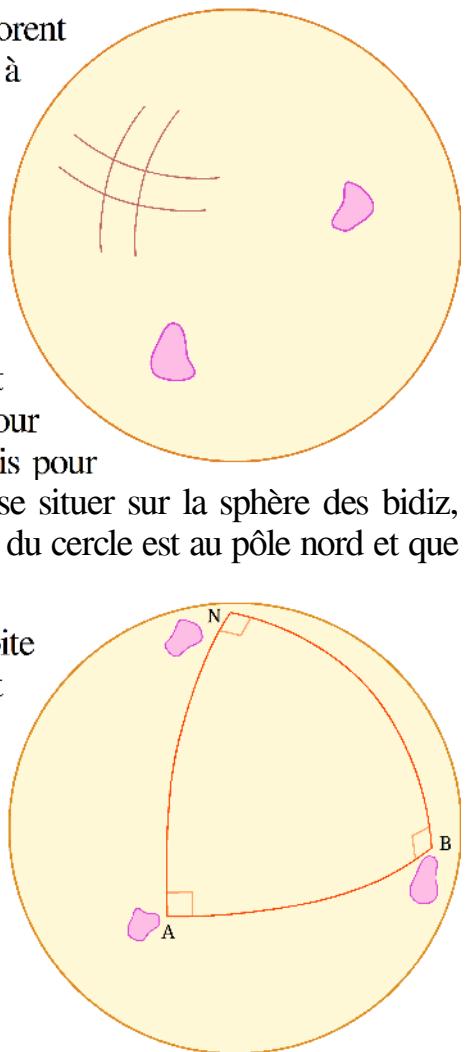
Les bidiz ont développé des méthodes scientifiques rigoureuses. Ils disposent de cordelettes. Ils fixent le bout d'une corde, et, fil tendu, font tourner un crayon attaché à l'autre extrémité pour dessiner des cercles. Pour de petits cercles, le rapport périmètre sur diamètre est proche de 3, mais pour des cercles de plus grands rayons, ce rapport devient plus petit ! Pour se situer sur la sphère des bidiz, utilisons les mêmes repères qu'à la surface du globe terrestre. Si le centre du cercle est au pôle nord et que le périmètre du cercle correspond à l'équateur, alors  $\pi$  vaudrait 2 !

Trois bidiz se retrouvent au pôle nord N, deux bidiz partent en ligne droite dans deux directions perpendiculaires jusqu'à rejoindre l'équateur. Ils ont ainsi construit un triangle NAB avec trois angles droits !

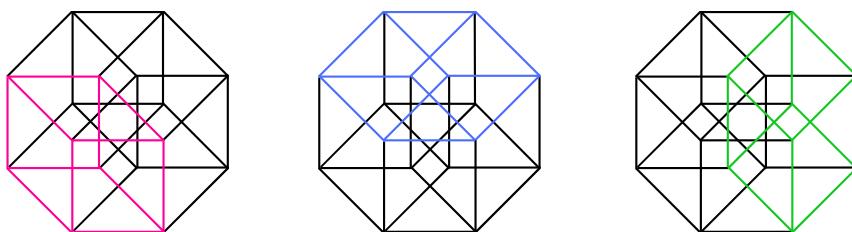
Leur esprit mathématique aiguisé leur permet d'en déduire qu'ils vivent à la surface d'une sphère, objet 3D qu'ils ne peuvent pas se représenter mentalement et appellent hyper cercle. Les bidiz vivent sur un monde courbe et de taille finie, la surface de la sphère. Ils n'ont pas de sens tridimensionnels et cela ne leur empêche pas, par une analyse interne à leur monde, de concevoir une réalité 3D.

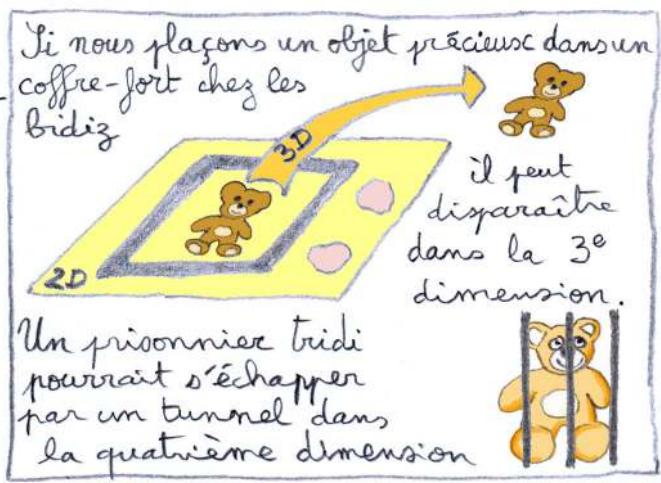
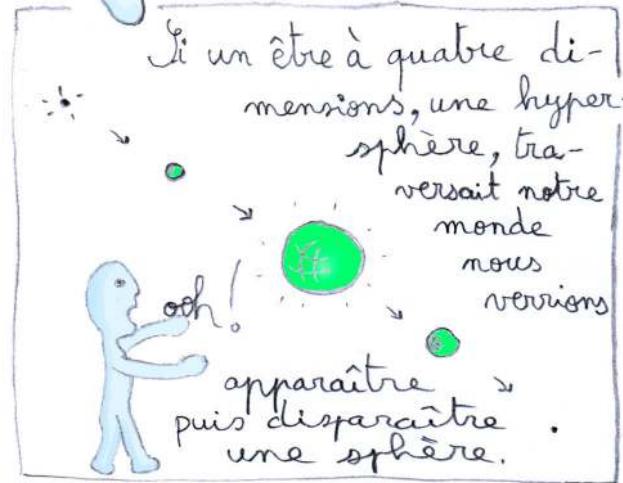
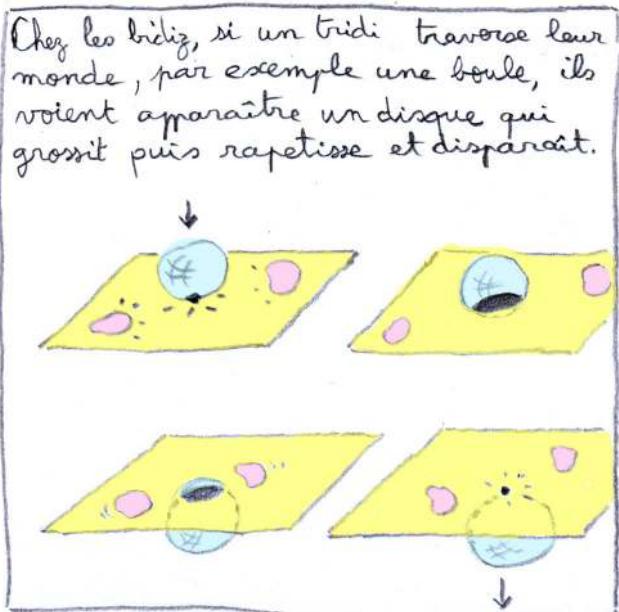
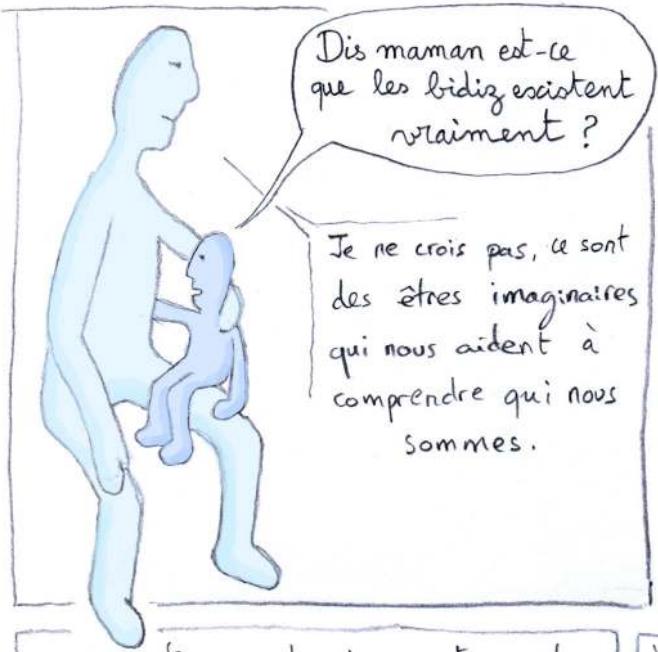
Si le rayon de la sphère était très grand devant leur taille, ils mettraient plus de temps à s'en rendre compte car les effets seraient plus faibles ou il faudrait se déplacer sur de grandes distances. Un bidi, pour rejoindre deux points diamétrallement opposés sur son Univers boule, doit parcourir la moitié d'un périmètre, alors qu'un tridi peut prendre un chemin plus court en passant directement par le centre de la sphère.

L'histoire des bidiz est peut-être semblable à la nôtre, nous, tridiz, vivrions dans le volume d'une hypersphère, objet à quatre dimensions spatiales. Le rayon devrait être important car nous n'avons pas encore pu le mesurer. Notre univers serait alors courbe et de volume fini. Le problème du bord de l'Univers est dans ce modèle résolu, il n'y a pas le moindre bord dans une hypersphère, tout comme pour les bidiz sur leur sphère.



*Aide pour voir les différents cubes de l'hypercube :*





## Le bidi

Les bidiz ont été découverts par Joja Hlang en 2231 à côté de la naine blanche de Sirius.

Taille 3 mega yotta planckx

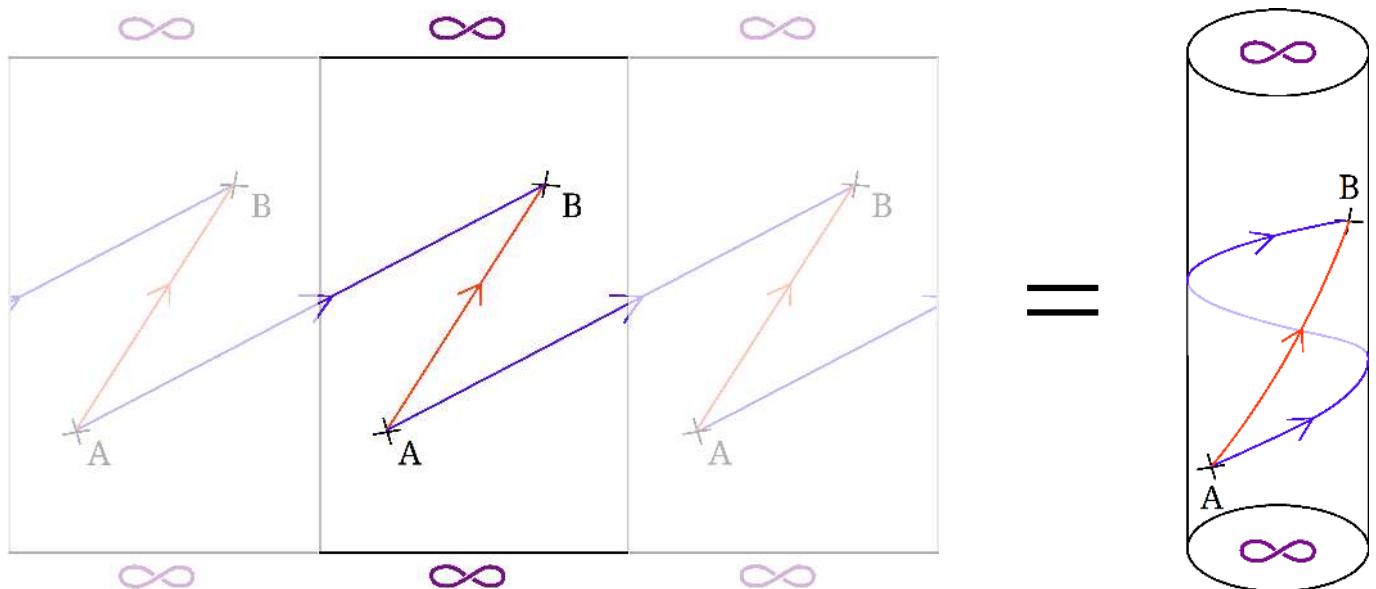
récepteur  
émetteur d'ondes  
coeur 8 battements par pétazzetta planckt

bidi mature

Joja, arrière-petite-fille de colons proximiens est une chercheuse émérite qui s'est d'abord spécialisée en exobiologie, pour ensuite étudier exclusivement les êtres bidimensionnels.

Joja passa des années à étudier la vie sociale des bidiz et principalement leur mode de reproduction. Le bidi mature se sépare en deux bébés bidiz, appelés bidinos. Mais à la différence de la mitose des cellules terrestres, le bidi mature doit être entouré, durant toute la séparation, de trois bidiz en contact permanent, les bidinos ont ainsi trois parents.

Imaginons maintenant qu'ils vivent sur une bande verticalement infinie, et lorsqu'ils arrivent à droite de la bande ils se retrouvent à gauche, et vice versa. Ce monde est plat avec une topologie particulière.



Nous pouvons de manière équivalente renfermer les bords latéraux et former un cylindre.

Sur un monde plan, la ligne droite qui relie deux points est le chemin le plus court. Sur ce monde cylindrique il y a plusieurs lignes droites possibles de longueurs différentes.

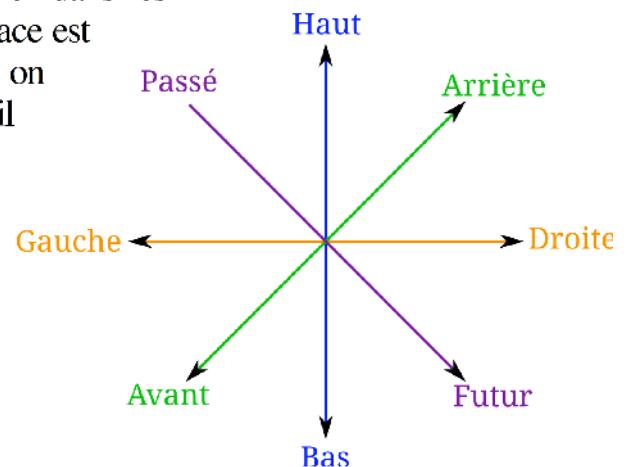
Contrairement à ce monde cylindrique plat, la sphère était courbe car elle ne pouvait être aplatie sans déchirer la surface.

Imaginons la surface d'une feuille de papier, on peut comme précédemment former un cylindre et, maintenant, si la feuille est suffisamment élastique, nous pouvons aussi refermer les deux bouts du cylindre pour former un tore. Ce monde est courbe, la feuille a dû être déformée.

Peut-être nous-mêmes vivons-nous dans un pavé et en traversant une des surfaces nous restons à l'intérieur et nous nous retrouvons de l'autre côté ; ce monde pourrait être équivalent à un hypertore. Plein d'espaces, courbures et topologies sont concevables et peuvent être imaginées !<sup>2</sup>

### *Espace et temps : où et quand ?*

Pour caractériser un événement, en plus des trois coordonnées d'espace, il faut une date, la coordonnée de temps. Finalement, nous vivons au quotidien dans un monde à quatre dimensions. Nous pourrions imaginer ce monde équivalent à un espace à quatre dimensions. En fait, l'espace et le temps ne sont pas de même nature : pour chaque dimension d'espace on peut aller dans les deux sens, par exemple, à droite ou à gauche, on dit que l'espace est isotrope, on peut aller dans toutes les directions. Par contre, on ne peut aller que du passé vers le futur, ce n'est pas isotrope, il existe ce qu'on appelle une flèche du temps. Donc plutôt qu'un monde 4D, nous vivons dans un monde 3+1D.



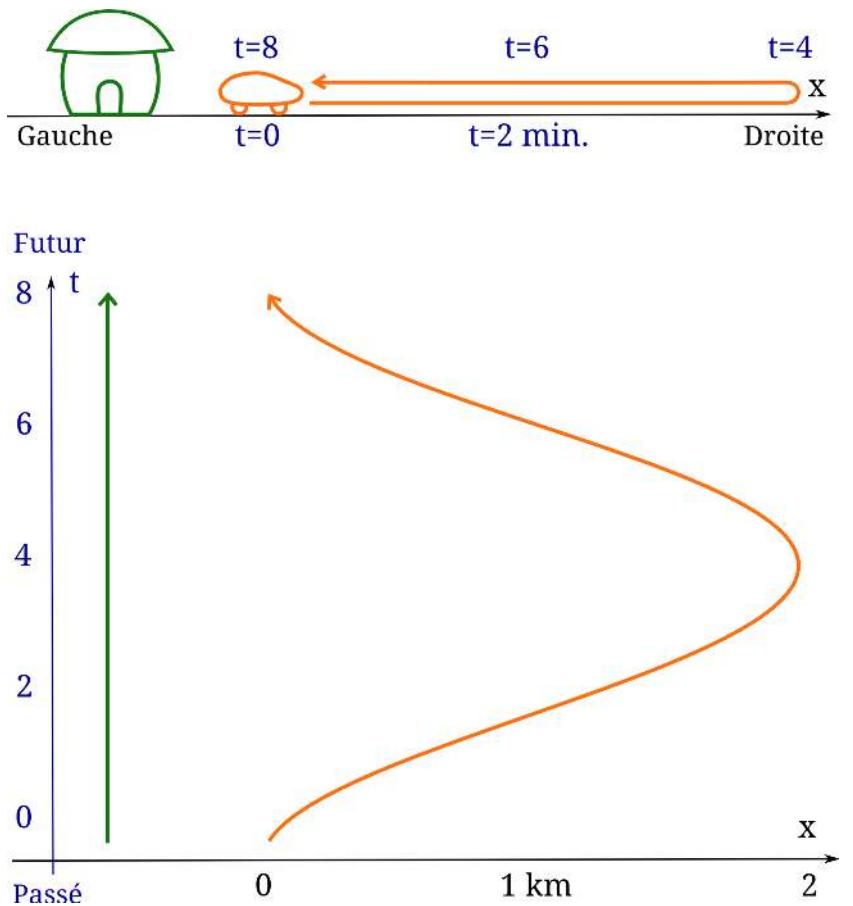
Cet espace-temps peut aussi être courbe et avoir des topologies particulières.

2 réf. 4 (références page 86)

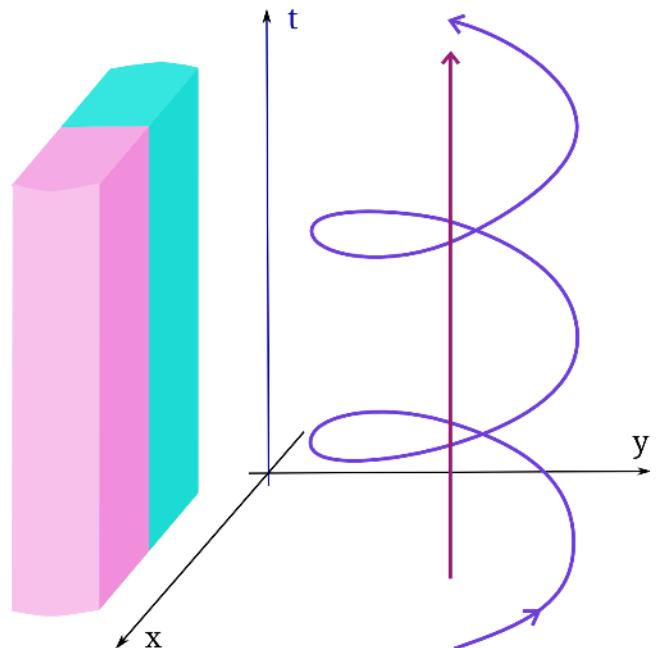
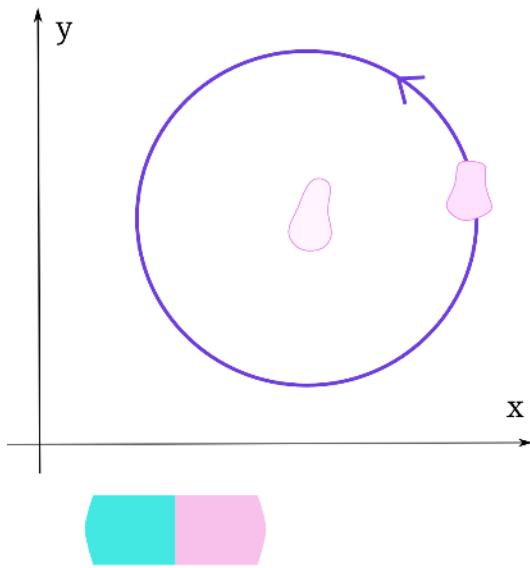
Dans l'espace, les objets se déplacent au cours du temps selon des trajectoires. Dans l'espace-temps, nous avons des lignes d'univers qui contiennent toute l'information sur les déplacements.

Par exemple, ci-contre, nous avons une maison, et une voiture qui fait un aller-retour. Sur le schéma du haut, la trajectoire de la maison est un point et celle de la voiture une ligne brisée qui revient sur elle-même. Les temps y sont ajoutés pour mieux d'écrire le mouvement.

Sur le deuxième schéma, tout est représenté d'un coup, en utilisant des lignes d'univers dans un diagramme d'espace-temps. Un objet immobile est représenté par une ligne verticale. Un objet en mouvement à vitesse constante par une droite d'autant plus inclinée vers l'horizontale qu'il va vite.



Ci-dessous, nous avons représenté une gomme 2D immobile et un bidi qui dort avec un deuxième qui tourne autour de lui. Un point donne une ligne d'univers. Un segment donne une surface d'univers. La gomme 2D donne un volume d'univers. Avec un objet 3D on obtient un objet 4D dans un diagramme d'espace-temps.

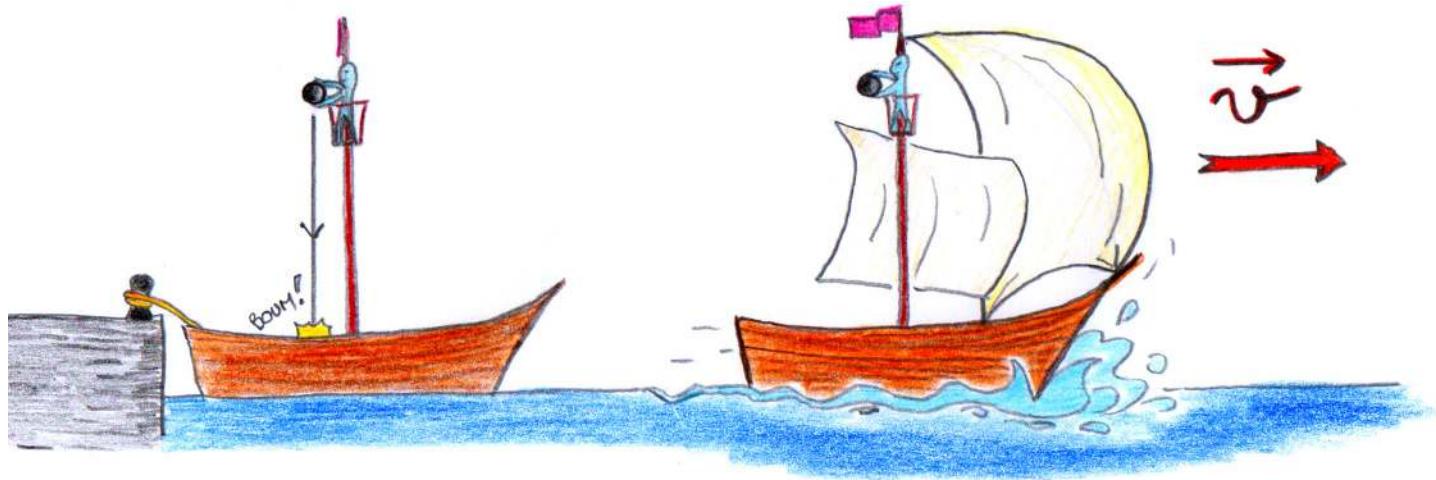


Un corps peut être au repos ou en mouvement.

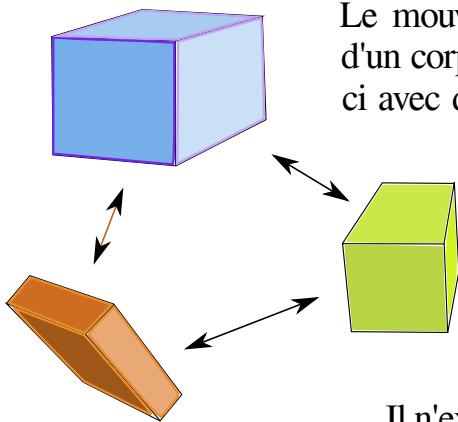
Selon la pensée aristotélicienne, le repos d'un corps est une propriété fondamentale et absolue de celui-ci ; de même pour son état de mouvement. À l'image de la glace figée qui passe à l'état de liquide et s'écoule.

Galilée, en rupture avec cette pensée, assure que le repos ou le mouvement d'un corps sont relatifs et sont question de point de vue. La publication du "Dialogue sur les deux grands systèmes du monde" de Galilée (1564-1642) en 1632 contribue à la naissance de la physique moderne<sup>réf. 1</sup>. Le livre remet en cause l'état de repos absolu de la Terre placée au centre du monde. De plus, le livre est écrit en italien, langue du peuple, et non en latin. L'ouvrage est à l'époque interdit par l'église et Galilée est dans un premier temps condamné.

Prenons l'exemple d'un bateau à quai puis qui navigue avec une vitesse et une direction constantes. À quai, le bateau est au repos. Si nous lâchons un boulet du haut du mât il tombera verticalement au pied de celui-ci. Dans la cale une mouche vole aisément d'une caisse à l'autre. Qu'en est-il une fois que le bateau navigue ?



Selon Aristote, un mouvement doit avoir une cause, un moteur. Si nous lançons un palet sur un plancher parfaitement lisse et sans friction, le palet continuera-t-il le même mouvement alors qu'aucune action n'est exercée ?



Le mouvement n'est pas, selon Galilée, une propriété d'un corps mais une modification des relations de celui-ci avec d'autres corps. Un corps est en mouvement par rapport à un autre au repos, et cet autre corps est en mouvement par rapport au premier considéré alors au repos.

**Galilée a une conception relativiste du mouvement**

Galilée énonce les principes suivants :

1 - *Le repos absolu n'existe pas*

Il n'existe pas un centre du monde immobile, mais un ensemble de référentiels équivalents en mouvement rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres.

2 - Un corps sur lequel ne s'exerce aucune action se déplace en ligne droite et à vitesse constante (loi d'inertie).

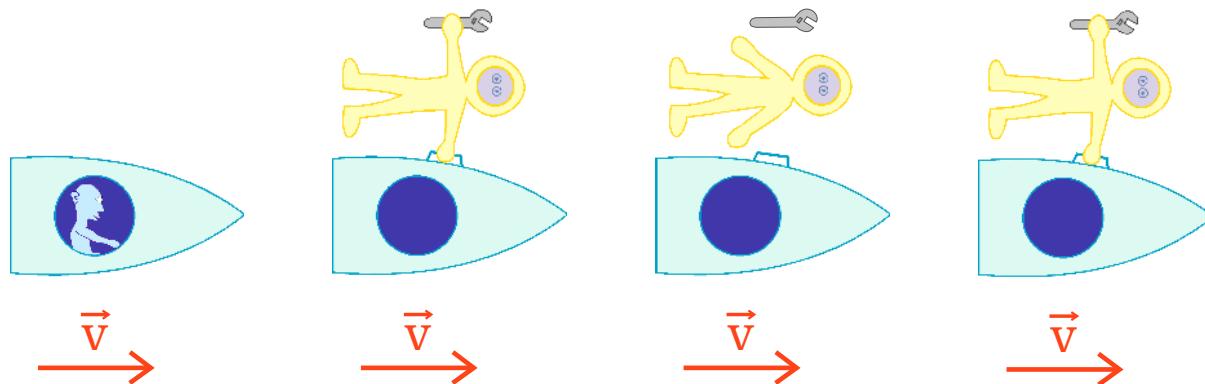
Si sa vitesse est nulle, il est au repos et le reste.

Lorsque le bateau navigue, il est en mouvement relativement au quai. Les caisses dans la cale du bateau sont aussi en mouvement par rapport au quai. Les caisses partagent leur mouvement avec le bateau et sont donc au repos par rapport à celui-ci. L'air de la cale est au repos et la mouche vole de la même manière que quand le navire est à quai (aux mouvements de la houle près). Le mouvement étant partagé il n'agit pas. De même, si vous sautez dans la cale du bateau quand il vogue, vous retomberez au même endroit que lorsqu'il est à quai. Le liquide versé dans un verre s'écoulera selon la verticale et le boulet tombera au pied du mât bien que le bateau soit en train de se déplacer par rapport au quai.

Pour l'exemple du palet, il continuera à vitesse constante sur le plancher tant que les frottements pourront être négligés.

Aussi, une voiture sur autoroute, qui rejoint deux points de même altitude, tant qu'elle roule à vitesse constante, n'utilise son carburant que pour vaincre les frottements. En l'absence de frottements, on pourrait couper le moteur dès la vitesse désirée acquise et parcourir ainsi des centaines de kilomètres sans rien consommer.

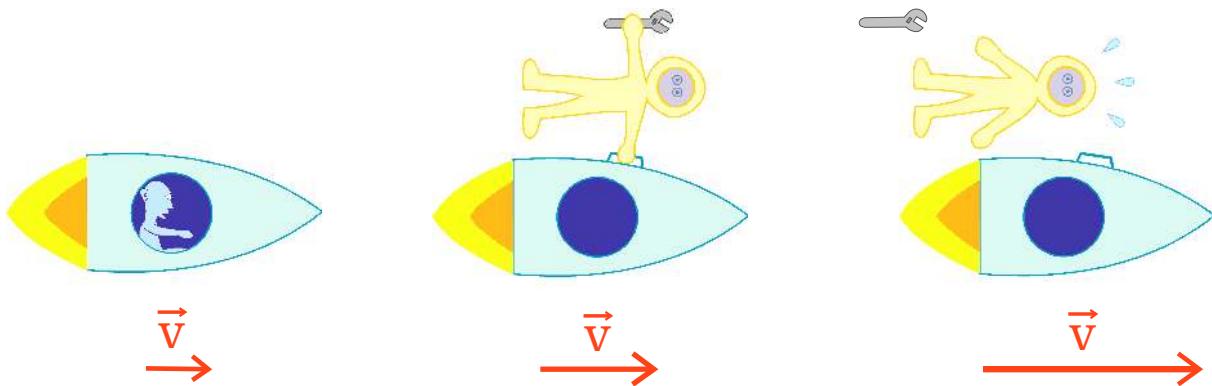
Pour une fusée lancée dans le vide interstellaire, ce n'est pas une vue de l'esprit. Il n'y a pas le moindre frottement. Dès la propulsion coupée, elle garde sa vitesse indéfiniment pour rejoindre en ligne droite une destination aussi éloignée que l'on veut. Si un astronaute sort alors du vaisseau pour une réparation avec sa clef à molette, que se passe-t-il s'il la lâche, ou s'il lâche lui-même le vaisseau ?



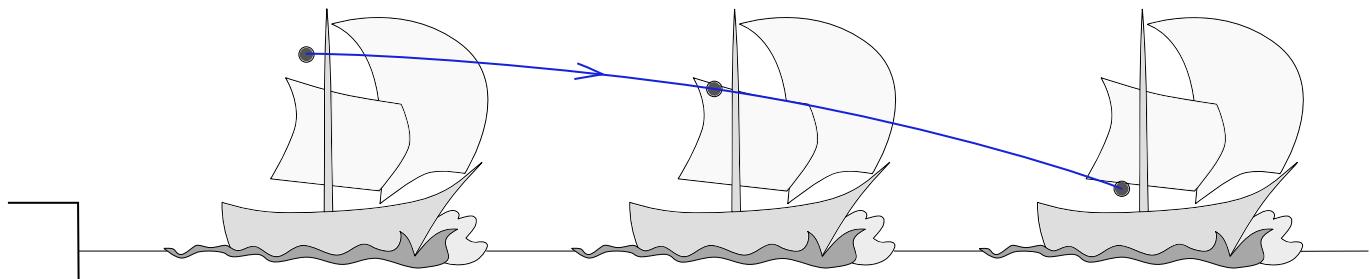
Vaisseau, astronaute et clef à molette ont un mouvement partagé et sont donc au repos dans le référentiel du vaisseau. Si l'astronaute lâche la clef, celle-ci reste au même endroit relativement au vaisseau et de même pour l'astronaute, même si le vaisseau file à une vitesse proche de la lumière. C'est une vitesse par rapport à la Terre. Rien n'empêche de considérer le vaisseau au repos et la Terre en mouvement qui s'éloigne à très grande vitesse vers l'arrière : le mouvement est relatif.

Par contre, dans une phase d'accélération où le mouvement n'est pas uniforme, ils auraient été projetés vers l'arrière. Nous voyons, sur le dessin page suivante, la poussée du vaisseau qui crée une accélération et une augmentation de la vitesse. Dans ce cas, il doit bien s'accrocher, et s'il lâche la clef à molette puis la poignée, il va voir le vaisseau s'éloigner sans lui !

Pour Galilée, les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels appelés galiléens. Référentiels définis par un ensemble de corps au repos qui partagent leurs mouvements de translation rectiligne uniforme avec un autre référentiel galiléen. Par contre, s'il y a changement de vitesse ce n'est plus le cas. Bien que les lois soient les mêmes, les trajectoires des objets sont différentes selon le référentiel galiléen d'observation. Dans le référentiel du navire, le boulet chute selon une trajectoire rectiligne alors



que par rapport à la côte, le mouvement de ce même boulet est courbé, la trajectoire suit une parabole. En effet, par rapport au navire, la vitesse du boulet, quand on le lâche, est nulle alors que par rapport au quai elle est égale à celle du bateau :



On pourrait penser que le boulet ne tombe pas au pied du mât mais vers l'arrière du bateau. Si au lieu d'un boulet, nous avions une boule toute légère, en polystyrène par exemple, elle serait sensible au vent et en particulier au vent relatif, dû au déplacement du navire, qui entraînerait l'objet vers l'arrière. Effets encore plus importants et imprévisibles si vous lâchiez une feuille du haut du mât. Quand vous ouvrez la vitre d'une voiture et mettez la main à l'extérieur, vous sentez la force de l'air en mouvement, surtout si la voiture roule vite. C'est pour cela que nous avons considéré un boulet, objet très compact et massif, ce qui permet de négliger les frottements devant le poids de l'objet.

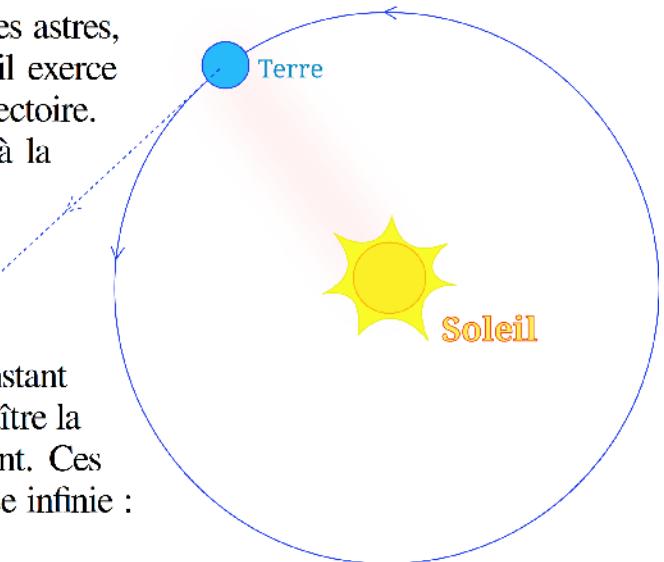
Nous avons souvent tendance à surinterpréter l'influence des frottements. Par exemple pour la loi d'inertie, on peut être étonné qu'un objet garde sa vitesse indéfiniment. Il y a aussi la fameuse expérience où on lâche simultanément un marteau et une plume. On peut faire l'expérience au laboratoire dans un enceinte sous vide, ou bien sur la Lune. Dans les deux cas les objets arrivent au sol en même temps car les frottements sont ici négligeables.

Newton (1642-1727) reprend l'ensemble des idées de Galilée et prolonge son travail dans son ouvrage *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* publié en latin en 1687 à Londres. Pour comprendre en détail ce qui détermine la trajectoire d'un corps, il introduit de nouvelles notions : la force, la masse, et, l'espace et le temps absolu. L'espace de Galilée n'a pas d'existence propre, il est relatif aux corps présents. Au contraire, l'espace de Newton est le cadre préexistant indépendant et absolu, et les objets s'y placent ensuite.

Pensons à la Terre qui tourne autour du Soleil. Nous allons nous intéresser au mouvement de la Terre dans le référentiel de Copernic, référentiel galiléen associé à notre système solaire. La trajectoire de la Terre dépend de l'attraction gravitationnelle de tous les autres astres, principalement de celle du Soleil, mais aussi de la Lune et de toutes les autres planètes et corps de l'Univers.

Si la Terre pouvait se déconnecter de l'influence des autres astres, elle continuerait en ligne droite. Mais preuve que le Soleil exerce une force sur elle, elle tourne autour de lui et courbe sa trajectoire. Tout se passe comme si une tige rigide reliant le Soleil à la Terre lui imposait une trajectoire circulaire.

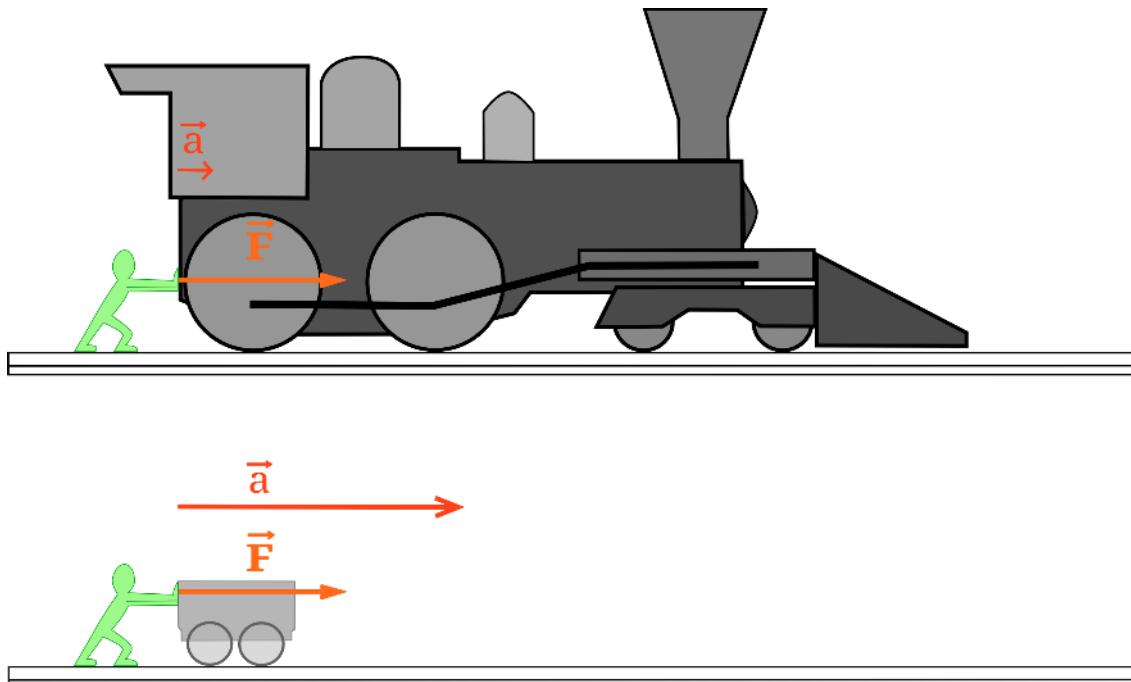
Mais en absence de tige, comment expliquer que, bien que distant, le Soleil exerce ainsi une force instantanément sur la Terre ? De manière plus large, toutes les masses de l'Univers doivent connaître à chaque instant toutes les positions et valeurs des autres masses pour connaître la force qui s'exerce sur elles et en déduire leur mouvement. Ces informations doivent transiter dans l'espace avec une vitesse infinie : il y a instantanéité.



Cette propriété de l'espace est, dans ce cadre, nécessaire pour remplacer le rôle matériel de la tige et permettre aux forces de s'exercer à distance. Plus qu'un espace géométrique, nous avons un espace physique. Cet espace est tel un corps indépendant au sein duquel toutes les particules disposent en permanence de toutes les informations sur l'Univers qui leurs sont nécessaires.

## Deux types de masses

Newton relie la force et l'accélération d'un corps par sa masse. Par exemple, en absence de frottements, si vous poussez une locomotive sur des rails horizontaux, celle-ci, malgré vos efforts, ne se mettra que très lentement en mouvement. Alors qu'en exerçant la même force sur un petit chariot, il va rapidement aller si vite que vous peinerez à le suivre. Nous avons une inertie à la mise en mouvement.



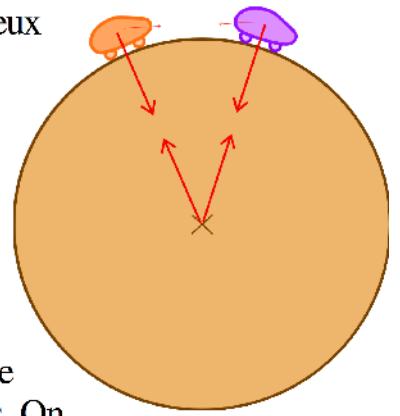
Plus la masse est grande, plus l'objet peine à prendre de l'élan : on parle alors de *masse inerte*.

C'est une autre masse qui intervient dans la force de gravitation.

Pour expliquer la chute d'une pomme qui se décroche d'un arbre, ou le mouvement de la Lune autour de la

Terre, Newton suppose que les corps génèrent un champ de gravitation. Deux objets, quels qu'ils soient, sont attirés l'un vers l'autre.

Par exemple, lorsque vous regardez deux voitures sur un parking, celles-ci s'attirent, si rien ne les retenait elles viendraient lentement se coller l'une à l'autre. Par exemple, si nous imaginons deux voitures sur une patinoire parfaitement lisse, ce serait le cas. Une force un milliard de fois plus forte s'exerce sur une voiture, celle de la Terre bien plus massive. Cette force cloue la voiture au sol et comparée aux frottements, entre le macadam et les pneus, l'attraction entre les deux voitures est totalement négligeable. Cette force diminue rapidement avec la distance et est proportionnelle à la masse des corps. On parle alors de *masse grave*. On montre expérimentalement, avec une très grande précision, que ces deux masses sont égales :



$$\text{masse inerte} = \text{masse grave}$$

L'équivalence des deux masses n'a, a priori, aucune raison d'être, ce sont deux propriétés différentes des objets. Cette égalité est inexpliquée dans la théorie de Newton. La théorie de Newton présente de nombreux postulats qui peuvent sembler quelque peu "magiques" : existence de la force de gravitation, égalité des masses inertes et de gravité, instantanéité des forces à distance, rôle central d'un espace physique. Cette théorie fonctionne néanmoins excellemment bien et présente d'innombrables applications dans notre vie de tous les jours : explication du fonctionnement de l'ensemble des systèmes mécaniques, du fonctionnement d'un vélo au mouvement des planètes.

L'histoire est loin de s'arrêter là. En 1860, Maxwell est le principal artisan de l'électromagnétisme qui unifie les lois de l'électricité et du magnétisme. La lumière est alors interprétée comme une onde électromagnétique qui se propage avec une vitesse finie indépendante du référentiel galiléen (encore appelé référentiel d'inertie). Vitesse très grande proche de 300 000 km par seconde ! Cette théorie est magnifique et se vérifie expérimentalement. Malheureusement, la mécanique de Newton, tout aussi fabuleuse, contredit la théorie de l'électromagnétisme...

En effet, la mécanique classique démontre l'additivité des vitesses or, ici, la vitesse de la lumière est constante même si on l'observe de deux référentiels différents en mouvement l'un par rapport à l'autre. Si une voiture qui roule sur la route à 50 km/h, en voit une deuxième qui roule vers elle à 100 km/h, elle aura l'impression qu'elle se rapproche d'elle à 150 km/h. Ici ça ne marche plus. Un vaisseau qui se déplace à



50% de la vitesse de la lumière vers un rayon lumineux ne verra pas les photons aller plus vite que la lumière mais toujours exactement à la même vitesse de la lumière dans le vide.

Voilà qui troubla la communauté scientifique. Pour essayer de concilier les deux théories, un référentiel privilégié fut proposé pour la lumière. Nous étions habitué à ce qu'une onde se propage dans un milieu physique, comme le son dans l'air ou une vague à la surface de l'eau. Certains cherchèrent donc le milieu de propagation de la lumière, qu'ils dénommèrent *éther*. Mais, il fut montré que celui-ci n'existe pas, la lumière n'a pas besoin de milieu pour se propager.

Suite aux travaux, notamment de Poincaré et d'Einstein, il est proposé en 1905<sup>ref. viii</sup> un nouveau cadre pour la mécanique : la relativité restreinte. Il existe une vitesse limite et indépassable pour la propagation des interactions, vitesse qui s'identifie à celle de la lumière dans le vide dans la théorie de Maxwell. L'espace absolu et le temps absolu, indépendants l'un de l'autre, sont remplacés par un espace-temps

absolu où l'espace et le temps sont relatifs. Les coordonnées d'espace et de temps se mélangent lors d'un changement de référentiel d'inertie et perdent ainsi leur caractère propre et absolu. On parle alors de dilatation du temps et de contraction des longueurs. Ce n'est pas un effet réel, mais un effet de perspective spatio-temporelle. Deux événements simultanés dans un référentiel ne le sont plus dans un autre. Comme il y a une vitesse maximale, il n'y a plus additivité des vitesses. De plus, les forces dépendent du référentiel, le principe des actions réciproques n'est plus vérifié et l'énergie peut se transformer en masse... Tout ceci peut paraître étrange mais cette théorie présente moins de concepts posés a priori que la mécanique classique de Newton et présente un cadre idéal pour l'électromagnétisme. La relativité restreinte est parfaitement vérifiée expérimentalement et, dans la limite des petites vitesses, redonne la mécanique classique.

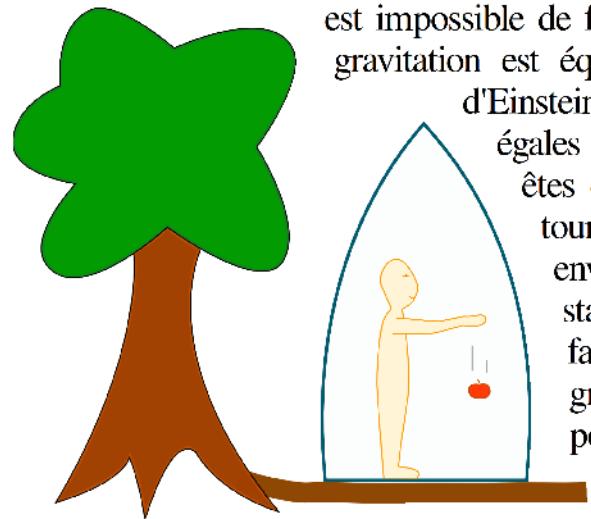
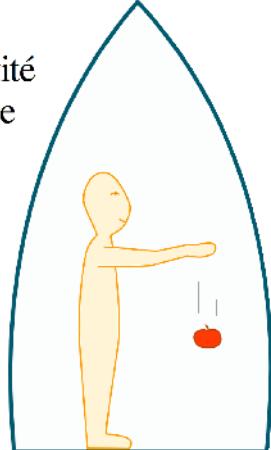
*Troisième loi de Newton, Principe d'action-réaction ou Principe des actions réciproques : « L'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens contraires. ». Sur l'exemple précédent, la force qu'exerce la Terre sur la voiture rouge est la même au sens près que celle qu'exerce la voiture rouge sur la Terre.*

restreinte aux référentiels non inertiels et crée la relativité générale qui refond complètement notre vision de la gravitation et la nature même de l'espace-temps. Il propose l'expérience de pensée suivante : vous vous réveillez, vous êtes dans une fusée, vous vous tenez debout, et si vous lâchez un objet celui-ci tombe à vos pieds. Il se trouve que vous ne pouvez pas voir à l'extérieur de la fusée. Comment interprétez-vous la situation ?

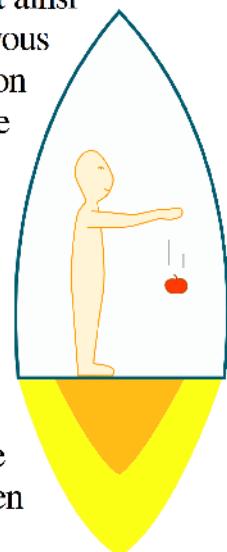
Premièrement, vous pouvez considérer que la fusée n'a pas encore décollé et qu'elle est posée au sol sur Terre. Ce qui explique, de par l'existence de la force de gravitation, que les objets tombent et que vous n'êtes pas en apesanteur. Mais il y a une autre possibilité. La fusée peut déjà être dans l'espace, les moteurs sont en marche et la poussée engendrée accélère le vaisseau, ce qui vous plaque au sol et fait que les objets se déplacent vers l'arrière. Il est impossible de faire la différence, donc fondamentalement, dans le vaisseau, la gravitation est équivalente à une accélération. C'est le principe d'équivalence d'Einstein. Par construction les masses inerte et grave sont ainsi égales et ne sont plus qu'une. Une autre situation : vous êtes dans la station spatiale internationale, la station tourne autour de la Terre en une heure trente environ. Le champ de pesanteur au niveau de la station placée à 500 km d'altitude est 15% plus faible qu'au niveau du sol. Le champ de gravitation est loin, donc, d'être négligeable et pourtant les spationautes sont en apesanteur dans la station. Cela est dû au fait que la station spatiale est en chute libre. Imaginez que vous soyez dans un ascenseur et que le câble casse, l'ascenseur sera alors aussi en

Ceci dit, la force de gravitation de Newton ne peut plus alors être utilisée telle quelle. L'interaction n'est plus instantanée et de plus cette force dépend de la distance entre les deux masses. Or, en relativité restreinte, cette distance dépend du référentiel d'inertie : il y a contraction des longueurs. Or les lois doivent garder la même forme dans tous ces référentiels. La première idée serait de modifier la loi pour qu'elle ne change plus de forme, mais Albert Einstein suit un chemin très différent.

En 1915, Einstein prolonge la relativité



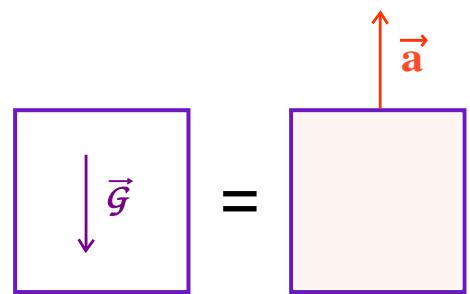
Ci-dessus : un champ de gravitation  $\vec{g}$  dirigé vers le bas. À droite : une accélération  $\vec{a}$  dirigée vers le haut.



chute libre et vous flotterez en apesanteur dans l'ascenseur.

Revenons dans la station spatiale, c'est quand même plus sympathique que la situation de l'ascenseur... les satellites tombent aussi vers la Terre mais comme ils ont une vitesse initiale importante et comme la Terre n'est pas plate, ils tombent toujours à côté et continuent à tomber indéfiniment ! Les spationautes ne ressentent pas la force de gravitation, et de leur point de vue, elle n'existe pas. En effet, ils flottent librement et aucune force ne s'exerce sur eux. D'ailleurs si les fenêtres de la station étaient fermées, aucun moyen de savoir si le vaisseau gravite autour de la Terre ou s'il vogue librement dans l'espace intersidéral. Là aussi, cet exemple illustre le principe d'équivalence. Le vaisseau est plongé dans le champ de gravitation terrestre et celui-ci est effacé par l'accélération de la cabine en chute libre. Tout se passe comme si il n'y avait plus de gravitation.

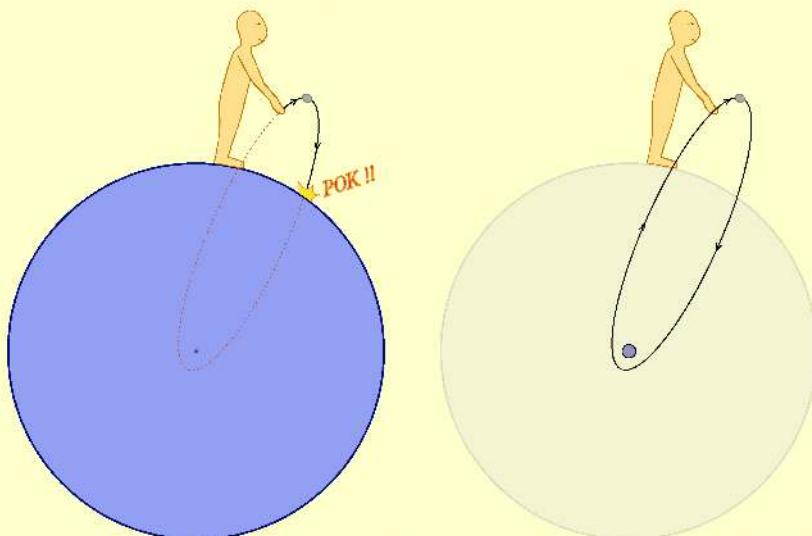
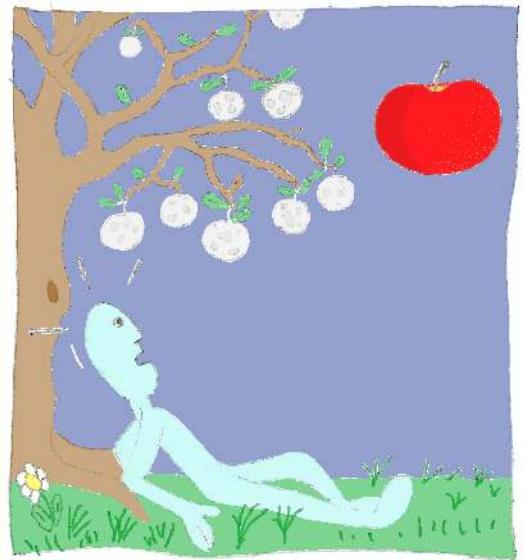
En chaque point, nous pouvons effacer la gravitation en se plaçant dans un référentiel accéléré. Dans ce référentiel, comme il n'y a plus de gravitation, nous pouvons appliquer la relativité restreinte.



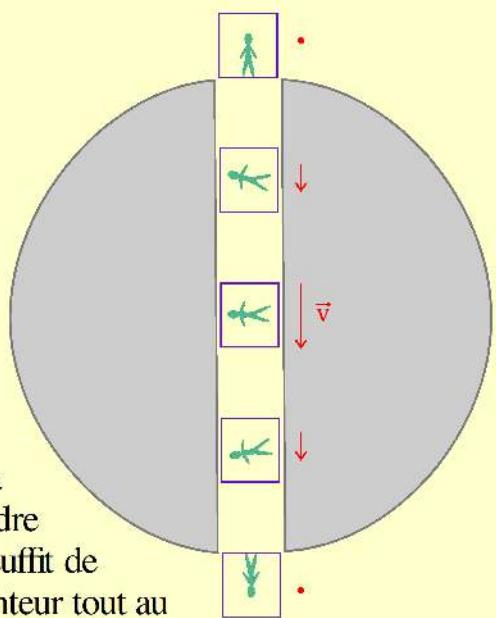
## Chutes libres

Quand vous lancez un objet, il tombe au sol après quelques secondes, mais si toute la masse de la Terre était concentrée en son centre, l'objet continuerait à tomber, contournerait le centre de la Terre et reviendrait dans votre main après une cinquantaine de minutes.

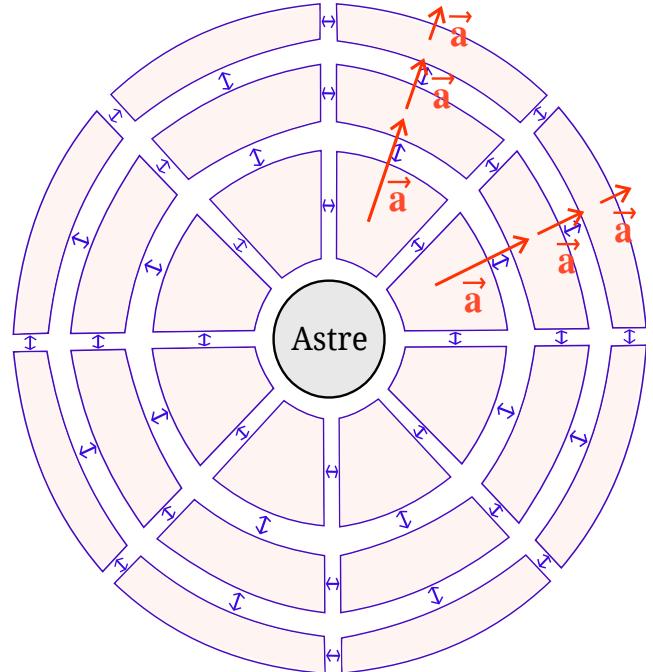
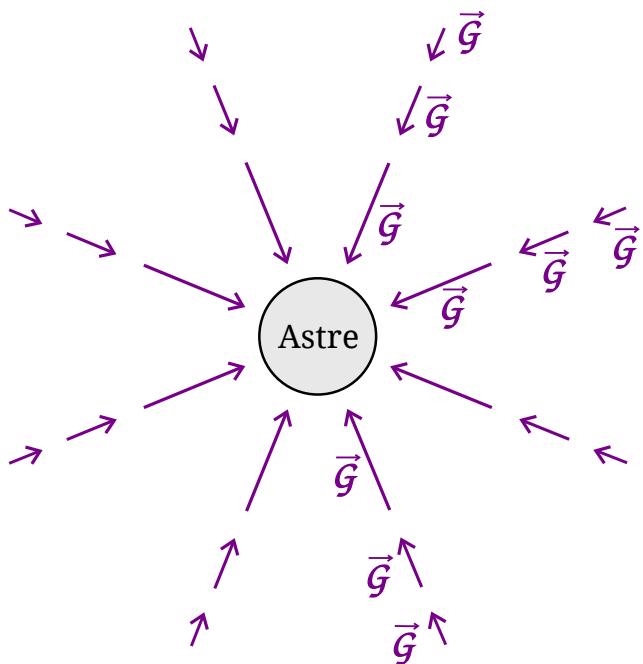
C'est en voyant tomber une pomme d'un arbre qu'Isaac Newton aurait compris que la Lune et la pomme chutent pour les mêmes raisons dans le champ de gravitation.



Nous pourrions aussi concevoir un ascenseur pour rejoindre les antipodes en creusant un tunnel dans une planète rocheuse. Ce serait difficile sur Terre à cause du magma, mais c'est concevable sur la Lune. Sur la Lune, un tel ascenseur vous permettrait de rejoindre l'antipode en moins d'une heure sans fournir la moindre énergie. Il suffit de laisser tomber l'ascenseur, vous seriez alors en chute libre et en apesanteur tout au long du voyage.



Au final, de proche en proche, nous pouvons effacer la gravitation partout en connectant un ensemble de référentiels non inertiels autour d'un astre. Les connexions entre les référentiels non inertiels nécessitent un espace-temps courbe !

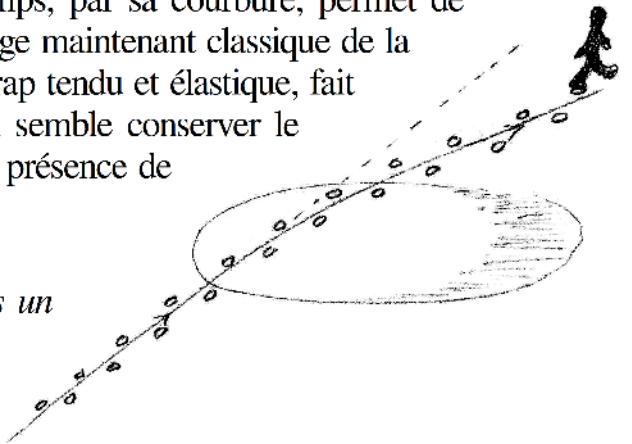


La cabine des spationautes représente une partie de l'espace où la gravitation est effacée, mais cela fonctionne si la cabine est suffisamment petite pour pouvoir considérer le champ uniforme dans la cabine. C'est une très bonne approximation, la cabine est si petite, localisée dans une toute petite zone de l'espace environnant la Terre. Mais si on pouvait faire des mesures très précises, on pourrait voir d'infimes variations en direction et intensité du champ. C'est pour cela qu'il faut répéter finement l'opération de proche en proche et que l'espace-temps du référentiel des astronautes est courbé. Localement, en un point, le principe d'équivalence s'applique, aucun moyen de faire la différence. Par contre, dans une zone étendue comme la station, les spationautes pourraient faire des mesures pour se rendre compte qu'ils vivent dans un espace courbe.

En relativité restreinte, nous pouvions étudier le mouvement des objets accélérés mais nous avions un espace-temps qui restait plat. Ici, pour la gravitation, ce n'est plus le cas, et l'énergie, et donc la masse, crée la courbure de l'espace-temps. L'espace-temps n'est plus absolu mais relatif à la matière. Étonnamment nous retrouvons, d'une certaine manière, la vision de Galilée où l'espace n'a de sens que comme relation entre les corps présents. Il en est fini de l'espace de Newton, un espace contenant préexistant.

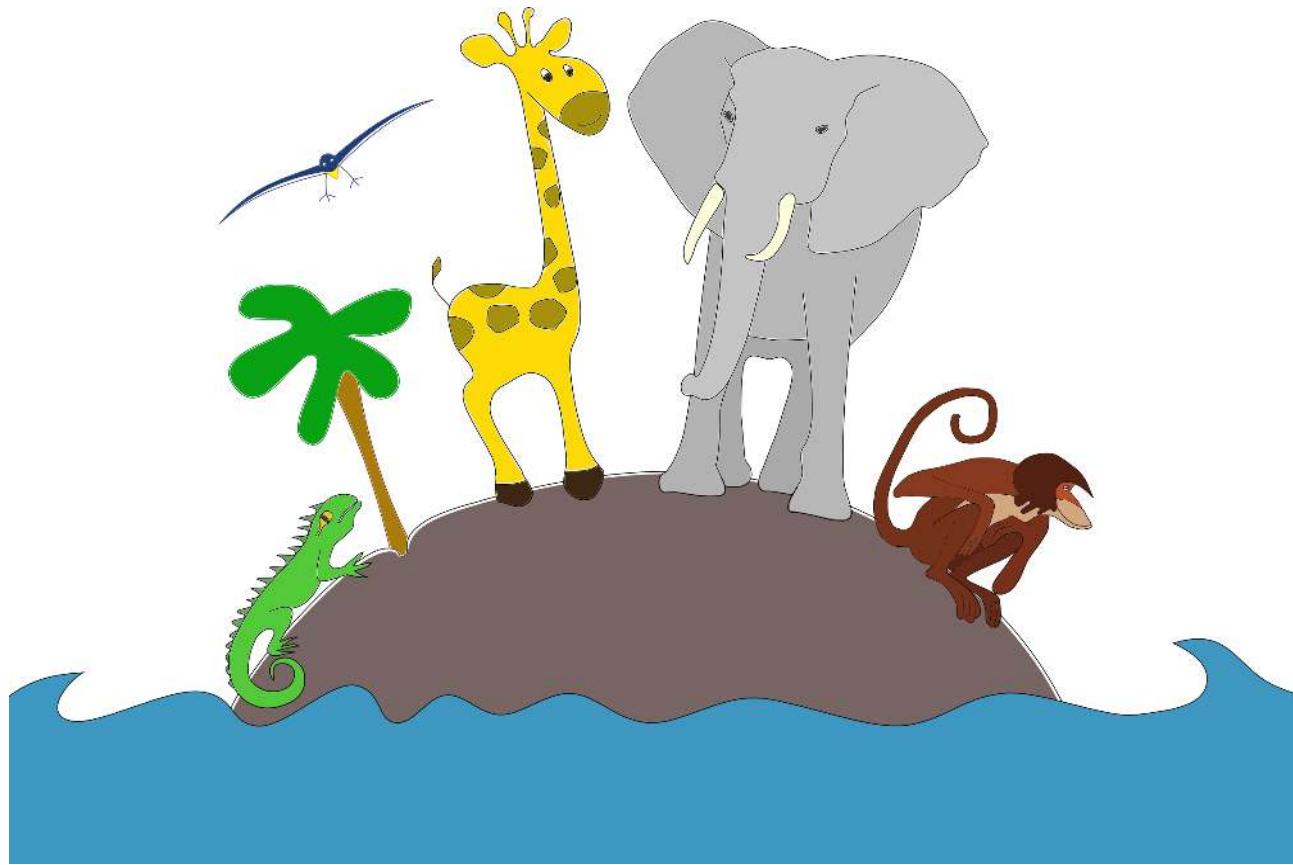
La courbure de l'espace-temps modifie la trajectoire de l'objet et remplace la force de gravitation de Newton. Il n'y a plus ici de concept de force. L'espace-temps, par sa courbure, permet de comprendre le mouvement de la Terre autour du Soleil. Image maintenant classique de la relativité générale où le Soleil, tel une boule placée sur un drap tendu et élastique, fait tourner la Terre en cercle. Néanmoins, cette représentation semble conserver le statut absolu de l'espace-temps qui, bien que déformé par la présence de masses, préexiste comme une entité indépendante.

*Un marcheur dans le désert croit aller en ligne droite, mais un léger renfoncement le fait dévier de sa trajectoire.*



Comme l'espace-temps devient une entité dynamique, pourquoi pas considérer, à l'inverse, que le champ gravitationnel est l'espace-temps ? L'espace-temps créé par le champ gravitationnel finalement s'y identifie et disparaît. Telle une onde électromagnétique qui n'a pas besoin d'un milieu pour se propager, le champ gravitationnel peut se passer de l'espace-temps pour exister.

Prenons l'image d'une île<sup>réf. 3</sup>. Des animaux vivent sur l'île. L'île est leur maison, c'est leur cadre de vie stable qui leur permet de survivre et d'exister.



Pour la mécanique de Newton et la physique quantique, l'île représente l'espace et le temps absolus. Les animaux sont les particules et les champs qui s'y déplacent et interagissent. Pour la relativité restreinte, et le modèle standard de la physique des particules, l'île est l'espace-temps absolu.

Il existe quatre interactions fondamentales dans l'Univers : la force de gravitation qui lie les masses, l'électromagnétisme qui lie les charges électriques et constitue la lumière, l'interaction forte qui permet aux noyaux atomiques d'exister et colle les quarks entre eux, et l'interaction faible qui explique la radioactivité.

Les trois dernières forces sont unifiées dans le Modèle Standard depuis les années 70, modèle parfaitement établi expérimentalement, mais la gravitation échappe toujours à toute unification depuis !

D'où des théories spéculatives, telles celles des cordes, et maintenant des boucles, pour essayer de sortir de l'impasse.

La relativité générale sort l'espace-temps du cadre pour le rendre vivant. Il interagit avec les autres animaux. Il est le champ de gravitation (illustration page suivante).

La relativité générale est une théorie fabuleuse et très économique en concepts. Les vérifications expérimentales sont chaque fois plus nombreuses et il s'agit maintenant d'une théorie bien établie.

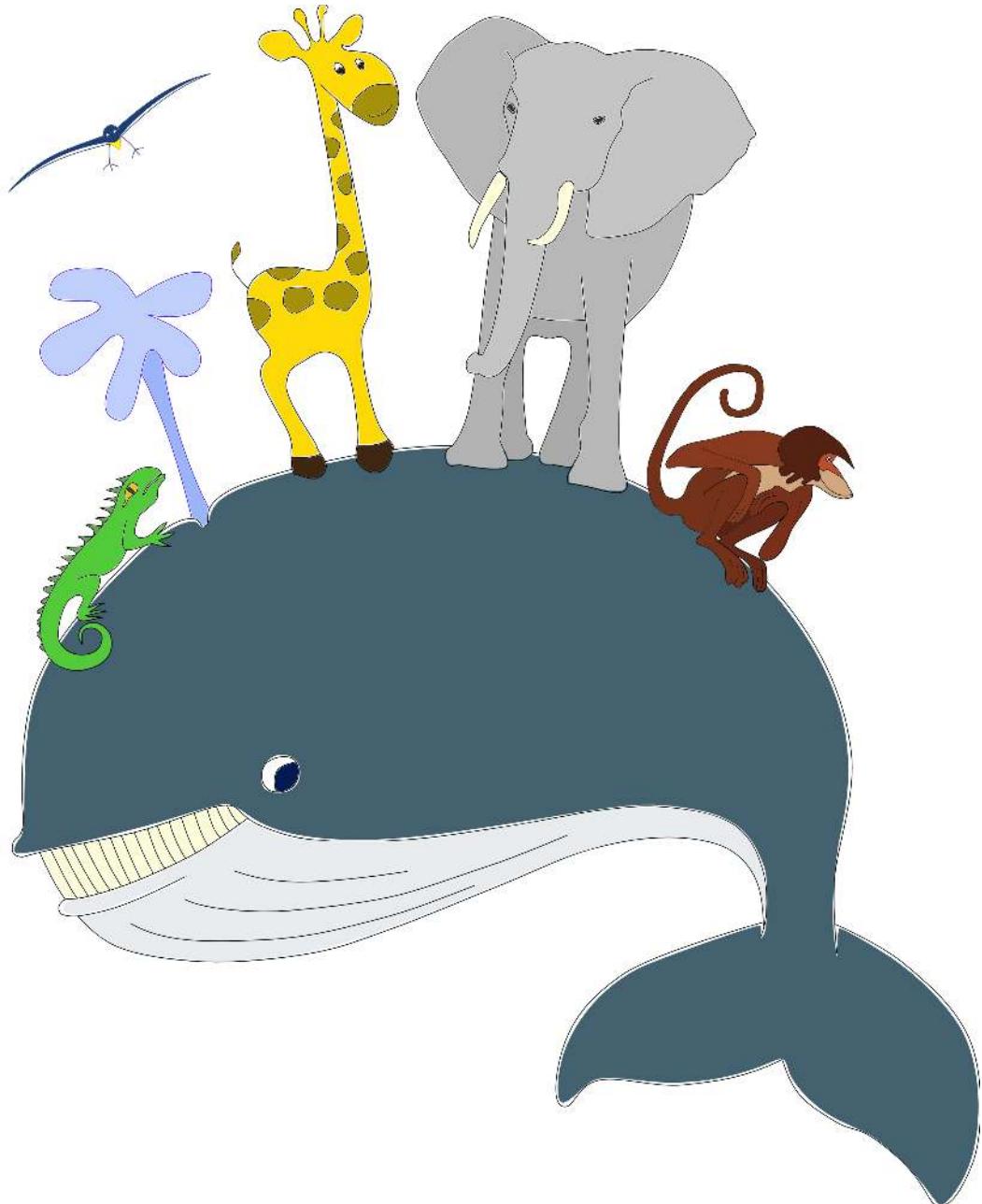
Historiquement la théorie a d'abord permis d'expliquer la déviation des rayons lumineux par le Soleil. Les photons qui constituent la lumière sont de masse nulle. Dans le cadre de la mécanique classique, il n'y aurait donc pas de force de gravitation exercée sur la lumière et donc pas de déviation des rayons lumineux par le Soleil.

D'un autre côté, même si la masse du photon est souvent considérée comme nulle, ce n'est pas une certitude. Ça n'a pas été démontré expérimentalement : on a juste mesuré une masse maximale qui est effectivement extrêmement petite.

Or en mécanique Newtonienne la masse disparaît dans les équations du mouvement, la déviation d'un objet qui passe au voisinage du Soleil ne dépend pas de la masse de celui-ci, mais seulement de sa vitesse.

On peut considérer une particule de vitesse  $c$  et la déviation ainsi calculée en mécanique classique est la moitié du résultat trouvé en relativité générale.

Expérimentalement c'est la valeur prédictive par la relativité générale qui fut validée lors d'une éclipse solaire en 1919.



La relativité générale prédit aussi deux types de singularités : les trous noirs et le Big Bang.

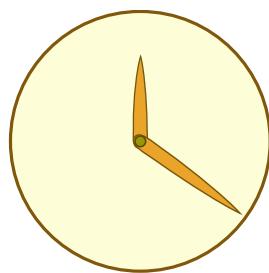
L'existence de lentilles gravitationnelles et des ondes de gravitation a elle aussi été validée par les mesures expérimentales.

La relativité générale, et dans une moindre mesure la relativité restreinte, expliquent le ralentissement des horloges qui nous permettent d'utiliser les systèmes de positionnement par satellites, comme le système états-unien GPS, l'europeen Galileo, le russe GloNaSS ou encore le chinois Beidou.

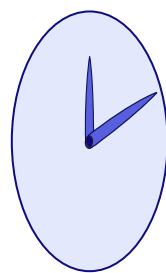
Sans les corrections relativistes, les systèmes de navigation, que l'on soit en avion, en bateau ou dans sa voiture, seraient tout à fait inutilisables. La dilatation du temps doit être prise en compte pour deux raisons : la vitesse élevée des satellites et la déformation de l'espace-temps par la masse de la Terre.

Nous n'avons pas parlé des fondements de la physique quantique dans ce petit historique car ce n'est pas nécessaire dans ce livre pour comprendre les différentes étapes du voyage pour Proxima. Dans un second tome, nous nous intéresserons au mode de propulsion du vaisseau. Il nous faudra alors proposer un carburant pour atteindre des vitesses proches de celle de la lumière. Ce carburant lumineux du futur sera constitué d'anti-matière et sera nommé le *proxinium*. À ce moment nous nous intéresserons à la physique quantique.

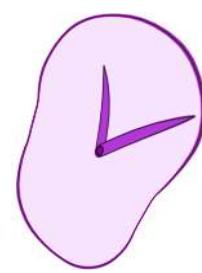
Remarque : on peut s'étonner du nom de *Relativité restreinte* choisi vu que son champ d'application est au contraire élargi par rapport à la *Mécanique de Newton*. Nous pouvons voir la relativité restreinte comme le premier pas vers la *Relativité générale*, théorie généralisée à tous les types de référentiels.



Mécanique  
classique



Relativité  
restreinte



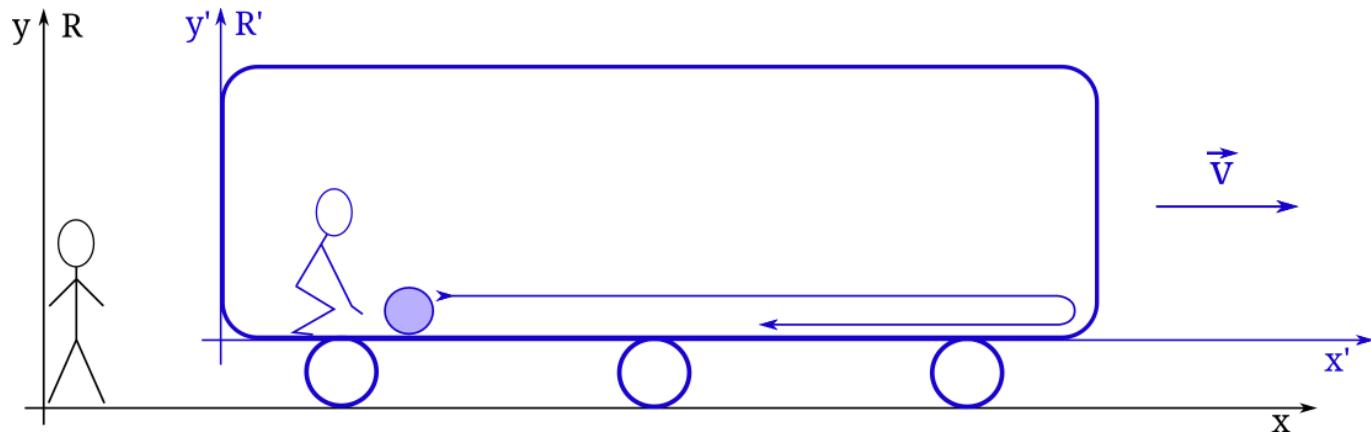
Relativité  
générale

### Approche moderne : utilisation des symétries

Nous avons besoin de quelques postulats de base pour construire la théorie de la relativité restreinte, ils sont peu nombreux et semblent assez naturels :

- Il y a trois dimensions d'espace et une dimension de temps.
- L'espace est homogène. En tout point de l'espace, les lois qui régissent la nature doivent être les mêmes. On a les mêmes lois à Paris, sur la Lune ou de l'autre côté de la galaxie.
- Le temps est homogène. En tout temps les lois sont les mêmes, que ce soit à l'époque des dinosaures, sous l'empire romain, maintenant ou dans le futur.
- L'espace est isotrope. Les propriétés fondamentales ne dépendent pas de la direction. Il n'existe pas une direction privilégiée.
- Le temps n'est pas isotrope. Nous pouvons aller du passé vers le futur mais pas l'inverse. C'est le principe de causalité : l'effet vient après la cause. Nous vivons dans un monde à quatre dimensions mais celles-ci ne sont pas de natures équivalentes, nous avons une flèche du temps.
- Si les lois de l'univers sont vérifiées dans un référentiel d'inertie, elles doivent l'être dans tous les référentiels en translation rectiligne uniforme par rapport à ce premier référentiel. Ce référentiel est aussi d'inertie et nous avons ainsi un ensemble de référentiels d'inertie équivalents. Nous avons mis ici une restriction en se limitant aux référentiels d'inertie.

Nous positionnons un événement dans l'espace et le temps en utilisant quatre coordonnées  $(x, y, z, t)$ . Un même événement  $E$  peut être observé depuis différents référentiels dans lesquels il aura différentes coordonnées,  $(x, y, z, t)$  dans le référentiel  $R$ , et  $(x', y', z', t')$ <sup>3</sup> dans le référentiel  $R'$ . On peut étudier les phénomènes physiques dans le référentiel d'inertie que l'on veut, on obtiendra la même évolution d'un système, il sera simplement vu selon des perspectives différentes. Par exemple, si quelqu'un fait rouler une balle sur le plancher d'un train, la ligne d'univers de la balle sera interprétée différemment vue du sol ou du train. Mais on étudie bien la même chose, par exemple, dans les deux cas la balle rebondira contre le bord du wagon.



<sup>3</sup>  $x'$  se lit "iks prime".

Dans le cadre de la mécanique de Newton, les deux observateurs de  $R$  et  $R'$ , du moment qu'ils ont correctement synchronisé leurs montres, tomberont d'accord sur l'heure à laquelle la balle rebondit. Dans la théorie de Newton le temps est présupposé absolu :  $t' = t$ .

Ici, nous ne voulons préjuger de rien. Nous voulons déterminer l'expression la plus générale possible entre les coordonnées dans  $R$  et celle dans  $R'$ . Après un petit calcul de quelques pages<sup>4</sup> qui aurait pu être déjà réalisé avec les outils mathématiques de l'époque de Newton, et en n'utilisant que les postulats énoncés précédemment, nous trouvons un résultat étonnant : l'univers admet une vitesse maximale indépassable ! La transmission des informations, l'énergie et la matière ont une vitesse limite.

De plus, le temps n'est plus absolu, mais il dépend du mouvement. Il n'y a plus un temps pour tous, mais un temps propre à chaque observateur. Le temps  $t'$  de  $R'$  dépend du temps  $t$  du référentiel  $R$  mais aussi des positions  $x, y, z$  et de la vitesse  $v$  de  $R'$  dans  $R$ . Les coordonnées de temps et d'espace se mélagent, temps et espace sont relatifs et nous parlons alors d'*espace-temps*. Cet effet de perspective spatio-temporelle a plusieurs conséquences remarquables sur la simultanéité des événements, la dilatation du temps et la contraction des longueurs.

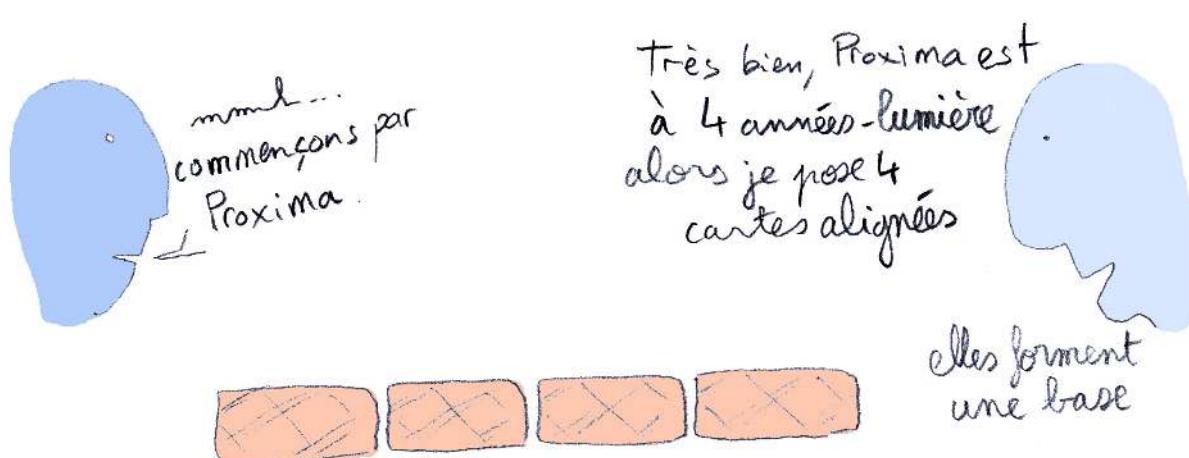
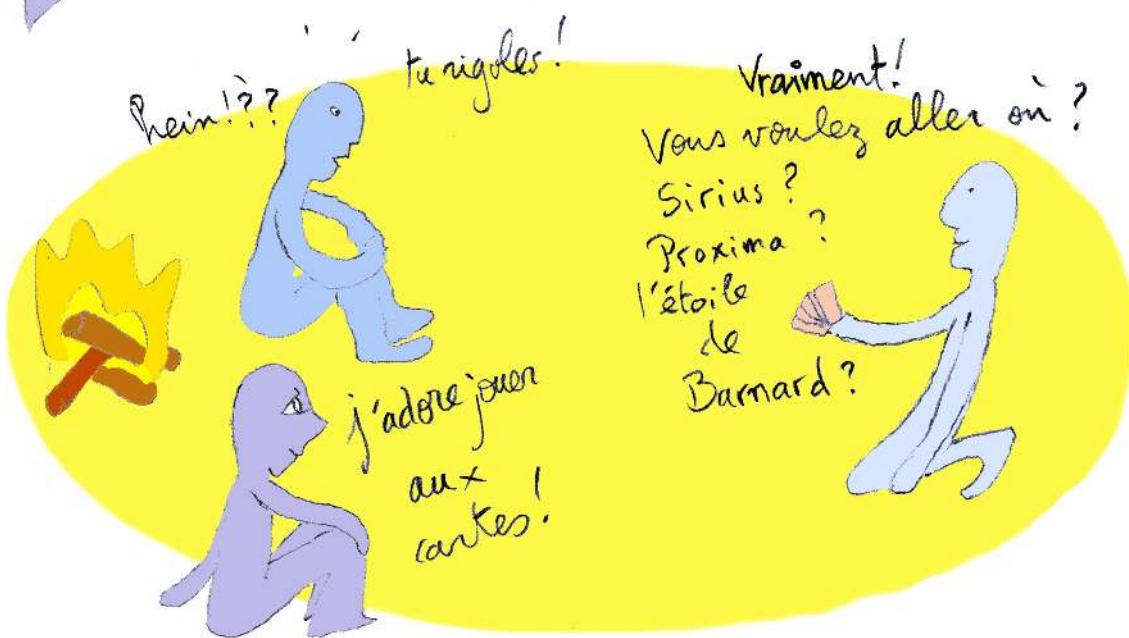
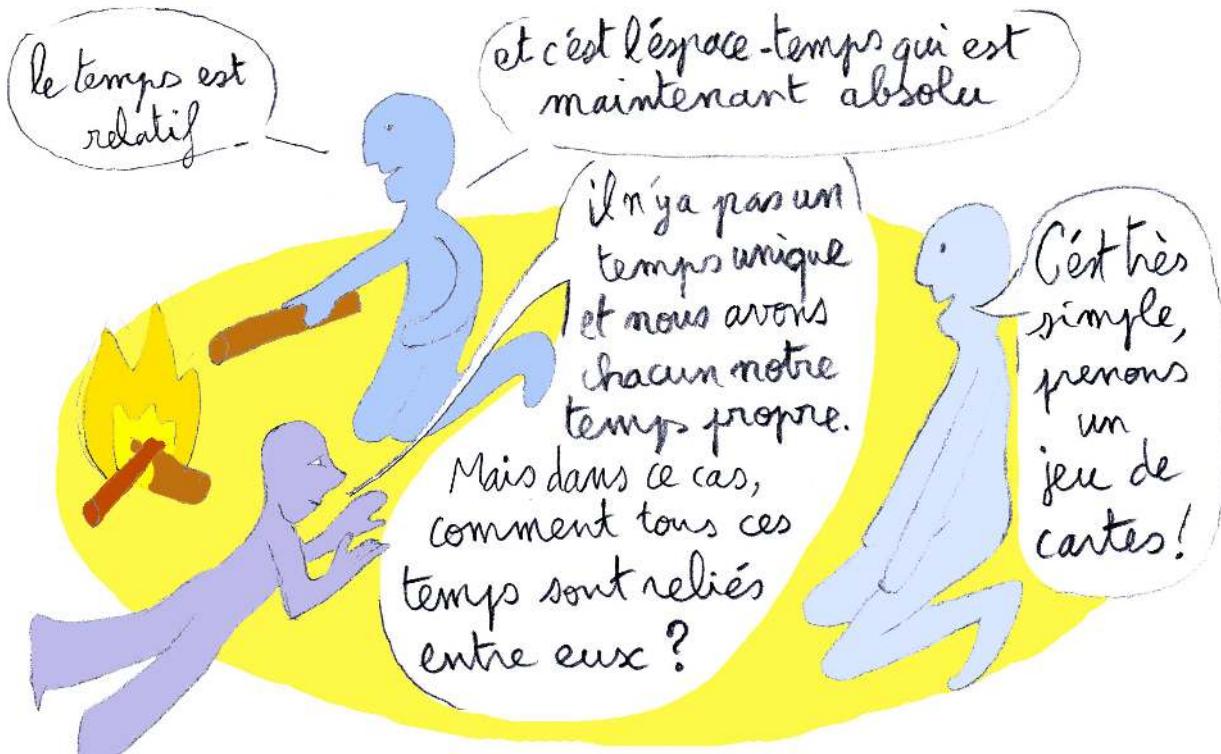
Cette vitesse limite est un prolongement direct de la structure de l'espace-temps. Nous avons un cadre maintenant redéfini. Que vaut cette vitesse limite ? Cette vitesse correspond à celle de toute particule de masse nulle. À ce jour, nous pouvons penser aux photons, neutrinos, gravitons, gluons... mais même si nous découvrions que ces particules ont une masse, bien qu'infime, la théorie de la relativité n'en serait pas remise en cause.

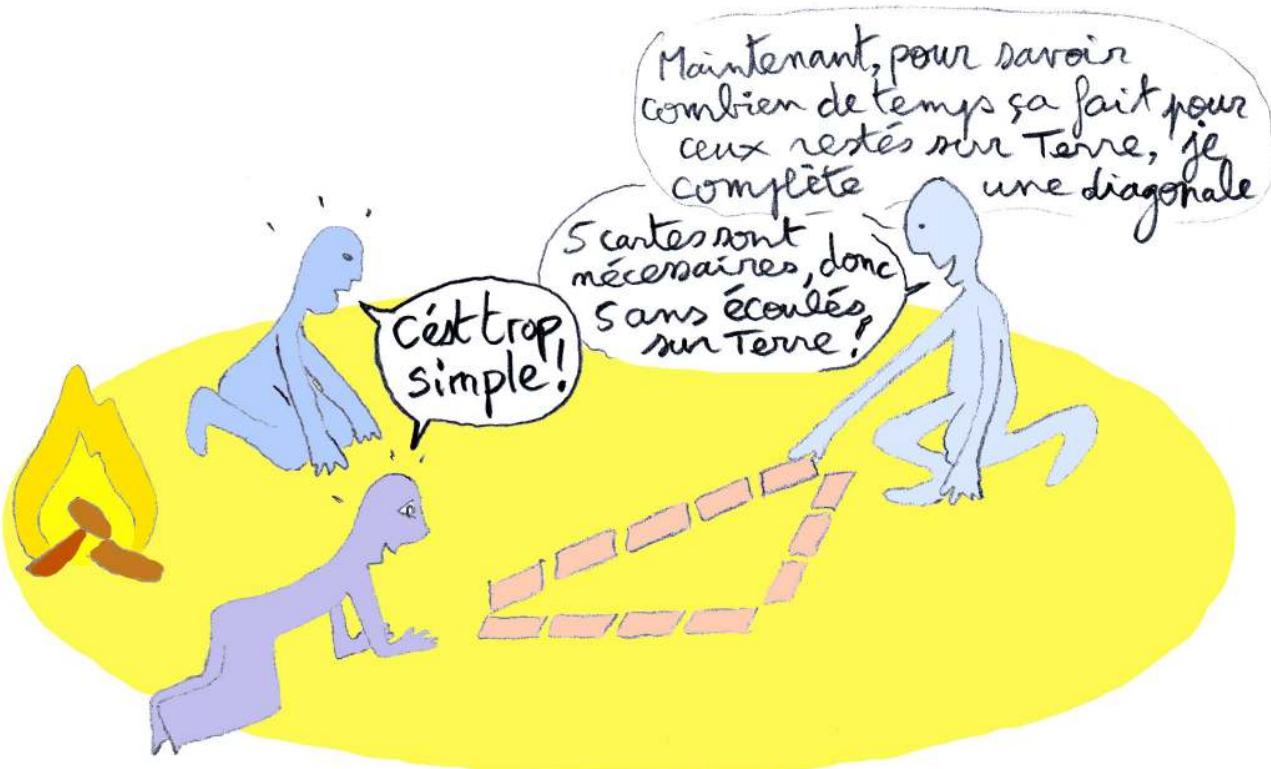
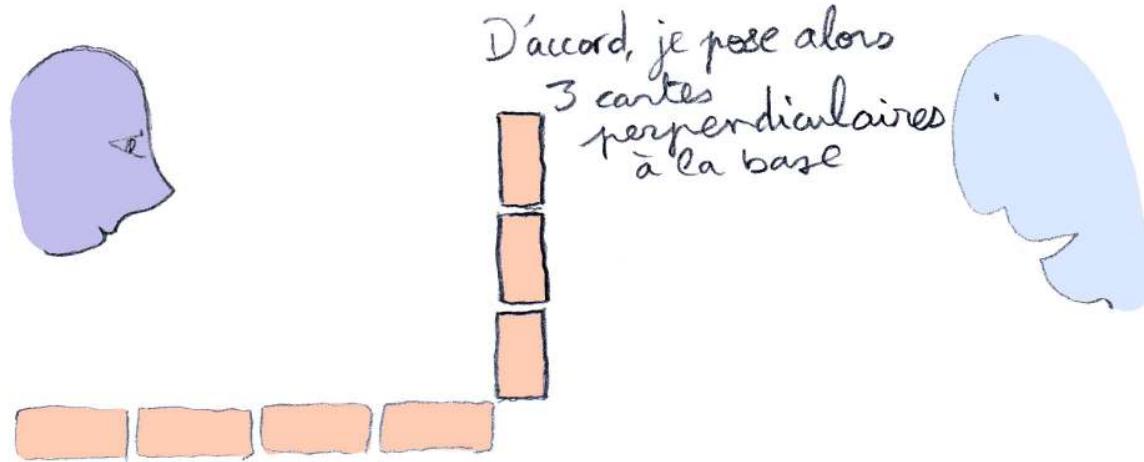
Cette vitesse vaut environ un milliard de kilomètre heure, vitesse très grande devant celle de nos déplacements habituels. C'est pour cela que le temps nous semble absolu. Rien n'impose, a priori, à cette vitesse d'avoir une valeur plutôt qu'une autre. Imaginons un monde où elle vaut 10 km/h, nous pourrions alors en expérimenter les effets au quotidien. Vous commencez à lire tranquillement un livre dans votre canapé quand votre amie part courir, elle part 2 heures, mais pour elle il ne s'est écoulé que 20 minutes !

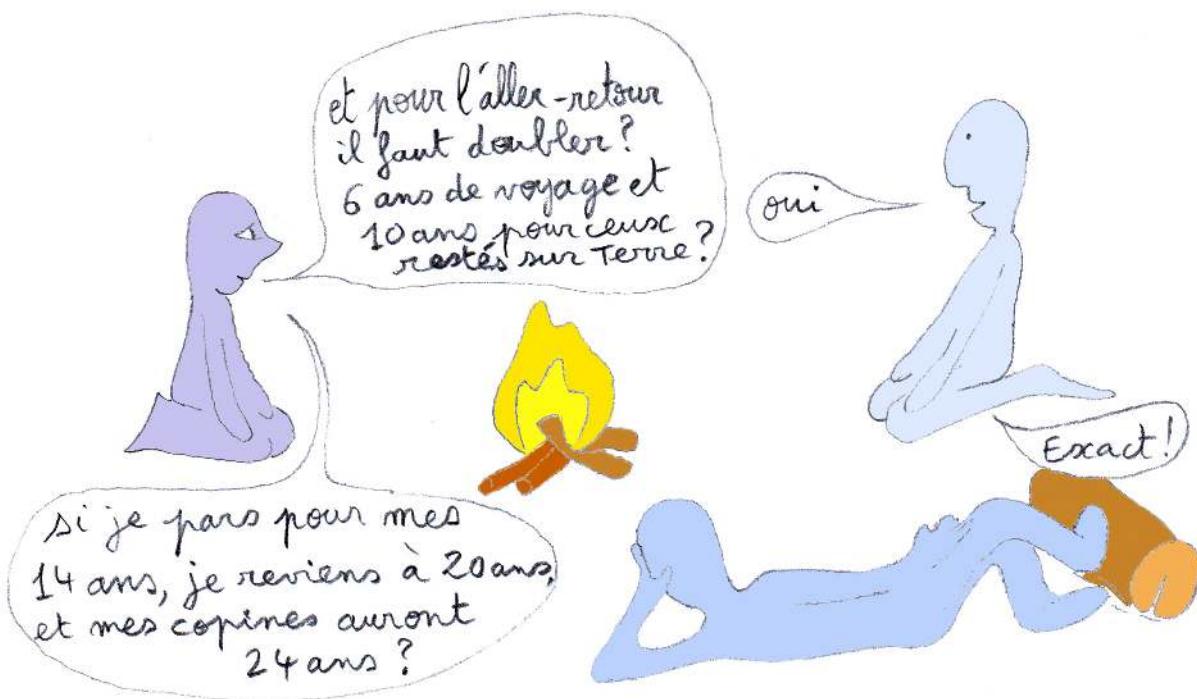


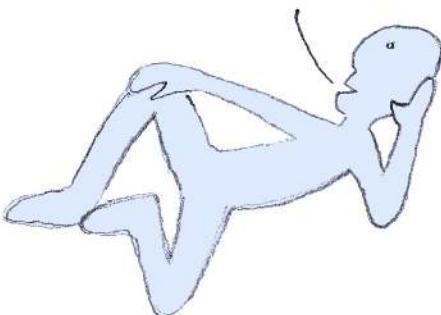
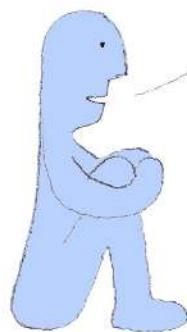
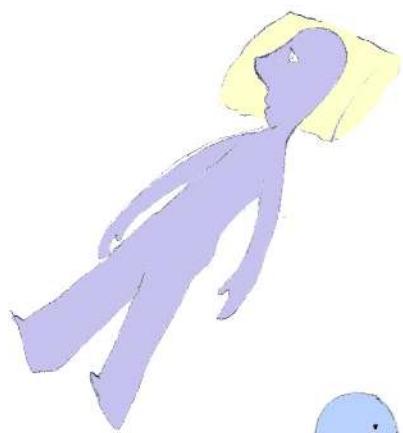
Il serait aussi très compliqué de se donner rendez-vous, car selon le mouvement de chacun, les montres ne seraient plus à la même heure. Nous adapterions nécessairement notre comportement à la structure de notre espace-temps. De la même manière que nous avons du mal à comprendre la dilatation du temps, les personnes qui vivraient dans ce monde auraient sûrement le plus grand mal à comprendre le concept de temps absolu du nôtre.

<sup>4</sup> références ii et vi de la bibliographie page 86.







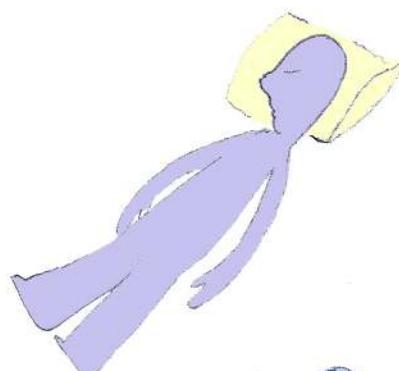


Et à quelle vitesse faut-il aller ?

le nombre de cartes de la diagonale représente la vitesse de la lumière et la base, ta vitesse.

5 cartes pour la vitesse de la lumière, donc 20% par carte.

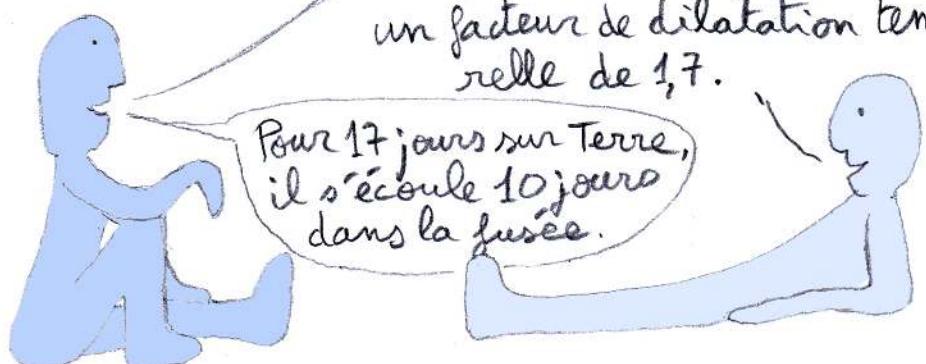
4 cartes à la base, donc 80% de la vitesse de la lumière.



Et le temps va beaucoup se dilater ?

Toujours la diagonale, 5 ans, divisée par le côté perpendiculaire, 3 ans.

5 divisé par 3 soit un facteur de dilatation temporelle de 1,7.



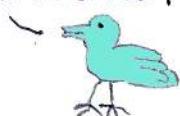
Pour 17 jours sur Terre, il s'écoule 10 jours dans la fusée.

à la calculatrice j'ai :  $5 \div 3 = 1.6666667$

Moi je pose une division et je connais ma table de multiplication

$$\begin{array}{r} 3 \\ -3 \\ \hline 20 \\ -18 \\ \hline 20 \\ -18 \\ \hline 2 \end{array}$$

Wouah ! C'est à l'ancienne, il suffit de taper 5/3 sur internet !



## Approche historique : les postulats d'Einstein

La démarche initiale donne un rôle central à la lumière. Ce fil directeur est encore celui qui est souvent choisi dans les cours actuels. Et nous même nous utiliserons régulièrement des rayons lumineux pour illustrer nos propos. Il s'ensuit une certaine confusion dans les esprits. Longtemps j'ai cru que la lumière jouait un rôle central dans la nature même de l'espace-temps, il n'en est rien. Les symétries, comme montré précédemment, sont le fondement de la théorie, indépendamment de tout objet physique. L'approche moderne permet d'étendre le cadre de la relativité restreinte à l'ensemble des interactions fondamentales sans se restreindre à l'électro-magnétisme. La construction chronologique d'une théorie correspond rarement à sa structure logique.

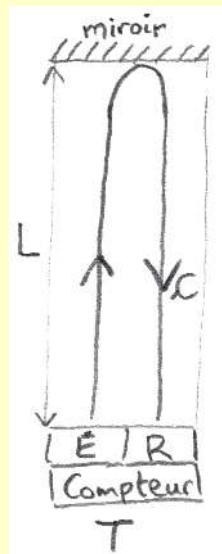
Premier postulat : Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels d'inertie.

Dans la théorie de Newton ce postulat était limité à la mécanique, ici la physique inclut la mécanique et l'électromagnétisme - la matière et la lumière.

Deuxième postulat : La vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels d'inertie.

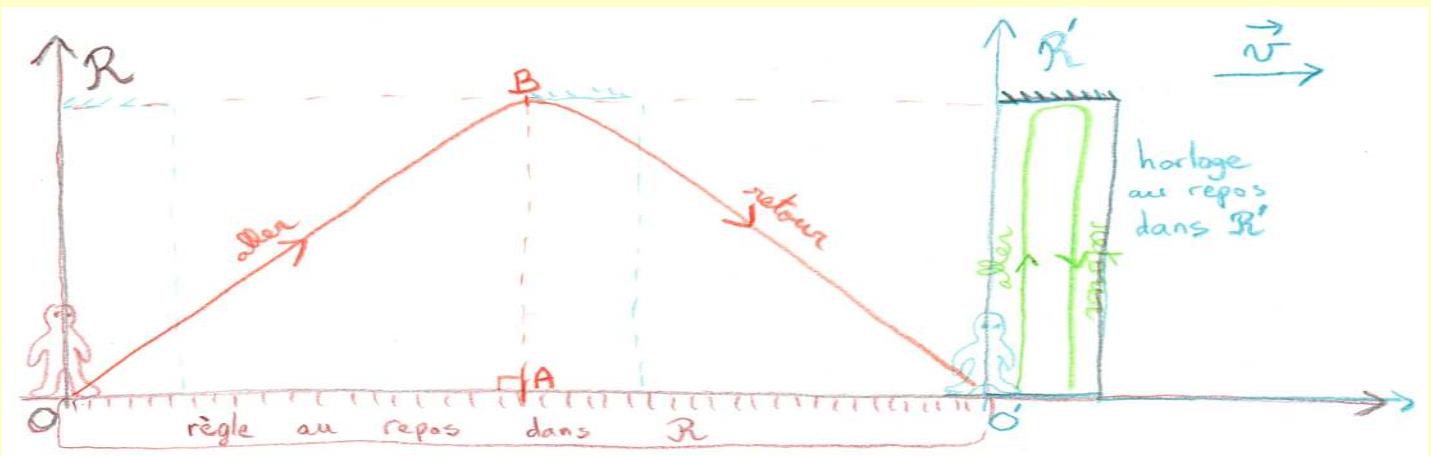
Cette propriété est la plus étonnante et permet de montrer simplement la dilatation du temps avec ce qu'on appelle parfois l'*horloge de Pythagore*. Nous concevons une horloge optique qui utilise le temps d'aller-retour d'un rayon lumineux comme base de temps.

Un flash lumineux est émis, réfléchi sur un miroir puis reçu et compté au point de départ, ce qui déclenche l'émission d'un nouveau flash. Nous plaçons cette horloge au repos dans  $R'$ .  $R'$  est lui-même en mouvement à la vitesse  $v$  dans  $R$ . Nous avons en vert la trajectoire du rayon dans  $R'$  et en rouge dans  $R$ . Comme la vitesse de la lumière  $c$  est la même dans les deux référentiels et que la trajectoire est plus longue dans  $R$ , le temps d'un aller-retour mesuré dans le référentiel propre  $R'$  est plus court que celui mesuré dans le référentiel  $R$  en mouvement par rapport à l'horloge. C'est un résultat général, le temps propre est toujours le plus court.



Le rapport entre le temps relatif et le temps propre est appelé le facteur de dilatation temporel gamma,  $\gamma$ . Ce facteur est plus grand que 1 et augmente avec  $v$ .

La mesure d'une durée dépend donc de l'observateur. Par contre, la vitesse  $v$  de  $R$  dans  $R'$  est la même que celle de  $R'$  dans  $R$ , nous avons ainsi deux manières de l'évaluer. Imaginons une règle posée au sol et immobile dans  $R$ , son origine là où le signal est émis, et son autre extrémité là où le signal retour est reçu. Dans  $R$ ,  $v$  est obtenue en divisant la longueur propre de la règle par la durée relative d'un aller-retour.



Dans  $R'$ ,  $v$  est obtenue en divisant la longueur relative par la durée propre d'un aller-retour. Comme la durée mesurée dans  $R'$  est plus faible d'un facteur gamma, pour que  $v$  soit la même, la

*Table de correspondance :*

| vitesse $v$      | facteur gamma $\gamma$ |
|------------------|------------------------|
| 10 km/h          | 1                      |
| la moitié de $c$ | 1,15 (+15%)            |
| 87% de $c$       | 2                      |
| 94% de $c$       | 3                      |
| 99,5% de $c$     | 10                     |
| $c$              | $\infty$               |

longueur mesurée de la règle est divisée par le

même facteur  $\gamma$  : lorsque l'on observe un objet en mouvement celui-ci semble contracté d'un facteur gamma. La valeur de  $\gamma$  ne dépend que de  $v$  et est déterminée géométriquement dans le triangle rectangle OAB en comparant les longueurs OB et AB.

Lorsqu'on mesure, pour un objet en mouvement, son rythme et sa taille (selon la direction de sa vitesse) et que l'on compare aux valeurs mesurées dans le référentiel où l'objet est au repos, la durée est dilatée et la longueur est contractée, par un même facteur qui dépend seulement de sa vitesse.

## Comment se repérer dans l'espace-temps ?

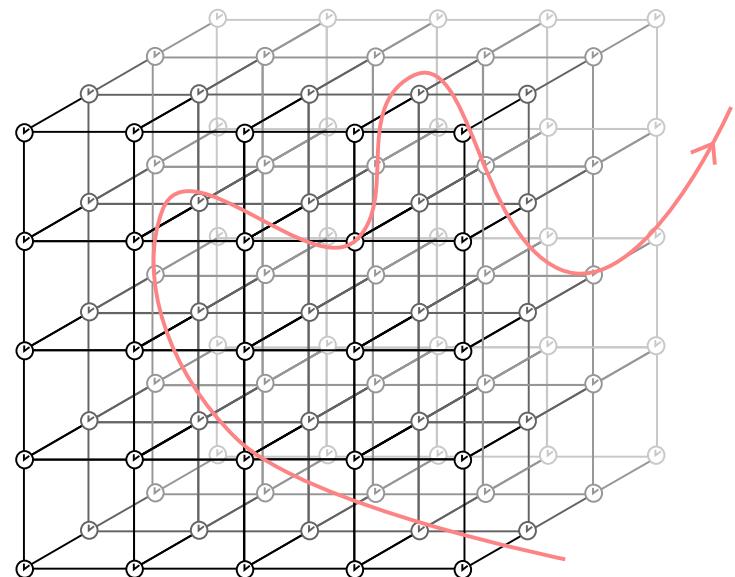
Imaginons que nous voulions déterminer la trajectoire d'un vaisseau spatial qui traverse l'espace. Comment connaître sa position au cours du temps ?

Tout d'abord, il nous faut un référentiel. Pour cela, construisons un solide de référence. Utilisons des barres rigides que l'on place perpendiculaires les unes aux autres selon un maillage régulier. Nous obtenons un réseau cristallin en plaçant autant de barres que nécessaire pour couvrir un volume suffisant pour étudier la trajectoire du vaisseau.

De plus, à chaque nœud du réseaux nous plaçons une horloge et un observateur. Toutes les barres sont étalonnées à la même longueur et les horloges sont synchronisées. Plus les mailles du réseau sont fines, plus les relevés des positions au passage du vaisseau au voisinage de chaque nœud seront précis. Les observateurs placés sur la trajectoire notent l'heure de passage en chacune de leur position. Après le passage, tous les observateurs concernés se retrouvent et mettent en commun leurs données et ils obtiennent ainsi une liste de positions et d'heures, ce qui permet de reconstituer et d'étudier la trajectoire du vaisseau.

Pour ce qui est du principe théorique, ce procédé est satisfaisant et permet de clairement poser le problème. Par contre, en pratique nous n'allons pas, en général, construire de tels échafaudages, qui dans le cas de notre vaisseau seraient géants et demanderaient l'aide de nombreuses personnes (le vaisseau ne pourrait même plus passer). Nous allons utiliser une autre méthode bien plus pratique.

Expliquons, à titre d'exemple, une méthode pour déterminer l'heure et la position de l'épicentre d'un tremblement de terre. Nous resterons à deux dimensions à la surface du sol.



Nous disposons de trois sismographes A, B et C. Leurs positions respectives sont connues et indiquées sur le schéma. Nous connaissons aussi la vitesse de propagation de l'onde sismique : 5 km par seconde. À chaque station on note l'heure quand la perturbation est détectée. En A, elle arrive à 12:27:53 (12 heures 27 minutes et 53 secondes), en B à 12:27:45 et en C à 12:27:43. Sauriez-vous déterminer l'heure et la position de la secousse sismique ?

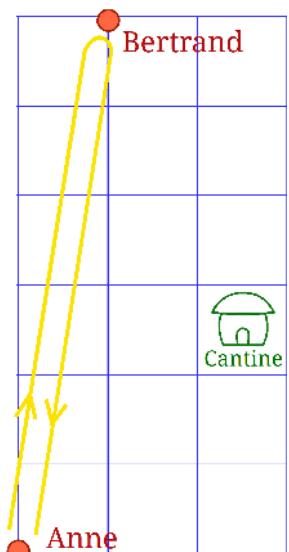
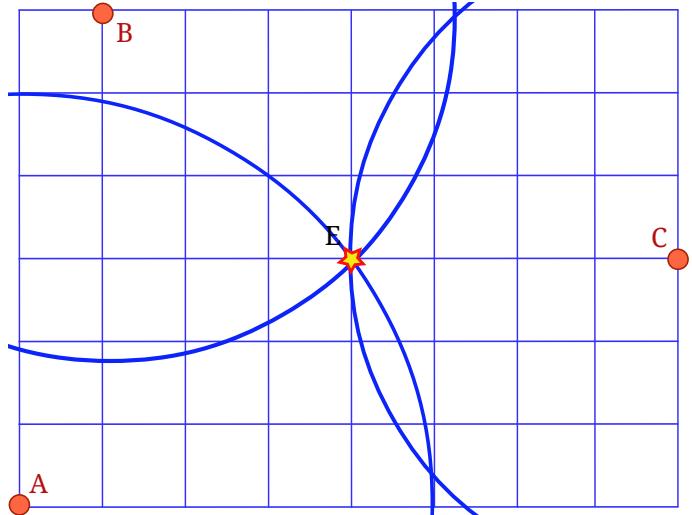
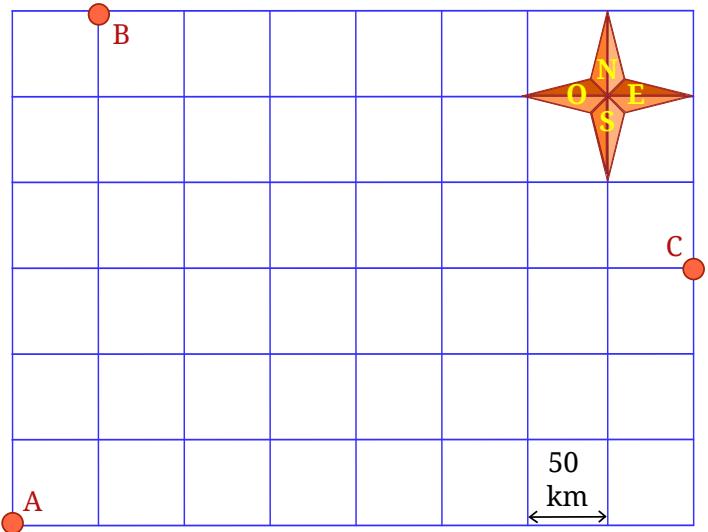
Il s'agit d'un problème de géolocalisation. Appelons E le lieu de l'épicentre. La distance AE est reliée par la vitesse de propagation à la durée mise par l'onde pour aller de E à A. De même pour les stations B et C. Les inconnues sont au nombre de trois : une pour l'heure et deux pour la position de E. Nous avons ainsi trois équations et autant d'inconnues, ce qui permet de résoudre mathématiquement le problème.

Le point à 200 km à l'Est et à 150 km au Nord de A satisfait les conditions. Ce point E est à 200 km de la station C. L'onde a donc mis 40 secondes à parcourir la distance EC et l'heure du tremblement de terre est 12:27:03. Pour A, la distance EA vaut 250 km (triangle 3-4-5) et on retrouve la même heure. Pour B, ça fonctionne aussi, la distance EB, diagonale d'un carré de côté 150 km, vaut environ 210 km, soit une durée de 42 secondes.

La méthode est efficace, trois stations sont suffisantes et il n'est pas nécessaire de mailler tout le territoire. Pour repérer un point, non plus sur une surface, mais dans l'espace, il faut quatre stations car l'intersection de deux sphères donne un cercle, avec une troisième sphère on a deux points, et une quatrième sphère permet de n'avoir plus qu'un point. Par exemple, pour les systèmes de positionnement à l'échelle du globe, il faut quatre satellites pour positionner un point sur Terre.

Mieux on connaît la position des stations et plus les horloges sont précises, meilleure sera la précision sur la position et l'heure de l'événement. Mais à condition que les horloges soient bien synchronisées entre elles. Quand on utilise des ondes lumineuses il faut des horloges atomiques très précises. Il ne suffit pas de mettre les horloges à la même heure en un point donné puis de les déplacer aux différentes stations. En procédant ainsi les horloges, arrivées à destination, ne seraient plus synchronisées ! En effet, des horloges seraient mises en mouvement et leurs temps propres seraient différents de celui de l'horloge restée immobile au point de départ. Pour éviter les problèmes de dilatation du temps nous allons utiliser la *méthode de l'écho*.

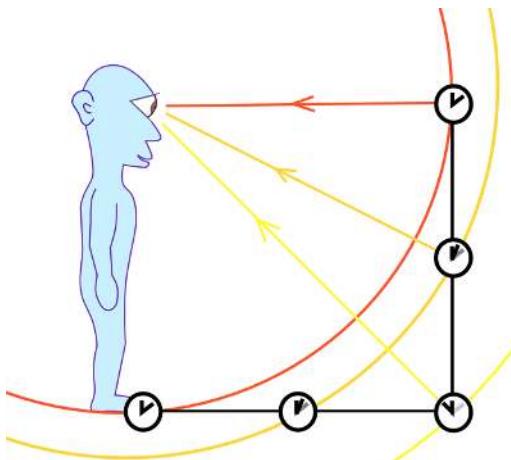
Nous avons Bertrand qui travaille à la station B et Anne à la station A. À chaque station ils ont une horloge. Les deux horloges ne sont pas parfaitement synchronisées. Un matin, Bertrand place un miroir à sa station et Anne envoie à 10 heures pile un flash lumineux vers la station de Bertrand. Le rayon lumineux revient



à Anne en 2 millièmes de seconde. Bertrand a reçu le rayon à 10 heures et 5 millièmes de seconde. Anne et Bertrand déjeunent ensemble à la cantine et Anne lui indique l'heure de l'envoi et le temps que le rayon lumineux a mis à faire l'aller-retour. De retour à sa station, comment Bertrand doit modifier l'heure de son horloge ?

Le rayon lumineux a mis 1 millième de seconde pour aller de la station A à la station B, donc, quand le rayon est parti de A, il était indiqué 10h et 4 millièmes de seconde sur l'horloge placée en B. Bertrand doit donc retarder son horloge de 4 millièmes de seconde pour avoir la même heure que celle indiquée sur l'horloge d'Anne.

Les horloges sont synchronisées par la méthode de l'écho



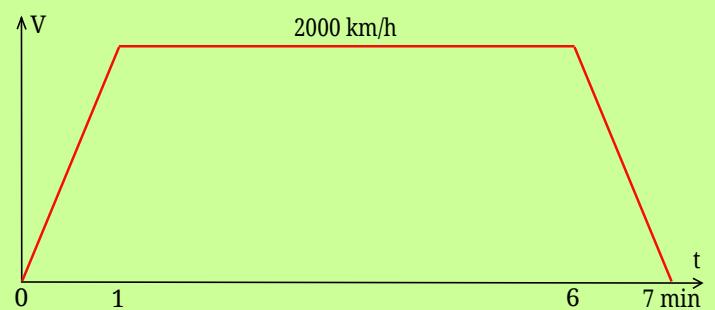
Si vous regardez un cristal d'horloges synchronisées, vous ne les verrez pas toutes à la même heure, car, suivant la distance des horloges à votre œil, la lumière mettra un temps différent pour parvenir sur votre rétine. De la même manière, quand vous regardez le ciel étoilé la nuit, vous voyez le présent relatif et non le présent absolu (la constellation de la grande ourse est représentée page suivante).

Pour revenir à la trajectoire de notre vaisseau spatial, nous n'avons finalement besoin que de quatre points fixes avec chacun une horloge synchronisée. Un radar émet une onde électromagnétique par flashes réguliers qui se réfléchissent sur le vaisseau et parviennent ensuite à chaque station. Connaissant les heures d'arrivée à chacune des quatre stations et la vitesse de la lumière, on reconstruit la trajectoire point par point.

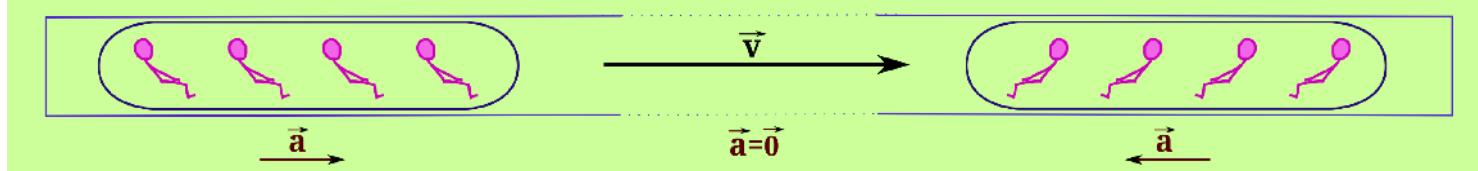
### Le train sous vide

*La technologie Hyperloop devrait être au point dans un futur proche !*

Pour se rendre à la cantine, située à environ 200 km des stations, Anne et Bertrand utilisent les capsules sous vide. Les capsules sont en lévitation magnétique et propulsées dans un tunnel rectiligne et vide d'air. Ainsi les frottements sont négligeables et l'énergie cinétique fournie, dans la première phase d'accélération à un  $g$ , est en grande partie réinjectée dans le réseau électrique lors de la décélération. Le système permet d'atteindre une vitesse de 2000 km/h. La station de Bertrand est à 190 km de la cantine. La phase d'accélération se fait à 36 km/h par seconde, ainsi en une minute la vitesse de croisière de 2000 km/h est atteinte.



Comme l'accélération est uniforme cela correspond à une vitesse moyenne de 1000 km/h, soit une distance nécessaire de 17 km. Ensuite, il suffit de laisser filer la capsule. Après que les sièges passagers se soient retournés, vient la phase de décélération sur aussi 17 km. L'étape à vitesse constante se déroule sur 156 km et dure donc 5 minutes. Au total, le trajet de Bertrand de sa station à la cantine n'aura duré que 7 minutes.



Alkaïd  
104 al

Mizar  
78 al

Alioth  
83 al

Megrez  
81 al

Dubhe  
124 al

Phad  
83 al

Merak  
78 al

### La grande Ourse

Plus on regarde loin, plus on plonge dans le passé : l'étoile Dubhe est à une distance de 124 années-lumière et Merak est située à 78 a.l., vous voyez Dubhe telle qu'elle était il y a 124 ans et Merak telle qu'il y a 78 ans.

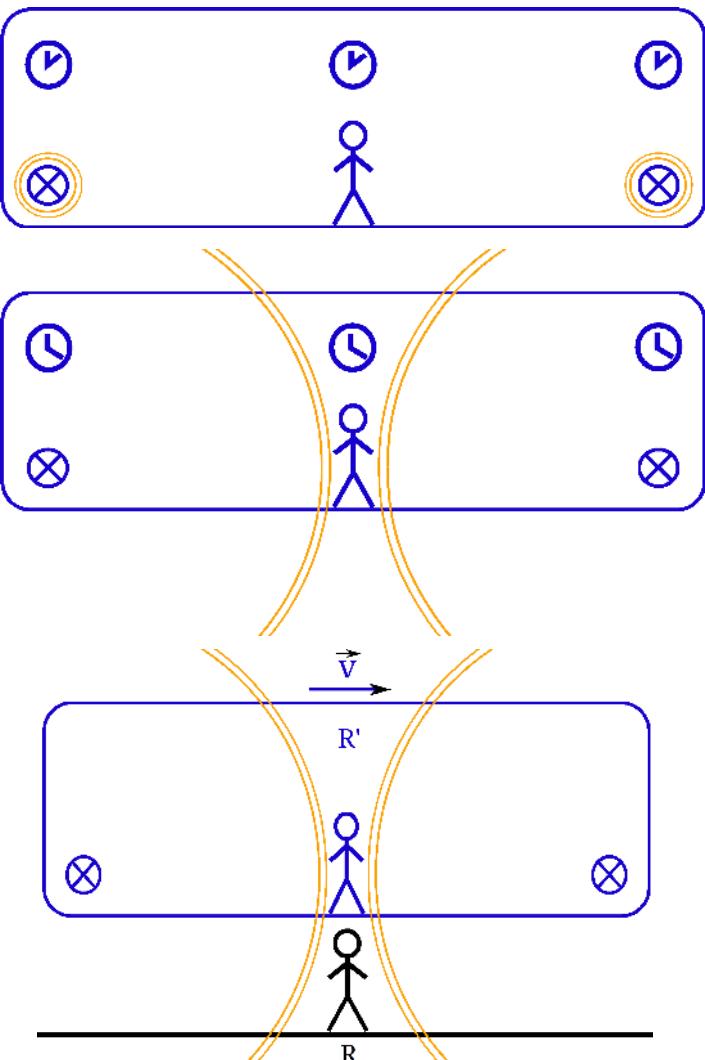
## La notion de simultanéité

Des événements sont dit simultanés s'ils se produisent à la même date. Les dates sont mesurées avec des horloges fixes et synchronisées dans un référentiel donné. Prenons le cas particulier de deux lampes immobiles dans un wagon.

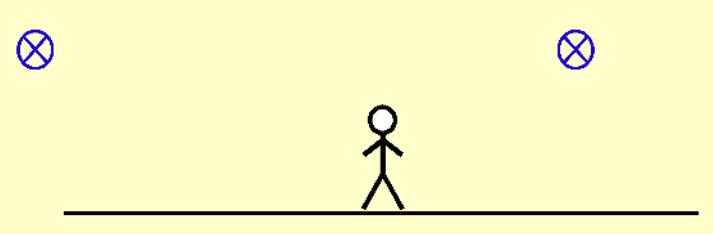
Elles émettent un flash au même instant. Un observateur est placé au milieu des deux lampes. Comme l'observateur est symétriquement situé et les émissions simultanées, il recevra les signaux lumineux au même moment. Le wagon est en mouvement par rapport au sol. L'observateur mobile du wagon passe au niveau de l'observateur au sol au même moment qu'il reçoit les deux éclairs.

Ainsi l'observateur fixe voit aussi les deux éclairs en même temps. Ce deuxième observateur ne sait pas que dans le wagon les deux lampes se sont allumées en même temps. De son point de vue comment va-t-il interpréter la situation ?

La vitesse de la lumière ne dépend pas du référentiel. Supposons que les flashs soient émis en même temps.



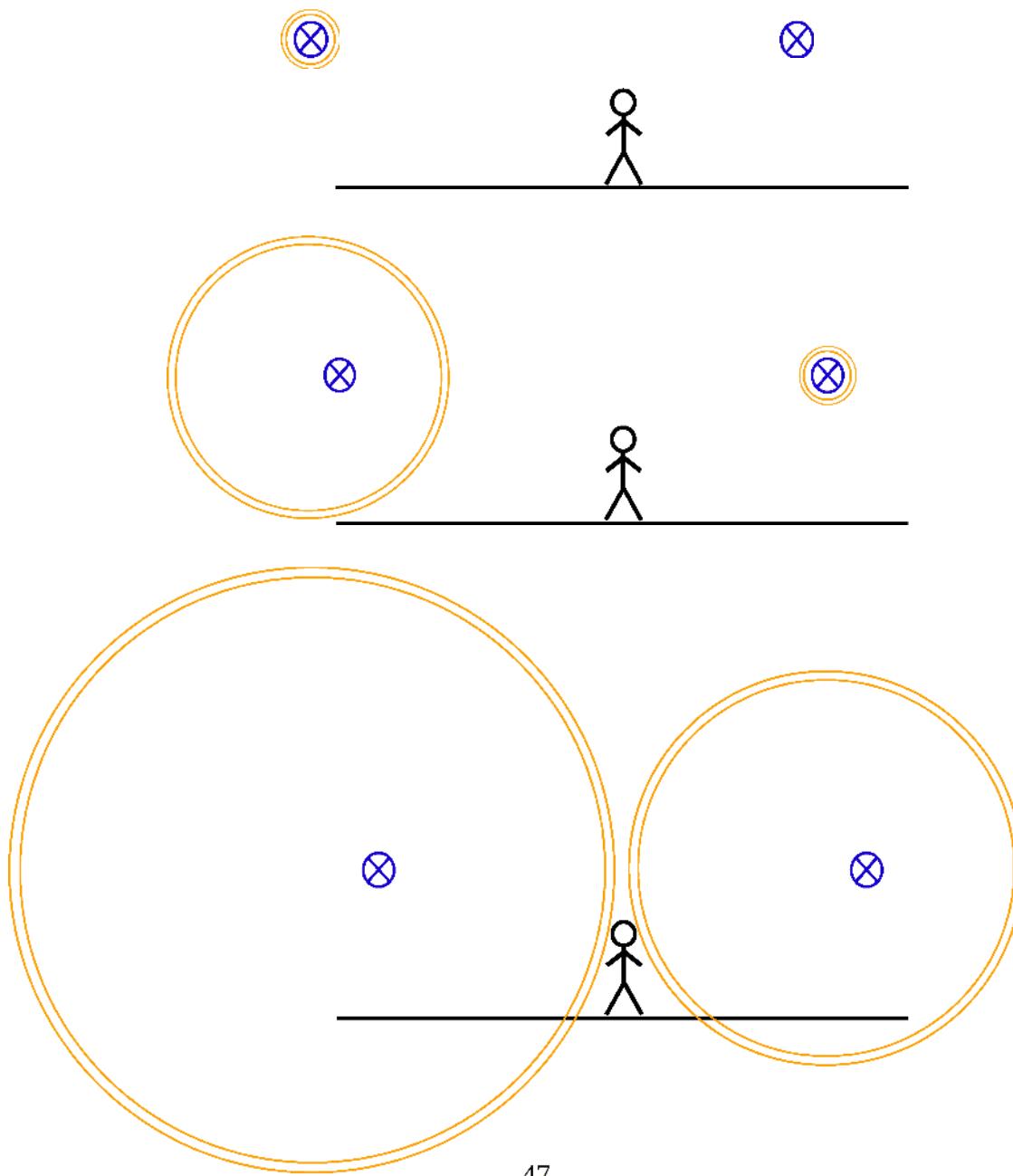
Comme les lampes sont en mouvement, elles étaient positionnées vers la gauche au moment de l'émission. Le flash de la lampe de droite, plus proche, serait donc parvenu avant à l'observateur.

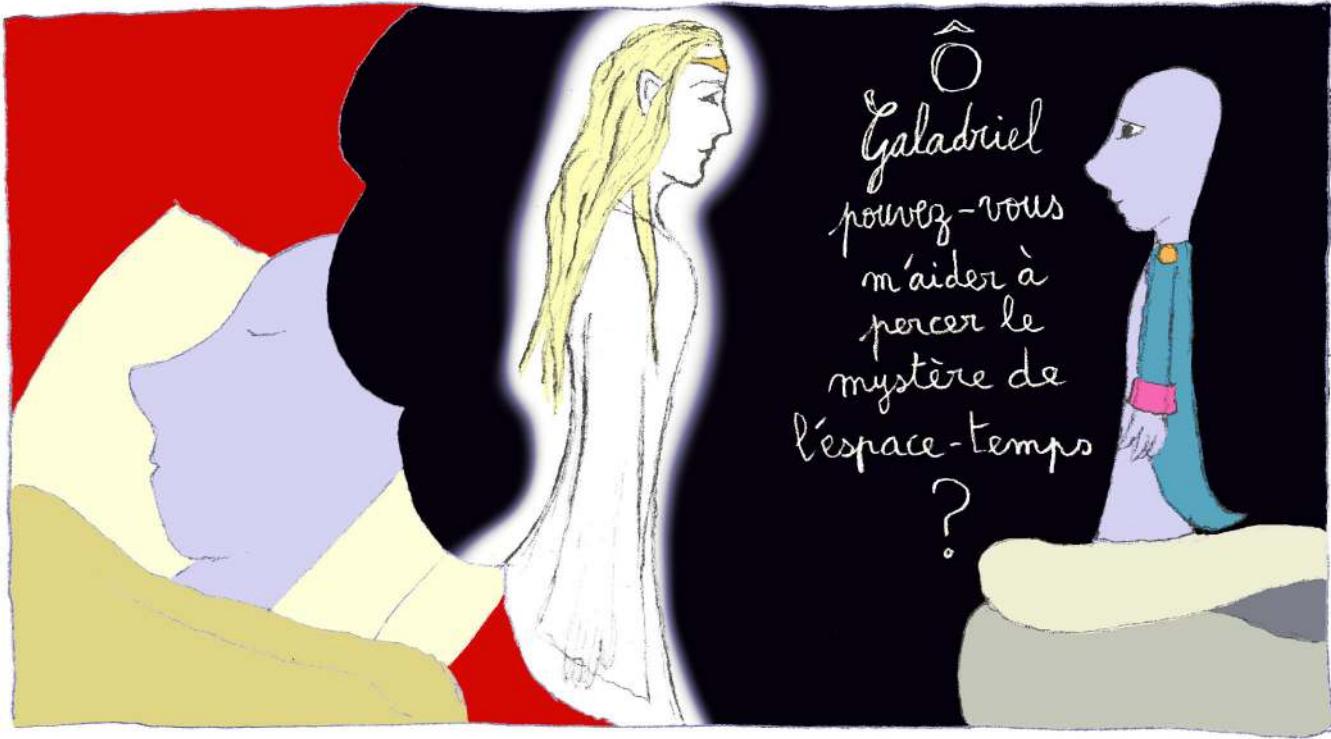


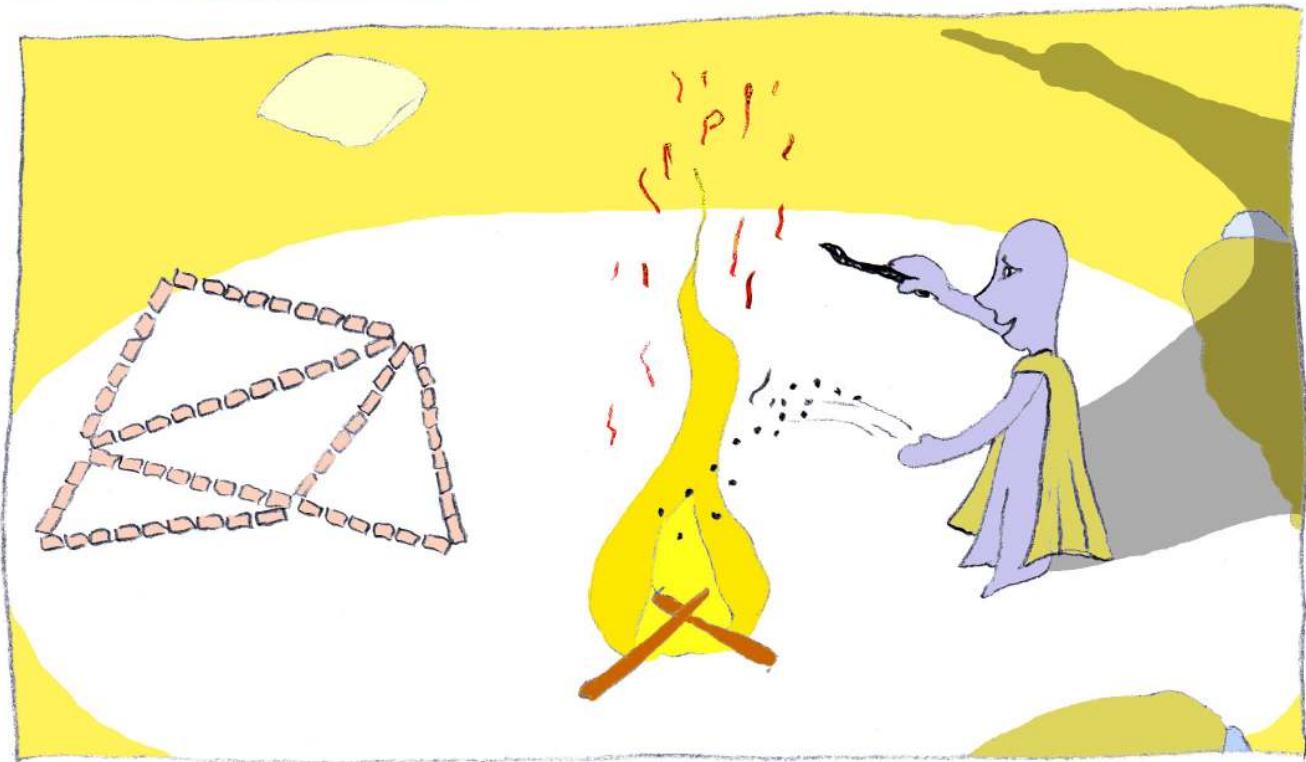
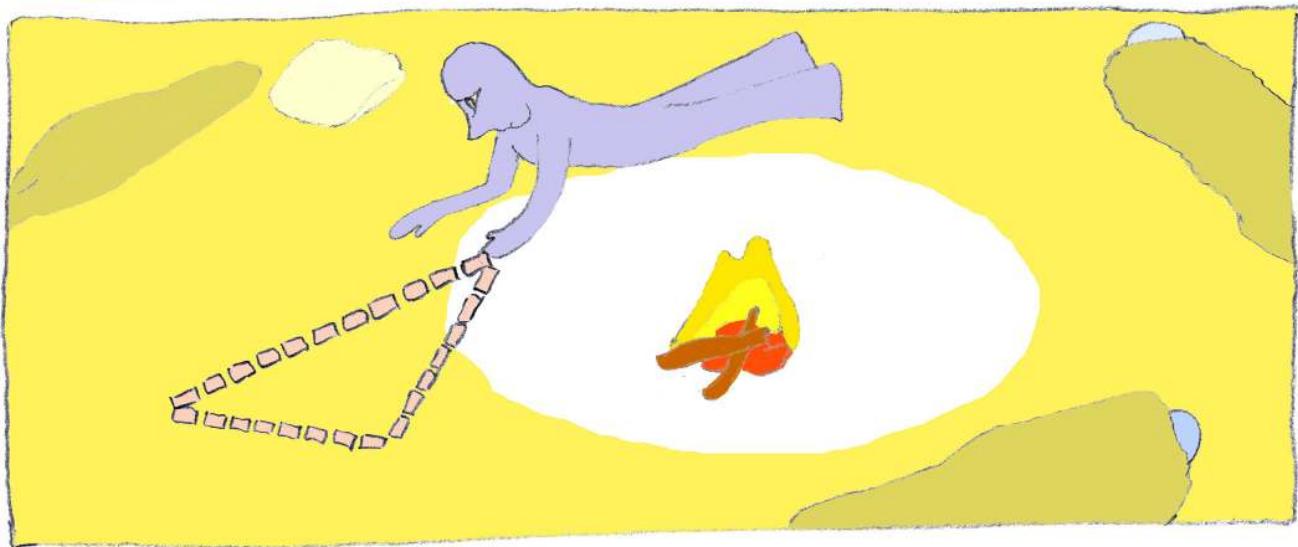
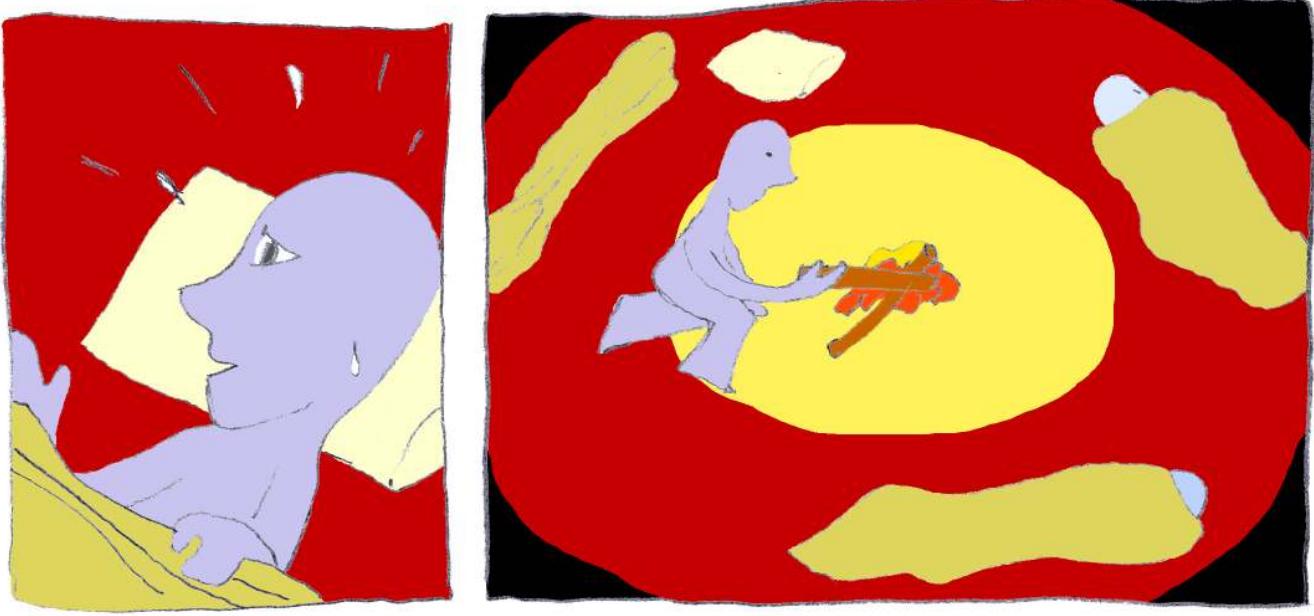
Un premier éclair est donc d'abord émis par la lampe de gauche, puis un deuxième ultérieurement par la lampe de droite. Les événements simultanés dans le référentiel du wagon ne le sont pas dans le référentiel du sol.

En mécanique Newtonienne, le temps était considéré absolu et donc la simultanéité aussi. La notion de simultanéité perd son caractère universel et devient relative à l'observateur.

En relativité restreinte, deux événements simultanés dans un référentiel ne le sont pas nécessairement dans un autre.

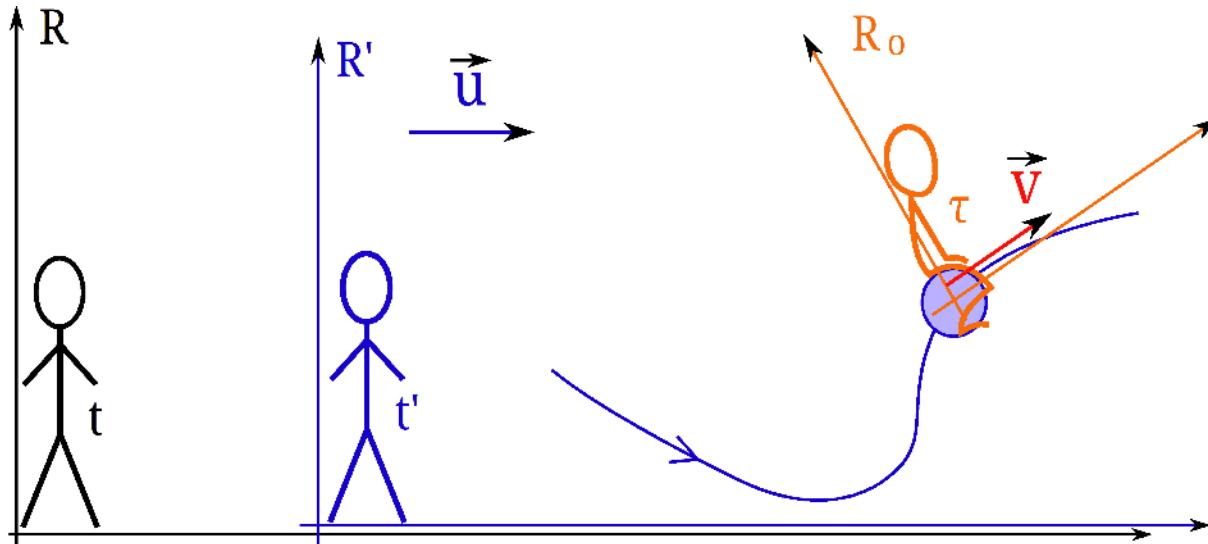






## Temps et référentiels

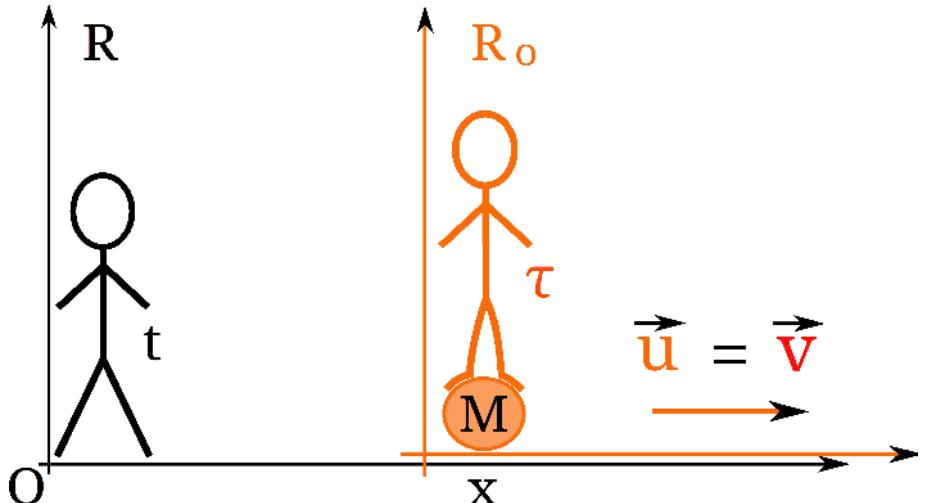
En général, c'est assez compliqué car nous pouvons être amené à définir trois référentiels. Cela fait beaucoup et souvent l'on peut simplifier. Un premier référentiel  $R$  représenté fixe, un deuxième  $R'$  en mouvement de translation, rectiligne et uniforme par rapport à  $R$  et un troisième  $R_0$  lié au corps en mouvement que l'on étudie. On a alors trois temps  $t$ ,  $t'$  et  $\tau$  (tau) !



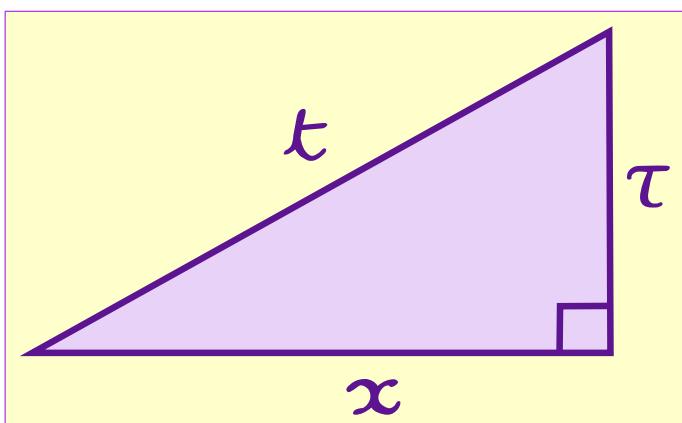
Heureusement, nous pourrons nous ramener au cas où le corps a un mouvement rectiligne et uniforme, ainsi,  $R' = R_0$  et  $t' = \tau$ .

La distance parcourue  $x$  pendant la durée  $t$  est reliée au temps propre  $\tau$  par le triangle ci-dessous.

Ce triangle est très pratique et va nous permettre de répondre à toutes nos questions.



Sur les pages suivantes nous illustrons, à l'aide de nombreux exemples, comment utiliser le triangle des temps.

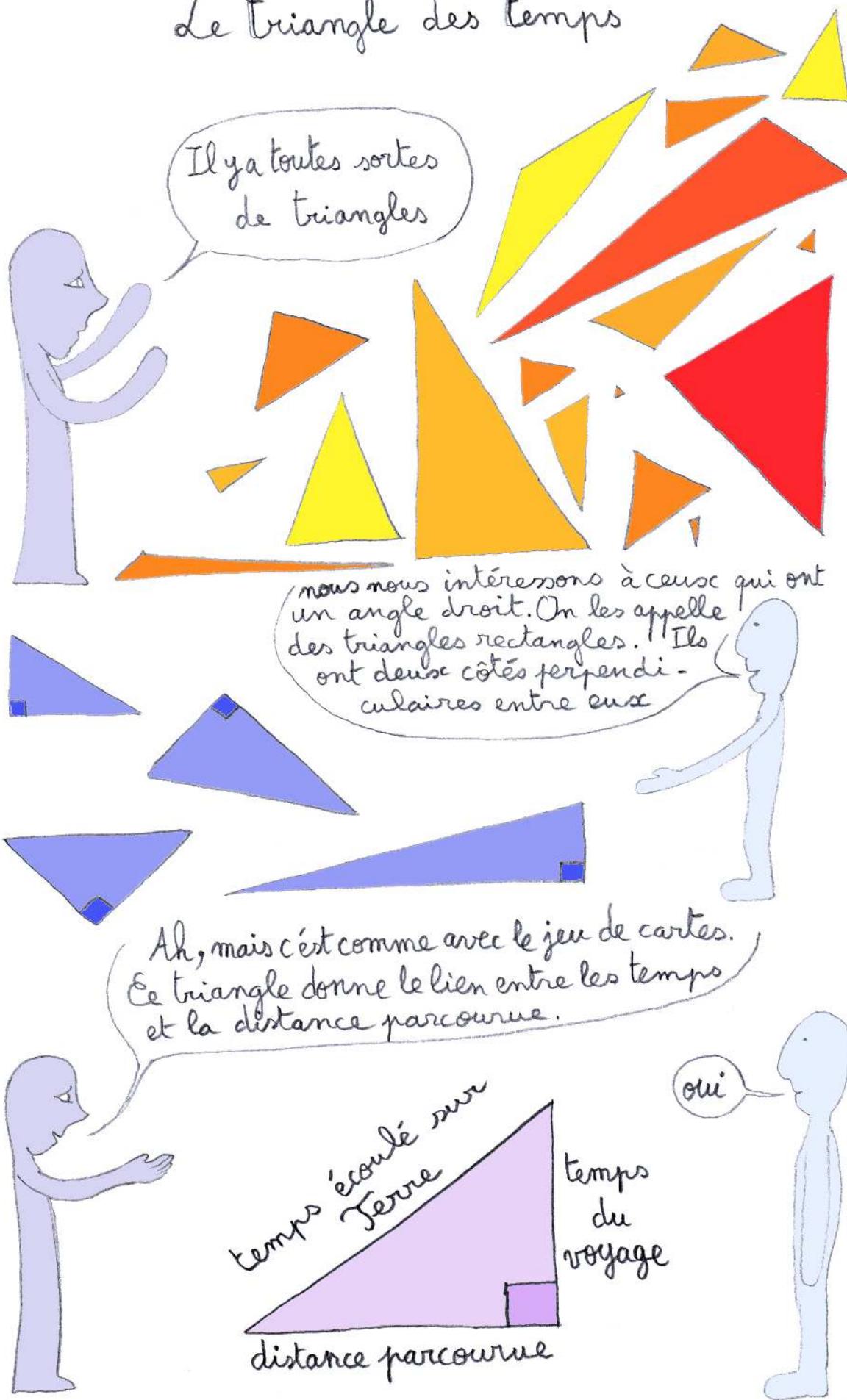


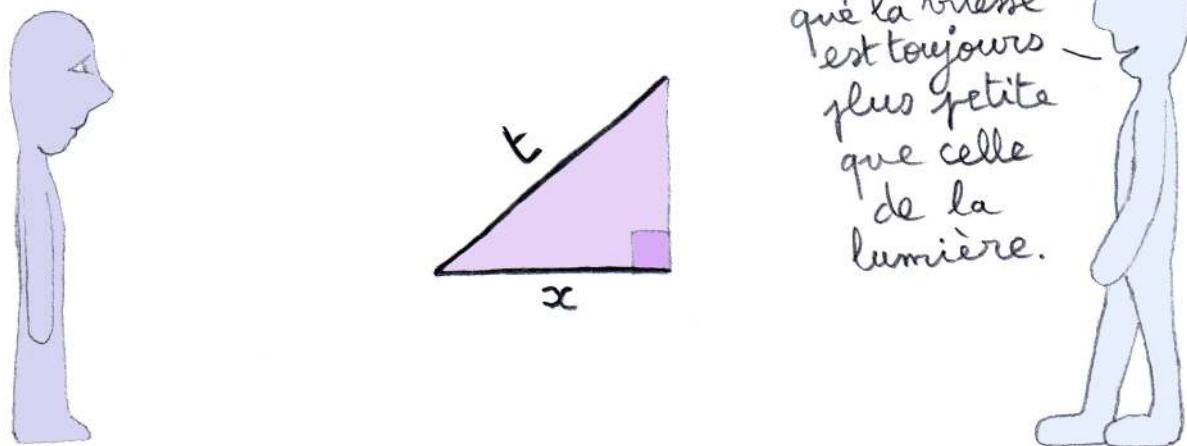
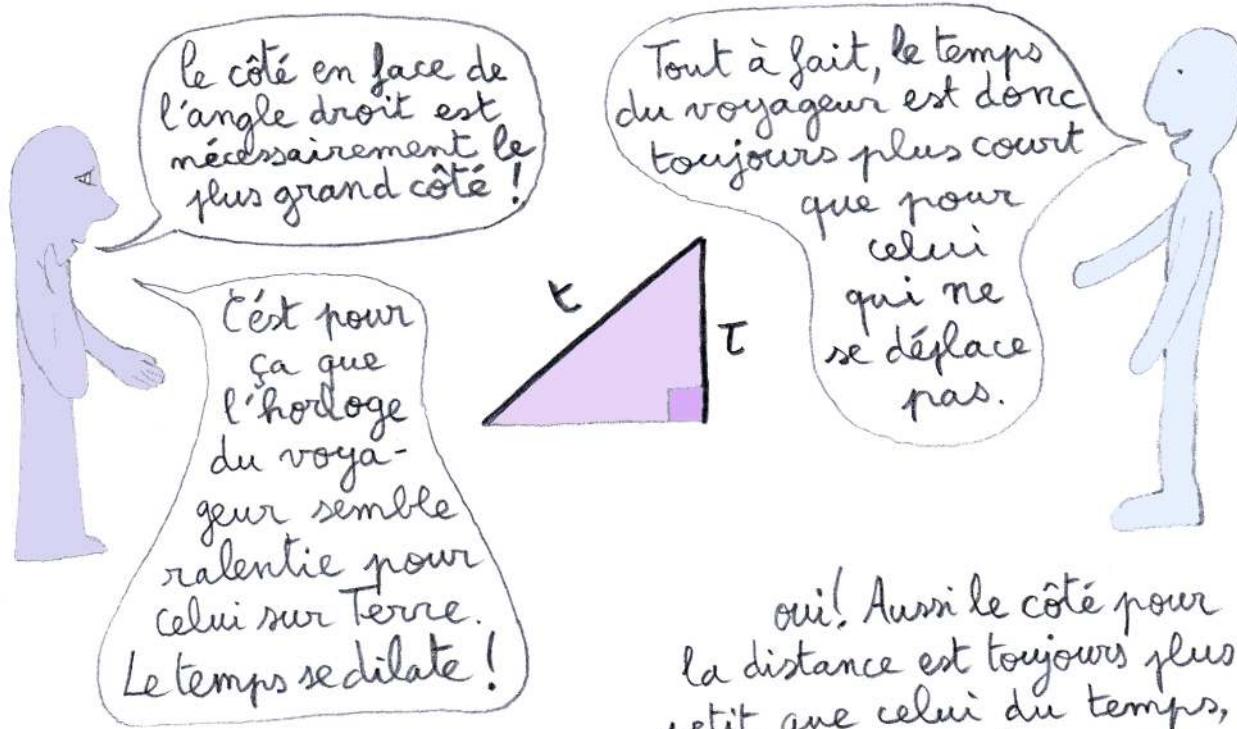
### *Le Triangle des Temps*

Lien entre temps propre et temps relatif.

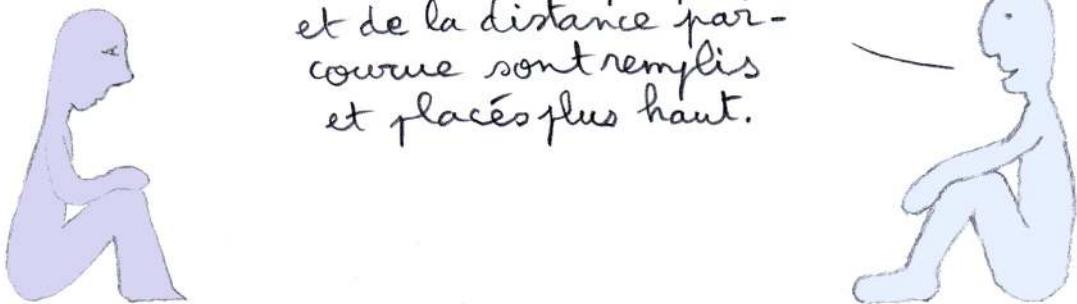
*Les temps sont en années et la distance en années-lumière.  $x$  divisé par  $t$  donne la vitesse  $v$  en pourcentage de la vitesse de la lumière. Le temps relatif  $t$  divisé par le temps propre  $\tau$  donne  $\gamma$ .*

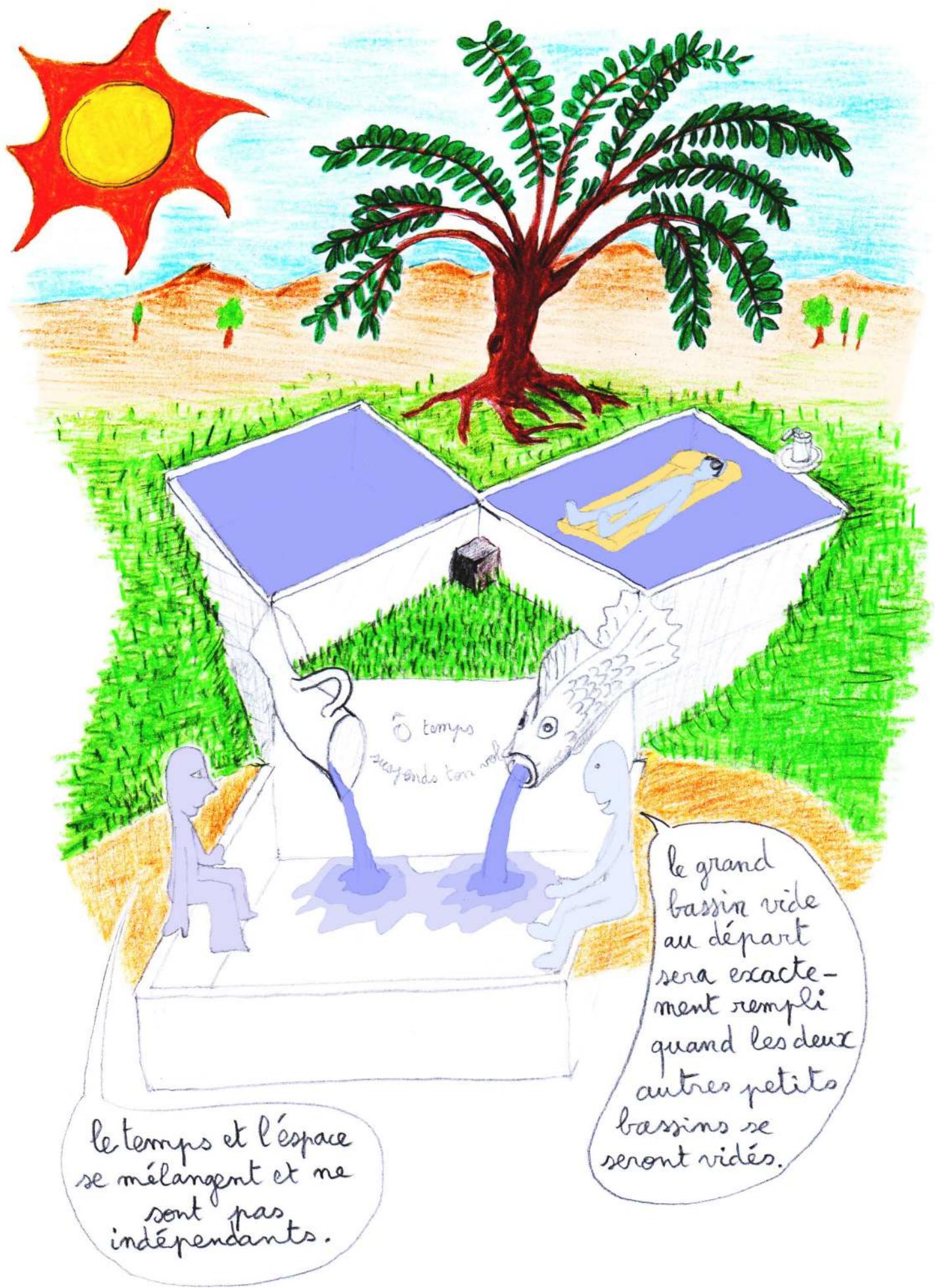
# Le triangle des temps





5) Imaginons maintenant une fontaine spatiotemporelle. Nous avons trois bassins carrés de même profondeur accolés aux trois côtés du triangle. Les bassins du temps propre et de la distance parcourue sont remplis et placés plus haut.





## EXEMPLES D'UTILISATION DU TRIANGLE DES TEMPS :

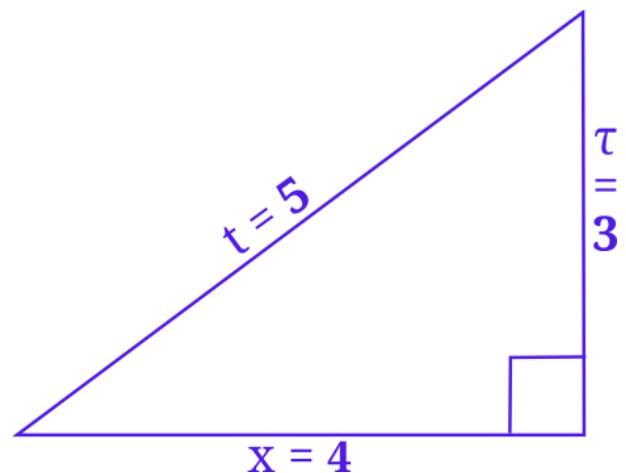
Claire va à Proxima située à 4 années-lumière avec son vaisseau spatial. Son voyage dure 3 ans.

Vu depuis la Terre, il dure, donc, 5 ans :

Quelle doit être la vitesse de son vaisseau pour ce voyage ? Quel sera son facteur de dilatation temporelle ?

La vitesse est égale à la distance parcourue divisée par la durée du parcours. La vitesse  $v$  vaut donc 4 a.l. divisée par 5 ans, le calcul donne 0,8 soit 80% de la vitesse de la lumière. Le facteur de dilatation temporelle est égale au temps de parcours du vaisseau à la vitesse  $v$  divisé par le temps propre vécu dans le vaisseau. Le facteur gamma vaut donc 5 divisé par 3, soit 1,7.

17 minutes écoulées sur Terre correspondent à 10 minutes écoulées pour Claire au bord du vaisseau.

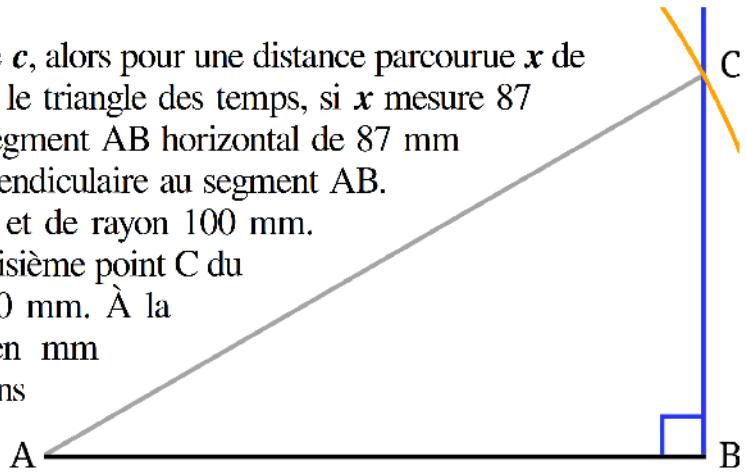


### On connaît la vitesse, que vaut gamma ?

Par exemple, si nous avons une vitesse de 87 % de  $c$ , alors pour une distance parcourue  $x$  de 87 a.l., le temps de parcours  $t$  vaut 100 ans. Dans le triangle des temps, si  $x$  mesure 87 millimètres,  $t$  en mesure 100. Nous traçons un segment AB horizontal de 87 mm pour  $x$ . À l'équerre, nous traçons une droite perpendiculaire au segment AB.

Au compas, nous traçons un cercle de centre A et de rayon 100 mm.

L'intersection de la droite et du cercle donne le troisième point C du triangle. Nous mesurons alors BC à la règle : 50 mm. À la calculatrice nous divisons 100 par la valeur en mm trouvée pour BC, le résultat donne gamma : 2. Dans ce cas, le facteur de dilatation temporelle vaut 2.



### On connaît gamma, que vaut la vitesse ?

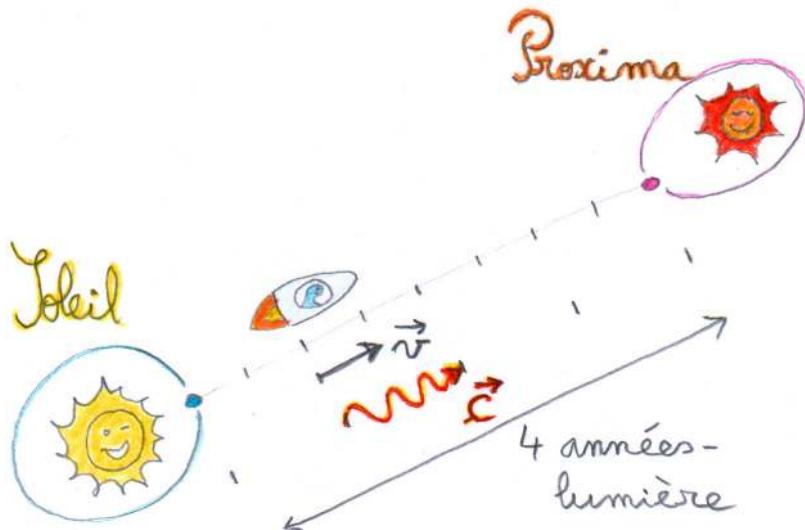
Par exemple, si nous avons un facteur gamma de 3. Nous traçons une droite horizontale pour  $x$ . D'un point B, nous traçons un segment BC perpendiculaire. Si BC vaut 30 mm alors AC devra valoir 90 mm. En traçant un cercle de centre C et de rayon 90 mm, nous obtenons le point A par intersection du cercle avec la droite horizontale. Nous mesurons AB : 85 mm. Nous divisons AB par AC, et dans ce cas, la vitesse vaut 94% de  $c$ .



# La relativité en dessinant !

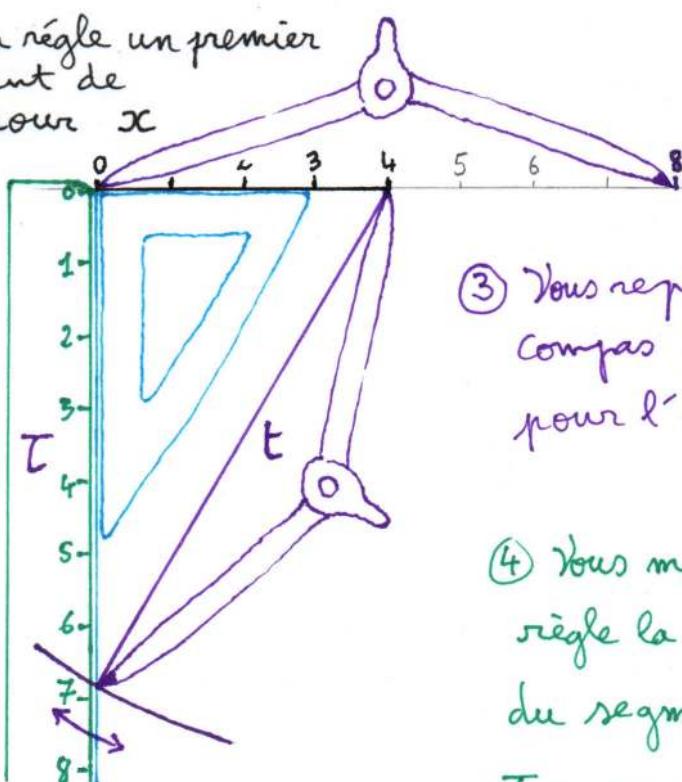
Leïla se rend à Proxima avec son tout nouveau vaisseau qui file à la moitié de la vitesse de la lumière.

Combien de temps durera son voyage ?



De depuis la Terre, la lumière met 4 ans, donc le vaisseau, deux fois plus lent, met 8 ans.

- ① On trace à la règle un premier segment de 4 cm pour  $x$



- ② Avec une équerre on trace une droite perpendiculaire au segment pour  $T$

- ③ Vous reportez au compas la longueur 8 pour l'hypoténuse

- ④ Vous mesurez à la règle la longueur du segment pour  $T$ : un peu moins de 7 cm

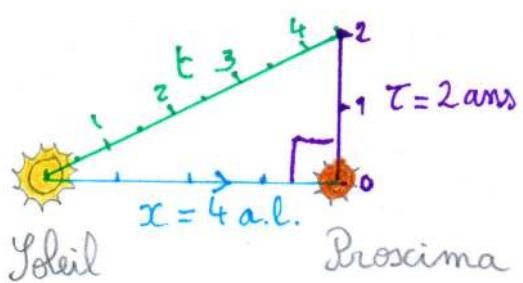
Conclusion: Leïla mettra un peu moins de 7 ans pour se rendre à Proxima.

D'où 14 ans pour son voyage aller-retour. Par contre il se sera écoulé 16 ans pour ceux restés sur Terre.

Rémi veut une fusée permettant d'aller à Proxima en 2 ans.  
A quelle vitesse doit aller le vaisseau ?

Arrivé à destination, Rémi envoie un message lumineux à ses amis restés sur Terre avec une photo de lui avec son vaisseau spatial posé sur la planète Proxima-b. Combien de temps après son départ recevront-ils la photo ?

① On construit un segment de 4 cm pour  $x$



② Avec une équerre, nous plâtons, perpendiculaire au premier segment, le segment pour le temps propre  $T$  de 2 cm de long.

③ Vous mesurez l'hypoténuse à la règle. Le temps relatif  $t$  correspond à une mesure de 4,5 cm et  $t$  vaut 4 ans et demi.

④  $\gamma$  est obtenu en divisant  $t$  par  $T$  soit 2,2.

⑤  $v$  est obtenue en divisant  $x$  par  $t$  soit 0,89.

Le vaisseau doit donc se déplacer à 89 % de la vitesse de la lumière dans le vide.

Vu de la Terre, Rémi arrive sur Proxima-b après quatre ans et demi ; il envoie alors une photo à la vitesse de la lumière, elle met donc 4 ans à revenir. La photo sera reçue 8 ans et demi après son départ.

Anne et Fabrice ont chacun leur projet. Fabrice veut faire le tour du monde en bateau pendant 18 ans ! Anne veut, pendant le même temps, faire un séjour sur Proxima-b. Vu de la Terre ses voyages aller et retour durent chacun 6 ans.

Quelle doit être la vitesse de son vaisseau ?

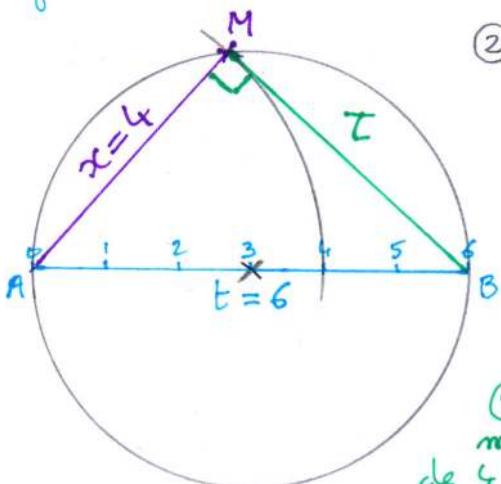
De combien d'années Anne sera plus âgée à son retour ?

À son arrivée sur Proxima-b, Anne envoie un message à Fabrice, combien de temps après le départ de Anne recevra-t-il le message ?

Tout d'abord  $t$  vaut six ans et  $x = 4$  a.l. donc la vitesse vaut 67% de  $c$ .

Cette fois nous voyons une méthode sans équerre. Nous utilisons la propriété suivante : si nous traçons un cercle et un diamètre  $AB$  alors, en tout point  $M$  du cercle,  $M$  forme un triangle rectangle.

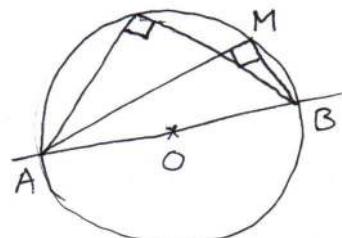
① Pour étudier l'aller, nous traçons un segment  $AB$  de 6 cm pour  $t$



② Nous traçons un cercle de centre le milieu du segment et de rayon 3 cm.

③ Nous traçons un 2<sup>em</sup> cercle de centre  $A$  et de rayon 4 cm.  $x$  est obtenu par l'intersection en  $M$  des deux cercles.

④ Nous traçons le 3<sup>em</sup> côté et nous mesurons à la règle une longueur de 4,5 cm, d'où une durée de 4 ans et demi pour  $t$ .



Anne passera donc 9 ans au total pour l'aller et le retour.

Au moment du séjour sur la planète ils ne sont plus en mouvement l'un par rapport à l'autre et leurs temps sont les mêmes. À son retour Anne sera plus âgée de 15 ans.

Vu de la Terre, les trois parties du voyage de Anne sont de même durée alors que vécu par Anne, le séjour est plus long. Fabrice recevra le message de Anne 10 ans après son départ.

Marc se dirige vers une étoile inconnue à 90% de la vitesse de la lumière. Après avoir voyagé 4 ans dans sa fusée, il arrive au niveau de l'étoile. Il constate qu'elle est deux fois plus massive que notre Soleil et qu'elle est accompagnée d'une naine blanche.

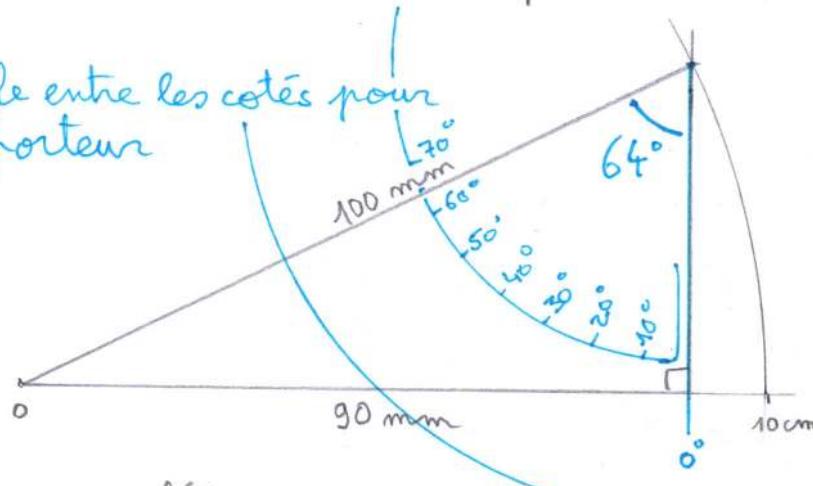
A quelle distance de notre Soleil est cette étoile ?  
De quelle étoile pensez-vous qu'il s'agit ?

Nous savons que le temps propre  $T$  vaut 4 ans.

Par contre, nous ne connaissons ni  $x$  ni  $t$ . Comme la vitesse  $v$  vaut 90% de  $c$ , si  $x$  est représenté par une longueur de 90 mm,  $t$  le sera par une de 100 mm :

Nous mesurons l'angle entre les cotés pour  $t$  et  $T$  avec un rapporteur

Nous traçons un segment de 4 cm pour  $T$



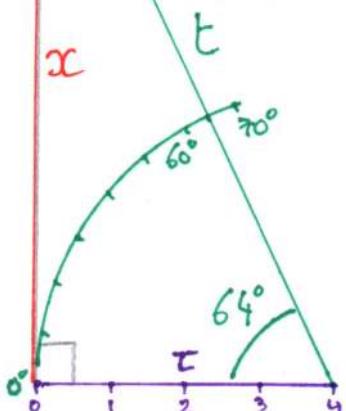
Nous traçons à l'équerre une perpendiculaire au côté  $T$ .

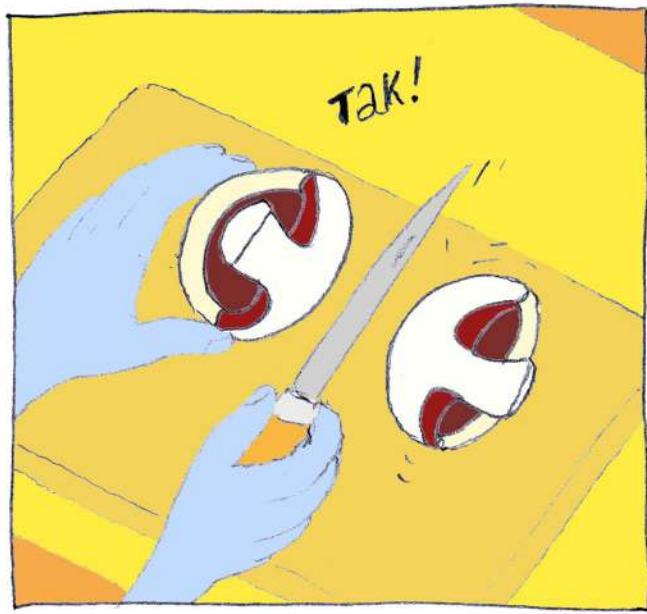
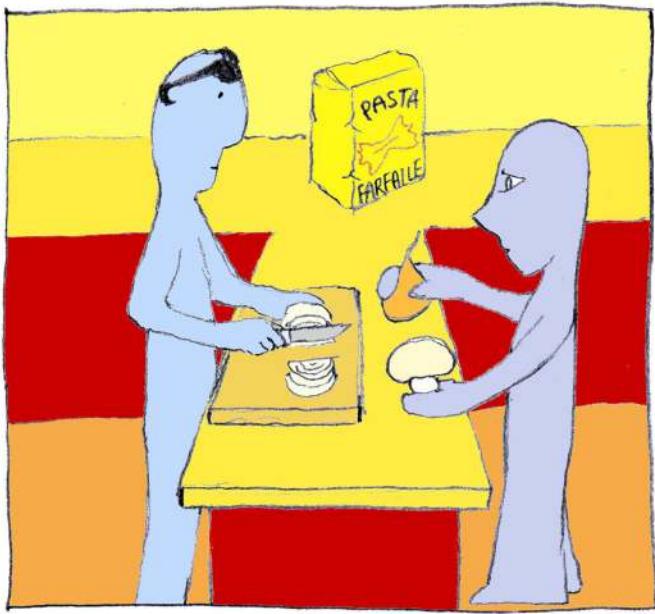
Avec le rapporteur nous plâtons le côté pour  $t$ .

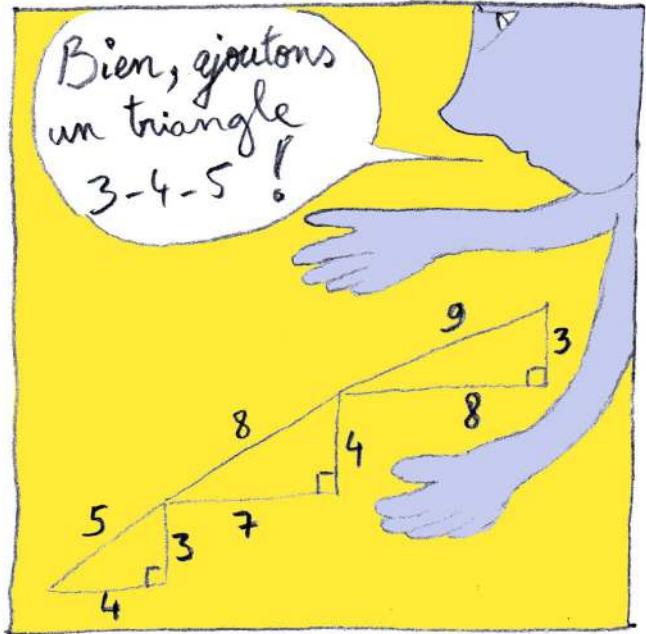
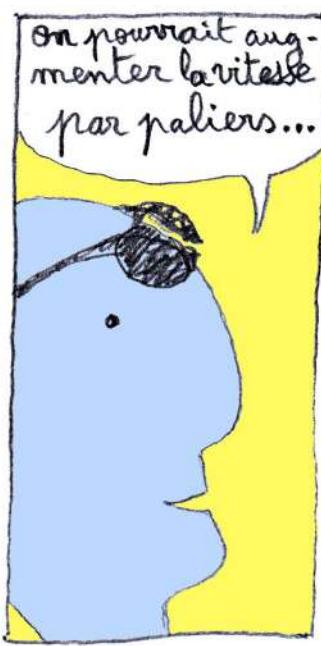
Nous mesurons la longueur  $x$  à la règle : 8,5 cm.

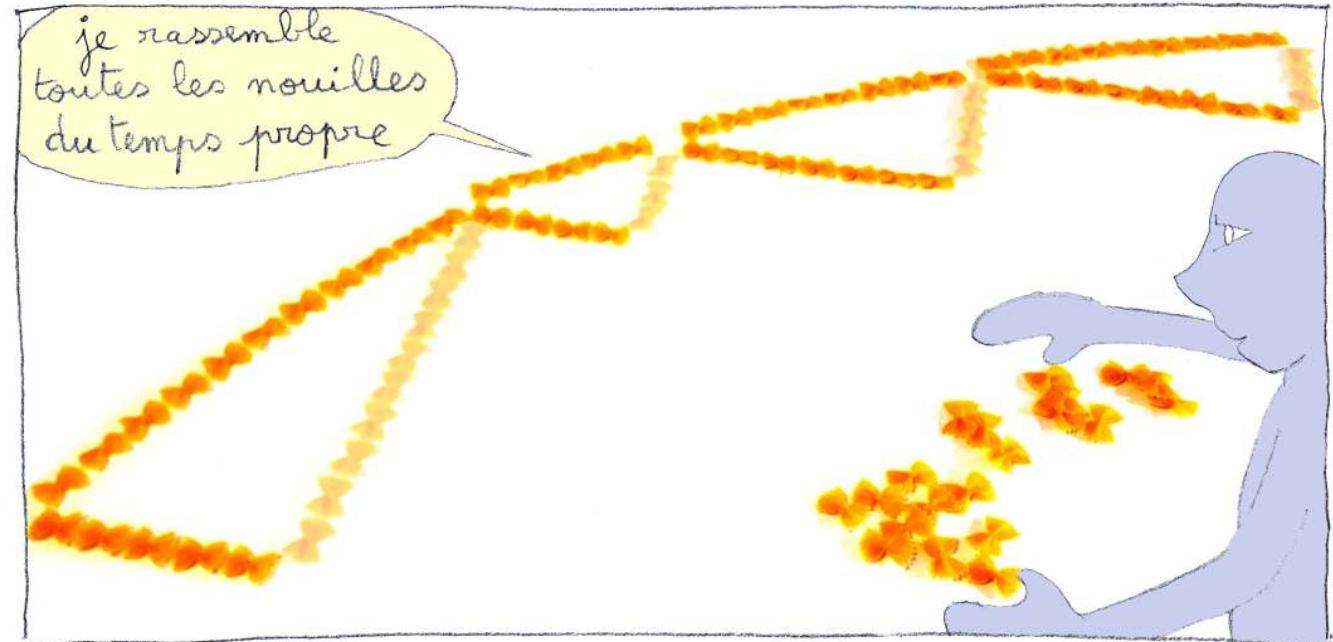
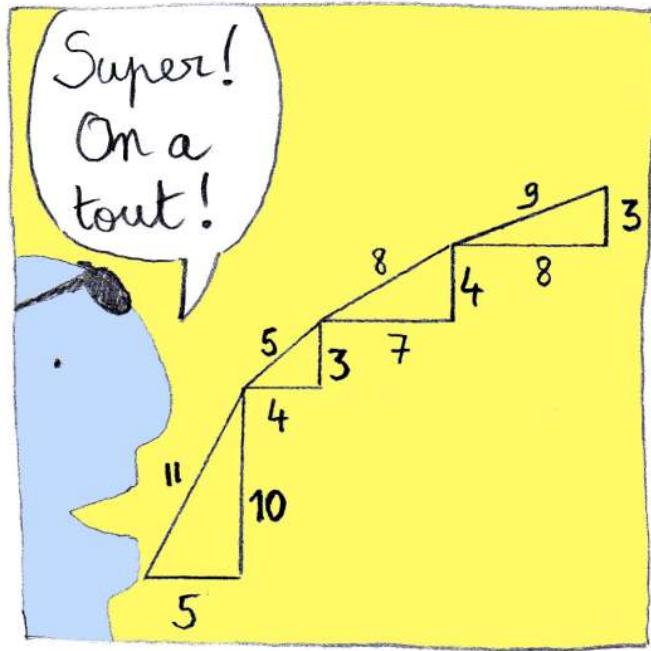
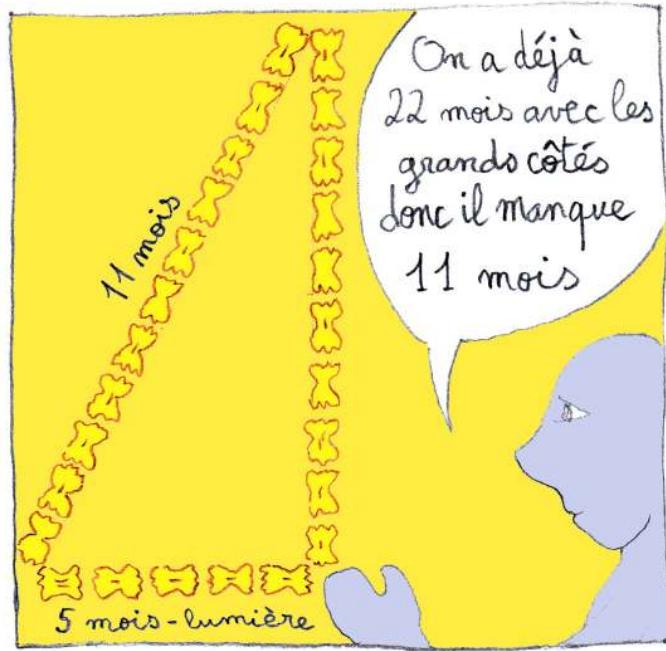
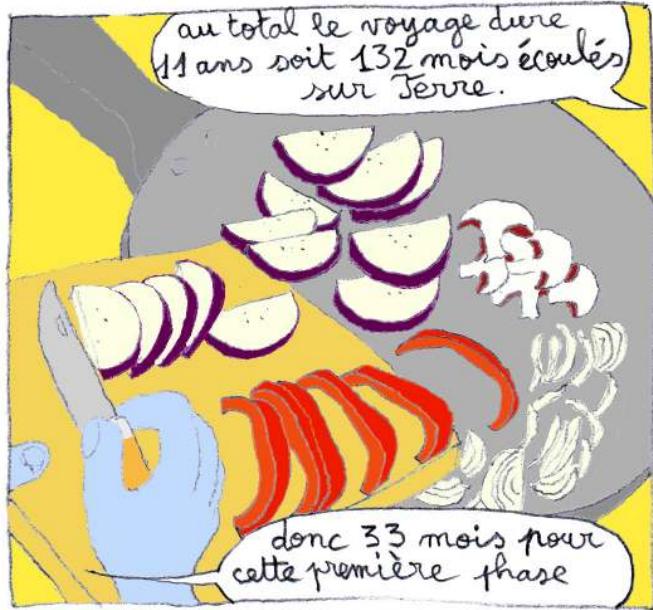
L'étoile est située à 8,5 années-lumière de nous.

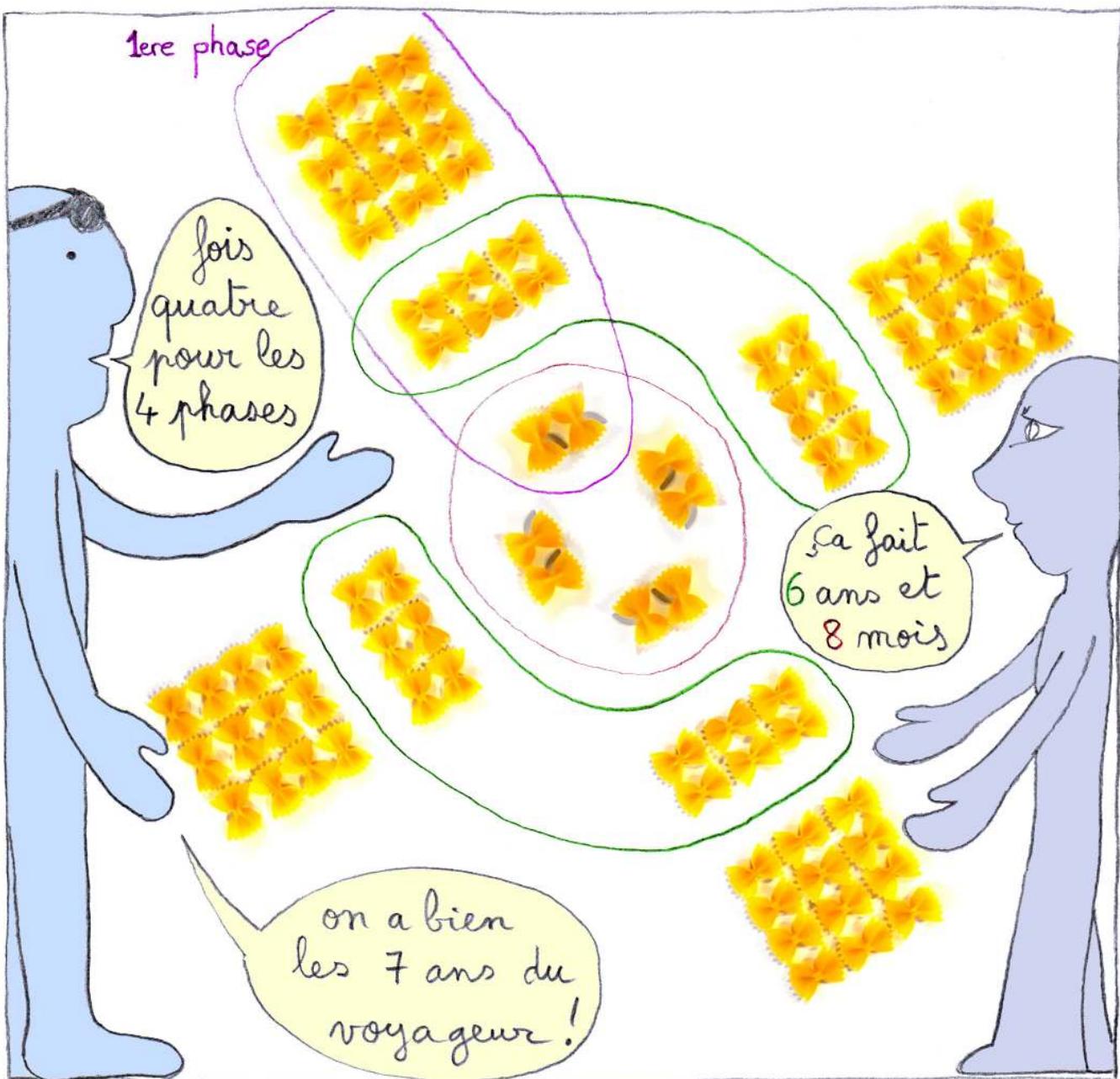
Il s'agit de Sirius, l'étoile du ciel la plus lumineuse après le Soleil.

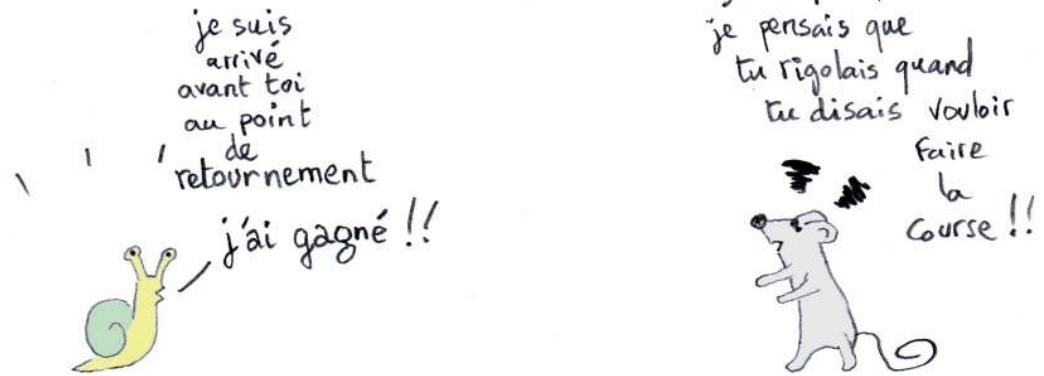
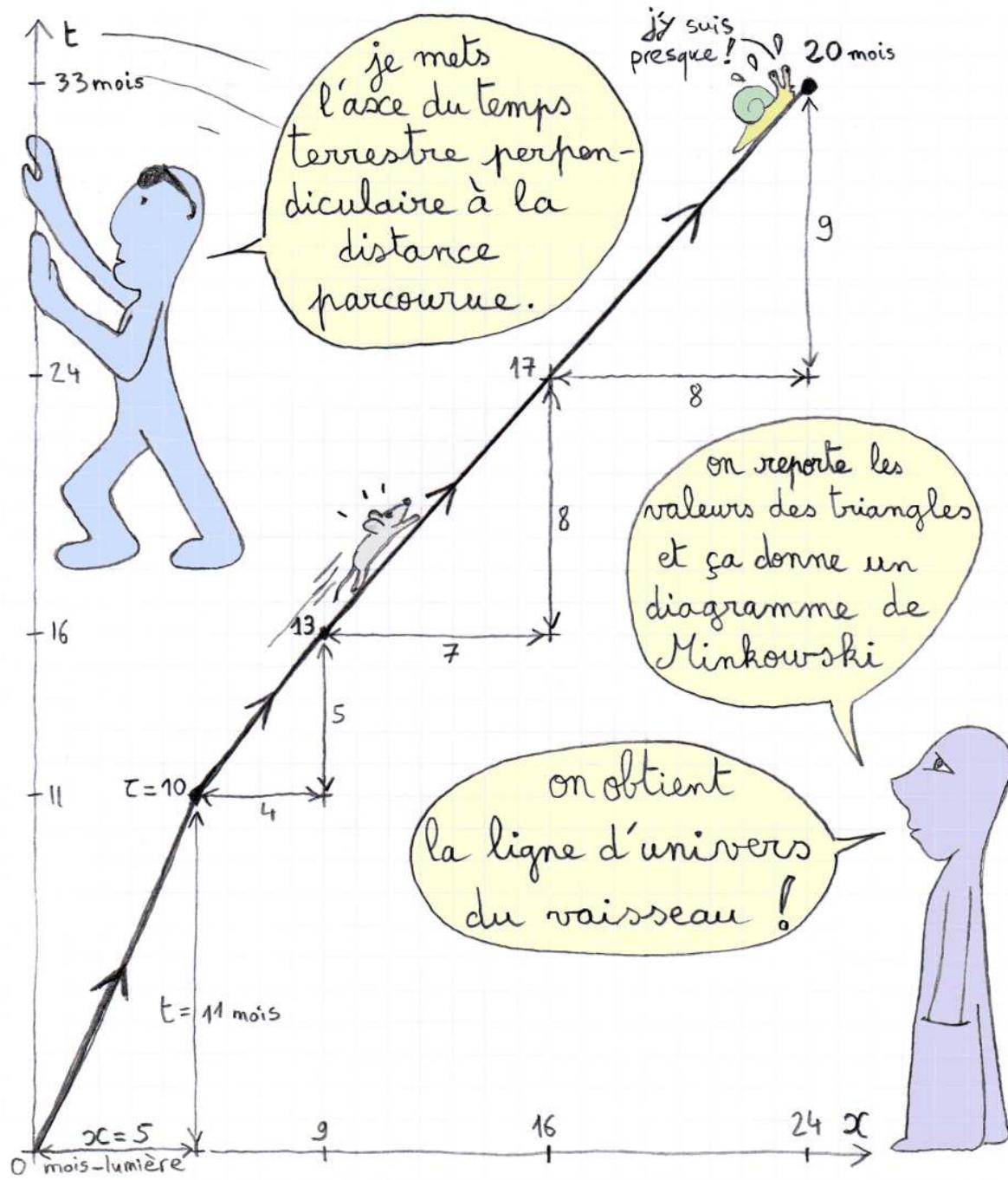


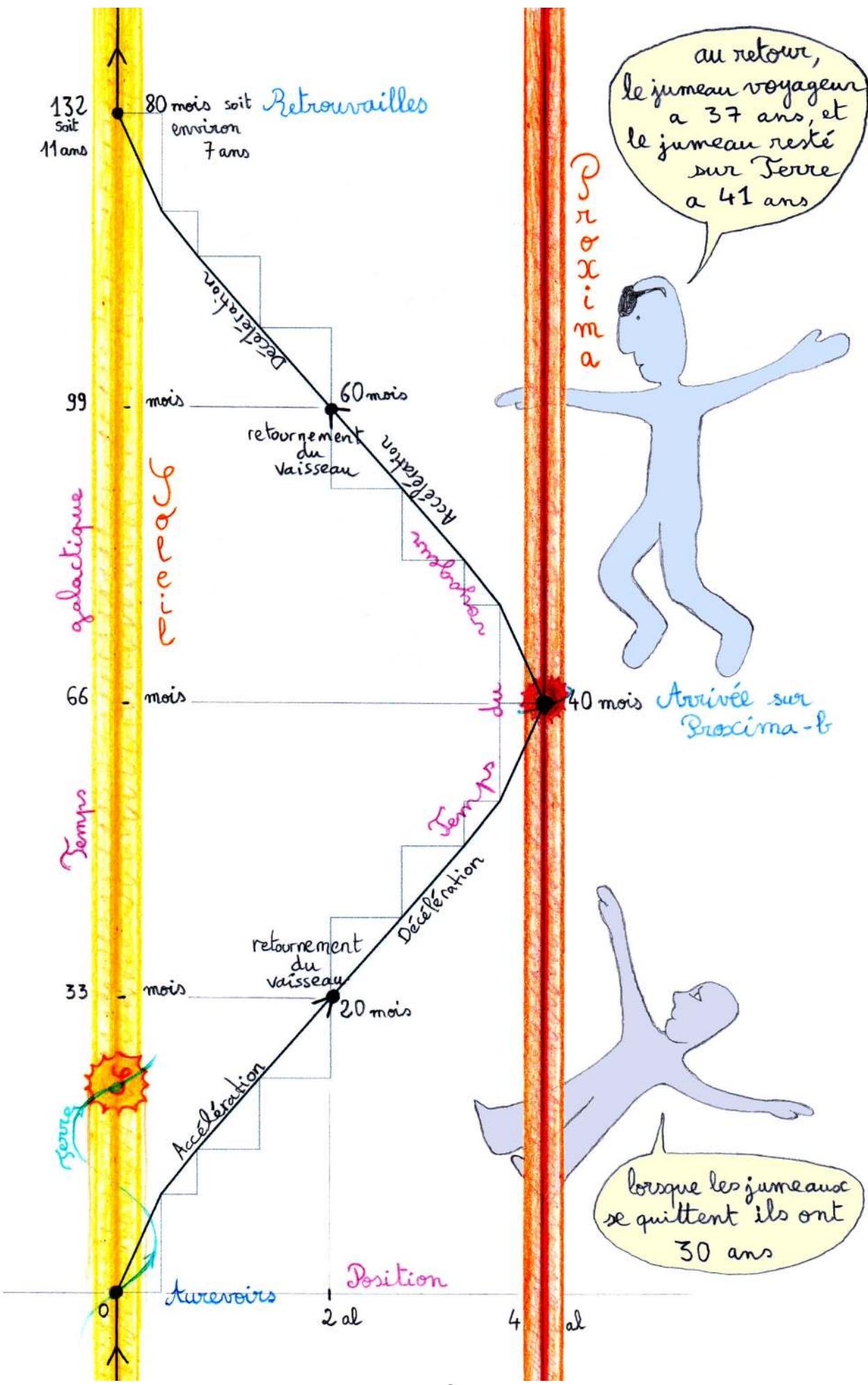












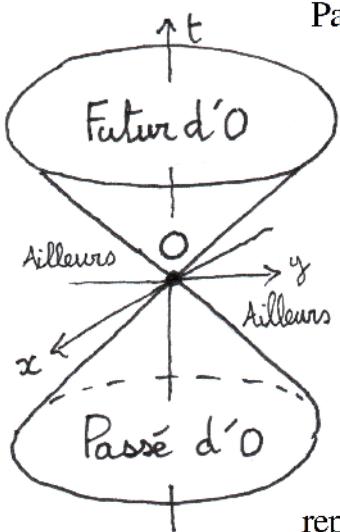
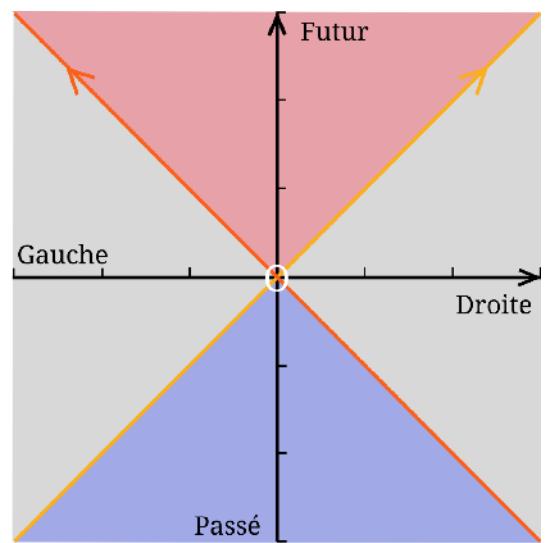
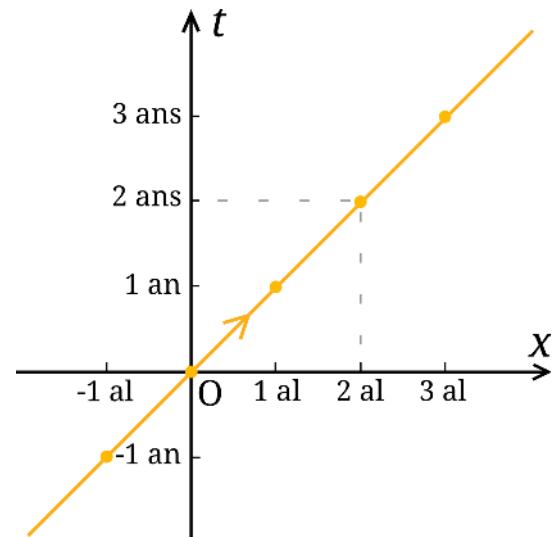
## Le diagramme de Minkowski

Pour avoir une vision plus large des expériences décrites, nous voulons visualiser les situations avec des graphiques. Ils vont synthétiser l'ensemble des résultats. Nous commençons ici par les premiers diagrammes proposés par Minkowski en 1908. Ce sont des diagrammes d'espace-temps comme celui vu à la page 24.

Nous allons décrire des mouvements qui se font selon une seule direction (l'axe des  $x$ ). On peut se déplacer vers la droite ou vers la gauche. Nous plaçons l'axe pour l'espace selon l'horizontale et l'axe du temps selon la verticale.

Considérons tout d'abord un photon orange qui se déplace vers la droite et qui passe au point origine O à l'an zéro. Après un an il a parcouru une année-lumière (par définition!). Après deux ans il aura parcouru deux années-lumière, et ainsi de suite... On peut alors tracer la ligne d'univers du photon. C'est une droite inclinée vers la droite qui passe symétriquement aux deux axes. On peut aussi prolonger la droite vers le bas à gauche : par exemple, il y a un an le photon était à une année-lumière à gauche de l'origine. Quand on est dans le passé, ou vers la gauche, on le signifie par un signe moins.

Ajoutons sur le diagramme la deuxième ligne d'univers d'un photon rouge qui se déplace vers la gauche et qui passe aussi au point origine O à l'an zéro. Le point O représente "ici et maintenant". La zone rouge représente tous les futurs possibles de ce point. Si l'objet est immobile il restera sur la ligne noire verticale. Si il va à vitesse constante il suivra une ligne inclinée. Plus sa vitesse est proche de celle de la lumière, plus l'inclinaison augmente et se rapproche de la ligne d'univers d'un photon. La zone bleue représente tous les passés possibles du point O. La zone grise est inaccessible pour le point O, car il faudrait aller plus vite que la vitesse de la lumière.



Parfois, pour les lignes d'univers de la lumière on parle de *cône de lumière*.

Pourtant nous n'avons pas dessiné le moindre cône. Ce vocabulaire provient de la représentation de l'espace de Minkowski lorsqu'il y a deux dimensions d'espace. C'est le cas plus général où l'objet ne se déplace plus seulement sur un axe mais dans un plan. On a le cône de lumière future, le cône de lumière passée et l'ailleurs.

Pour alléger les graphiques on représente les deux lignes d'univers des photons en pointillés.

Pour vous familiariser avec les diagrammes de Minkowski, vous pouvez jouer au jeu *Course pour Proxima* en page 87.

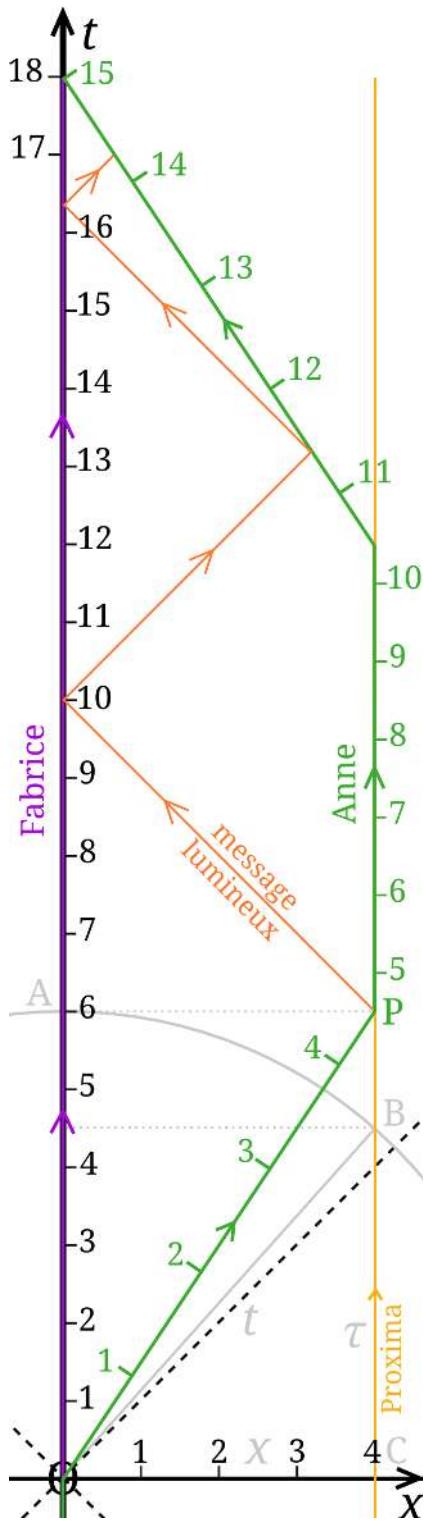
Page suivante, étudions le voyage aller de Leïla. Le Soleil et Proxima sont représentés par des lignes d'univers verticales. Leïla part de O en l'an zéro et se déplace vers la droite à la moitié de la vitesse de la lumière. Le vaisseau spatial de Leïla va du Soleil à Proxima, distante de 4 années-lumière, en 8 ans. Nous allons représenter en gris le Triangle des Temps sur le Diagramme de Minkowski. Nous traçons l'arc de cercle AB de centre O. L'intersection B avec la ligne

d'univers de Proxima permet de construire un triangle des temps OCB. La mesure à la règle de BC donne une valeur de 7 ans pour la durée  $\tau$  du voyage mesurée dans le vaisseau.

Dans le diagramme, en plus des grandeurs  $x$  et  $t$ , mesurées dans le référentiel où le vaisseau est en mouvement, nous aimons aussi indiquer les temps propres mesurés dans le référentiel du vaisseau

Nous voyons bien, depuis la Terre, le temps s'écouler plus lentement pour Leïla.

Nous avons aussi représenté les voyages d'Anne et Fabrice sur un diagramme de Minkowski. Le diagramme permet d'avoir une vision globale claire de l'ensemble des lignes d'univers. Nous voyons comment les temps propres s'ajoutent sur la ligne d'univers d'Anne. Nous avons aussi tracé la ligne d'univers des photons messagers envoyés par Anne, lors de son arrivée sur Proxima-b, à Fabrice. Anne peut s'aider du diagramme pour rédiger son message :



*'Bonjour Fabrice,*

*Me voilà tout juste arrivée sur l'exoplanète. Les colons Proxiadiens sont vraiment très accueillants. J'ai atterri hier en fin de journée et ils avaient organisé une fête rien que pour moi ! Les Terriens viennent rarement faire du tourisme sur Proxima, il est vrai que le voyage est un peu long... La planète est magnifique, la terraformation est quasiment achevée. Une végétation luxuriante et une faune déroutante. Le plus surprenant a été pour moi la luminosité très douce et chaleureuse créée par leur Soleil qui nous a offert un magnifique coucher.*

*Voilà dix ans que tu fais le tour du monde en bateau, tu as dû vivre des expériences fabuleuses, raconte-moi ! Je suis impatiente de recevoir ton message-retour.*

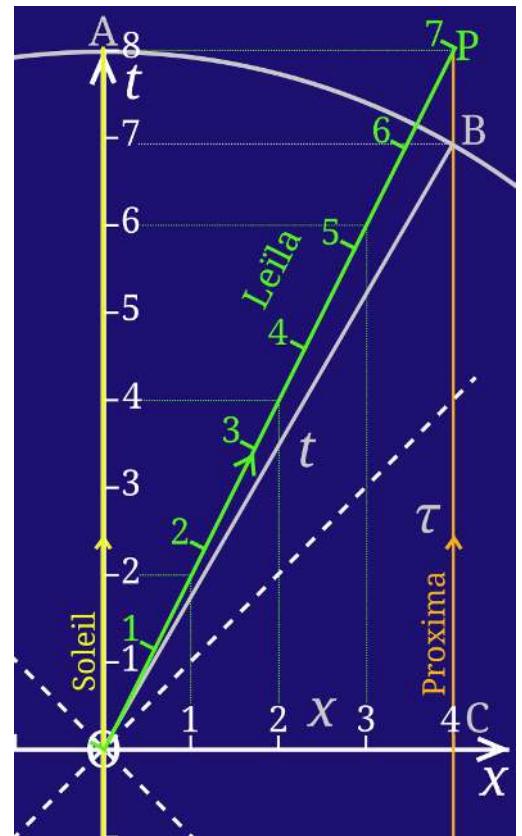
*Bises et à bientôt.*

*Anne"*

Nous avons aussi ajouté les messages en retour, en supposant qu'ils sont renvoyés rapidement dans la semaine après réception. Les messages lumineux sont représentés par des traits rouges parallèles ou perpendiculaires aux lignes en pointillés. Sur le diagramme, Fabrice voit que son message en retour parviendra après que Anne soit repartie de Proxima b.

*'Bonjour Anne,*

*Six ans sur Proxima ! Cette expérience a dû complètement te transformer, je suis très impatient d'écouter tes récits. Repose-toi bien pendant le voyage retour. Mon tour du monde se passe très bien, je fais des rencontres passionnantes mais à la fois je me dis que mes aventures vont te sembler bien banales comparées à la vie que tu as eu avec les Proxiadiens.*



*On se revoit dans huit ans pour en parler directement, enfin pour toi ce n'est plus que dans moins de quatre ans.  
Je t'embrasse.  
Fabrice"*

Le diagramme de Minkowski donne une vision presque naturelle de la situation.

Tout ceci semble très satisfaisant. Supposant que nous ayons à disposition des vaisseaux aussi rapides, pensez-vous que tout les voyages considérés tout au long de ces dernières pages soient physiquement acceptables ?

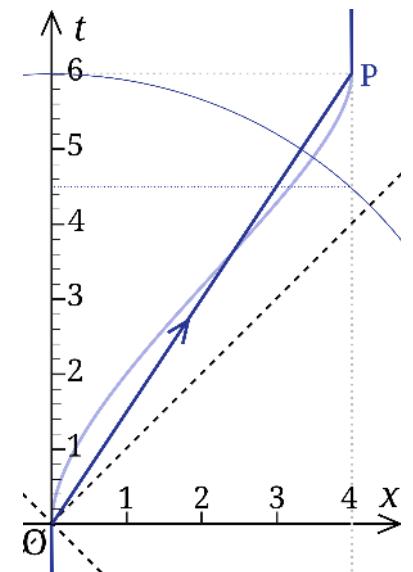
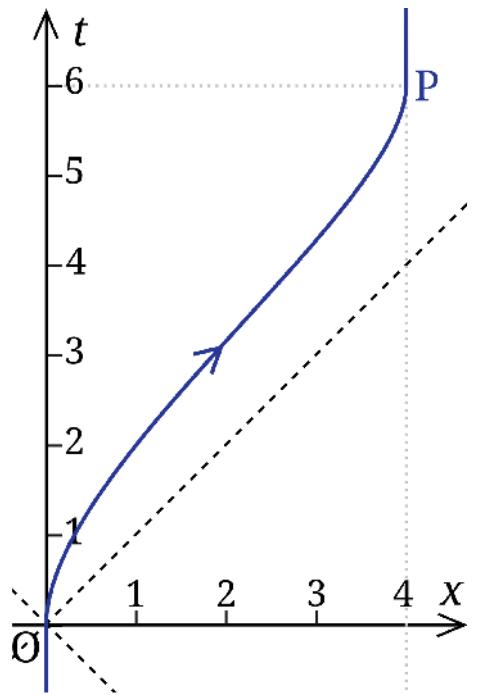
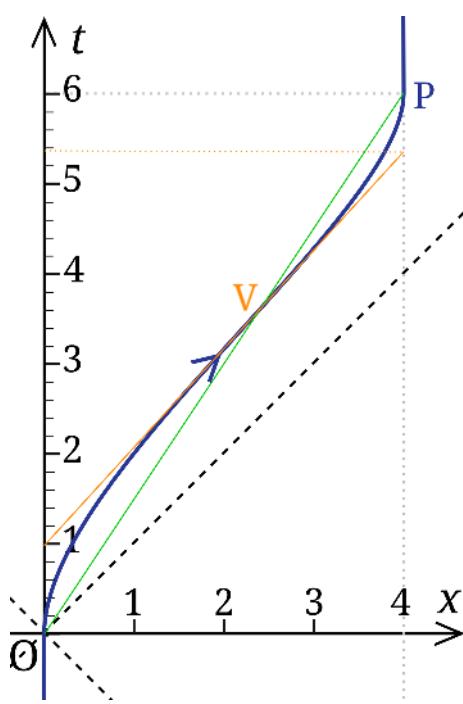
Imaginez-vous au bord du vaisseau de Leïla satellisé en orbite de parking autour de la Terre. Vous faites les derniers aurevoirs et les dernières vérifications avant le départ. Vous êtes grosso modo immobile par rapport au système solaire. Vous démarrez et hop instantanément vous vous retrouvez à la moitié de la vitesse de la lumière, ce qui correspond à 500 millions de km/h. D'une part, il faudrait un vaisseau d'une puissance infinie et d'autre part vous seriez infiniment écrasé au fond de votre fauteuil ; deux choses impossibles. Un mobile ne peut avoir une accélération infinie. Même si l'accélération ne durait qu'une minute, elle serait bien trop forte et votre corps ne pourrait pas résister à la compression. Avec une accélération d'un  $g$  il faut six mois pour atteindre 50% de  $c$ . De même pour la décélération, pensez déjà à ce qu'il se passe dans une voiture quand l'on freine trop brusquement. Pour éviter ces effets, les lignes d'univers ne doivent pas avoir de points anguleux, comme en O et P, sur la ligne d'univers verte d'Anne.

Les variations des lignes d'univers doivent être douces. Pour étudier les mouvements réels nous décomposons les lignes d'univers en segments. Plus le nombre de segments est important meilleure sera l'approximation.

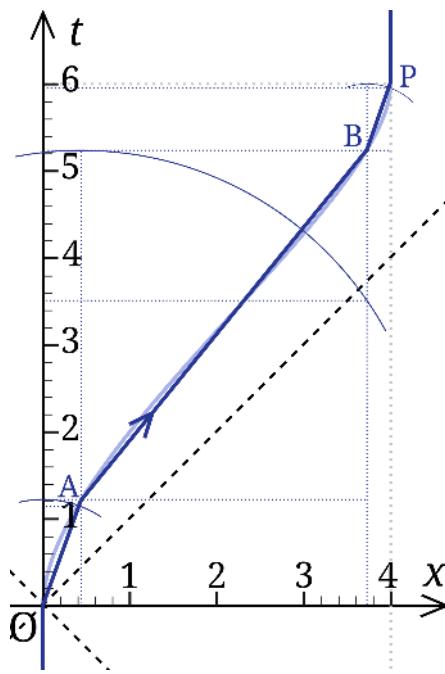
Nous avons mesuré dans un référentiel les positions du vaisseau de Paul au cours du temps. La ligne d'univers du vaisseau est représentée à droite. Pour une ligne d'univers réelle, il n'y a pas de points anguleux. Il y a des coudes. Le premier coude correspond à la phase d'accélération. Il y a ensuite une phase plutôt linéaire avec une vitesse de croisière. Vient finalement la décélération et l'arrivée sur Proxima en P. La ligne, d'abord verticale, s'incline vers la droite, la vitesse et le gamma augmentent pour atteindre leurs maxima en V (point indiqué sur la figure de gauche), le gamma diminue ensuite graduellement jusqu'à 1 pour l'arrivée sur Proxima.

La ligne en orange est tangente à la ligne d'univers en V et permet d'évaluer la vitesse maximale, soit environ 4 divisé par 4,4 et donc 91% de  $c$ . Ce qui donne un  $\gamma$  maximal d'environ 2,4. La droite OP nous donne une vitesse moyenne de 67% de  $c$ .

La troisième figure, à droite, approxime la trajectoire par un seul segment et nous trouvons un temps propre d'environ 4,5. La quatrième figure, page suivante, est une approximation en trois segments de la ligne d'univers du vaisseau. On se rapproche de la ligne réelle. Nous mesurons le temps propre pour chaque segment et nous ajoutons ensuite les temps propres. Pour le premier segment OA le temps propre



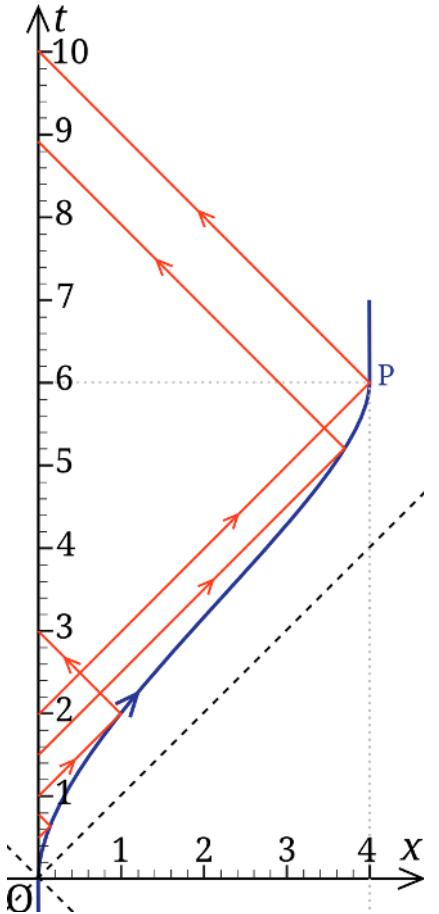
ligne réelle. Nous mesurons le temps propre pour chaque segment et nous ajoutons ensuite les temps propres. Pour le premier segment OA le temps propre



vaut environ 1,15 an. Pour le deuxième segment AB nous avons 2,3 ans. Pour le troisième segment BP environ 0,7 an. En sommant les trois temps propres nous trouvons une durée pour le voyageur approximée à 4,15 ans. Tout au long de la trajectoire, la vitesse et le  $\gamma$  varient et les temps propres s'ajoutent. Normalement, nous ne considérons que des objets en mouvement rectiligne et à vitesse constante. Ici, nous généralisons à des objets en mouvements quelconques. Pour la même vitesse instantanée, le  $\gamma$  est le même, que le mouvement soit uniforme ou accéléré. C'est ce qu'on appelle l'*hypothèse de l'horloge*. Cette hypothèse a été vérifiée expérimentalement <sup>ref. ii p148</sup>.

Concrètement nous pouvons utiliser la méthode de l'écho radar. On peut être aussi précis que l'on veut en envoyant des flashes radar régulièrement.

Pour illustrer prenons le cas où les échos ne sont créés qu'une fois tous les six mois. Nous rassemblons les données collectées dans un tableau, et nous obtenons une estimation du temps propre encore plus précise. On calcule la durée en années entre l'émission et la réception. La position  $x$  en années-lumière vue depuis le référentiel terrestre correspond à la moitié de cette valeur. La date  $t$  de passage du vaisseau au niveau d'une horloge immobile dans le référentiel terrestre est obtenue en ajoutant à la date d'émission la moitié de la durée d'aller-retour de l'écho. Nous avons ainsi un ensemble de coordonnées spatio-temporelles. Pour la vitesse moyenne entre deux positions successives nous divisons la distance par la durée. Pour le gamma moyen nous utilisons le Triangle des Temps. Pour le temps propre éoulé entre deux positions, nous divisons la durée dans le référentiel terrestre par le gamma sur cet intervalle. Et finalement nous ajoutons tous les temps propres pour obtenir le temps total du voyage qui serait mesuré par le spationaute.



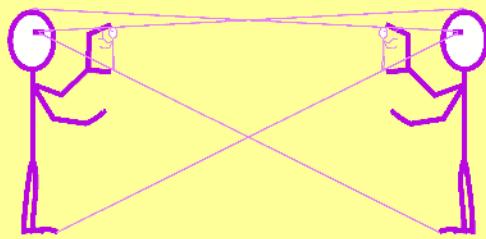
| Date d'émission                | Date de réception | Date t | Position x | Vitesse moyenne v | Gamma moyen $\gamma$ | Temps propres $\tau$ |
|--------------------------------|-------------------|--------|------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| 0                              | 0                 | 0      | 0          |                   |                      |                      |
| 0,5                            | 0,78              | 0,64   | 0,14       | 22% de c          | 1,025                | 0,62                 |
| 1                              | 3                 | 2      | 1          | 63%               | 1,29                 | 1,05                 |
| 1,5                            | 8,9               | 5,2    | 3,7        | 84%               | 1,86                 | 1,72                 |
| 2                              | 10                | 6      | 4          | 38%               | 1,08                 | 0,74                 |
| <u>Temps propre : 4,14 ans</u> |                   |        |            |                   |                      |                      |

## L'expérience des jumeaux et les voyages dans le futur

En 1911, Paul Langevin propose une expérience de pensée. Prenons de vrais jumeaux âgés de 20 ans. L'un reste sur Terre et l'autre part en voyage. Le voyage dure 20 ans pour le jumeau voyageur. La vitesse du vaisseau est telle que le facteur de dilatation temporelle vaut deux. Ainsi au retour de voyage, le jumeau resté sur Terre a 60 ans et le jumeau voyageur 40 ans.

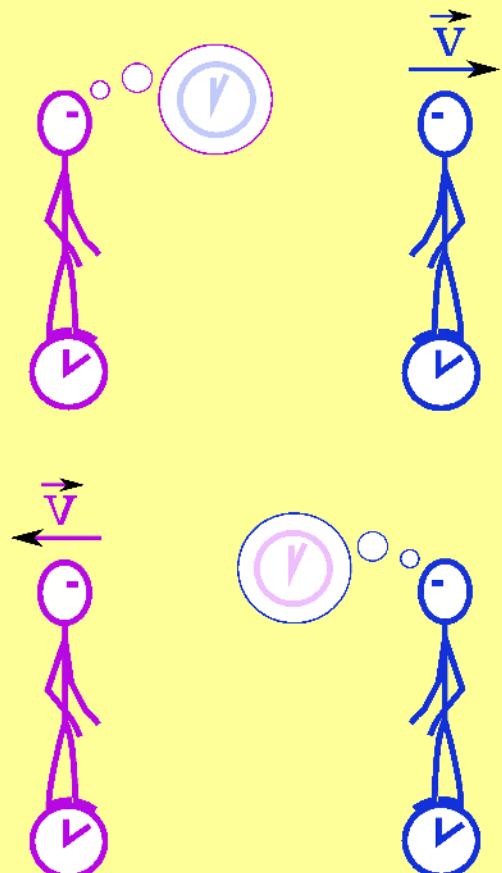
Cet exemple montre clairement comment l'écoulement du temps dépend du mouvement des objets. Cette expérience de pensée a historiquement marqué les esprits et provoqué les résistances de la vieille culture classique. On parle parfois de paradoxe des jumeaux, mais il n'y a pas de paradoxe. La vérification expérimentale avec des horloges marche parfaitement. Du moment que l'on a compris la relativité restreinte, il n'y a pas de contradiction dans l'interprétation de l'expérience.

Prenons l'analogie classique avec l'effet de perspective spatiale. Si deux personnes de même taille sont placées face à face à quelques mètres de distance, chacune verra l'autre plus petit que lui. Il n'y a aucune contradiction à cela.



Il y a un peu de cela avec l'effet de perspective spatio-temporelle. Si deux personnes s'éloignent l'une de l'autre, elles interpréteront les fonctionnements des horloges respectives comme ralentis. Là aussi il n'y a pas de contradiction. C'est bien ce que chacun, de son référentiel, mesure avec son cristal d'horloges. Mais à la différence de l'effet de perspective classique, ici la lumière n'est pas supposée se propager instantanément. Donc, ici, quand l'on regarde l'horloge de l'autre, ça ne correspond pas à ce qu'on enregistre avec son cristal d'horloges, car il faut en plus attendre que la lumière se propage de l'horloge de l'autre personne à notre œil.

Nous représentons sur le schéma en grisé, ce qu'enregistre les cristaux d'horloges, pas ce qu'on voit.



Chacun dans son référentiel au repos interprète l'horloge de l'autre, en mouvement à la vitesse  $v$ , comme ralentie d'un facteur gamma.

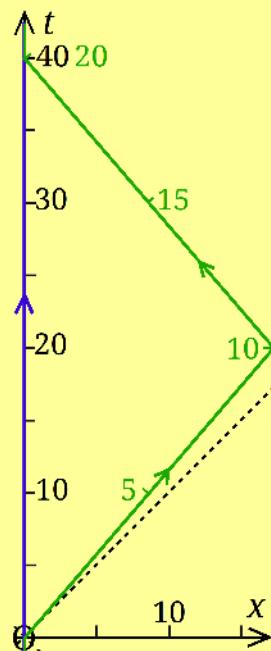
Par exemple, quand la trotteuse avance d'une seconde sur l'horloge propre à un observateur, ce même mouvement de la trotteuse durera deux secondes mesuré par l'autre personnage. La situation est symétrique pour les deux observateurs. De plus, si les personnages se rapprochaient au lieu de s'éloigner, nous aurions aussi ralentissement des horloges.

Nous sommes maintenant prêts à faire un faux raisonnement : lors de l'expérience des jumeaux, ils s'éloignent puis se rapprochent, comme chacune de ces deux situations est vécue symétriquement, ils ont le même âge quand ils se retrouvent. C'est oublier que le jumeau voyageur doit partir puis revenir, il faut donc qu'il accélère, décélère, réaccélère puis redécélère, alors que l'autre jumeau va rester au repos bien tranquille sur Terre.

Et comme nous l'avons vu, accélérer et décélérer n'est pas anodin et soumet le voyageur à des forces importantes, qui vont jusqu'à mettre sa vie en danger si elles sont trop violentes. Le référentiel n'est plus d'inertie mais accéléré et la relativité restreinte ne peut plus s'appliquer. Le principe de la relativité du mouvement ne fonctionne qu'entre corps en translation rectiligne uniforme. C'est pour cela que les situations ne sont pas équivalentes et qu'ils ont bien des âges différents à l'arrivée ; un corps au repos ayant toujours un temps propre supérieur à un corps en mouvement.

Nous pouvons faire le raisonnement depuis le point de vue de l'observateur terrestre car le référentiel est inertiel, et nous appliquons les principes de la relativité restreinte qui ne sont valables que dans ces référentiels. Par contre, celui du voyageur n'est pas inertiel et nous ne pouvons pas nous mettre à sa place, il faudrait une autre théorie généralisée à des référentiels quelconques.

Nous pourrions représenter la situation sur un diagramme de Minkowski avec pour simplifier des phases d'accélération et de décélération instantanées.

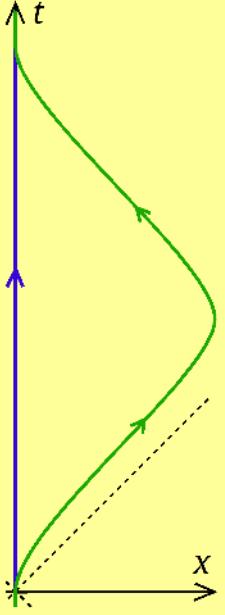


L'ennui est que les phases d'accélération qui posent justement problème n'apparaissent pas explicitement. On a juste des points anguleux.

Nous pourrions aussi faire le faux raisonnement suivant : du point de vue du voyageur, sur son aller qui dure 10 ans, son jumeau sur Terre s'éloigne de lui avec un  $\gamma$  de 2, donc il le verra vieillir de 5 ans. Puis à nouveau 5 ans au retour, donc le jumeau sur Terre aura vieilli de 10 ans au lieu de 40. 30 ans ont disparu... Même réponse que tout à l'heure, on ne peut penser à la place du jumeau voyageur à cause des phases d'accélération.

Le diagramme ci-contre est plus proche de la réalité : le référentiel du voyageur n'est jamais inertiel. La ligne d'univers du voyageur ne peut être étudiée que depuis le jumeau sur Terre.

Petite question : vous êtes assis sur un banc face à la mer. Il est midi et vous voulez voir le coucher de Soleil qui aura lieu à 10h du soir. Vous avez donc dix heures à attendre sur le banc... Est-il possible de voir le coucher de Soleil plus rapidement ?



Oui, en voyageant dans le futur : vous partez puis revenez avec un facteur de dilatation de dix, et vous serez là dans une heure, pile pour le coucher de Soleil !

## Changement de référentiels et composition des vitesses

Parfois en gare, on croit que notre train commence à avancer, alors que c'est le train d'à côté qui recule. Le mouvement rectiligne et à vitesse constante est relatif. C'est un principe fondamental, du moment que votre mouvement n'est pas accéléré, impossible d'affirmer si vous êtes en mouvement ou au repos. C'est une question de point de vue.

Page suivante, nous avons représenté trois diagrammes. Sur le premier diagramme, un observateur immobile voit avancer un deuxième observateur qui se déplace vers la droite à vitesse constante (50% de  $c$  sur cet exemple). L'axe  $t'$  représente le temps propre vécu par l'observateur mobile, au repos dans son référentiel. Sur le deuxième diagramme, nous avons le point de vue équivalent du deuxième observateur. Selon lui, il est immobile et c'est le premier observateur qui recule. Sur le troisième diagramme nous avons les axes  $x$  et  $t$  dans le référentiel  $R$  du premier observateur, et les axes  $x'$  et  $t'$  dans le référentiel  $R'$  du deuxième observateur. L'axe  $x'$  est placé symétriquement, car la vitesse de la lumière est un invariant qui ne dépend pas du référentiel d'inertie considéré.

## L'effet Doppler relativiste

Un vaisseau spatial se rapproche de vous à 87% de la vitesse de la lumière dans le vide. Cette vitesse correspond à un facteur de dilatation temporelle de 2. Au bord du vaisseau une lampe clignote toutes les secondes.

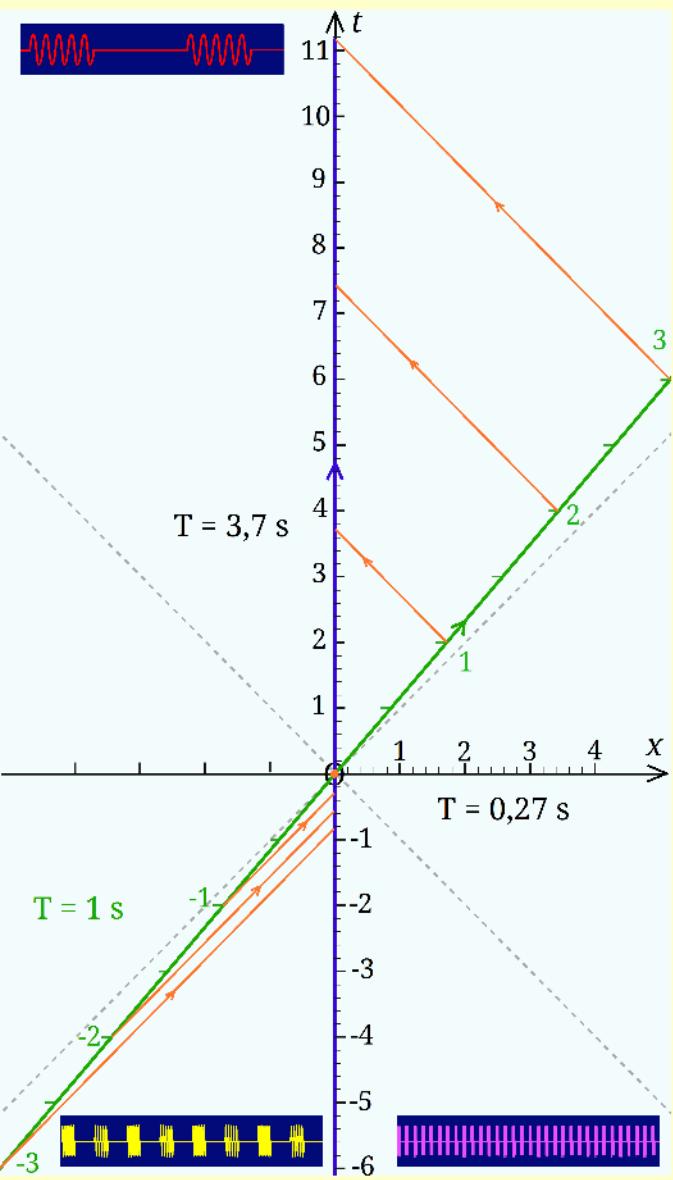
Avec quelle fréquence verrez-vous clignoter la lampe quand le vaisseau s'approche, puis quand il s'éloigne ?

Il y a deux choses : le ralentissement des horloges, mesuré à l'aide de notre référentiel, puis les délais de propagation de la lumière de la lampe en mouvement à notre œil. L'effet Doppler tient compte de ces deux effets combinés. Il est facile de mesurer graphiquement la modification de périodicité. En bleu la ligne d'univers de l'observateur immobile. En vert la ligne de la lampe clignotante. En orange les lignes d'univers des flashs. La lampe émet un éclair toutes les secondes dans son référentiel propre. Quand elle s'approche, la fréquence est augmentée et vous voyez quatre flashs par seconde. Quand elle s'éloigne la fréquence est diminuée et vous voyez un flash toutes les quatre secondes.

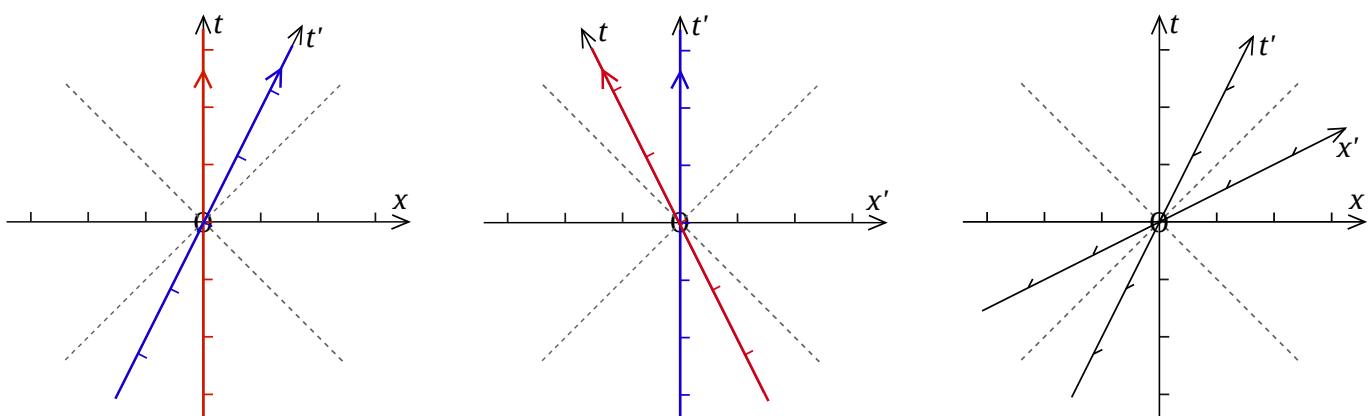
Supposons que la lampe émette des flashs jaunes. De quelles couleurs seront les flashs reçus ?

Les flashs ne seront même plus dans le visible !

En effet quand la lampe s'approche, la fréquence sera multipliée par quatre et le signal sera dans l'ultraviolet.



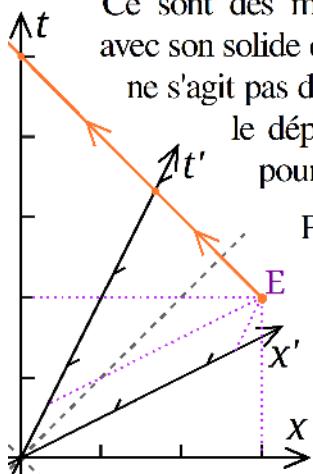
Quand elle s'éloigne, le rayonnement reçu sera dans l'infrarouge.



Nous pouvons ainsi avoir les coordonnées spatio-temporelles d'un événement dans les deux référentiels. Par exemple, dans le cas du voyage de Leïla. Si sur Terre, on enregistre, 2 ans après son départ, une explosion à 3 années-lumière. D'après le diagramme page suivante, Leïla enregistrera pour sa part ce même événement 7 mois après son départ à 2,3 années-lumière.

Lire les coordonnées dans  $R'$  est plus délicat que dans  $R$ . Dans  $R$  nous pouvons nous déplacer indifféremment perpendiculaire à un axe, ou parallèle à l'autre. Dans  $R'$  les axes ne sont plus perpendiculaires entre eux et *il faut se déplacer parallèle aux axes pour lire les coordonnées*. Plus la vitesse de  $R'$  dans  $R$  est importante, plus les unités sont grandes dans  $R'$  et plus l'angle entre les axes  $t'$  et  $x'$  est petit.

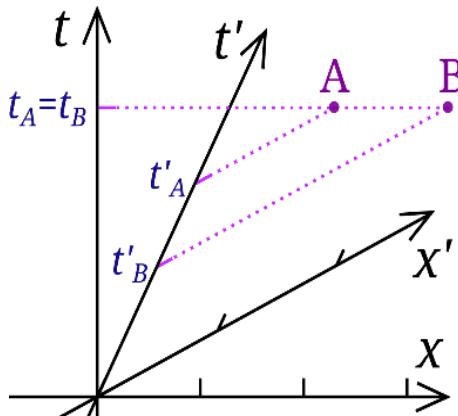
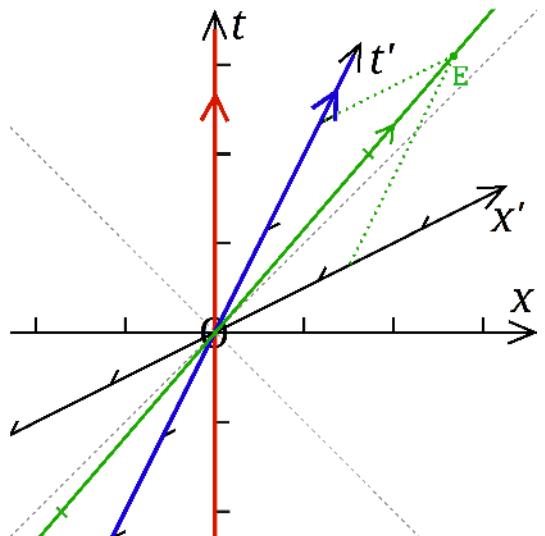
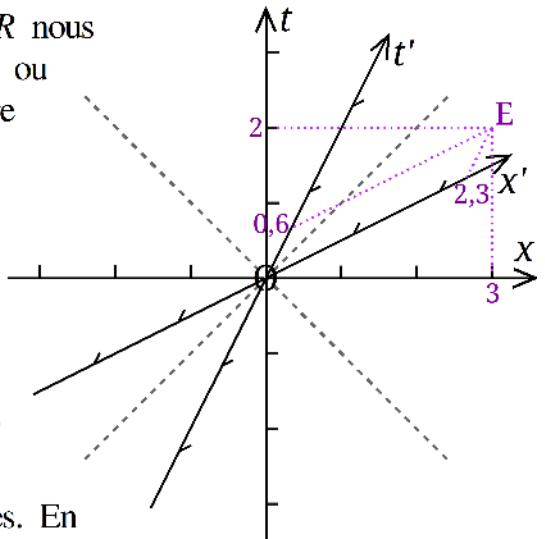
Ce sont des mesures que chaque expérimentateur effectue avec son solide de référence et son cristal d'horloges associé. Il ne s'agit pas des moments où l'explosion est vue (5 ans après le départ depuis la Terre, et 2 ans et 11 mois après pour Leïla).



Parlons maintenant de composition des vitesses. En mécanique classique c'est assez simple, il y a additivité des vitesses. Par exemple, si deux voitures roulent dans le même sens, l'une à 90 km/h et l'autre à 110 km/h, leur vitesse relative sera de 20 km/h. Par contre, si elles roulent en sens contraire la vitesse relative sera de 200 km/h.

Prenons maintenant deux vaisseaux en mouvement, celui de Leïla en bleu à 50% de  $c$  et un deuxième en vert à 87% de  $c$ . Les vitesses sont celles mesurées depuis la Terre. Bien sûr, en relativité restreinte, il n'y a pas additivité des vitesses, sinon deux vaisseaux qui se déplaceraient face à face pourraient avoir une vitesse relative supérieure à la vitesse de la lumière dans le vide. Ici, nous prenons un événement sur la trajectoire du vaisseau vert et nous mesurons ses coordonnées par rapport à Leïla : 2 ans pour  $t'$  et 1,3 au pour  $x'$ . Comme tous les vaisseaux sont passés par O, nous divisons 1,3 par 2 et nous trouvons une vitesse pour le vaisseau vert de 65% dans le référentiel de Leïla.

À vous de jouer : deux vaisseaux vont face à face, chacun à la moitié de la vitesse de la lumière. Ils se rapprochent, se croisent puis s'éloignent. Si vous êtes dans l'un des vaisseaux, à quelle vitesse verrez-vous l'autre vaisseau se diriger vers vous ? (Réponse sur une page qui suit)



### Simultanéité

Nous retrouvons la relativité de la simultanéité sur le diagramme de Minkowski : deux événements A et B sont simultanés dans  $R$ , mais pourtant ils ne le sont pas dans  $R'$  où B se produit avant A. Chose tout à fait impossible en mécanique de Newton où le temps, tout comme la simultanéité, sont des notions absolues.

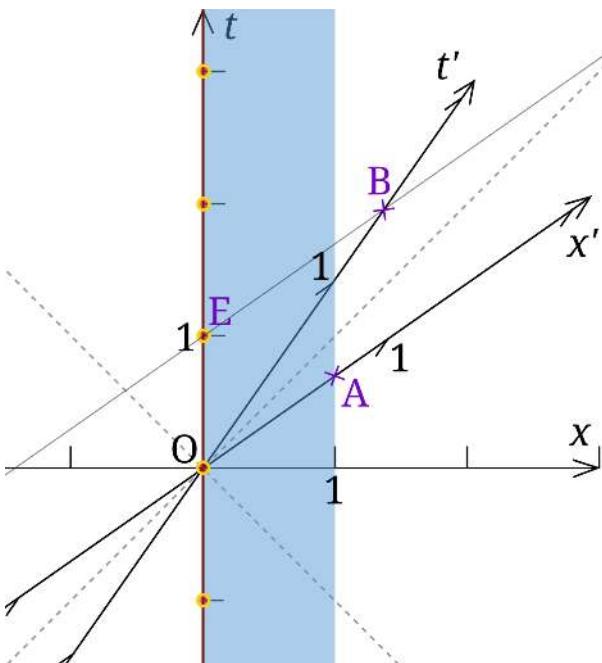
Il peut s'agir par exemple de deux explosions qui se produisent à des endroits différents. À nouveau, il s'agit des temps mesurés par les cristaux d'horloges. Peuvent venir ensuite les perceptions des flashes émis par A et B en un point C. Et même dans  $R$  les flashes peuvent être reçus à des moments différents. Tout comme dans  $R'$ , il peut exister un point C où les flashes sont perçus en même temps. La notion de simultanéité est intrinsèque à l'espace-temps, elle ne tient pas compte des temps de propagation ultérieurs possibles.

## Dilatation du temps et contraction des longueurs

Ces deux effets ne sont pas physiques. Par exemple, le jumeau voyageur vivra tout à fait normalement et ne sentira pas son rythme cardiaque se ralentir. Pour un volume, la contraction des longueurs se produit selon une seule direction, celle de la vitesse, ainsi le volume se contracte aussi d'un facteur  $\gamma$ . Si nous avons un gaz enfermé dans une boîte et que nous le comprimons, il peut changer d'état et se liquéfier. Ici, la contraction des longueurs n'a aucun effet sur l'état physique du gaz. Ce n'est qu'une question de point de vue, c'est un effet de perspective spatio-temporelle.

Utilisons les diagrammes de Minkowski pour étudier ces deux effets.

Nous avons une règle avec une lampe qui clignote à son extrémité gauche . Nous allons étudier la surface d'univers de la règle. Dans son référentiel au repos, la règle a une longueur d'une unité de distance, et la lampe clignote toutes les unités de temps. Pour les diagrammes de Minkowski, nous avons, depuis le début, pris l'année comme unité de temps et l'année-lumière comme unité de distance. Nous avions ainsi les lignes d'univers des photons bien symétriques, car la lumière parcourt une distance d'une année-lumière en une année... Mais la lumière parcourt aussi un milliard de kilomètres en une heure, ou bien trois mètres en dix milliardièmes de seconde. Nos vaisseaux parcourent des années-lumière, par contre pour une règle une longueur de trois mètres semble plus réaliste : nous choisissons une unité de temps de 10 nanosecondes et une unité de distance de 3 mètres.

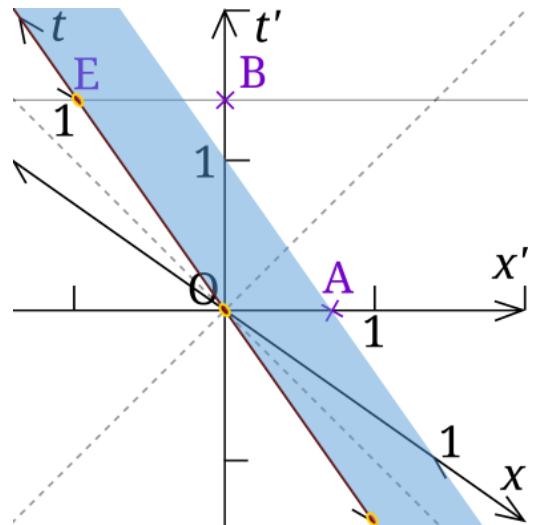


La règle est au repos dans le référentiel  $R$ . Nous étudions la règle depuis un vaisseau  $R'$  qui se déplace à 70% de la vitesse la lumière. Pour déterminer la longueur d'un objet, ses deux extrémités doivent être mesurées à la même date. Pour mesurer la longueur de la règle dans le référentiel en mouvement, nous mesurons les positions des événements O et A dans  $R'$ , tous deux à la date  $t'$  nulle. Nous trouvons une longueur OA de 0,71 unité de distance, soit, en multipliant par trois, une longueur relative pour la règle de 2,14 m. Nous avons bien une contraction des longueurs par rapport à la longueur au repos de 3 m. Le facteur de contraction est le facteur gamma. Nous pourrions aussi utiliser toute autre droite parallèle à  $(Ox')$  pour déterminer la longueur relative de la règle.

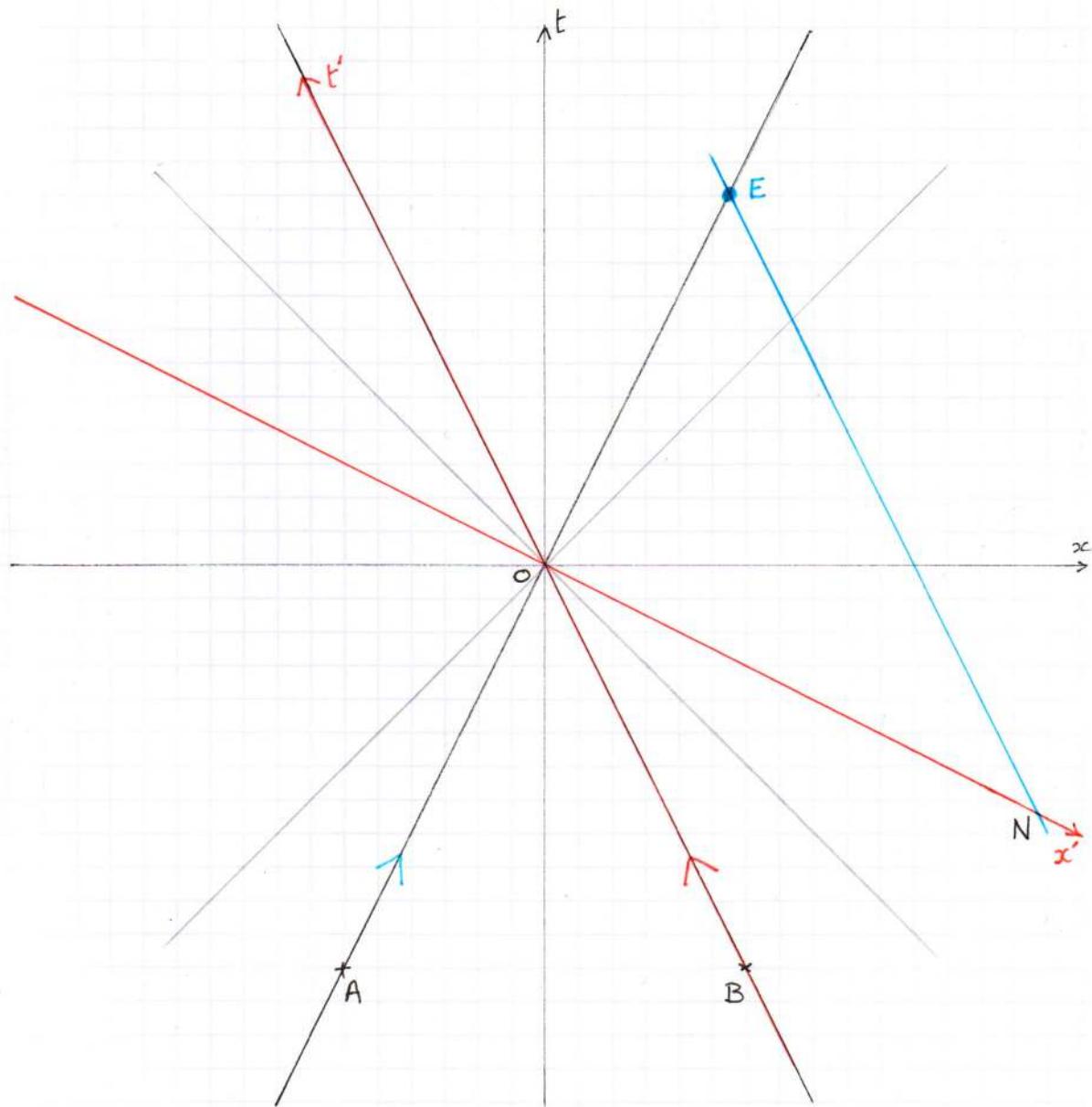
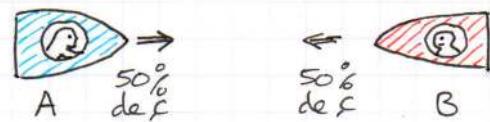
La durée entre deux flashes dans  $R'$  est obtenue en soustrayant les dates sur l'axe  $t'$  de deux flashes successifs. Nous mesurons, pour EB, 1,4 unités de

temps de  $R'$ . Soit une durée relative de 14 nanosecondes, alors que la durée au repos vaut 10 ns. Le facteur de dilatation est, là aussi, le facteur gamma.

Ci-contre, la règle clignotante du point de vue du référentiel en mouvement.



Deux vaisseaux foncent l'un vers l'autre chacun à la moitié de la vitesse de la lumière. Quelle est la vitesse relative des deux vaisseaux ?



Nous nous placons dans le référentiel  $R'$  du vaisseau orange qui se dirige vers la gauche. Nous tracons la droite  $(EN)$  parallèle à  $(OB)$ . Nous mesurons à la règle les longueurs  $ON$  et  $EN$ . En divisant la valeur pour  $ON$  par celle de  $EN$ , on trouve 0,8 soit 80% de  $c$ .

## Un vaisseau traverse un tunnel creusé dans un astéroïde

Nous allons décrire un autre pseudo-paradoxe classique. Comme pour l'expérience des jumeaux, il s'agit d'une expérience de pensée. Nous la modernisons un peu. Parfois l'on parle d'une perche qui traverse une grange, ou d'un train qui passe dans un hangar, nous ce sera un vaisseau qui passe dans un tunnel creusé dans un astéroïde.

Le tunnel a une longueur propre de 100 mètres. Chaque extrémité du tunnel est équipée d'une porte électromagnétique qui peut se fermer et s'ouvrir très rapidement. Le vaisseau d'une longueur propre de 120 mètres traverse le tunnel à la vitesse de 70% de la vitesse de la lumière. Dans le référentiel du tunnel est-il possible de, brièvement, fermer les deux portes simultanément pour enfermer le vaisseau ?

La réponse est oui.

En effet, la longueur du vaisseau, mesurée depuis le solide de référence de l'astéroïde, est contractée par un facteur 1,4. Soit une longueur relative du vaisseau de 86 mètres. Il reste même un espace de 14 mètres entre le vaisseau et les portes. Les portes disposent ainsi d'une bonne soixantaine de nanosecondes pour se fermer et se rouvrir.

Du point de vue du vaisseau, la situation semble plus délicate. En effet, cette fois c'est le tunnel qui est contracté, sa longueur relative est de 71 mètres, longueur bien inférieure aux 120 mètres du vaisseau. Il est impossible de fermer les portes en même temps avec le vaisseau dans le tunnel dans ce référentiel.

Y a-t-il une contradiction ?

Non, car souvenons-nous que des événements simultanés pour un observateur ne le sont pas pour un autre en mouvement. Dans le référentiel du vaisseau, la porte de sortie se ferme en premier, le vaisseau rentre, quand l'avant du vaisseau se rapproche de la porte de sortie, celle-ci s'ouvre, puis, quand l'arrière est rentré, c'est la porte d'entrée qui se ferme, puis se rouvre.

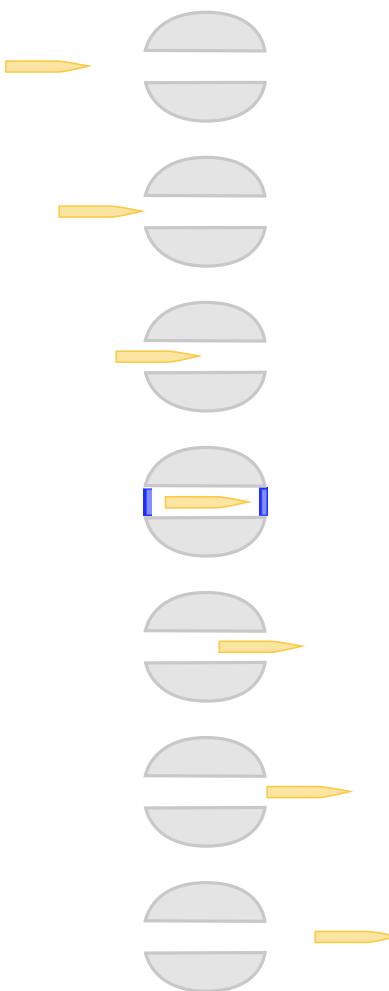
Sur la page suivante, nous avons représenté les deux points de vue par une chronologie à intervalles de temps réguliers. Dans le premier cas, c'est le vaisseau qui est en mouvement à vitesse constante, il s'en trouve contracté et il rentre entièrement dans l'astéroïde. Dans le deuxième cas, c'est l'astéroïde qui est contracté et en mouvement à vitesse constante vers la gauche. Dans cette perspective le vaisseau ne peut se cacher dans l'astéroïde.

Le diagramme de Minkowski, en bas de la page suivante, nous donne une vision complète de la situation.

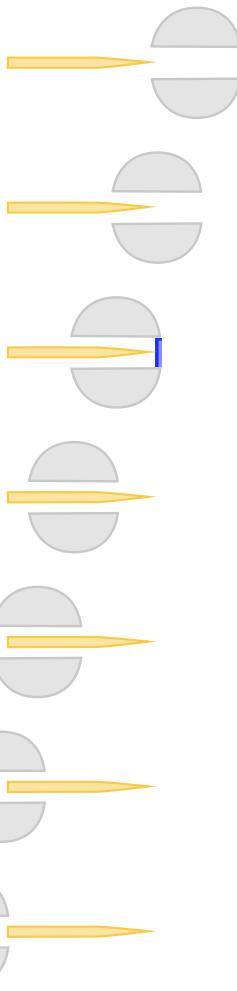


Vaisseau et astéroïde tous deux au repos.

*Du point de vue  
de l'astéroïde :*



*Du point de vue  
du vaisseau :*



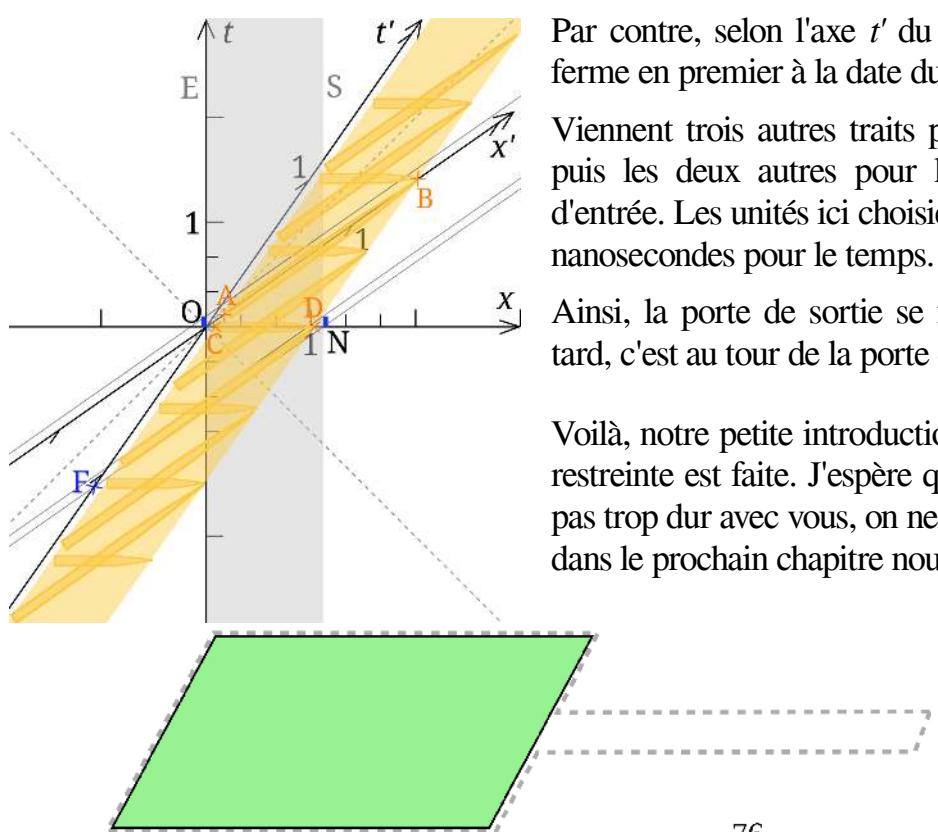
C'est un peu chargé, mais tout y est ! Tout d'abord, nous avons choisi le référentiel du

tunnel comme référence (axes  $t$  et  $x$ ). L'astéroïde au repos est représenté par sa surface d'univers avec une bande grise verticale. Le bord de gauche E est la ligne d'univers de l'entrée, et le bord de droite S est celle de la sortie. Les événements O et N correspondent à la fermeture des portes pendant 30 nanosecondes selon  $t$ .

La bande orange inclinée correspond à la surface d'univers du vaisseau.

Par rapport au tunnel d'une longueur ON de 100m, le vaisseau a une longueur CD de 87m. Par rapport au vaisseau d'une longueur AB de 120m, le tunnel a une longueur relative de 71m.

Dans la chronologie, nous avons sept positions pour chaque point de vue, qui sont toutes représentées sur le diagramme. Les portes se ferment bien simultanément du point de vue du tunnel : les événements O et N se produisent au même temps  $t$ .



Par contre, selon l'axe  $t'$  du temps du vaisseau la porte de sortie se ferme en premier à la date du point F.

Viennent trois autres traits parallèles, le suivant pour son ouverture, puis les deux autres pour la fermeture et l'ouverture de la porte d'entrée. Les unités ici choisies, sont 90 mètres pour la distance et 300 nanosecondes pour le temps.

Ainsi, la porte de sortie se ferme pendant 42 ns, puis, 285 ns plus tard, c'est au tour de la porte d'entrée de se fermer pendant 42 ns.

Voilà, notre petite introduction à cette fameuse théorie de la relativité restreinte est faite. J'espère que ça n'aura pas été trop ardu. Ne soyez pas trop dur avec vous, on ne capte jamais tout d'un coup. Nous allons dans le prochain chapitre nous intéresser à notre voyage plus en détail.

Nous voilà maintenant outillés pour parler du voyage de manière plus réaliste. En effet, en se déplaçant vers l'étoile Proxima du Centaure avec une accélération d'un  $g$ , nous dépassons, dans une approche classique, la vitesse de la lumière dans le vide. Reprenons donc l'étude du mouvement dans le cadre de la relativité restreinte. Nous voulons connaître la durée du voyage autant pour le cosmonaute que pour ceux restés sur Terre. Nous nous sommes concentrés dans le chapitre précédent sur les mouvements à vitesse constante. Nous allons maintenant étudier les mouvements à accélération constante. Voyons ce qui se passe tout d'abord en mécanique de Newton, cas particulier de la relativité restreinte pour les faibles vitesses.

Une accélération constante correspond à une augmentation à rythme constant de la vitesse :

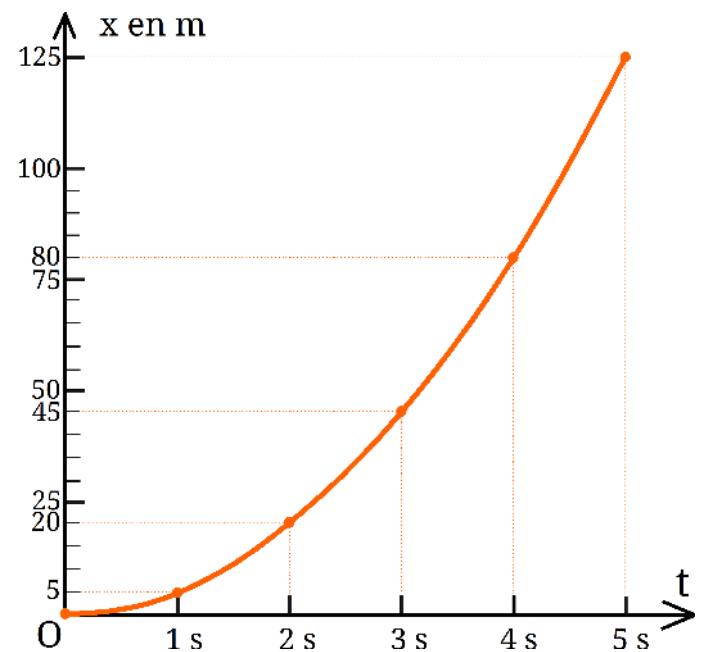
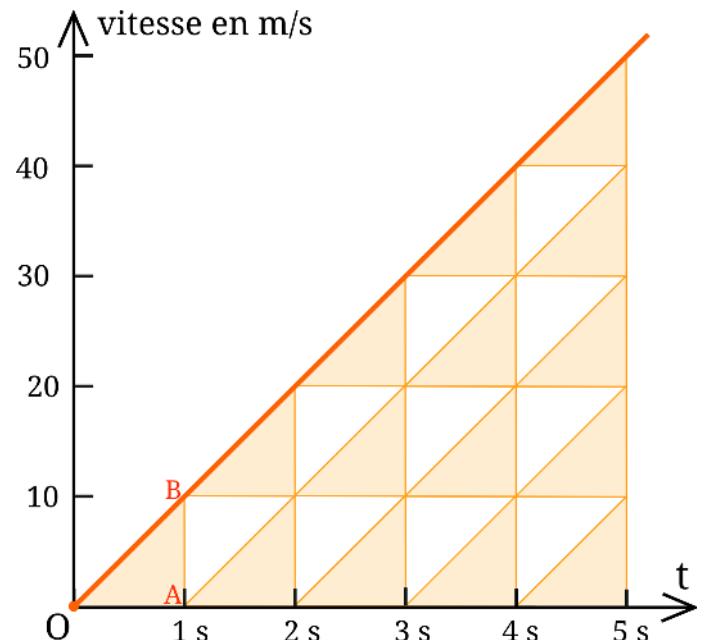
Dans le cas de notre vaisseau, la vitesse augmente de 10 m/s toutes les secondes. La même accélération que celle d'un objet lâché en chute libre d'en haut d'une tour. La vitesse de 10 m/s correspond aussi à 36 km/h.

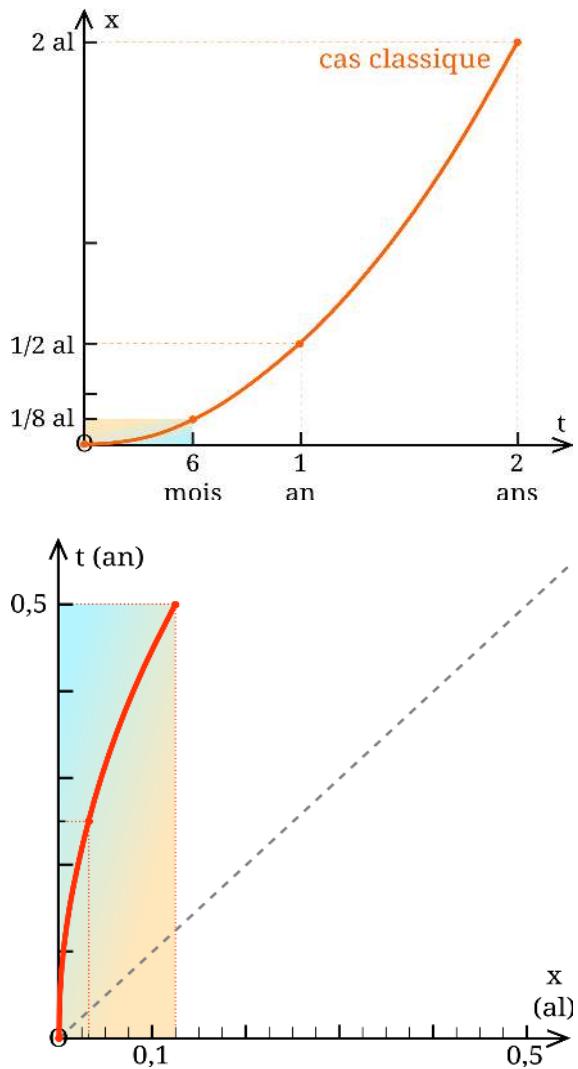
Quelle distance aura alors parcouru l'objet la première seconde ?

La première seconde l'objet verra régulièrement augmenter sa vitesse de zéro à 10 m/s. Donc sa vitesse vaudra en moyenne 5 m/s, ce qui donne une distance parcourue de 5 m. Ce qui correspond exactement à la surface du triangle OAB. La distance parcourue correspond à l'aire sous la courbe et en comptant simplement les triangles nous en déduisons la distance parcourue à chaque instant. Après deux secondes, nous avons au total quatre triangles depuis le départ, soit une distance de 20 mètres. Nous continuons ainsi et on obtient la courbe de la distance en fonction du temps. Cette courbe particulière s'appelle une branche de parabole. La fusée aura parcouru 125 mètres en 5 secondes. Aussi un boulet lâché d'une tour de 125 m de hauteur touchera le sol après cinq secondes à la vitesse de 180 km/h.

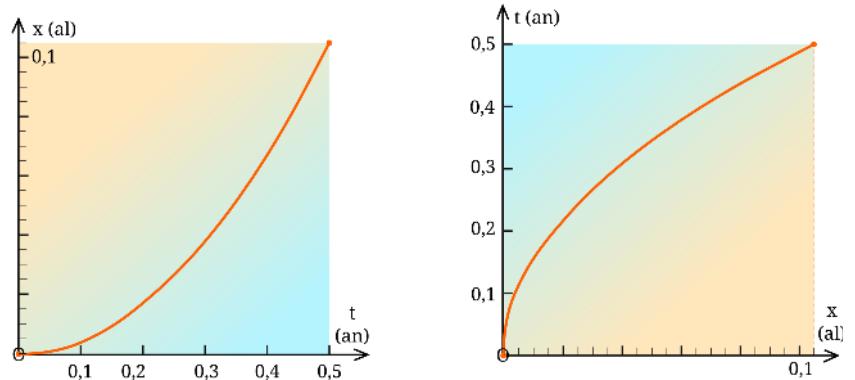
Cette courbe correspond bien à la réalité, car le vaisseau a, après 5 secondes, une vitesse de 180 km/h très inférieure à la vitesse de la lumière. Nous allons considérer que cette courbe reste correcte même après 6 mois. En fait, la différence commence alors à se faire sentir car la vitesse vaut déjà la moitié de la vitesse de la lumière. Mais cela va simplifier les explications et ce sera une bonne approximation.

En un an, on atteint en mécanique classique, une vitesse égale à la vitesse de la lumière, d'où une distance parcourue de la moitié d'une année-lumière en un an. En six mois, un huitième d'année-lumière est parcouru. À accélération constante quand la durée double la distance quadruple.





Le diagramme de Minkowski est simplement obtenu en retournant la courbe précédente. En effet, il suffit d'inverser les axes  $x$  et  $t$ . Nous avons tracé le diagramme zoomé sur le début, avec pour l'axe des  $x$  une distance maximale d'un huitième d'année-lumière et pour l'axe des temps  $t$  un maximum de 6 mois, soit une demi-année. La courbe garde la même forme parabolique :



À gauche, nous avons placé ce début de ligne d'univers. Nous avons contracté l'échelle horizontale d'un facteur cinq pour avoir la même échelle de temps et de distance. Pour connaître les durées du voyage, il faut construire toute la ligne. Nous savons que l'accélération s'arrête à mi-parcours lorsque le vaisseau se retourne. Il se met à décélérer à 2 années-lumière de distance.

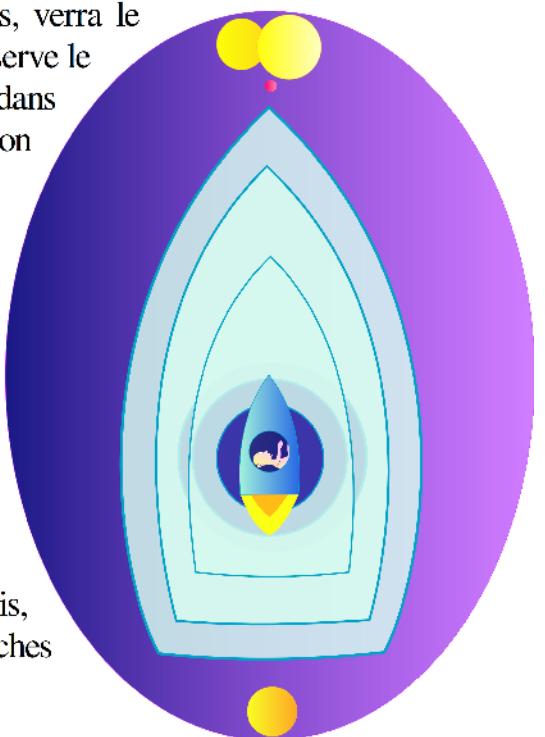
Imaginons qu'après six mois de voyage le vaisseau passe au niveau d'un vaisseau qui a la même vitesse que lui. Cet autre vaisseau a les réacteurs éteints et avance donc à vitesse constante, le référentiel de cet autre vaisseau est donc galiléen. Quand ils passent au même niveau, ils sont un instant immobiles l'un par rapport à l'autre.

Ensuite le vaisseau inertiel, que nous appelons aussi vaisseau relais, verra le vaisseau en route pour Proxima accélérer constamment à un  $g$ . S'il observe le mouvement de notre vaisseau, il pourra tracer sa trajectoire dans l'approximation des faibles vitesses durant six mois vécus dans son référentiel propre.

Nous savons placer les coordonnées d'un référentiel inertiel à l'autre. Nous avons ainsi la trajectoire pour six mois de référentiel terrestre, plus, six mois propres au référentiel du vaisseau inertiel. On continue ainsi comme dans un emboîtement successif de poupées russes avec de nouveaux vaisseaux inertIELS.

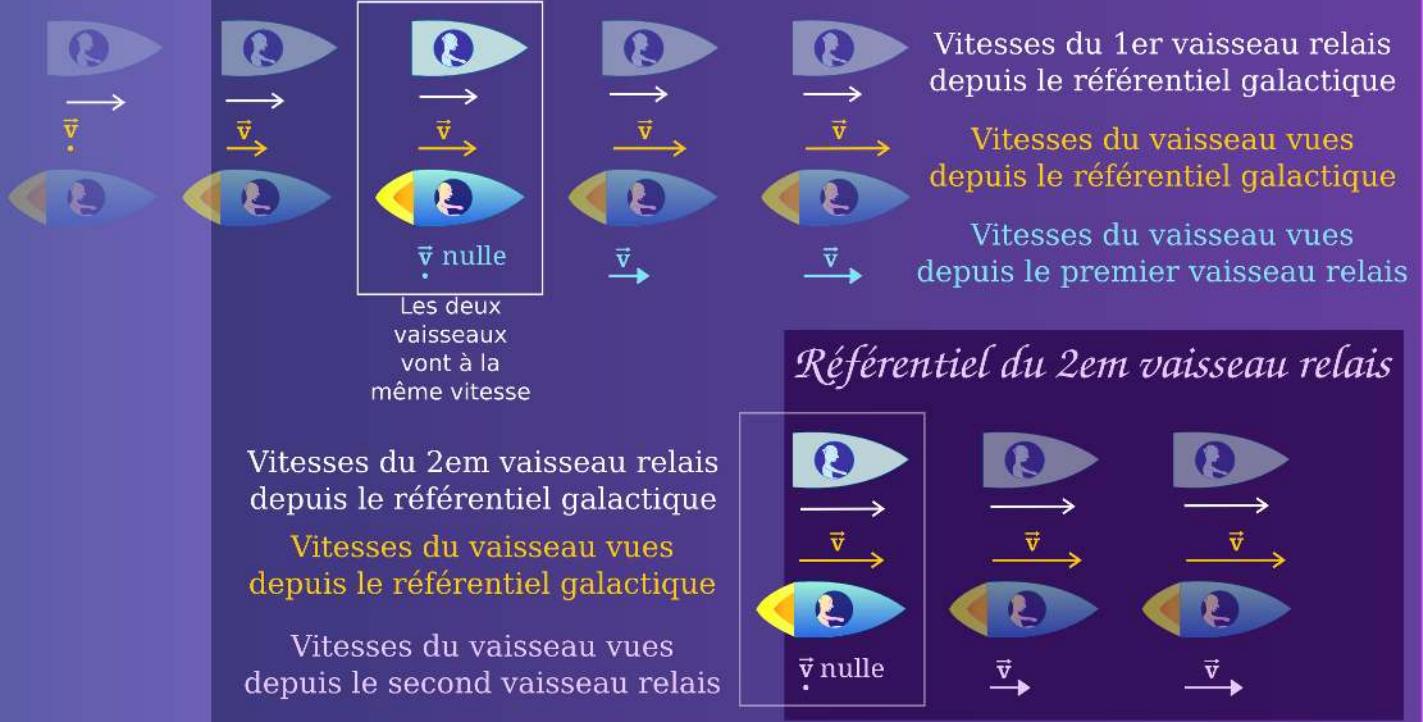
Pour atteindre ainsi le point de retournement, il nous faut trois vaisseaux relais. Le point de retournement donne directement le temps de voyage vu depuis la Terre.

Nous avons détaillé page suivante les deux premiers passages de relais, et, sur les pages 81 et 82, nous avons explicité l'ensemble des démarches pour tracer la ligne dans un diagramme de Minkowski.



# Référentiel Galactique

## Référentiel du premier vaisseau relais



En partant du référentiel de départ avec des axes perpendiculaires, nous obtenons de nouveaux référentiels emboîtés chaque fois plus aplatis par l'effet de perspective spatio-temporel.

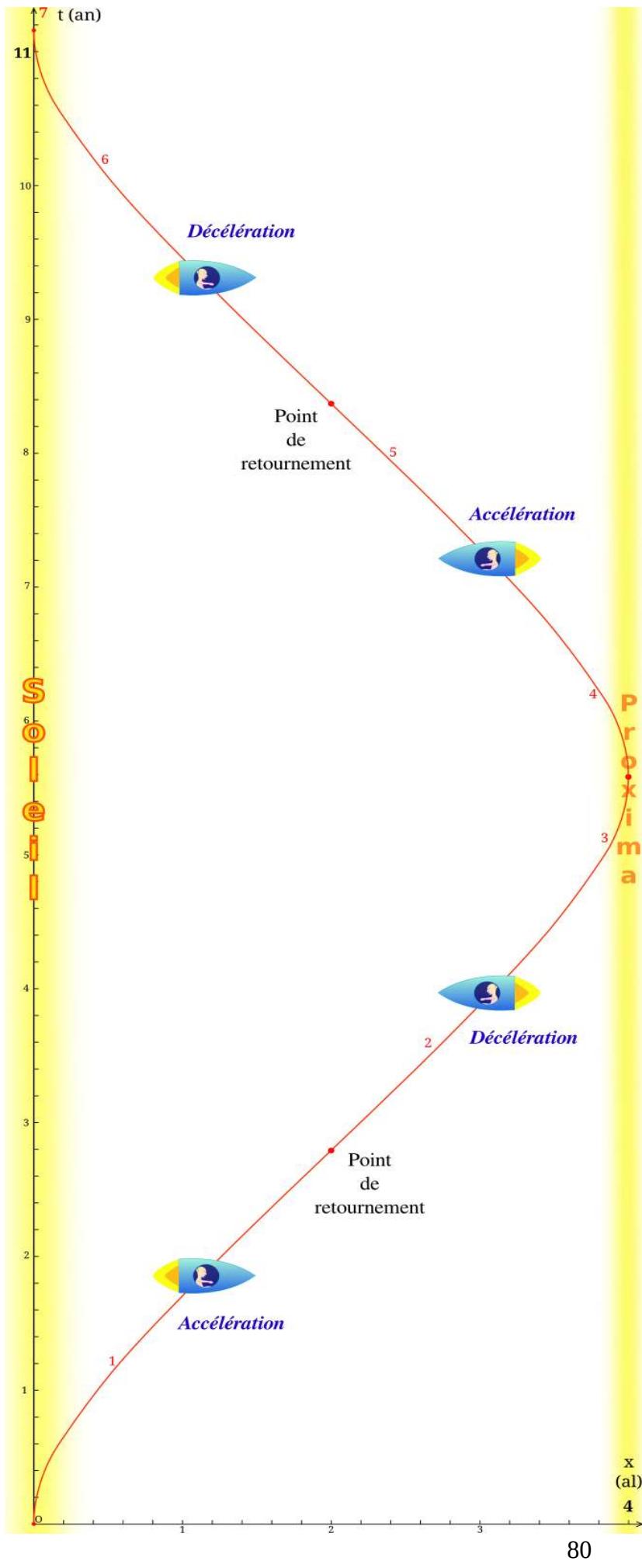
En reportant patiemment au compas les différents temps propres, nous obtenons la ligne d'univers jusqu'au point de retournement. La ligne est découpée en cinq segments pour obtenir une évaluation des différents temps propres. En les ajoutant, nous avons le temps propre du départ de la Terre au point de retournement. Par symétrie il faut le même temps pour décélérer jusqu'à Proxima.

Les résultats sont encore plus précis avec un nouveau vaisseau relais tous les trois mois, on retrouve bien, alors, une durée d'aller-retour de 11 ans vu depuis la Terre, et de 7 ans pour le voyageur. Il sera 4 ans plus jeune que les personnes qu'il a quittées sept ans auparavant.

Ainsi se termine ce premier tome. Livre consacré à l'étude de la structure particulière de l'espace et du temps. Nous avons des temps différents pour chacun et nous avons vu comment, dans une approche géométrique, nous pouvons les évaluer.

Le voyage dure donc 7 ans. Une durée qui n'est pas excessive en regard de celle d'une vie humaine. Nous pourrions de plus imaginer des alternatives pour diminuer la durée de ce voyage.

Va se poser maintenant la question de la propulsion du vaisseau. Nous verrons cela dans le prochain livre. Et aussi la question cruciale du carburant. Nous montrerons que l'anti-matière est le meilleur candidat. Comment fabriquer ou collecter l'anti-matière ? Comment la stocker ?



Nous qualifierons de *luminique* un carburant permettant d'atteindre des vitesses proches de la vitesse de la lumière. Nous appellerons ce carburant *luminique* le *proximum*. Nous ferons une proposition. Seule l'expérience pourra permettre de vérifier la stabilité de ce carburant.

Nous expliquerons les caractéristiques nécessaires du vaisseau. Par exemple, quelle devra être sa taille ?

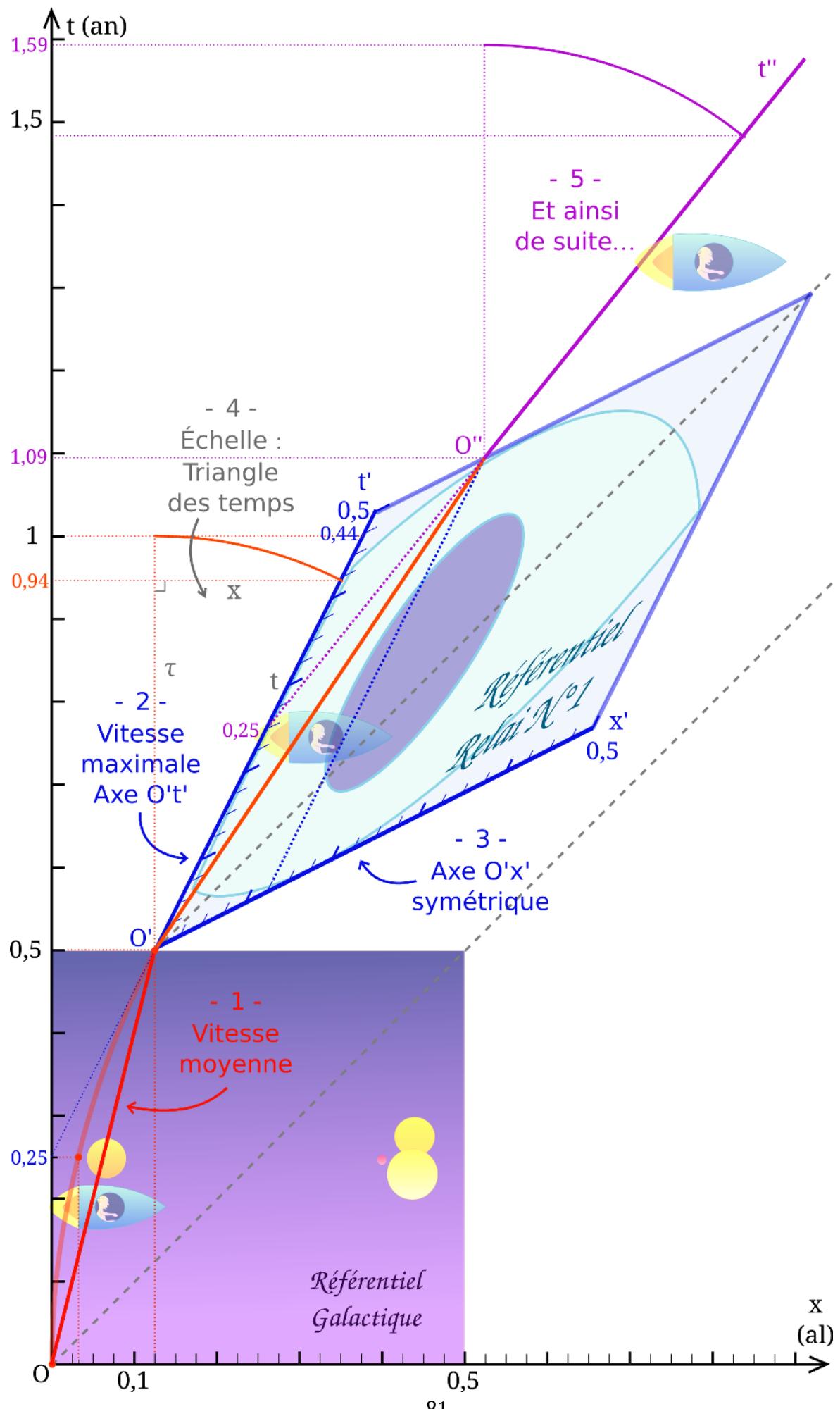
Cela peut paraître un peu fou, mais ce projet est pris au sérieux. Et à y bien penser, bien des technologies fonctionnelles aujourd'hui, et qui sont à la base de notre nouvelle société, n'étaient pas envisagées hier. Nous essayons de deviner de quoi le futur sera fait avec les connaissances du passé. Fort heureusement, il y a des découvertes et des surprises qui rendent le futur difficile à prédire.

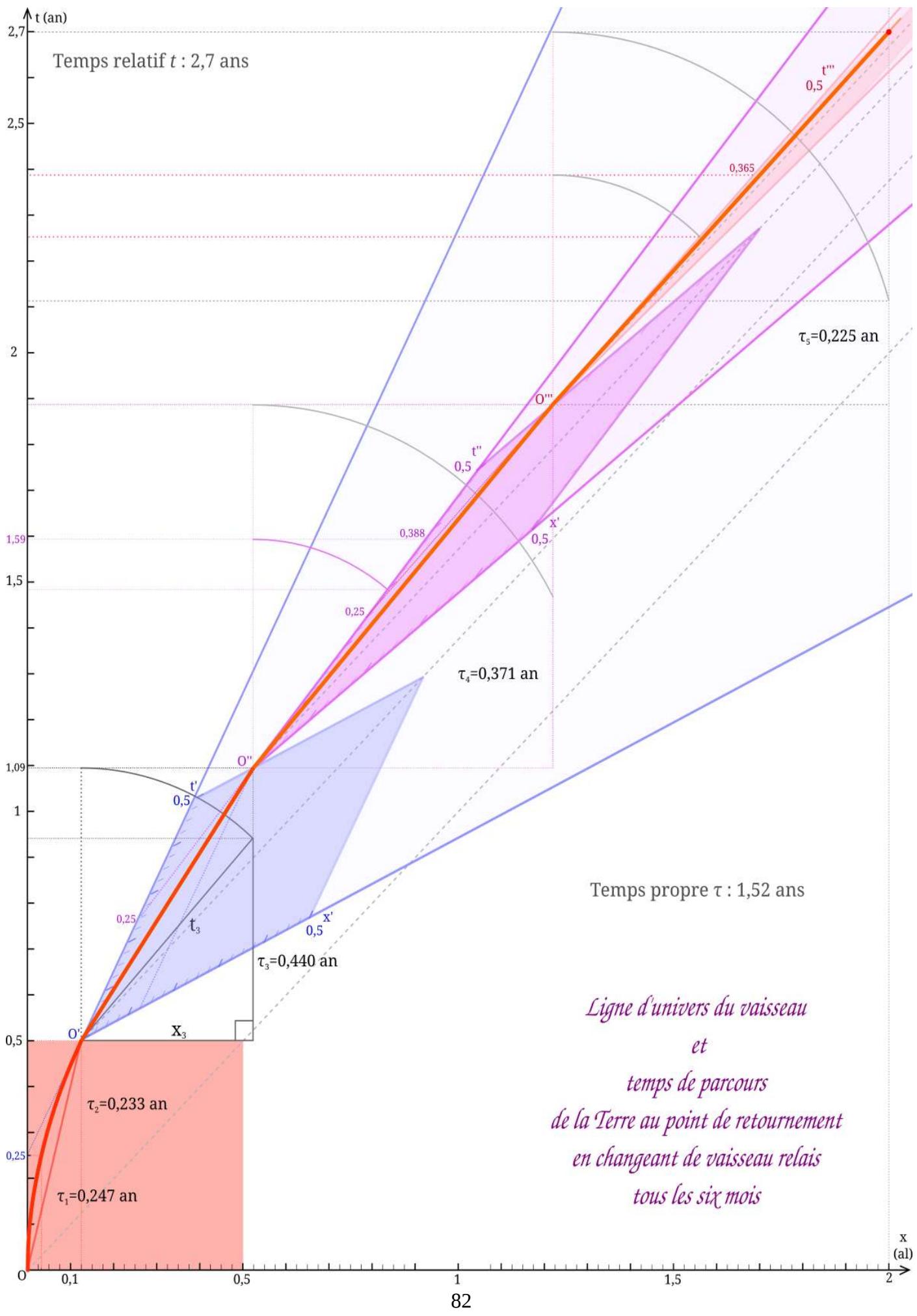
Et même, si une recherche mène à ce qui semble être un échec, bien souvent elle ouvre de nouvelles portes vers des découvertes que l'on n'avait même pas considérées.

Difficile de dire à quelle date un humain posera le pied sur la planète *Proxima b*, mais on y travaille !

“Ils ne savaient pas que c’était impossible alors ils l’ont fait.”

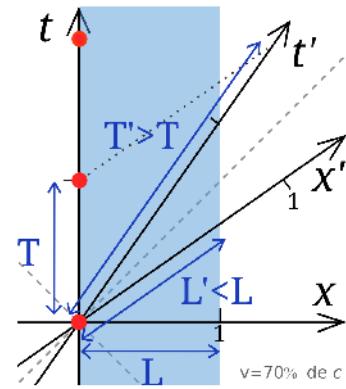
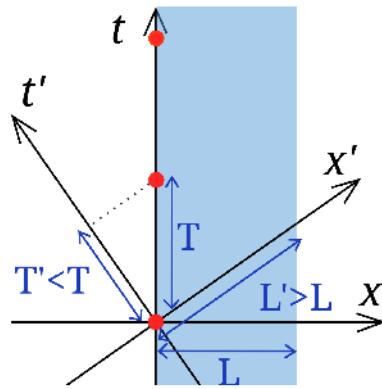
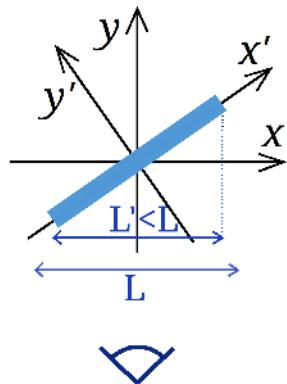
Mark Twain





Quelques compléments suivent pour ceux qui veulent approfondir la relativité restreinte. Nous verrons un autre type de diagramme permettant de représenter les lignes d'univers, puis nous répondrons à quelques questions classiques.

Nous ne pouvons pas comparer directement le changement de référentiel en relativité restreinte avec une rotation spatiale. Nous avions expliqué que la dimension du temps ne se comportait pas comme une dimension spatiale. Sinon l'espace-temps serait un espace dit euclidien à 4 dimensions, comme l'espace en est un à trois dimensions. Un changement de référentiel, par exemple de la Terre à une fusée à vitesse constante, serait une rotation spatio-temporelle d'axes  $(t,x)$  en  $(t',x')$ . Le repère bascule, tourne autour de l'origine, tout en gardant les axes perpendiculaires entre eux. Il y aurait dilatation des longueurs et contraction du temps, tout le contraire de ce qui est observé, et même en inversant les effets ce ne serait pas de la bonne quantité. Il n'y aurait plus de vitesse limite et plus de flèche du temps ... C'est pour cela que nous avons, dans ce livre, considéré la vraie nature du temps, telle explicitée par le Triangle des temps et surtout telle observée expérimentalement. L'espace-temps est dit minkowskien, du nom de la personne qui a inventé les diagrammes.



Rotation spatiale. La longueur de l'objet, par effet de perspective, semble plus petite. Sa longueur réelle est la valeur maximale. On peut dire qu'il y a contraction des longueurs, mais ça n'intervient pas sur l'état physique de la règle, ce n'est qu'une question d'angle de vue.

Cas théorique où le temps serait euclidien. Rotation spatio-pseudo-temporelle qui correspondrait du passage d'un référentiel d'inertie à un autre. La règle serait vue plus grande que dans son référentiel propre, ce qui est contraire à l'observation.

Cas réel d'effet de perspective spatio-temporel. Clairement ce n'est pas une rotation. Nous retrouvons bien la contraction des longueurs expérimentale avec la bonne valeur (unités différentes). Comme pour une pure rotation spatiale la longueur est contractée, mais pas de la même manière.

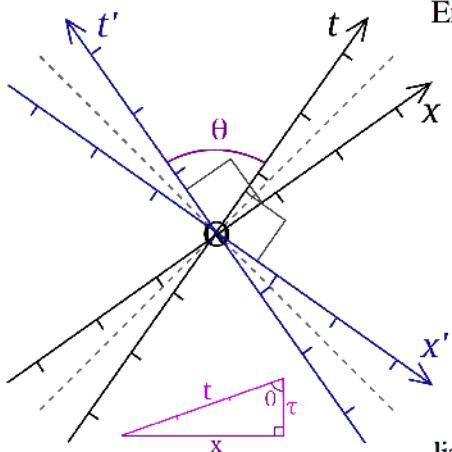
### Les diagrammes de Lorentz

Comment représenter un changement de référentiel ? Nous avions utilisé pour ce faire les diagrammes de Minkowski. Ceux-ci sont bien pratiques, mais nous obtenions pour  $x'$  et  $t'$  des axes qui ne sont plus perpendiculaires entre eux, et qui possèdent des unités différentes, ce qui rend la lecture un peu longue. Nous allons nous intéresser aux diagrammes de Lorentz qui ne présentent pas ces défauts. Les deux référentiels seront symétriques, il n'y aura pas un référentiel "au repos" avec un statut particulier. Par contre, nous ne pourrons pas étudier plus de deux référentiels à la fois.

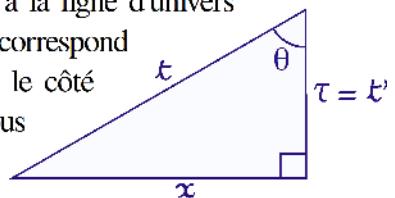
En fait, il existe une rotation d'espace-temps, si l'on mélange les axes des deux référentiels ! Quand on passe de  $(x',t)$  à  $(x,t)$  on a vraiment une rotation. Nous retrouvons tous les résultats de la relativité restreinte en utilisant cette propriété. C'est la méthode des diagrammes de Lorentz. C'est une méthode exacte qui permet même de trouver les valeurs numériques : ça vaut vraiment la peine d'essayer de comprendre comment ça marche ! De plus, cela nous permettra par comparaison de mieux comprendre les diagrammes de Minkowski. En page 72 nous lisions les coordonnées spatio-temporelles d'un événement  $E$ , une explosion, depuis deux référentiels  $R$  et  $R'$ . Nous nous déplaçons parallèlement aux axes, par exemple pour lire le temps  $t'$  de  $E$ , nous nous déplaçons parallèlement à l'axe  $x'$ . Pour lire  $x$  et  $t$ , ça n'avait pas d'importance, car les axes étant

perpendiculaires, se déplacer parallèle ou perpendiculaire revenait au même. Dans un diagramme de Lorentz, on se déplace en étant *perpendiculaire* à l'axe dont on veut lire la valeur.

Dans le diagramme de Minkowski nous avions dû adapter les unités, par contre, dans un diagramme de Lorentz, la lecture est directe, les unités sont les mêmes. L'angle de rotation entre les deux repères est celui entre  $t$  et  $\tau$  dans le Triangle des Temps.

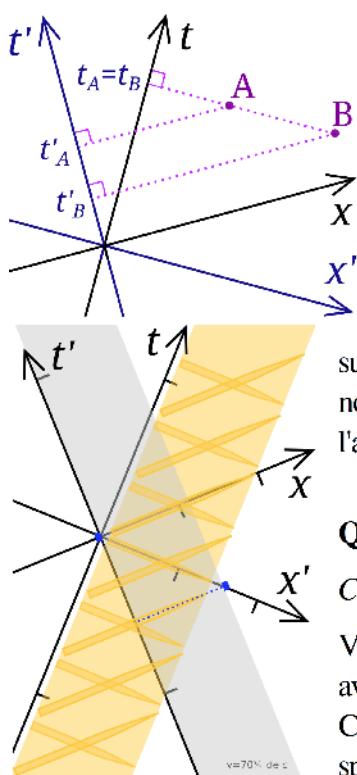


En effet, l'axe  $t'$  correspond à  $x'$  toujours nul, et donc à la ligne d'univers d'un objet immobile dans  $R'$ . C'est pour cela que  $t'$  correspond alors à  $\tau$ . À gauche, l'exemple où  $\theta$  vaut 3. Avec le côté pour  $t$  trois fois plus long que celui pour  $\tau$ , nous trouvons un angle  $\theta$  d'environ 70 degrés. Ainsi par rapport à la verticale, les axes pour  $t$  et  $t'$  sont à droite ou à gauche écartés de 35°. Sur le diagramme à droite nous reprenons le cas de Leïla qui voyage à la moitié de la vitesse de la lumière. Dans ce cas l'angle  $\theta$  vaut environ 30° et les coordonnées de l'explosion se lisent aisément. C'est bien plus simple qu'en

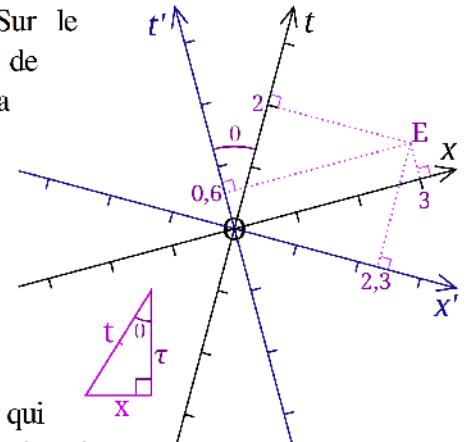


Minkowski, l'angle  $\theta$  seul suffit pour construire le diagramme de Lorentz.

Nous retrouvons la relativité de la simultanéité : les événements A et B sont simultanés dans  $R$  mais pas dans  $R'$ .



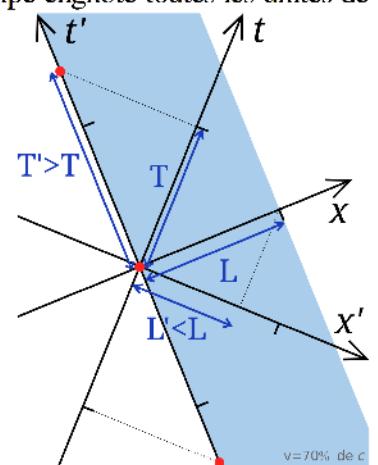
Reprendons le cas de la règle avec l'extrême gauche qui clignote. La règle est immobile dans  $R$  et les bords sont donnés par les deux droites perpendiculaires à  $x$  (bande bleue). La lampe clignote toutes les unités de temps, on projette perpendiculairement à  $t$  pour trouver les positions. Pour mesurer la longueur d'un objet, il faut déterminer les positions des deux extrémités au même instant. Pour mesurer la longueur dans  $R'$ , on se place par exemple à l'instant  $t'$  nul, cela correspond à l'axe des  $x$ . On a ainsi les deux extrémités de la règle dans  $R'$ , que l'on projette ensuite sur  $x'$ . Pour compléter l'explication des diagrammes de Lorentz, nous avons aussi représenté l'expérience du vaisseau qui traverse l'astéroïde page 76, et celle des jumeaux de la page 70.



### Questions et confusions classiques

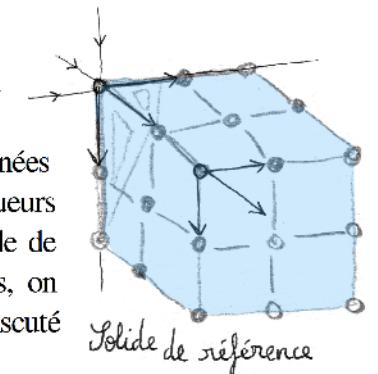
*Comment définir un référentiel en relativité restreinte ?*

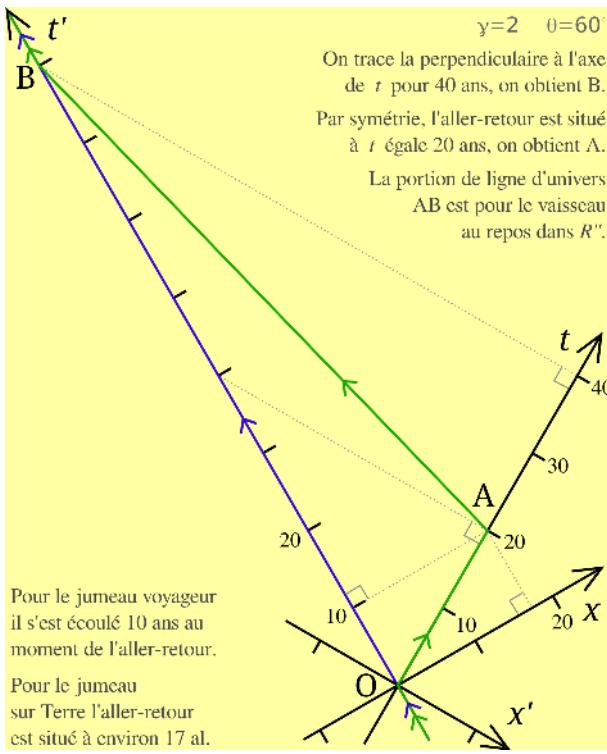
Voyons comment est défini un référentiel et pourquoi nous en avons besoin. Un référentiel est associé à un solide de référence. C'est ce solide qui permet de repérer un point par trois coordonnées spatiales, par exemple, en reportant des tiges rigides de longueurs connues selon trois directions perpendiculaires entre elles. En relativité restreinte, on procède de même qu'en mécanique classique pour déterminer la position d'un point ; pour les dates, on procède différemment en utilisant un cristal d'horloges synchronisées comme nous en avons discuté précédemment.



*Comment trouver un référentiel inertiel ?*

À partir du moment où vous avez un référentiel inertiel, vous les avez tous en considérant tous les référentiels en translation rectiligne uniforme par rapport à ce premier. C'est fondamental d'en trouver un, mais à la fois la manière de les caractériser

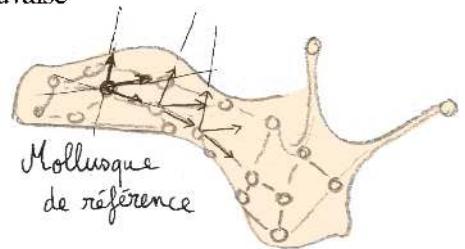




reste assez étrange. Il y a une sorte de définition cyclique : ce sont les référentiels où sont vérifiés les lois et les principes précédents ; d'autres postulent leur existence. Nous aurons une discussion dans un prochain tome à ce sujet.

### *Peut-on définir un solide en relativité restreinte ?*

Oui. On entend parfois que l'on ne peut pas définir de solide en relativité restreinte. Deux sources de confusions possibles : il y a confusion avec la relativité générale où l'on considère des référentiels non inertiels, c'est à dire accélérés, et, effectivement, on utilise un corps de référence non rigide ; ou bien, il y a une mauvaise compréhension du phénomène de contraction des longueurs en relativité restreinte, cette contraction n'est pas réelle, et n'est qu'un effet de perspective spatio-temporel. La contraction intervient quand on observe ce qui se passe dans un référentiel depuis un autre, mais dans un référentiel donné il n'y a pas de



problème pour qu'un solide existe. De plus, même dans deux cas particuliers de référentiels non inertiels, le critère de rigidité est satisfait et nous pouvons définir des solides : les référentiels uniformément accélérés, qui nous intéressent particulièrement pour notre voyage pour Proxima, et les référentiels en rotation uniforme <sup>réf.vii p19</sup>.

*"La fiction de corps de référence rigide est [...] inutile dans la théorie de la relativité générale. La marche des horloges est également influencée par les champs de gravitation, de telle sorte qu'une définition physique directe du temps à l'aide d'horloges n'a pas du tout le même degré de précision que dans la théorie de la relativité restreinte. [...] Ce corps de référence non-rigide, qu'on pourrait, non sans raison, désigner sous le nom de « mollusque de référence », est en substance équivalent à un système quelconque de coordonnées à quatre dimensions de Gauss."*

A. Einstein dans son livre *La relativité*, chapitre *Formulation exacte du principe de relativité générale*.

### *Pouvons-nous étudier les mouvements accélérés en relativité restreinte ?*

Oui. Les principes énoncés par Galilée, les différentes lois de Newton et leur extension en relativité restreinte ne sont valables que dans des référentiels d'inertie. Néanmoins elles peuvent aussi être adaptées dans n'importe quel référentiel non inertiel dont on connaît le mouvement par rapport à un référentiel inertiel connu. Si, du fait de l'énoncé des lois dans des référentiels galiléens, on ne pouvait pas étudier les mouvements accélérés en relativité restreinte, on ne le pourrait pas non plus en mécanique de Newton, ce qui n'est bien sûr pas le cas.

Peut-être aussi une confusion avec la relativité générale et son principe d'équivalence. Les lois changent de forme dans un référentiel non inertiel et doivent être modifiées au cas par cas. Par exemple, en mécanique classique de nouvelles forces de changement de référentiel apparaissent alors, ce sont les forces d'inertie, comme la force de Coriolis qui permet d'expliquer le mouvement des ouragans. La relativité restreinte est un nouveau cadre cinématique où tous les mouvements peuvent être étudiés. L'observateur accéléré pourra ressentir de nouvelles forces d'inertie dans un espace-temps avec une métrique différente. La métrique définit le lien entre les durées et les déplacements d'un référentiel à l'autre. Le Triangle des Temps ne pourra plus être directement appliquée. Comme pour l'expérience des jumeaux, où nous pouvions parfaitement étudier le mouvement du jumeau voyageur accéléré depuis le référentiel galactique, mais nous ne pouvions simplement interpréter le mouvement depuis son vaisseau <sup>réf.ii p257</sup>. Pour le faire, il faut se placer dans d'autres structures d'espace-temps, qui peuvent rester plates, mais aussi parfois être courbes. Mais, d'une part, on peut continuer l'étude depuis un référentiel inertiel, et d'autre part, travailler en espace-temps courbe n'est pas faire de la relativité générale. Ce qui est propre à la relativité générale c'est le principe d'équivalence et l'équation d'Einstein qui lie la courbure à la matière.

# Bibliographie / Sources

## Livres pour tous :

[1] *Galilée, Newton lus par Einstein*, Espace et relativité. Françoise Balibar

Une approche philosophique de la physique. Le commencement et la clef d'une compréhension véritable ! L'auteure reste en retrait pour laisser parler et mettre en scène un échange entre Galilée, Newton et Einstein. Leurs écrits, dans la traduction la mieux adaptée, sont la base du livre. Une approche historique et à la fois si contemporaine et présente. Nous prenons conscience à quel point les bouleversements philosophiques apportés ne font encore qu'effleurer la conscience de l'humain moderne. Ils ont semé les fermentes de développements encore à venir.

[2] *La relativité*. Albert Einstein. Ouvrage de référence. Clair et agréable à lire.

[3] *Et si le temps n'existe pas ?* Carlo Rovelli. Un ouvrage vivant, l'histoire d'une vie et de la physique des boucles quantiques. Un projet, alternatif à celui des cordes, pour unifier la gravitation avec la mécanique quantique.

[4] *L'univers a-t-il une forme ?* Roland Lehoucq. Une approche topologique de l'espace-temps.

[5] (en) *Geometry, relativity and the fourth dimension*. Rudolf v. B. Rucker. Bienvenue à FlatLand !

## Livres universitaires

Pour un niveau d'entrée minimal, déjà parfaitement connaître et maîtriser les notions en mathématiques et sciences physiques du lycée, pour ensuite se familiariser avec l'enseignement universitaire et plus particulièrement celui des classes préparatoires scientifiques qui disposent d'ouvrages pédagogiques complets avec de nombreux exercices d'entraînement corrigés (math sup).

[i] *Relativité* M.Boratav R.Kerner. Lecture agréable en compagnie d'Achille et de la Tortue !

[ii] *Relativité restreinte. Bases et applications*. Claude Semay Bernard Silvestre-Brac. Cours et exercices corrigés. Ouvrage complet qui insiste sur les voyages spatiaux.

[iii] *Introduction à la relativité restreinte*. Jean Hladik Michel Chrysos.

[iv] *Relativité restreinte*. Yvan Simon. 1971.

[v] *Relativité. Problèmes résolus*. Hubert Lumbroso. 1979.

[vi] *Relativité générale. Cours et exercices corrigés*. Aurélien Barrau et Julien Grain. Approche moderne de la relativité restreinte en introduction. Pour approfondir votre connaissance; de la restreinte, il peut être bon d'avoir quelques notions de générale pour ne pas mélanger les deux.

## Source web :

[vii] *L'espace-temps de Minkowski*. Nathalie Deruelle. web. pdf.

Source en copie dans [www.incertitudes.fr/relat/](http://www.incertitudes.fr/relat/)

[viii] *De l'électrodynamique des corps en mouvement*. Albert Einstein. 1905. Traduction française : [classiques.uqac.ca/classiques/einstein\\_albert/Electrodynamique/Electrodynamique.html](http://classiques.uqac.ca/classiques/einstein_albert/Electrodynamique/Electrodynamique.html)

## Jeu : Course pour Proxima

**But du jeu :** Au départ tous les joueurs ont 20 ans. Vous êtes sur Terre et vous devez aller à Proxima puis revenir. Celui qui revient le plus jeune a gagné !

**Nombre de joueurs :** 2 à 4 joueurs.

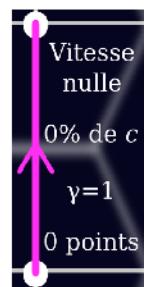
**Matériel de jeu :**

- plateau à découper et à assembler (pages 88, 90, 91 et 94 / autre option : utiliser les fichiers présents dans [www.incertitudes.fr/relat](http://www.incertitudes.fr/relat) pour photocopies).
- 36 cartes à découper (pages 95 et 96).
- 4 pions à découper pour les vaisseaux des joueurs (en bas de la page 95).
- 4 dés (un par joueur, non fourni).
- Jetons pour les points de jeunesse (non fourni).

**Présentation :** tout le monde part du point origine O. À chaque tour de jeu s'écoule une année galactique et votre vaisseau avance d'une case vers le haut du plateau. Plus votre vaisseau va vite, plus votre temps personnel est réduit, plus votre facteur de dilatation temporelle est grand, et plus vous serez jeune par rapport aux autres joueurs. À vitesse nulle votre temps est le temps galactique, votre facteur de dilatation gamma vaut 1 et vous avancez d'une case tout droit vers le haut. Si maintenant votre dilatation temporelle  $\gamma$  vaut 3, vous allez



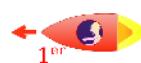
alors à 95% de la vitesse de la lumière et vous gagnez 8 points de jeunesse. Dans ce cas, en plus de vous déplacer d'une case vers le haut, vous vous déplacez sur le côté de 5 cases (vers la droite ou vers la gauche selon l'orientation de votre vaisseau).



Pour changer de vitesse il faut utiliser du carburant : ce sont des charges de Proximium ●. Chaque charge, vous fait vous déplacer d'une case de plus, ou de moins, sur le côté, et vous pouvez utiliser jusqu'à 3 charges à chaque tour. Les

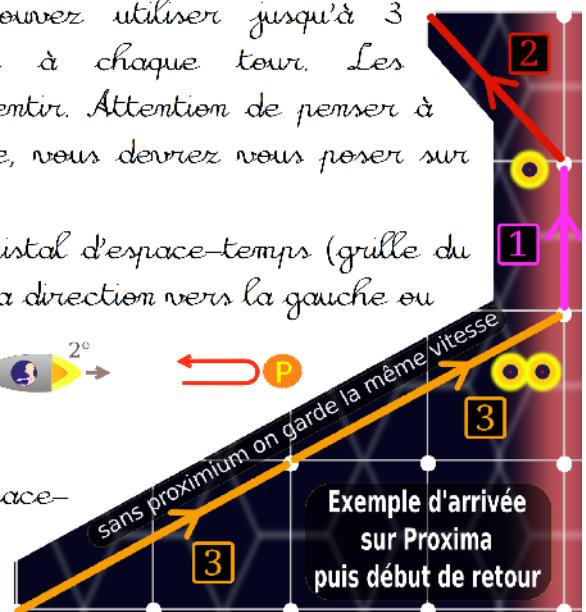
charges servent autant à prendre de la vitesse qu'à ralentir. Attention de penser à décélérer à temps, car, avant de repartir vers la Terre, nous devrons nous poser sur Proxima b avec une vitesse nulle !

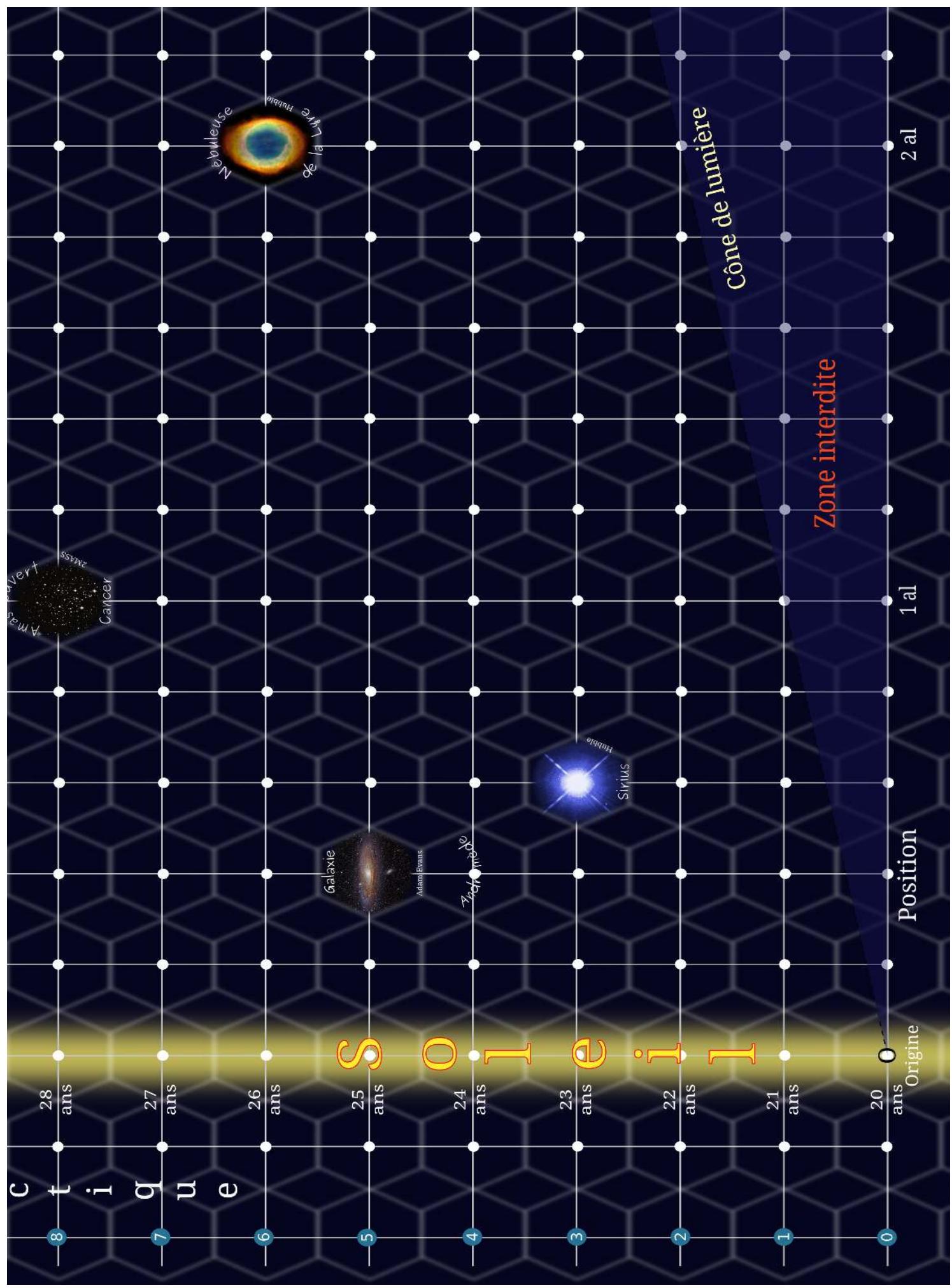
Un vaisseau a trois caractéristiques : sa position sur le cristal d'espace-temps (grille du plateau de jeu), son niveau de vitesse indiqué par le dé, et sa direction vers la gauche ou



la droite donné par l'orientation du pion.

Tous les vaisseaux sont sur une ligne, même si, dans l'espace-temps, ils semblent se déplacer sur un plan.





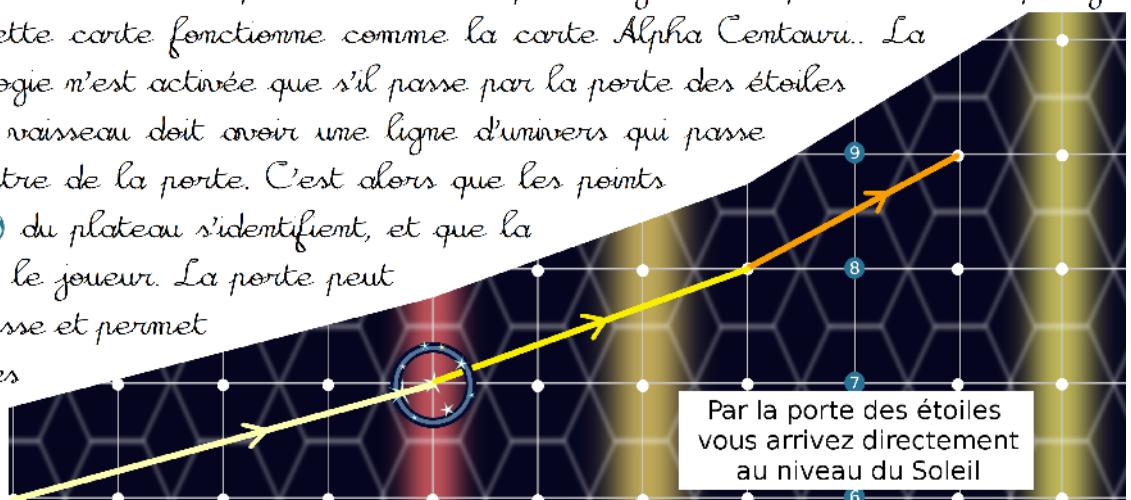
Au retour sur Terre, arrivée avec une vitesse nulle aussi, nous soustrayez au temps galactique d'arrivée vos points de jeunesse pour connaître votre âge (un mois par point).

**Préparation :** Au début, 6 cartes sont distribuées à chaque joueur et le reste constitue la pioche. Les joueurs tiennent leurs cartes en main et ne les montrent pas aux autres. À destination, Proxima ou Alpha du Centaure, vous tirerez à nouveau 6 cartes en plus de la pioche.

**Déroulement d'un tour de jeu :** Si carte **Action!** faire d'abord ce qui est demandé / Dans l'ordre que vous voulez, jouer différentes cartes et déplacer votre vaisseau / Adapter la valeur de votre dé  à votre vitesse et collecter les points de jeunesse / Tirage d'une nouvelle carte dans la pioche. Chaque carte utilisée, après avoir été montrée aux autres joueurs, est défaussee.

**Carte Alpha Centauri :** Si vous avez la carte Alpha Centauri en main, avant arrivée à Proxima, votre destination est changée. Quand un joueur la tire, il doit l'annoncer aux autres joueurs, il la garde dans son jeu. Il peut donc arriver qu'un joueur la lui pioche. Arrivé à Alpha Centauri il pose la carte devant lui.

 **Carte Porte des étoiles :** elle permet d'activer, pour le joueur la possédant, la topologie cylindrique. Cette carte fonctionne comme la carte Alpha Centauri. La nouvelle topologie n'est activée que s'il passe par la porte des étoiles de sa destination. Son vaisseau doit avoir une ligne d'univers qui passe exactement par le centre de la porte. C'est alors que les points d'espace-temps 0 à 16 du plateau s'identifient, et que la carte est posée devant le joueur. La porte peut être passée à toute vitesse et permet un raccourci par les bords.

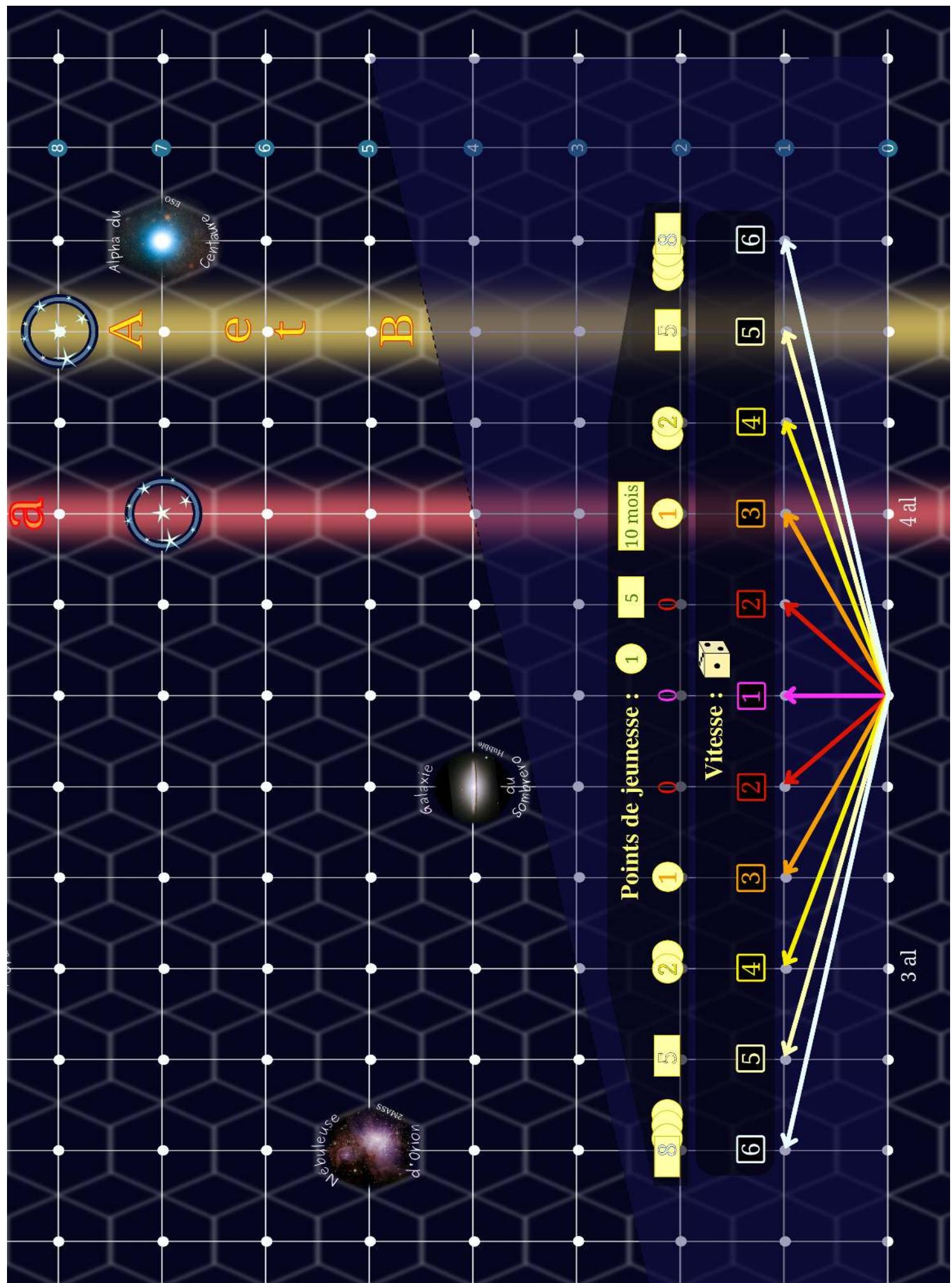


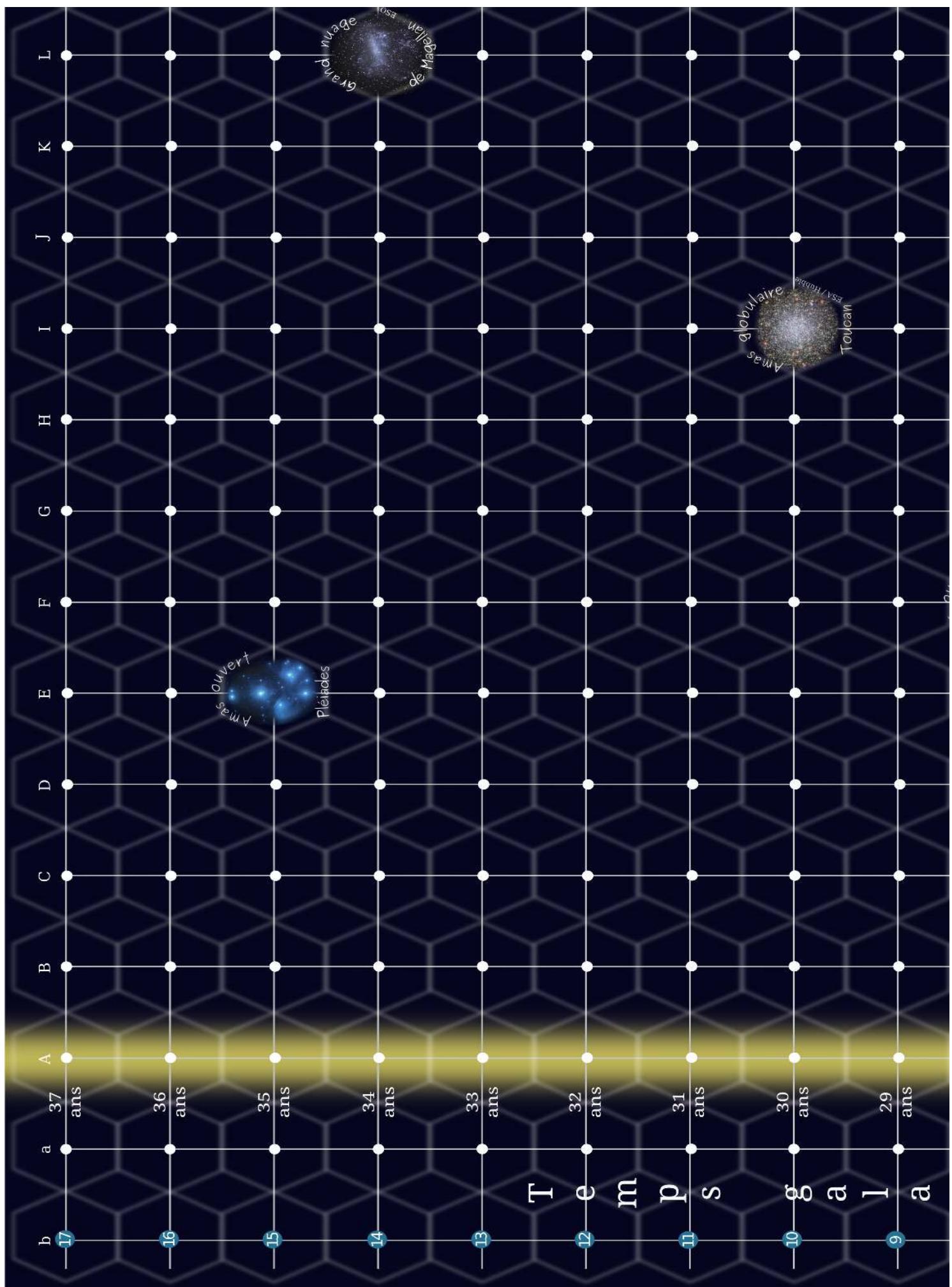
**Tirs :** les positions de tirs possibles sont indiquées par les flèches sur la carte. Notez que l'on peut tirer avant ou/et après le déplacement. Le tireur indique sa cible. Si la personne visée présente un bouclier, les deux cartes, tir et bouclier, sont remises sous la pioche. S'il y a plusieurs vaisseaux sur la case visée, le tireur désigne le vaisseau touché.



**Sortie de piste :** vous avez atteint un bord de la grille, que faire ? Ne vous inquiétez pas, les organisateurs ont tout prévu, vous vous retrouvez "collé" à vitesse nulle sur le bord droit, gauche ou avant. Sur les bords droit et gauche, vous pouvez repartir mais à chaque tour resté vous avez une pénalité de 12 points de jeunesse...

Bonne Course !





**Logiciels** : Tous les logiciels utilisés sont libres et gratuits.

Traitement de texte : LibreOffice.

Graphisme : Gimp (points), Inkscape (vectoriel) et Blender (3D).

Astronomie : Stellarium.

Système d'exploitation : Ubuntu.

**Droits** : Pour un meilleur partage de la connaissance et l'accès au plus grand nombre, le livre est en licence libre. Pour contacter l'auteur, courriel à ecrire@incertitudes.fr ou courrier à Boudiguen 29310 Querrien.

Ce livre est sous licence Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0.



Vous êtes libre de reproduire, distribuer et communiquer cette création au public et de modifier cette création . Selon les conditions suivantes :



**Attribution.** Vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits qui vous confère cette autorisation (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous soutiennent ou approuvent votre utilisation de l'œuvre).



**Pas d'Utilisation Commerciale.** Vous n'avez pas le droit d'utiliser cette création à des fins commerciales.

- A chaque réutilisation ou distribution de cette création, vous devez faire apparaître clairement au public les conditions contractuelles de sa mise à disposition.
- Chacune de ces conditions peut être levée si vous obtenez l'autorisation du titulaire des droits sur cette œuvre.
- Rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint le droit moral de l'auteur.

Date de parution et dépôt légal : novembre 2018 / ISBN 978-2-9549309-7-8 / Édition 4.

Quatrième édition : *Voyage pour Proxima. Comprendre Einstein plus vite que la lumière !* Troisième édition : *Voyage pour Proxima. Approachons la vitesse lumière !* Première et deuxième édition : *Voyage pour Proxima. La relativité en dessinant !*

Premier tome de *Voyage pour Proxima. Astronomie, dilatation du temps et antimatière.*

Merci à tous les relecteurs qui ont aidé à rendre accessible, à enrichir et à corriger le livre, merci aux testeurs qui ont aidé à rendre le jeu clair et ludique, merci aux scientifiques et enseignants qui ont validé le contenu : Yannick, Vincent, Thierry, Stéphane, Rémy, Reine, Régis, Philippe, Patrick, Marip, Marc, Magali, Lény, Kévin, Jérémie, Jean-No, Jean, Isa, Hélène, Grégoire, Érik, Éric, Corinne, Christian, Cédric, Cat, Brigitte, Arnaud, Anne, Anita, Alice et à tous les autres qui ont contribué à améliorer l'ouvrage.

## Les exoplanètes voisines de la Terre

À ce jour<sup>\*</sup> 3891 planètes ont été découvertes. Des dizaines de milliers d'autres d'ici quelques années le seront. Dans notre système solaire, sur huit planètes, deux sont dans la zone habitable.

L'eau a existé sous forme liquide sur Mars et peut-être des cellules de vie ont émergées avant que la planète ne perde sa magnétosphère puis son atmosphère.

Nous avons placé les plus proches exoplanètes connues. Pour l'instant nous en avons détecté 34 dans un rayon de 20 années-lumière.

Autant de mondes à découvrir et à habiter.

## Les étoiles les plus brillantes

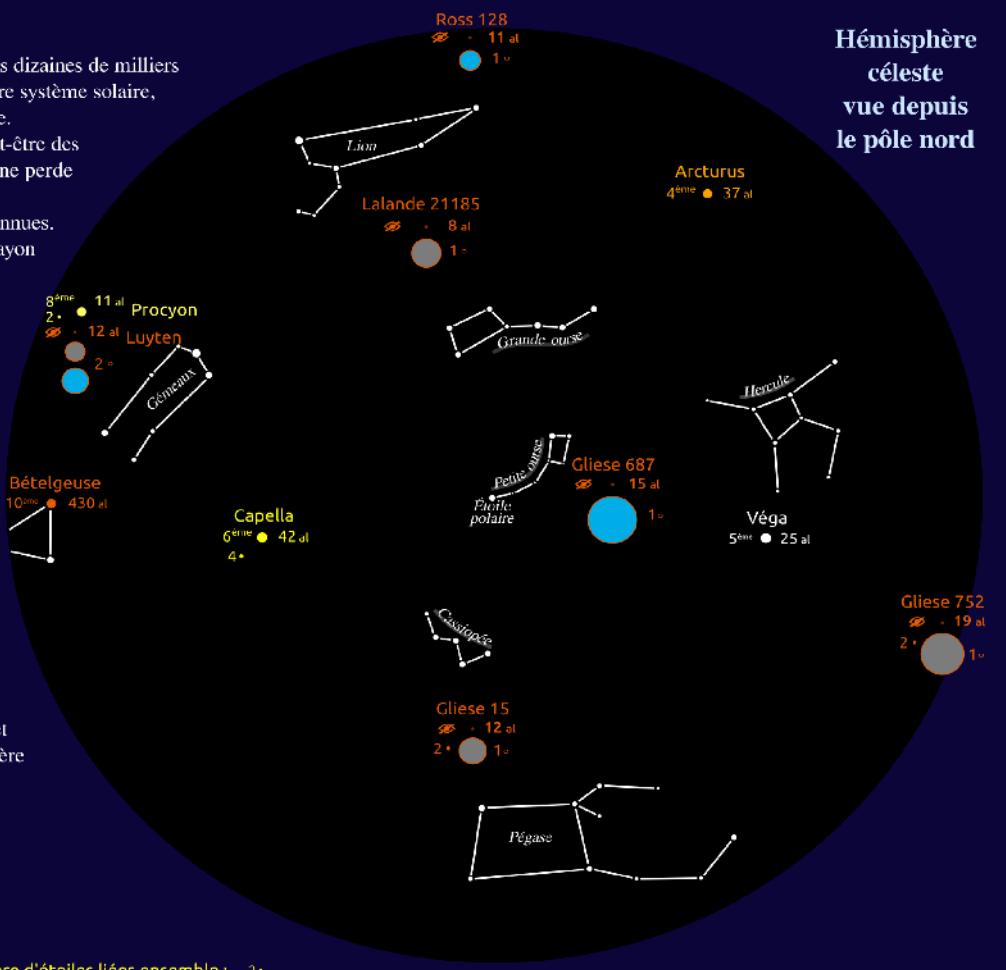
Pour se repérer dans le ciel étoilé, nous avons placé les dix étoiles les plus visibles.

Aussi quelques constellations pour aider le jeune astronome à se repérer.

Les étoiles sont comme des lampions placés sur une toile, la voûte céleste, tous à la même distance. En fait deux étoiles de même éclat, peuvent être, l'une, petite et proche, et l'autre, grosse et éloignée. Les étoiles ne sont pas posées à plat, mais disposées toute en profondeur, en relief, dans un volume à trois dimensions.

Encore plus étourdissant, l'étoile la plus proche nous apparaît telle qu'elle était il y a quatre ans, et d'une autre, plus lointaine, nous recevons sa lumière émise il y a plus de mille ans !

Le soir, lors d'une belle nuit étoilée, notre regard plonge dans l'espace et le temps.



### Étoiles :

étoile visible à l'œil nu : ● { rang : 3<sup>ème</sup>

nombre d'étoiles liées ensemble : 2\*

étoile invisible à l'œil nu : ☀

nombre d'exoplanètes : 3\*

distance en années-lumière : 4 al

Constellations :

### Couleurs des étoiles :

Température de surface autour de 3 000 degrés.

Par exemple les naines rouges.

comme les naines oranges

comme le Soleil

étoiles blanches

comme les géantes bleues.

Température de surface de 13 000 degrés.

### Exoplanètes :

planètes rocheuses : { ressemble à la Terre.  
Zone habitable

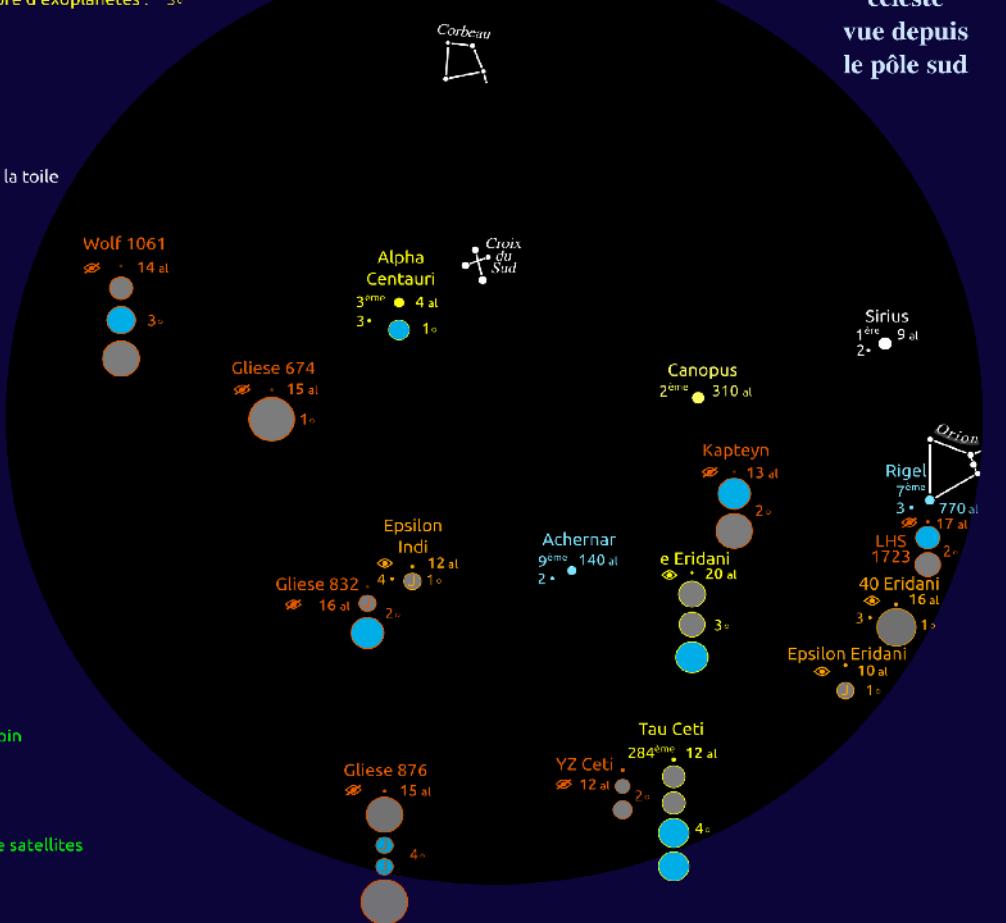
Zone habitable

semble trop près ou trop loin  
de son étoile

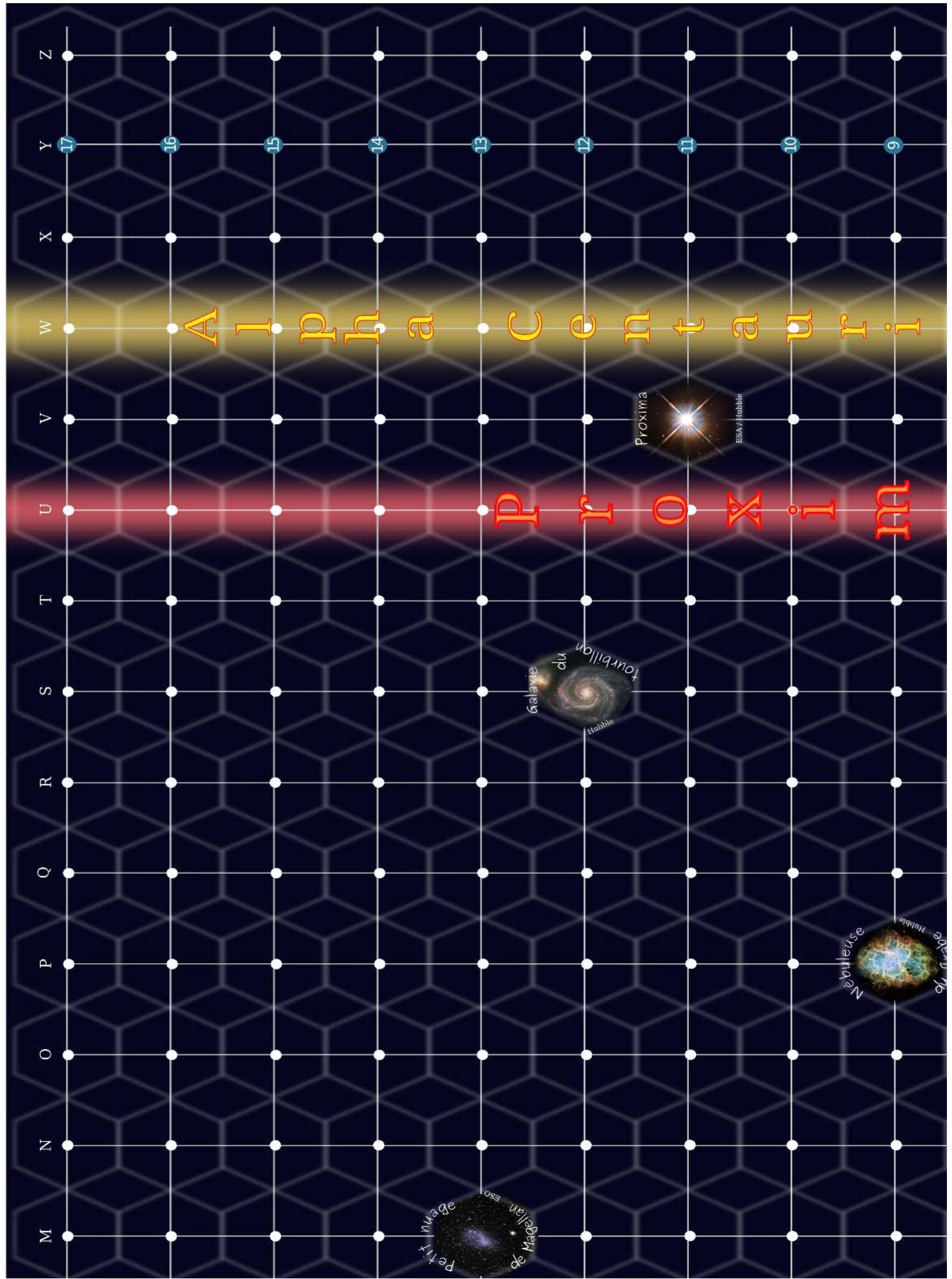
planètes gazeuses : ☉ géante, type Jupiter,  
probablement entourée de satellites

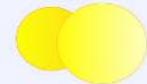
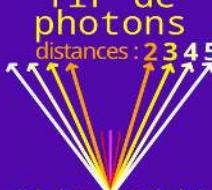
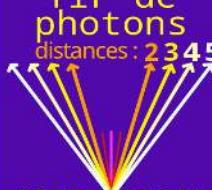
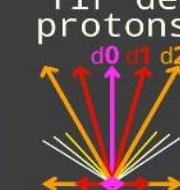
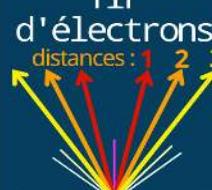
Hémisphère céleste vue depuis le pôle nord

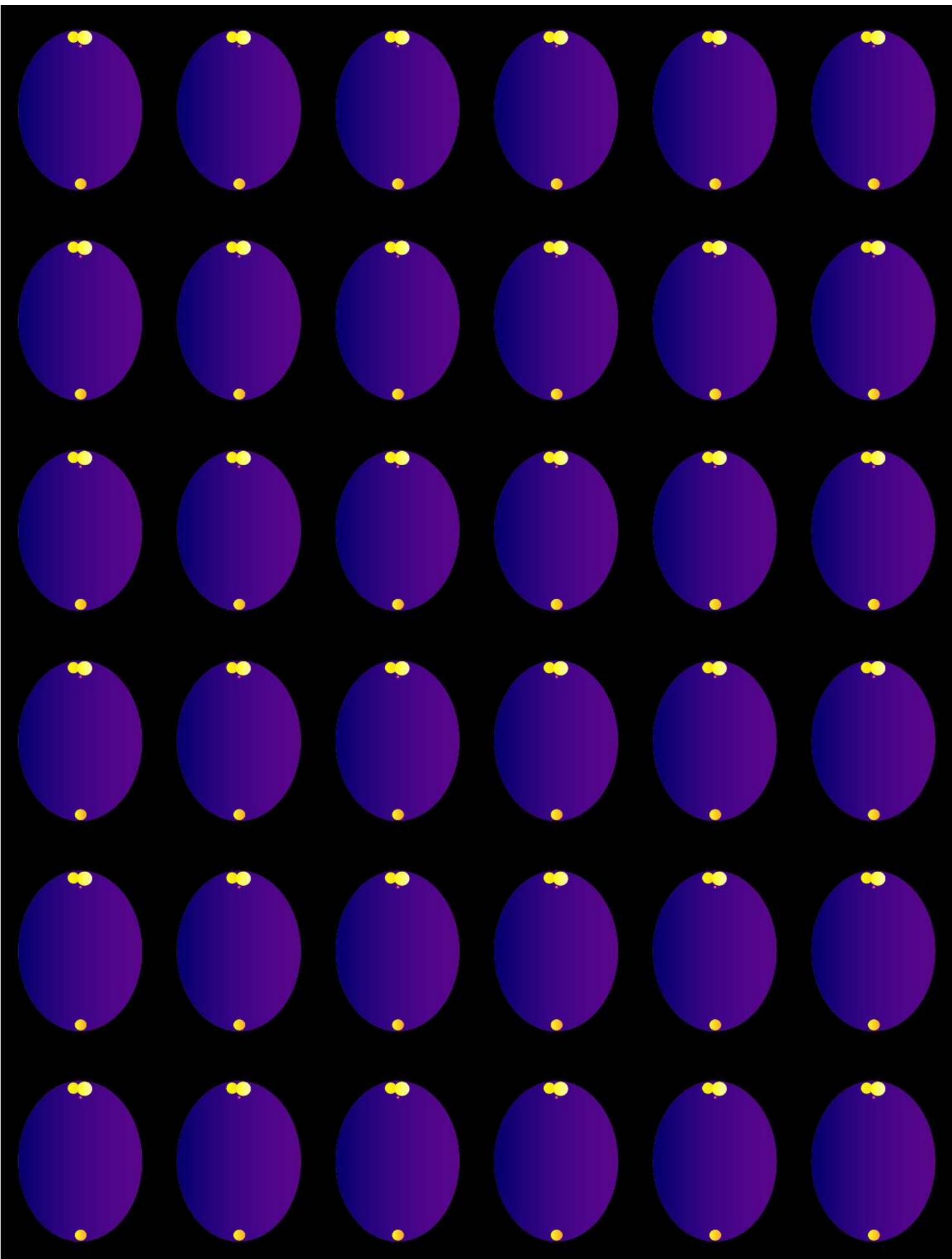
Hémisphère céleste vue depuis le pôle sud

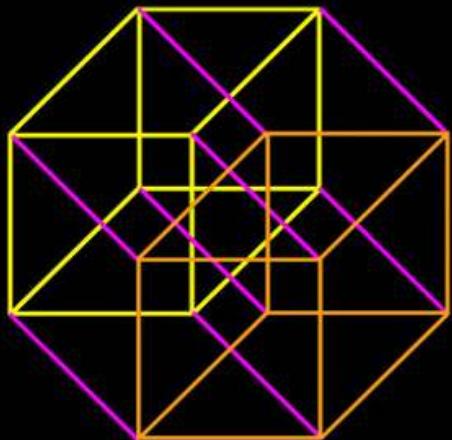


\* : 24 novembre 2018. Source : exoplanet.eu



|  |  |  |  |   |   |
|--|--|--|--|---|---|
| <b>Proximum</b><br><br>une charge   | <b>Proximum</b><br><br>une charge   | <b>Proximum</b><br><br>une charge                                       | <b>Proximum</b><br><br>une charge   | <b>Proximum</b><br><br>une charge  | <b>Proximum</b><br><br>une charge  |
| <b>Proximum</b><br><br>une charge   | <b>Proximum</b><br><br>une charge   | <b>Proximum</b><br><br>une charge                                       | <b>Proximum</b><br><br>une charge   | <b>Proximum</b><br><br>une charge  | <b>Proximum</b><br><br>une charge  |
| <b>Proximum</b><br><br>une charge   | <b>Proximum</b><br><br>une charge   | <b>Proximum</b><br><br>une charge                                       | <b>Proximum</b><br><br>charge double à utiliser en une fois   | <b>Proximum</b><br><br>charge double à utiliser en une fois                                    | <b>Proximum</b><br><br>charge double à utiliser en une fois  |
| <b>Proximum</b><br><br>charge double à utiliser en une fois                                     | <b>Proximum</b><br><br>charge double à utiliser en une fois                                     | <b>Proximum</b><br><br>charge triple à utiliser en une fois           | <b>Proximum</b><br><br>charge triple à utiliser en une fois                                       | <b>Proximum</b><br><br>charge triple à utiliser en une fois                                  | <b>Action!</b><br>Carte à annoncer<br>Changement de destination:<br><b>Alpha du Centaure</b><br> |
| <b>Bouclier</b><br><br>Protège d'un tir   | <b>Bouclier</b><br><br>Protège d'un tir   | <b>Réparation</b><br><br>Prévient une panne                           | <b>Action!</b><br>Panne du concentrateur<br>Matière/Anti-Matière<br><br>Un tour sans pouvoir agir | <b>Tirage</b><br>de trois cartes dans la pioche<br>  | <b>Action!</b><br>Carte à annoncer<br><b>Porte des étoiles</b><br>                               |
| <b>Tir de photons</b><br>distances : 2 3 4 5<br><br>Le joueur visé met une carte sous la pioche | <b>Tir de photons</b><br>distances : 2 3 4 5<br><br>Le joueur visé met une carte sous la pioche | <b>Tir de protons</b><br><br>Le joueur visé donne une carte au tireur | <b>Tir d'électrons</b><br>distances : 1 2 3<br><br>Le tireur tire une carte au joueur touché     | <b>Tir d'électrons</b><br>distances : 1 2 3<br><br>Le tireur tire une carte au joueur touché | Vous pouvez tirer une carte à un autre joueur<br>  |





*Nous avons exploré notre planète et nous en avons bel et bien fait le tour. Nous sommes allés sur la Lune, avons envoyé des sondes et des robots pour observer de près notre système solaire, le Soleil lui-même, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Pluton, leurs satellites et même des astéroïdes et des comètes. Quittons maintenant notre système et explorons notre galaxie. Commençons par Proxima étoile la plus proche de notre Soleil !*

*Un livre pour tous les curieux de science. Ouvrage pédagogique et abondamment illustré. Les secrets de la dilatation du temps et de la structure de l'espace sont mis en lumière de manière originale, complète et sans la moindre équation. Ce livre à la main, partez à l'aventure et rejoignez les étoiles !*

**Chapitres :** Le projet (p2) Réalité et illusions (p12) Petite histoire de la relativité (p25)  
La relativité restreinte (p36) Le voyage pour Proxima (p77) Course pour Proxima (p87)



## Mathieu Rouaud

Un livre de vulgarisation scientifique pour comprendre l'espace-temps de manière simple et ludique.

Mathieu Rouaud est professeur et diplômé en physique théorique.



16 € Prix France TTC

ISBN 978-2-9549309-7-8

