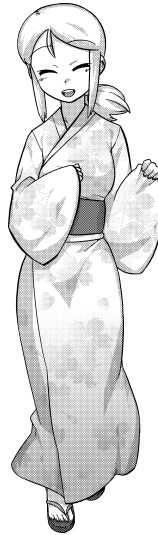


LES GUIDES MANGAS

.....

RELATIVITÉ

RESTREINTE ET GÉNÉRALE



Auteur
Réviseur
Dessins
Scénario
Studio

MASAFUMI YAMAMOTO
HIDEO NITTA
KEITA TAKATSU
RE_AKINO
TREND-PRO

Traduction

Harmonisation
Révision

PIERRE FLEURY
RAPHAËL GALICHER
PIERRE FLEURY
JEAN-YVES FÉVRIER

chercheur
enseignant-chercheur
chercheur
agrégé



Manga de wakaru : soutaiseiron est le titre japonais du *Guide manga de la relativité*. L'ouvrage a été créé par Ohmsha, l'un des éditeurs scientifiques les plus anciens et les plus respectés du Japon, et par Trend-Pro, un studio spécialisé dans les mangas. Ils ont réuni pour ce projet deux scientifiques très pédagogues, un dessinateur hyper expressif et un scénariste. Une version en anglais a ensuite été co-publiée par Ohmsha et l'éditeur américain No Starch Press. L'adaptation française a été effectuée par des scientifiques accomplis, normaliens, chercheurs en physique, et révisée par un relecteur spécialisé.

Masafumi Yamamoto est docteur de l'université d'Hokkaido.

Hideo Nitta est enseignant-chercheur à l'université Gakugei de Tokyo. Il a écrit de nombreux livres et articles de physique, notamment en mécanique quantique. Il est membre de la commission internationale pour l'enseignement de la physique.



D'autres titres sont disponibles ! Analyse, algèbre, mécanique...



Megumi, étudiante, excelle au tennis. Mais la physique de son sport lui échappe. Si l'action est égale à la réaction, pourquoi la balle bouge-t-elle quand elle la frappe avec sa raquette ? Les deux forces ne devraient-elles pas s'annuler ? Son camarade Nonomura va lui enseigner la mécanique par des exemples tirés du quotidien.

1. Action et réaction
 2. Force et mouvement
 3. Quantité de mouvement
 4. Énergie
- Index

Vous avez trouvé une erreur ? Gasp ! Vous pouvez nous en faire part à l'adresse errare.humanum.est@H-K.fr

© H&K, 68 boulevard de Port-Royal, 75005 Paris

© 2011 (*The Manga Guide to Relativity*) Hideo Nitta, Masafumi Yamamoto, Trend-Pro, éd. No Starch Press et Ohmsha

© 2009 (*Manga de wakaru : soutaiseiron*) Hideo Nitta, Masafumi Yamamoto, Trend-Pro, éd. Ohmsha

ISBN 978-2-35141-367-8

ISSN 2558-4375

Dépôt légal juin 2020

Avant-propos

Bienvenue dans le monde de la relativité !

Tout le monde se pose des questions sur cette théorie. Ses prédictions surprenantes et contre-intuitives, comme le ralentissement du temps et la contraction des distances, contredisent notre expérience quotidienne. Pourtant, ces phénomènes au parfum de magie ont été confirmés par d'innombrables expériences. La relativité, et la tout aussi déroutante physique quantique, sont des outils indispensables pour comprendre le monde.

À l'époque de Newton, les physiciens étaient confrontés à des vitesses bien plus petites que celle de la lumière. Considérer que l'espace et le temps sont absolus, distincts et inaltérables ne posait alors aucun problème. Ce n'est qu'à la fin du 19^e siècle que des mesures précises de la vitesse de la lumière, et le développement théorique de l'électromagnétisme, rendirent cette position intenable.

C'est alors qu'Einstein entra en scène. Il rejeta l'idée que l'espace et le temps étaient des absolus, et les lia dans un cadre théorique permettant d'expliquer l'invariance de la vitesse de la lumière. Ce changement radical de paradigme suscita une controverse comparable à celle provoquée par Galilée, trois siècles plus tôt, lorsqu'il affirma que c'était la Terre qui tournait autour du Soleil, et non l'inverse.

La théorie de la relativité nous a donné une compréhension plus fine des concepts d'espace et de temps. Elle propose une description de l'Univers dans sa complexité et sa nature véritable, sans s'arrêter aux limitations de notre intuition.

Bien que cet avant-propos puisse sembler un peu difficile, j'espère que vous apprécierez les mystères de la relativité dans un monde manga, avec Minagi et son professeur, M^{lle} Uraga.

Enfin, j'aimerais exprimer ma profonde gratitude à mon éditeur, Ohmsha, à re_akino qui a écrit le scénario et à M. Keita Takatsu qui en a fait un manga splendide.

Sans plus attendre, partons ensemble à la découverte du monde de la relativité !

Masafumi Yamamoto

Table des matières



Prologue

Scandale à la cérémonie de fin d'année

7



Chapitre 1

Qu'est-ce que la relativité ?

15

1. Qu'est-ce que la relativité ?	20
2. Relativité galiléenne et mécanique newtonienne	23
3. Le mystère de la vitesse de la lumière	29
4. Einstein rejette la mécanique newtonienne	40
Pour aller plus loin	46
Qu'est-ce que la lumière ?	46
La vitesse de la lumière est invariante	49
Simultané ? Ça dépend à qui on demande !	50
Cas newtonien d'addition des vitesses	
Cas relativiste d'addition des vitesses	
Principe galiléen de relativité et transformation de Galilée	53
Transformation de Lorentz	54
Attendez une seconde ! Qu'arrive-t-il à l'addition des vitesses ?	54



Chapitre 2

Comment ça, le temps ralentit ?

57

1. La dilatation du temps (effet Urashima)	60
2. Pourquoi est-ce que le temps ralentit ?	62
3. Le ralentissement du temps est symétrique	70
4. Le ralentissement du temps en équation	79
Pour aller plus loin	84
Dilatation du temps et théorème de Pythagore	84
Deux exemples d'application	86

	Chapitre 3	Plus on va vite, plus on est petit et lourd	89
---	-------------------	--	-----------

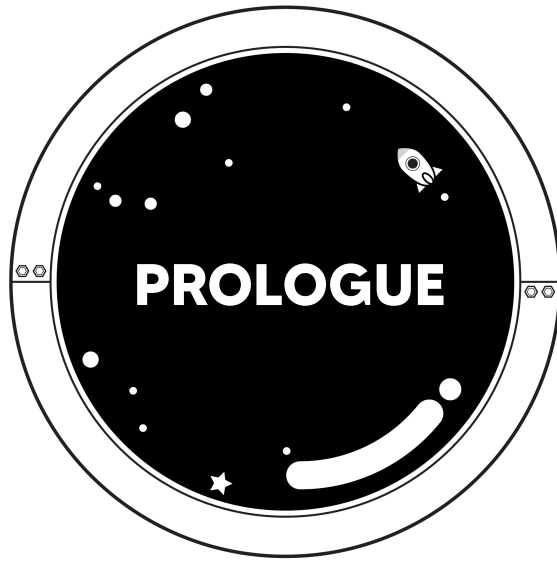
1. Les longueurs se contractent quand on va vite	92
2. Plus on va vite, plus on est lourd	98
Pour aller plus loin	112
La contraction des longueurs	112
Allongement de la durée de vie des muons	113
La masse augmente avec la vitesse	114
En physique newtonienne	
En relativité restreinte	
Relation entre masse et énergie	115
La lumière n'a pas de masse	116

	Chapitre 4	À la découverte de la relativité générale	117
---	-------------------	--	------------

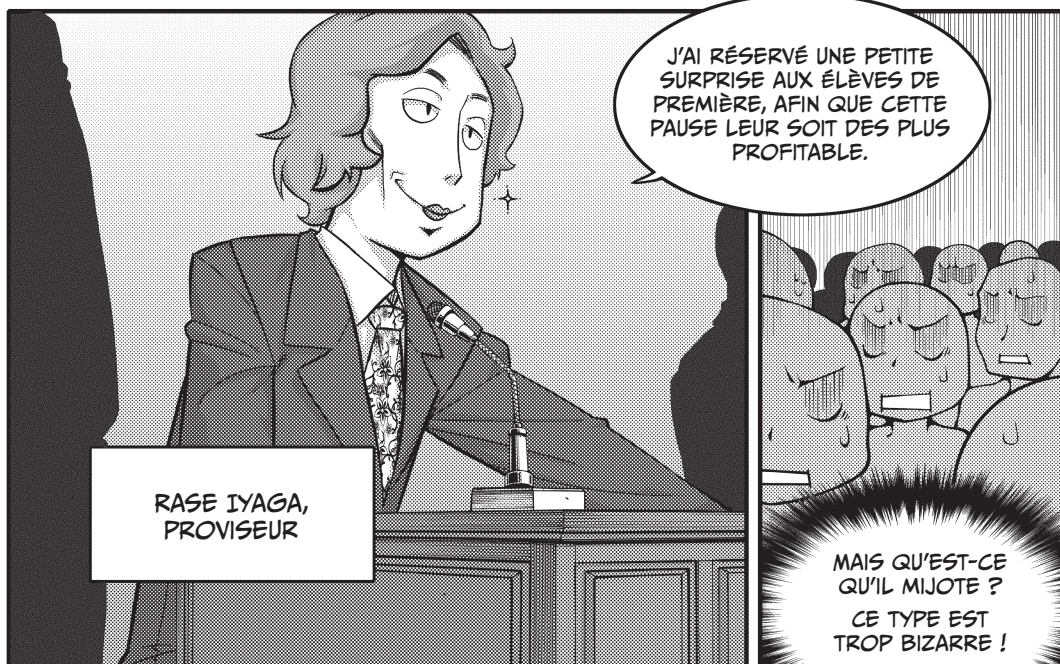
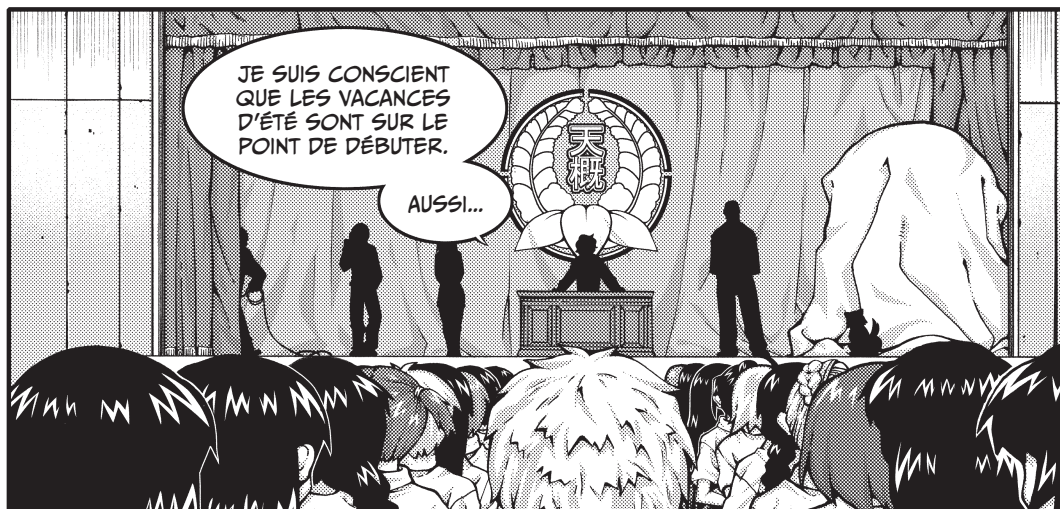
1. Le principe d'équivalence	122
2. La gravité dévie la lumière	135
3. La gravité ralentit le temps	145
4. La relativité et l'univers	151
Pour aller plus loin	160
La gravité ralentit le temps	160
La véritable nature de la gravité en relativité générale	162
Phénomènes découverts grâce à la relativité générale	162
La déviation de la lumière par un objet massif	
L'anomalie de la précession du périhélie de Mercure	
Les trous noirs	
Le GPS et la relativité	165

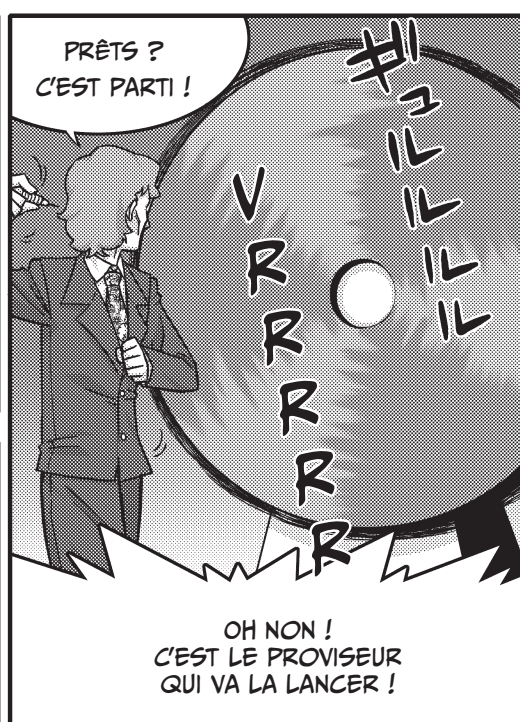
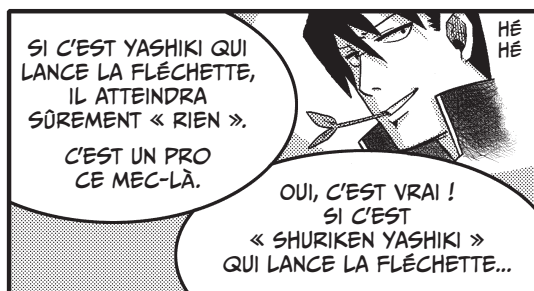
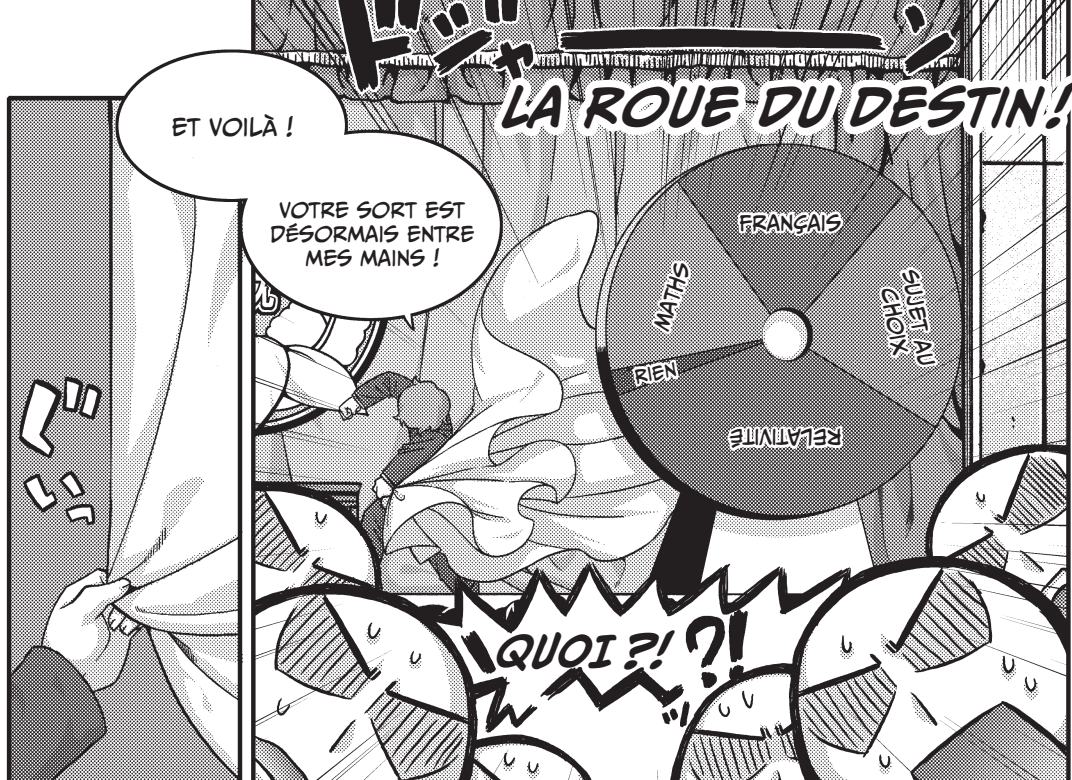
	Épilogue	167
---	-----------------	------------

Index	179
-------------	-----



Scandale à la cérémonie de fin d'année





C'EST PAS JUSTE,
M. LE PROVISEUR !
VOUS N'AVEZ PAS
LE DROIT !

ET PUIS
C'EST QUOI,
LA RELATIVITÉ ?

.....!!

RELATIVITÉ

QU'EST-CE
QUE... ?!

OH NON !
LE PIRE TRUC !
C'EST QUOI ÇA ?

MAIS QUE...

LE PROVISEUR
ADJOINT EST LÀ !

WOUF !
WOUF !

IL SE MOQUE
DE NOUS ?!

KOKOMARU,
PROVISEUR
ADJOINT

PLAIT-IL ?
CHER PROVISEUR
ADJOINT, VOUS LEUR
EN AVIEZ DÉJÀ PARLÉ,
N'EST-CE PAS ?

ON NE COMPREND PAS
CE QUE DIT LE PROVISEUR
ADJOINT, MAIS IL A L'AIR EN
COLÈRE CONTRE IYAGA !

AU FAIT...
POURQUOI C'EST UN
CHIEN, LE PROVISEUR
ADJOINT ?

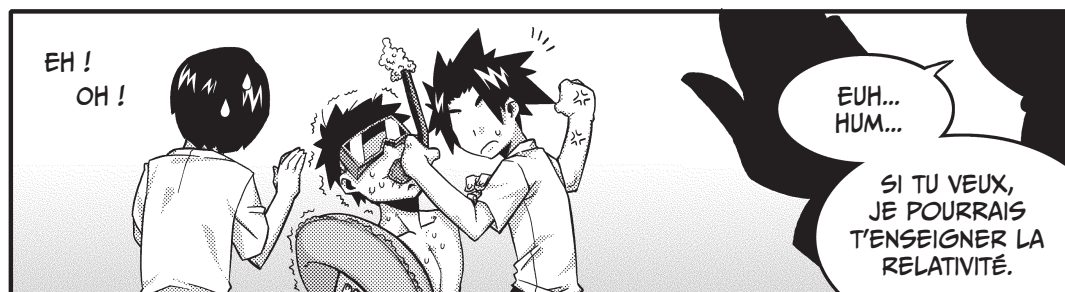
HÉ!
VOUS NE VOUS
EN SORTIREZ PAS
COMME ÇA !

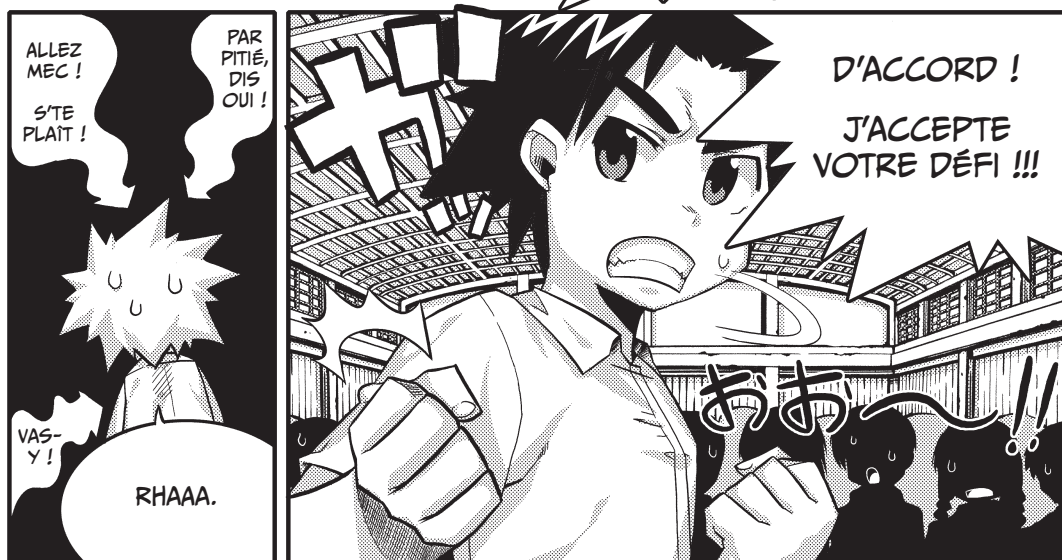
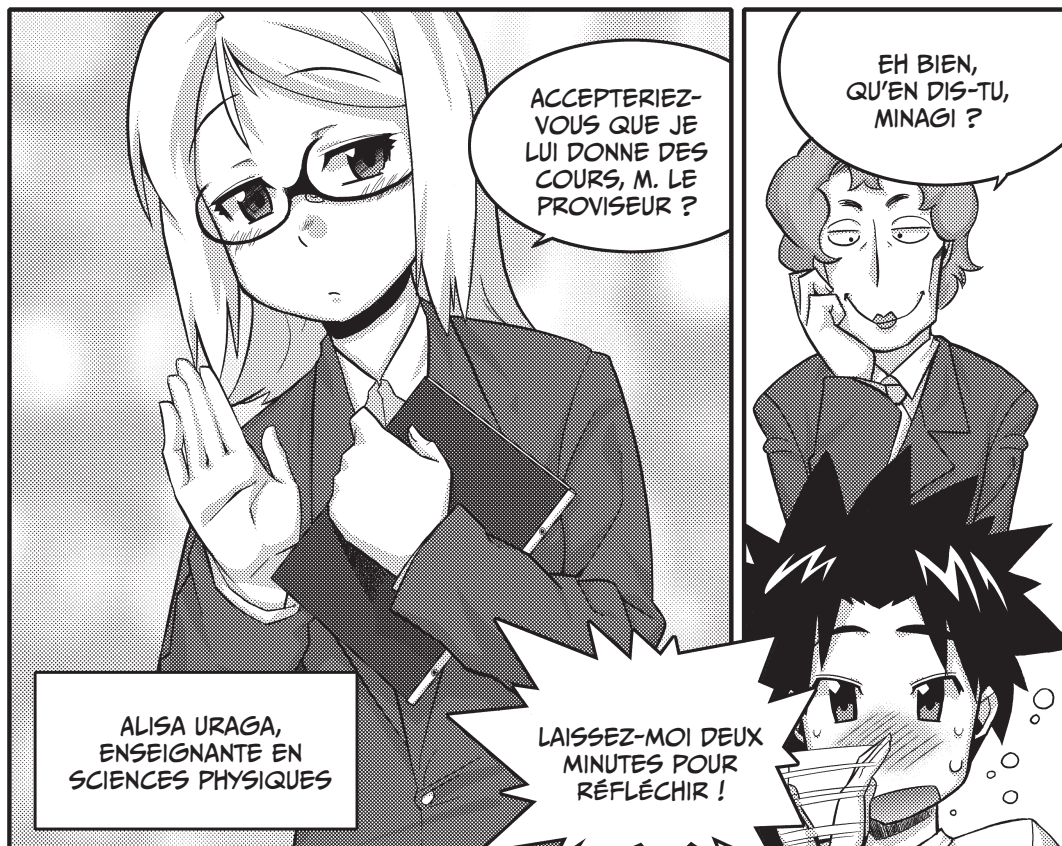
BONTÉ DIVINE !
REVOILÀ MACHIN-TRUC,
LE DÉFENSEUR
DES ÉLÈVES.

CETTE ROUE DU DESTIN
EST TRUQUÉE !
VOUS FAITES ÇA POUR
NOUS PERSÉCUTER !

TOUT LE MONDE
A DÉJÀ ORGANISÉ
SES VACANCES !

RUKA MINAGI,
REPRÉSENTANT
DES ÉLÈVES





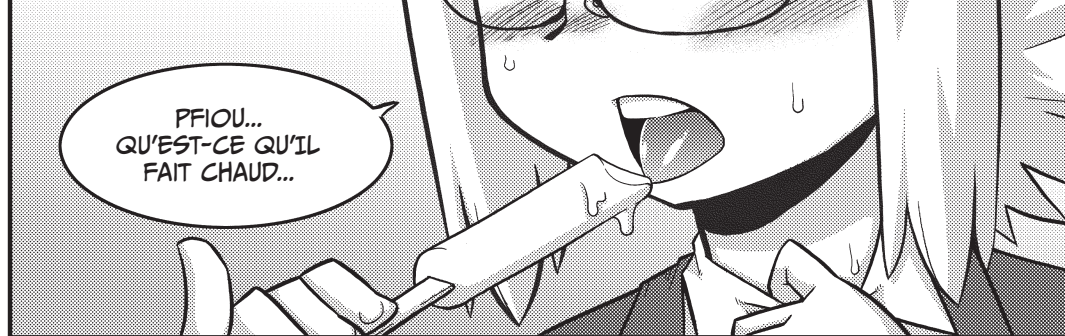




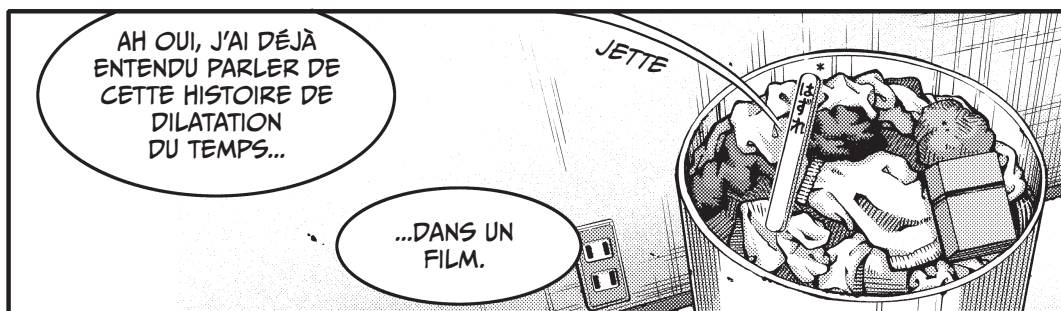
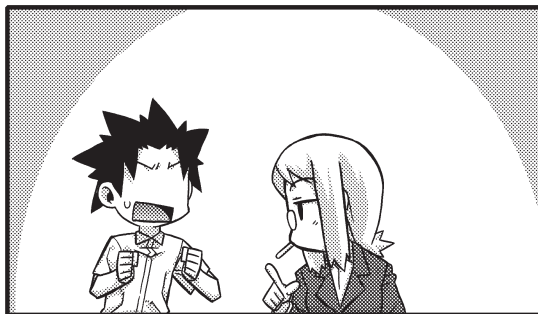
Qu'est-ce que la
relativité ?



Comment ça,
le temps ralentit ?

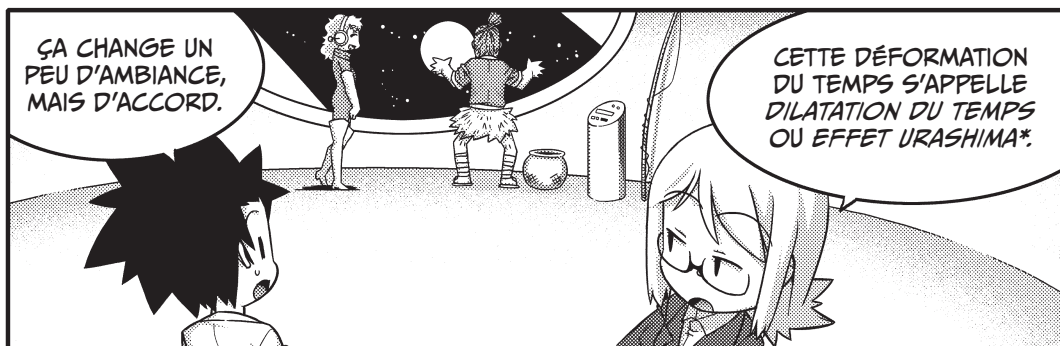
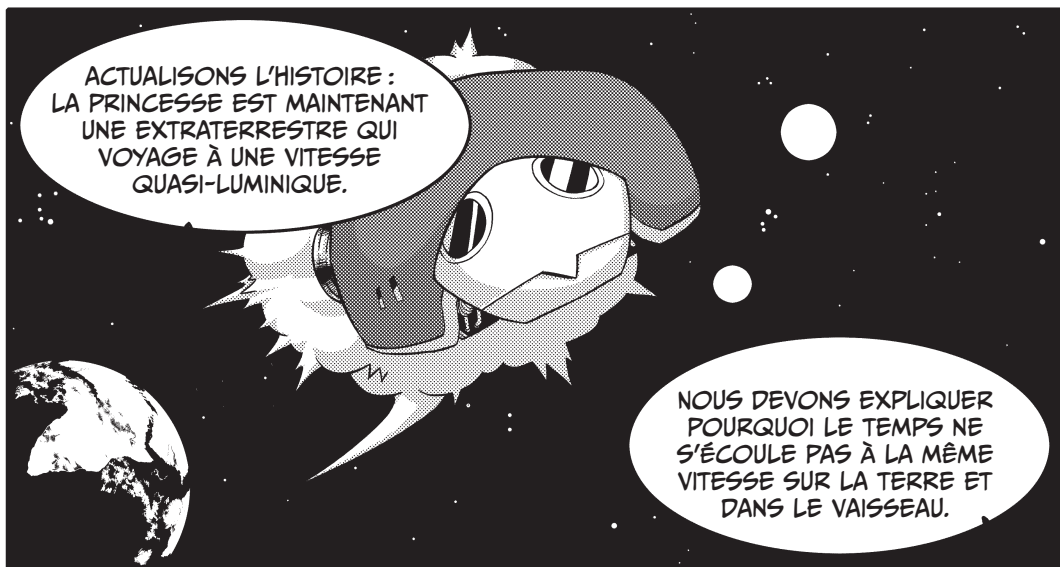


* LA PRINCESSE AVAIT PRIS LA FORME D'UNE TORTUE.



* ÉCHEC (AU JAPON, LES BÂTONNETS DE GLACE DISENT LA BONNE AVENTURE.)

1. La dilatation du temps (effet Urashima)

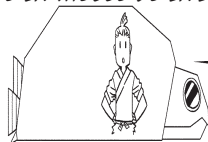


* LE JAPON EST LE SEUL PAYS OÙ L'ON NOMME «EFFET URASHIMA» LE PHÉNOMÈNE DE DILATATION DU TEMPS.

IMAGINE QU'UNE FUSÉE PESANT
100 TONNES ET LONGUE DE 10 M
VOLE À 99,6% DE LA VITESSE
DE LA LUMIÈRE.

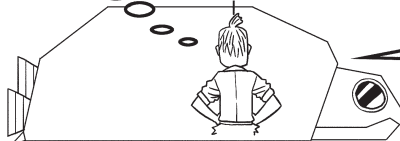
POUR UN OBSERVATEUR IMMOBILE,
LA FUSÉE EN MOUVEMENT
PÈSE 1100 TONNES
ET MESURE 0,9 M.

VOYAGEUR DANS UNE FUSÉE SE DÉPLAÇANT À
99,6% DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE



MA FUSÉE
PÈSE 100 TONNES ET
MESURE 10 M.

LA FUSÉE LÀ-BAS SE
DÉPLACE À 99,6% DE LA
VITESSE DE LA LUMIÈRE.



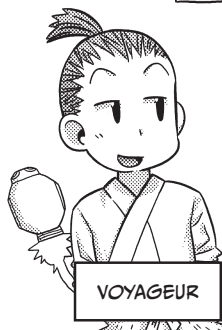
LA FUSÉE EN MOUVEMENT
PÈSE 1100 TONNES ET
MESURE 0,9 M.

OBSERVATEUR DANS UNE FUSÉE AU REPOS

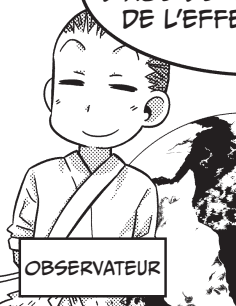
SI LE VOYAGE DURE 1 AN POUR LE
VOYAGEUR, ENVIRON 10 ANS SE SÉRONT
ÉCOULÉS SUR TERRE À SON RETOUR.

MÊME ÂGE

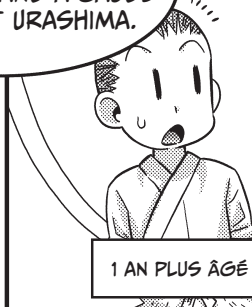
AUTREMENT DIT, IL Y
AURA UNE DIFFÉRENCE
D'ÂGE DE 9 ANS À CAUSE
DE L'EFFET URASHIMA.



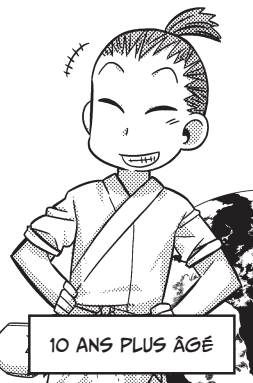
VOYAGEUR



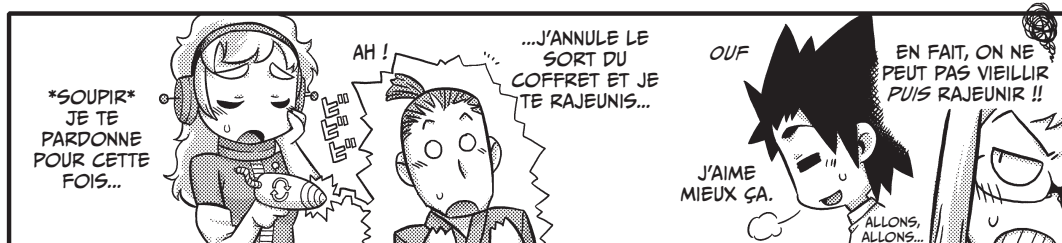
OBSERVATEUR



1 AN PLUS ÂGÉ

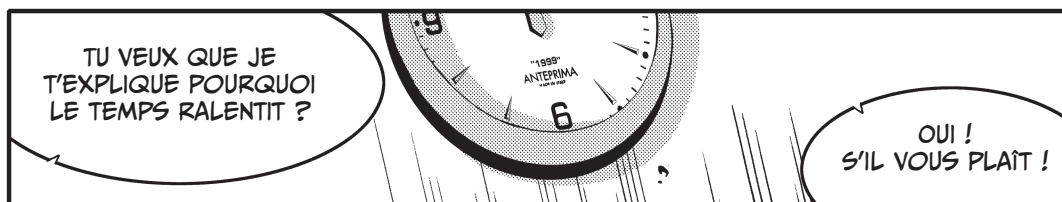


10 ANS PLUS ÂGÉ

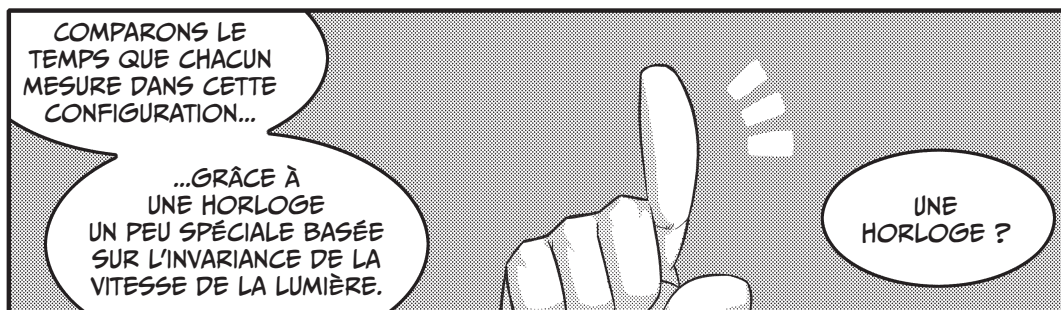
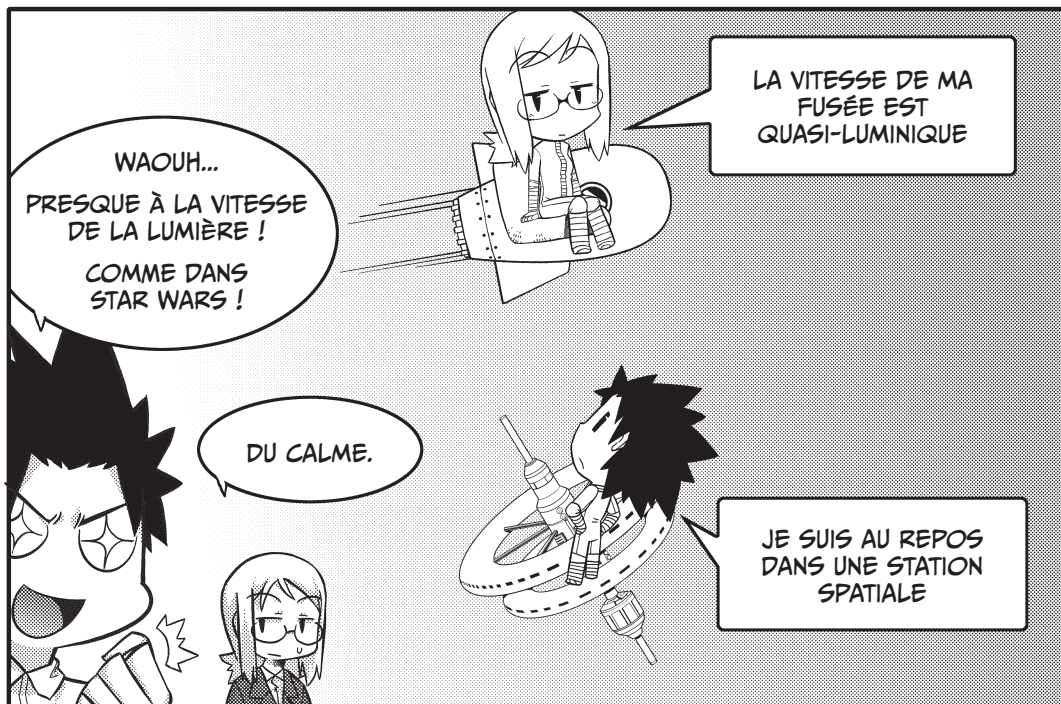
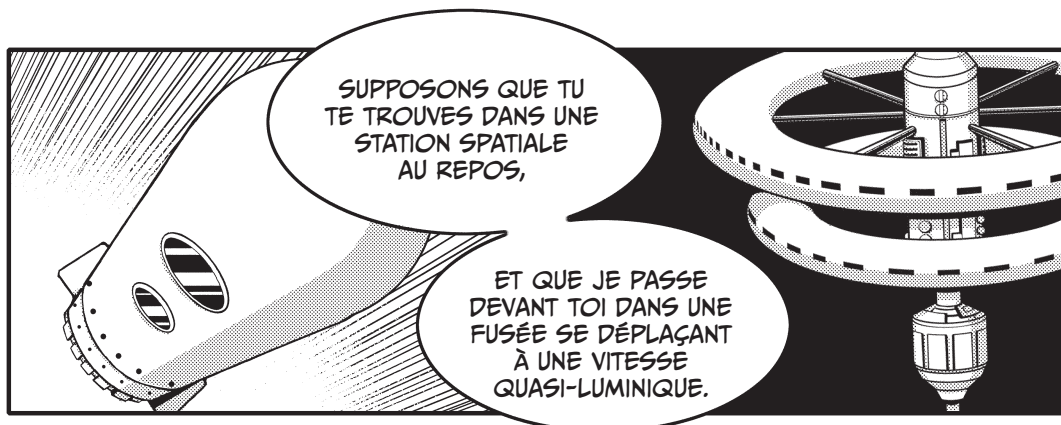


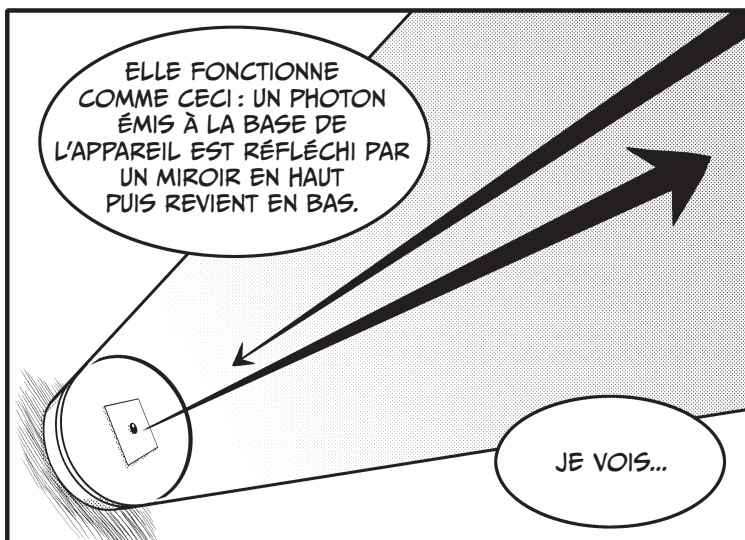
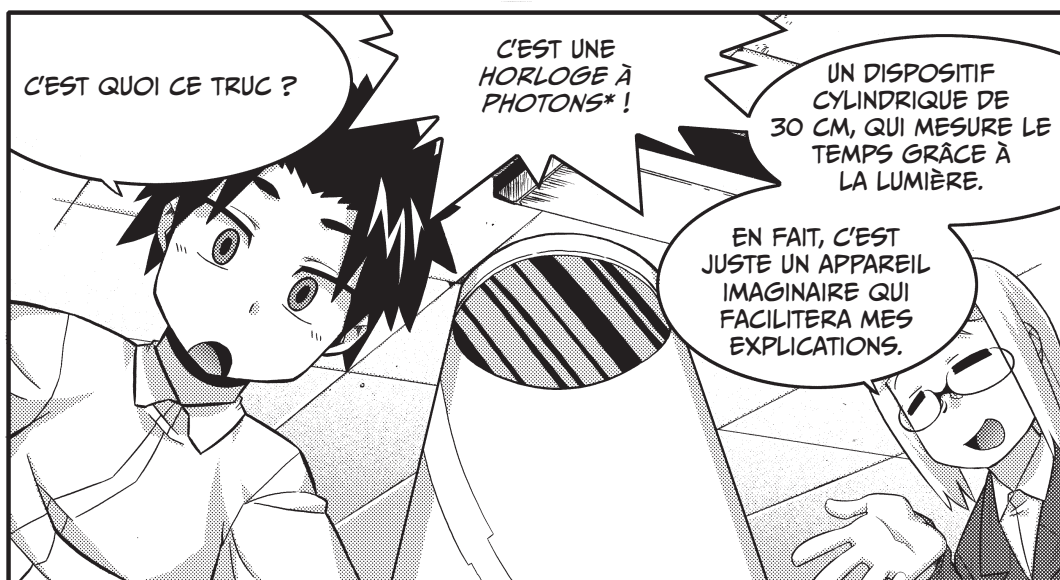
GRRRR !

2. Pourquoi est-ce que le temps ralentit ?



* DANS LE CONTE, LORSQU'URASHIMA DÉCIDE DE REVENIR SUR LA TERRE FERME, LA PRINCESSE LUI OFFRE UN COFFRET QU'IL NE DOIT JAMAIS OUVRIR. DÉSESPÉRÉ PAR LE TEMPS QUI S'EST ÉCOULÉ EN SON ABSENCE, IL CÈDE À LA CURIOSITÉ (LE COFFRET CONTENAIT SON ÂGE TERRESTRE), VIEILLIT D'UN COUP ET SE TRANSFORME EN GRUE (SYMBOLE DE LONGÉVITÉ).





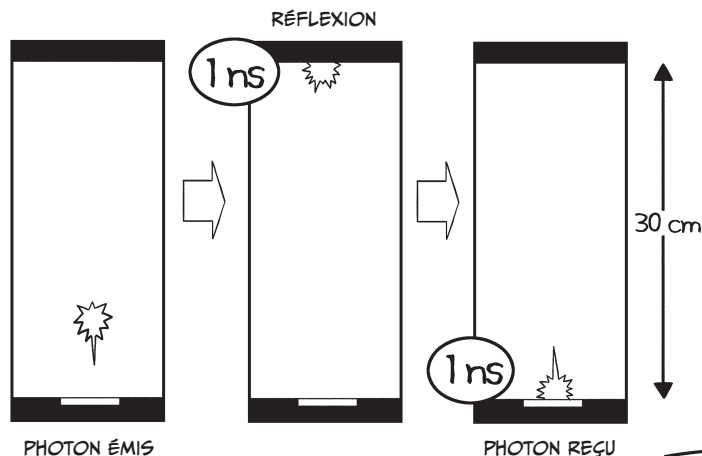
* L'ÉMISSION D'UN RAYON LUMINEUX A UN DÉBUT ET UNE FIN. UN RAYON LUMINEUX N'EST DONC PAS UNE ONDE INFINIE MAIS UN PAQUET D'ONDES, SOUVENT COMPARÉ À UN « GRAIN DE LUMIÈRE » QU'ON APPELLE PHOTON.

COMME LE TUBE MESURE 30 CM,
IL FAUT 1 NS* POUR QUE LA LUMIÈRE
ÉMISE EN BAS ARRIVE EN HAUT.

LE TEMPS QU'ELLE SOIT
RÉFLÉCHIE ET REVienne EN BAS,
IL S'ÉCOULE ENCORE 1 NS.



ÉCOULEMENT DU TEMPS



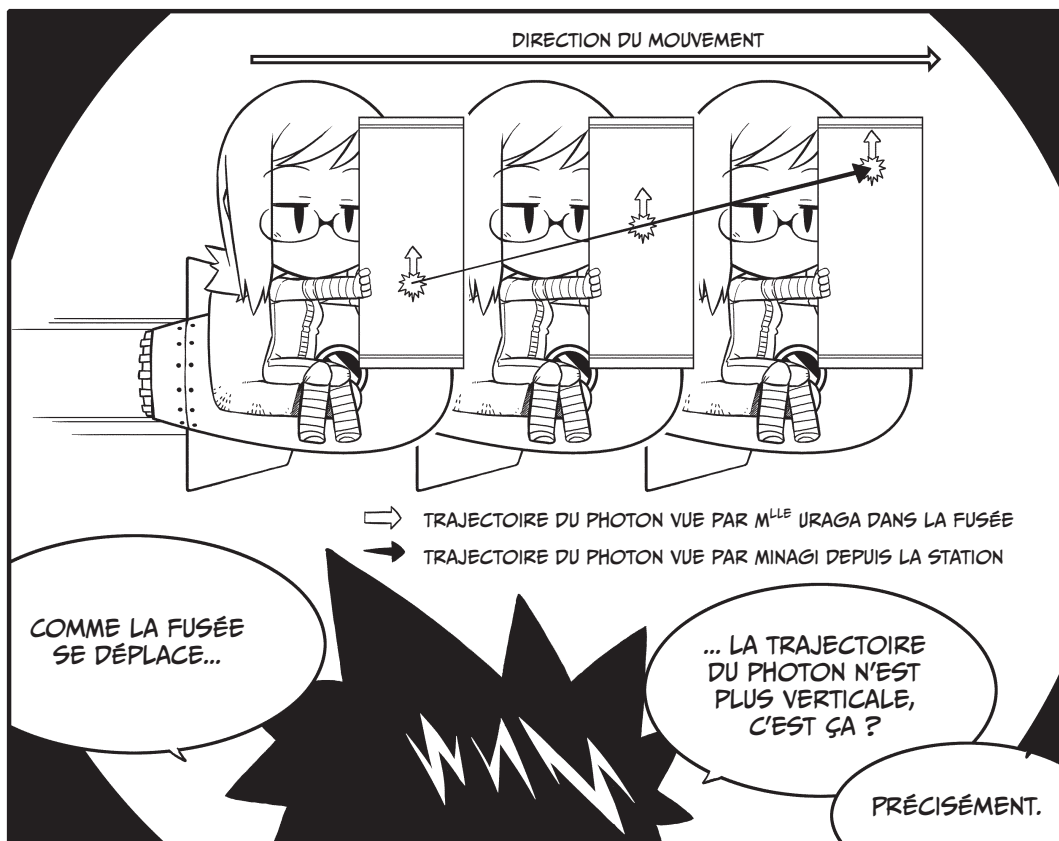
ON MESURE LE TEMPS
GRÂCE AU DÉPLACEMENT
D'UN PHOTON ?

C'EST ÇA.

CHACUN DE NOUS
EMPORTE UNE HORLOGE,
TOI DANS LA STATION SPATIALE ET
MOI DANS LA FUSÉE.

D'ACCORD.

* 1 NS = 1 NANOSECONDE = 1 MILLIARDIÈME DE SECONDE

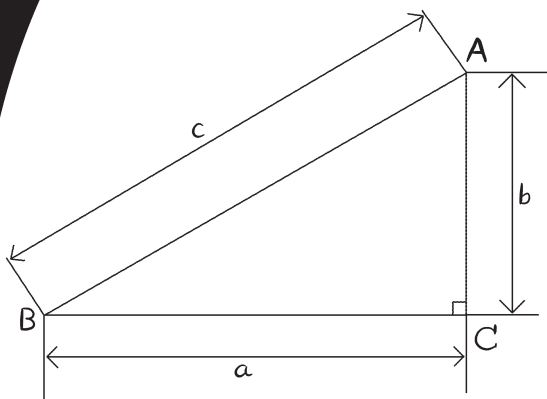


DE TON POINT DE VUE,
LA LUMIÈRE SUIT LA VERTICALE
DANS TON HORLOGE ET
UNE DROITE INCLINÉE
DANS LA MIENNE.



UTILISONS MAINTENANT
LE THÉORÈME DE
PYTHAGORE.

C'EST AVEC LES VIEUX THÉORÈMES
QU'ON FAIT LES MEILLEURES
DÉMONSTRATIONS...



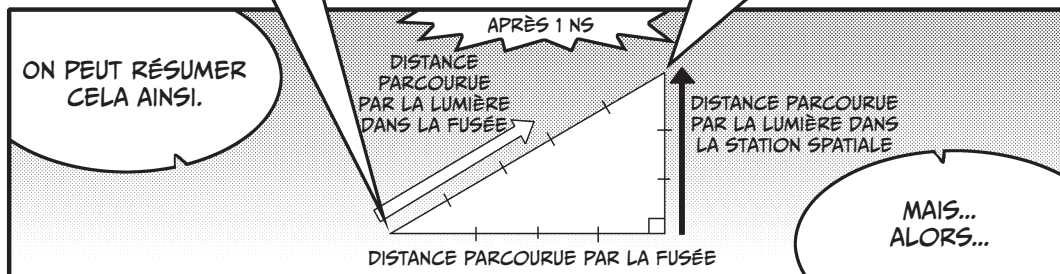
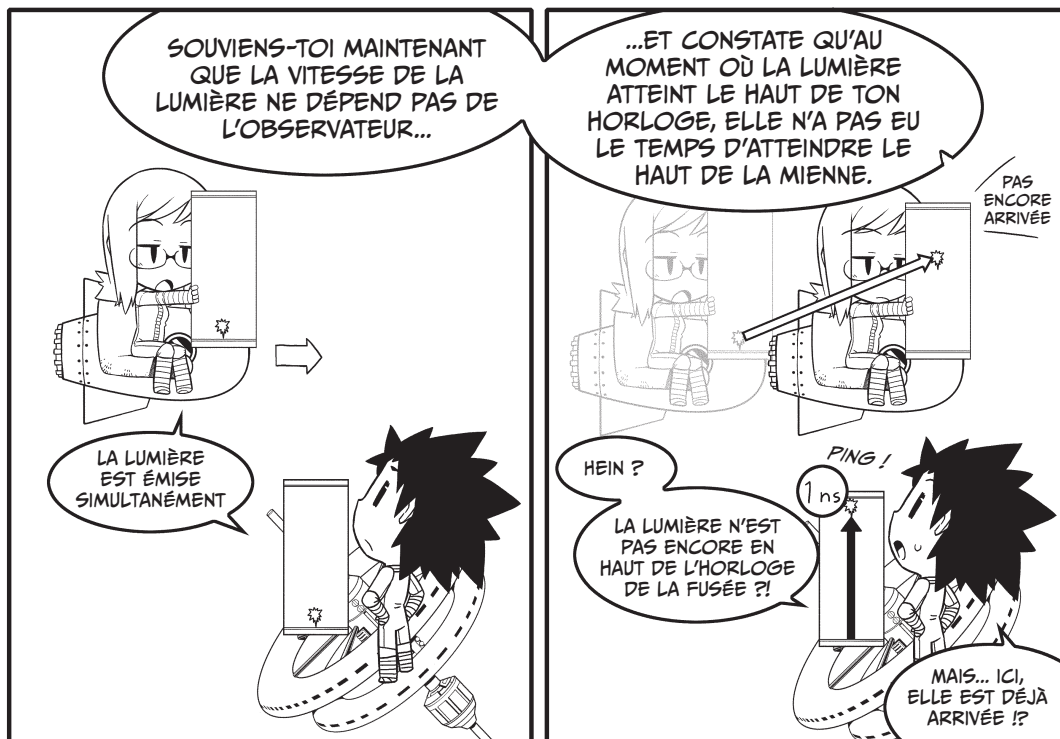
THÉORÈME DE
PYTHAGORE

$$c^2 = a^2 + b^2$$

« DANS UN TRIANGLE
RECTANGLE, LE CARRÉ DE
L'HYPOTHÈNUSE EST ÉGAL
À LA SOMME DES CARRÉS
DES AUTRES CÔTÉS. »

AH OUI,
JE ME SOUVIENS, ON AVAIT
APPRIIS ÇA AU COLLÈGE.
JE PENSais QUE ÇA NE
SERVAIT À RIEN...

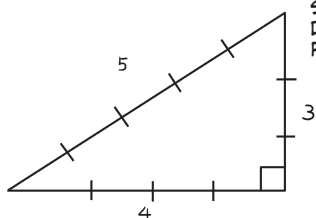




QUAND TU VERRAS LA
LUMIÈRE REVENIR À SON
POINT DE DÉPART DANS LA
FUSÉE, PLUS DE 2 NS SE
SERONT ÉCOULÉES SUR
TON HORLOGE.

EN D'AUTRES TERMES,
LE TEMPS S'ÉCOULE
PLUS LENTEMENT
DANS LA FUSÉE QUE
DANS LA STATION.

C'EST CHOQUANT À
PREMIÈRE VUE, MAIS
LE RAISONNEMENT
EST INATTAQUABLE.



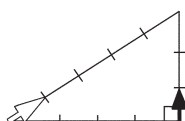
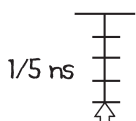
SUPPOSONS QUE LES CÔTÉS
DU TRIANGLE RECTANGLE AIENT
POUR LONGUEURS 3, 4 ET 5

↑ LUMIÈRE DANS LA
STATION SPATIALE
(SELON MINAGI)

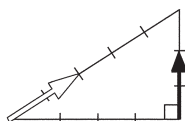
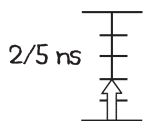
↗ LUMIÈRE DANS LA
FUSÉE (SELON
MINAGI)

ÉCOULEMENT DU TEMPS
SELON M^{lle} URAGA

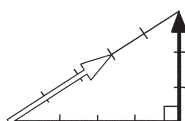
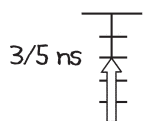
ÉCOULEMENT DU TEMPS
SELON MINAGI



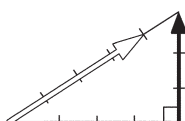
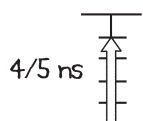
1/3 ns



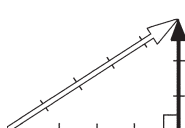
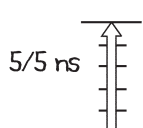
2/3 ns



3/3 ns

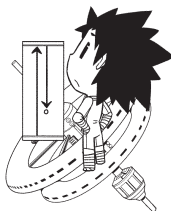
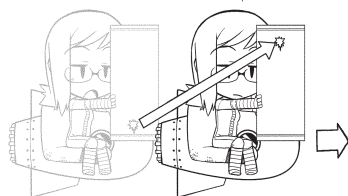


4/3 ns



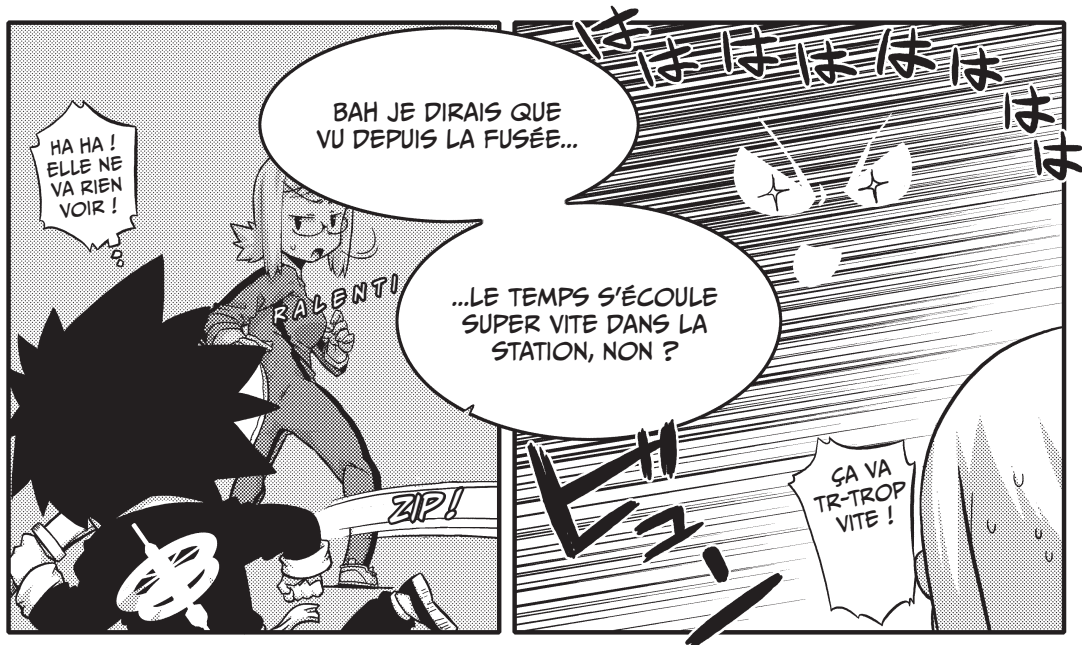
5/3 ns

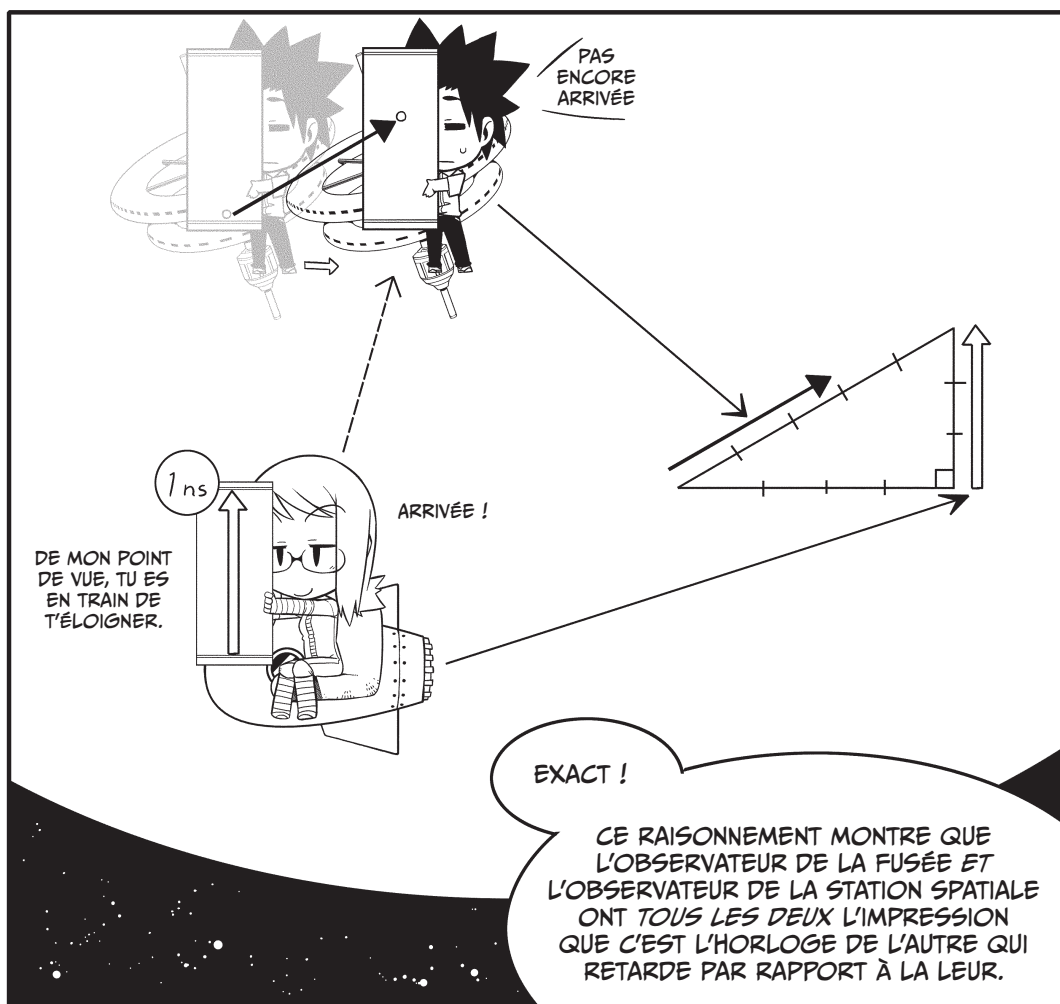
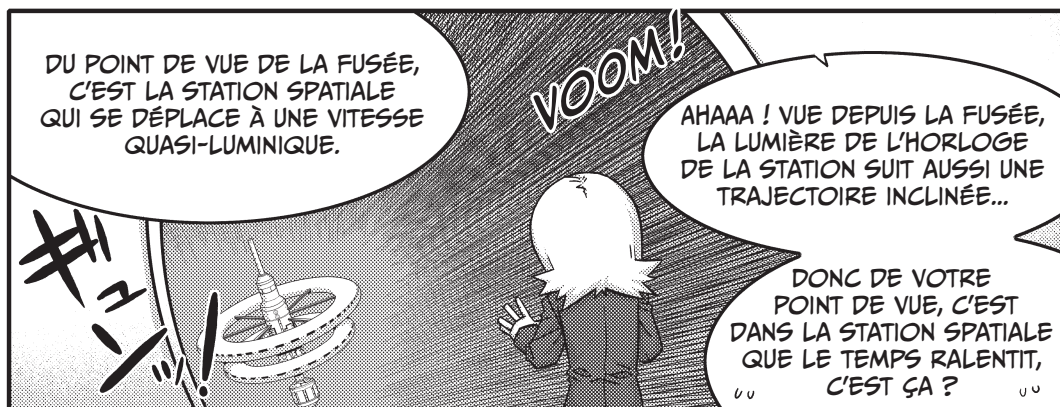
TRAJECTOIRE
DU PHOTON
DE LA FUSÉE
VUE PAR
MINAGI

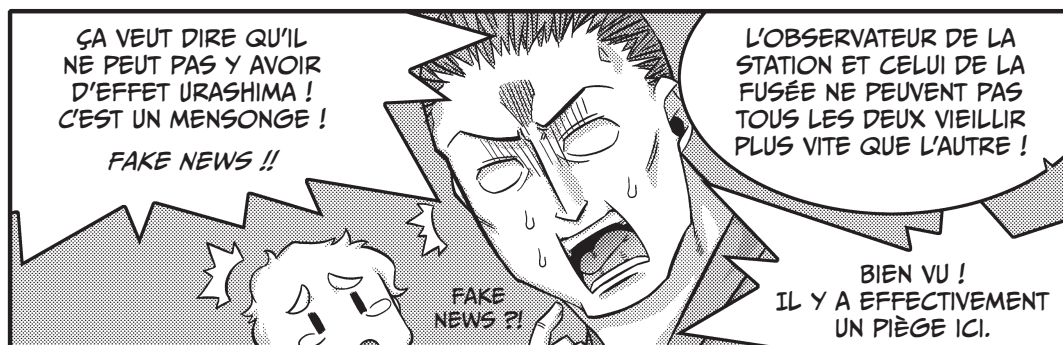
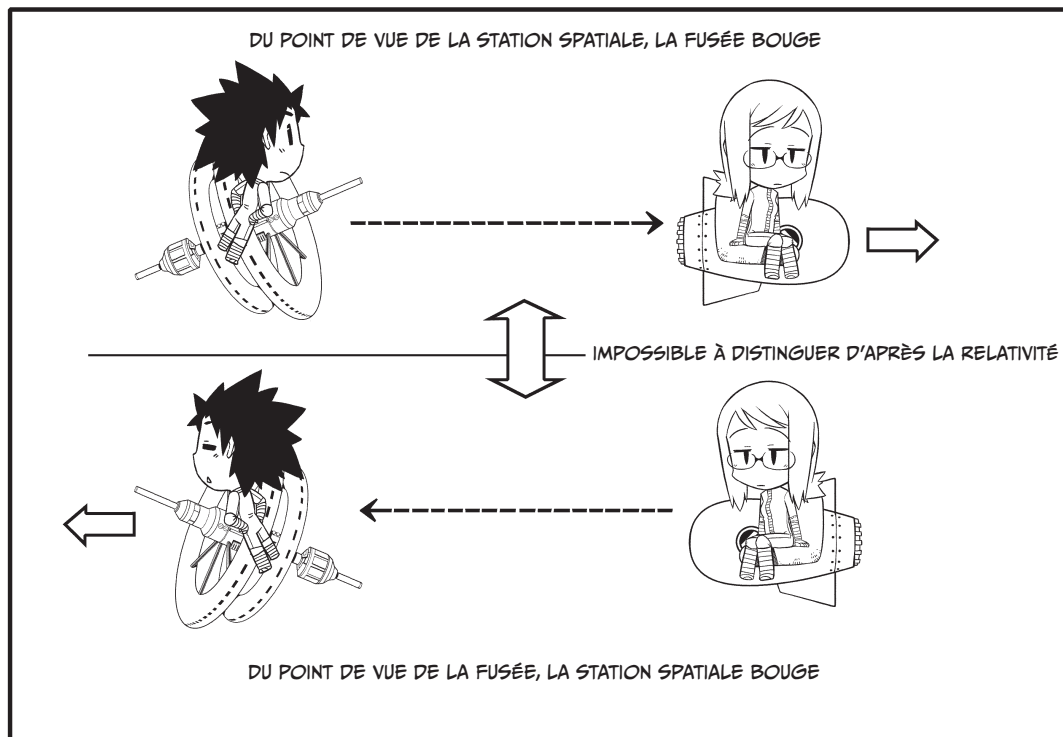


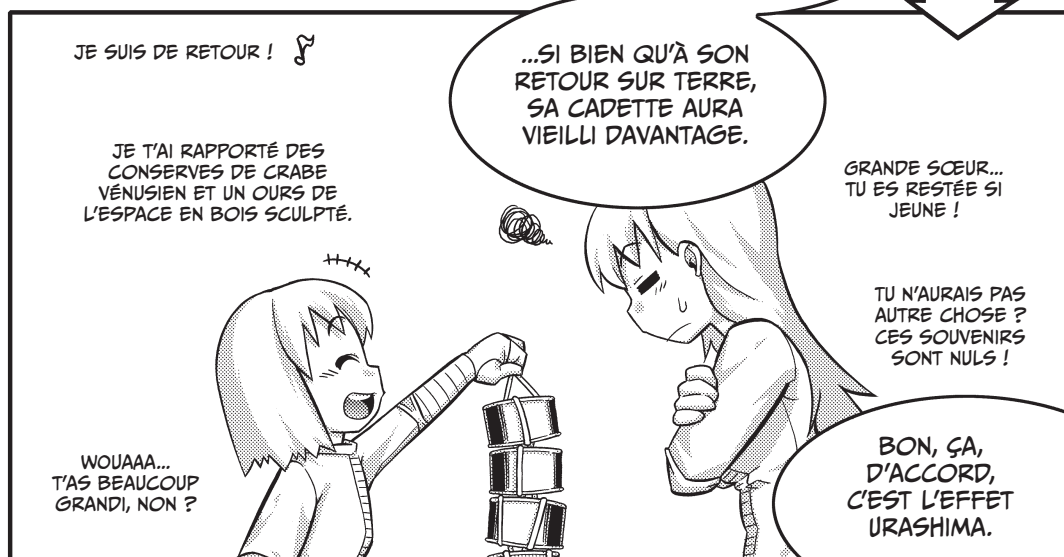
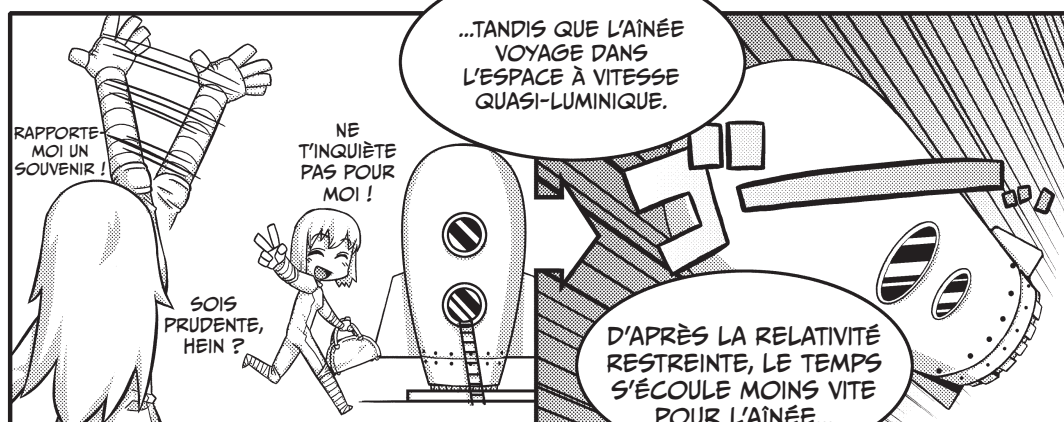
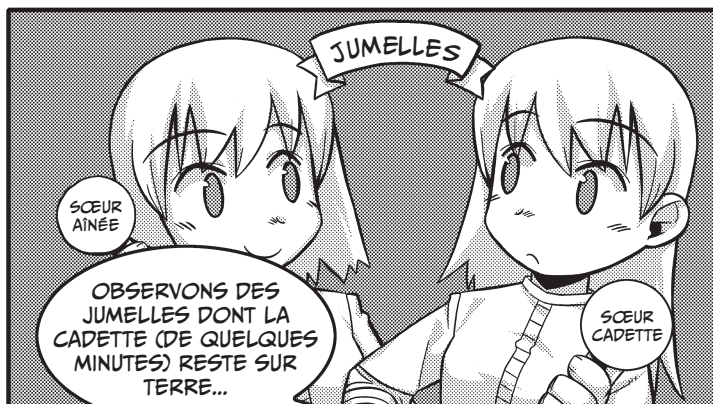
TRAJECTOIRE DU PHOTON
DE LA STATION SPATIALE
VUE PAR MINAGI

3. Le ralentissement du temps est symétrique

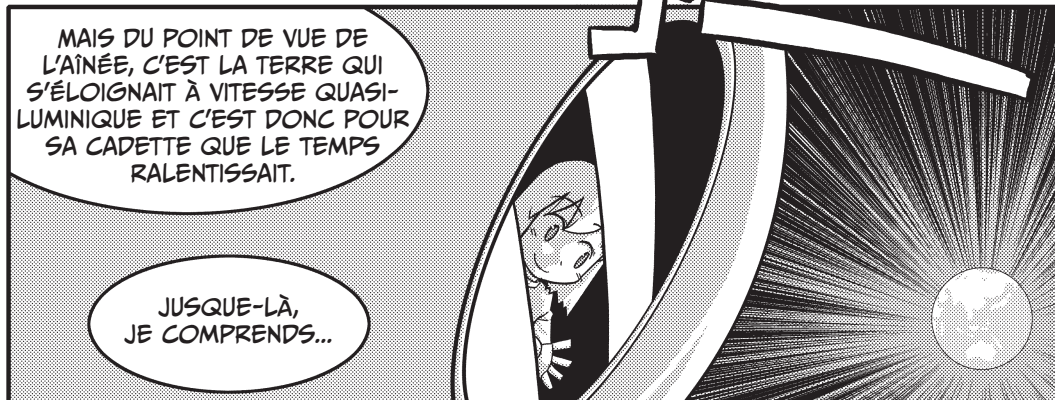






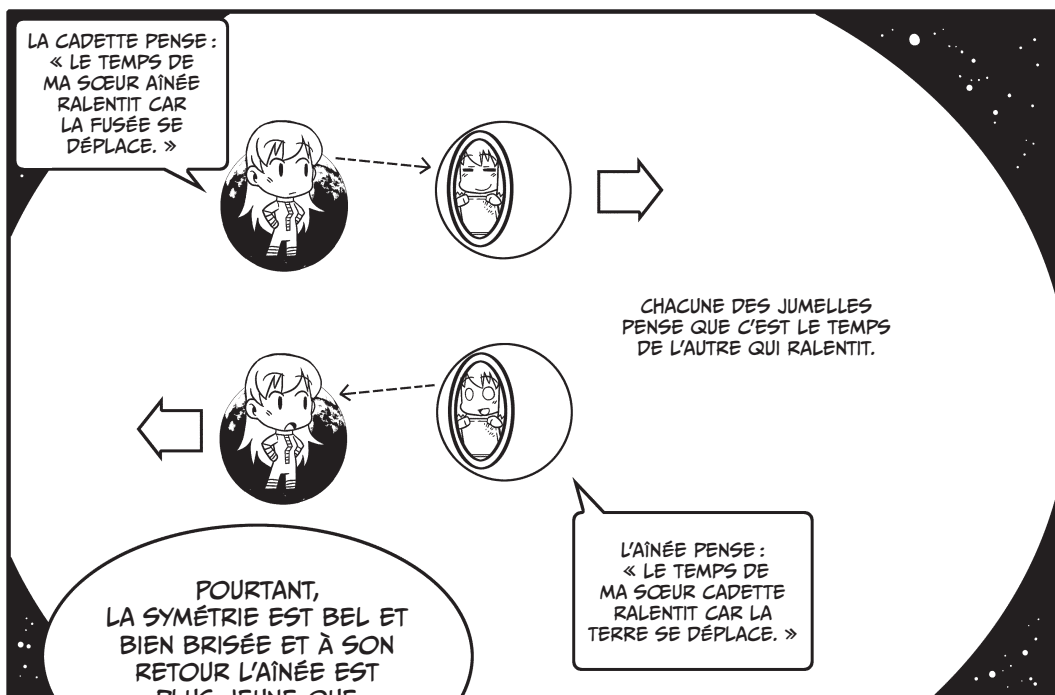


* CETTE EXPÉRIENCE DE PENSÉE FUT PROPOSÉE PAR PAUL LANGEVIN EN 1911.



MAIS DU POINT DE VUE DE L'AINÉE, C'EST LA TERRE QUI S'ÉLOIGNAIT À VITESSE QUASI-LUMINIQUE ET C'EST DONC POUR SA CADETTE QUE LE TEMPS RALENTISSAIT.

JUSQUE-LÀ, JE COMPRENDS...



LA CADETTE PENSE :
« LE TEMPS DE MA SŒUR AÎNÉE RALENTIT CAR LA FUSÉE SE DÉPLACE. »

CHACUNE DES JUMELLES PENSE QUE C'EST LE TEMPS DE L'AUTRE QUI RALENTIT.

L'AINÉE PENSE :
« LE TEMPS DE MA SŒUR CADETTE RALENTIT CAR LA TERRE SE DÉPLACE. »

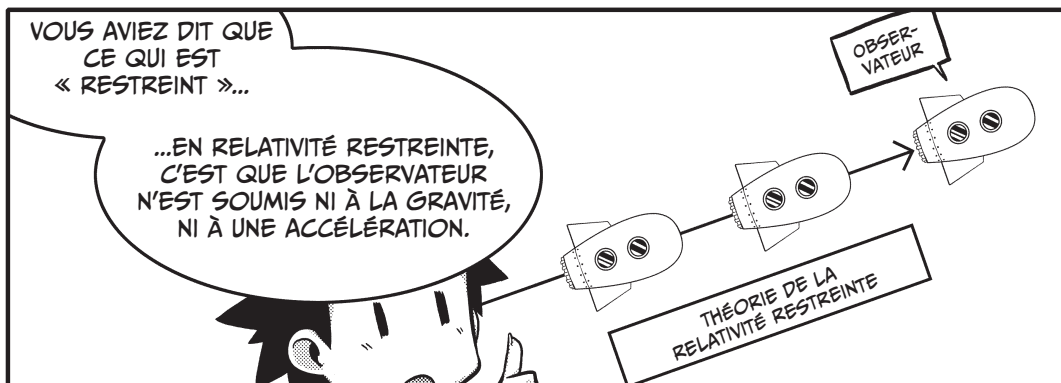
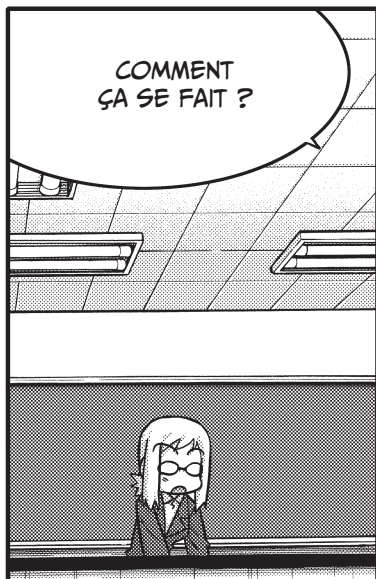
POURTANT, LA SYMÉTRIE EST BEL ET BIEN BRISÉE ET À SON RETOUR L'AINÉE EST PLUS JEUNE QUE SA CADETTE.

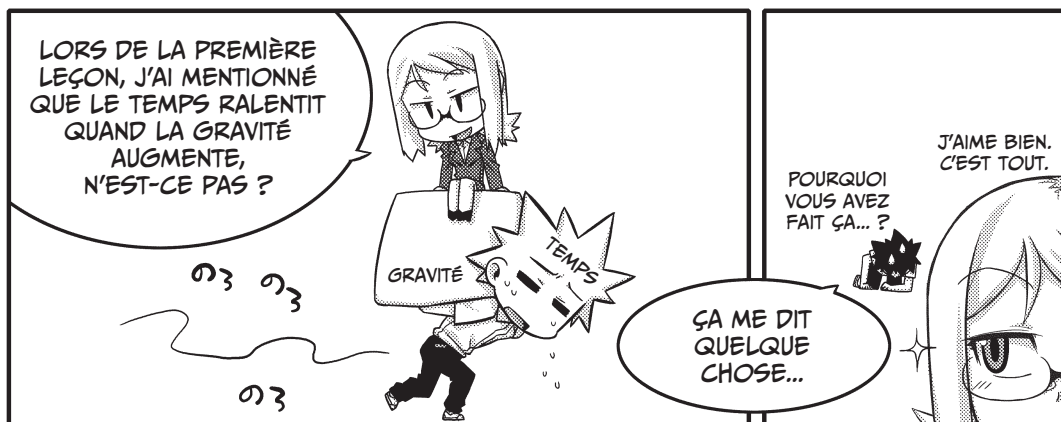
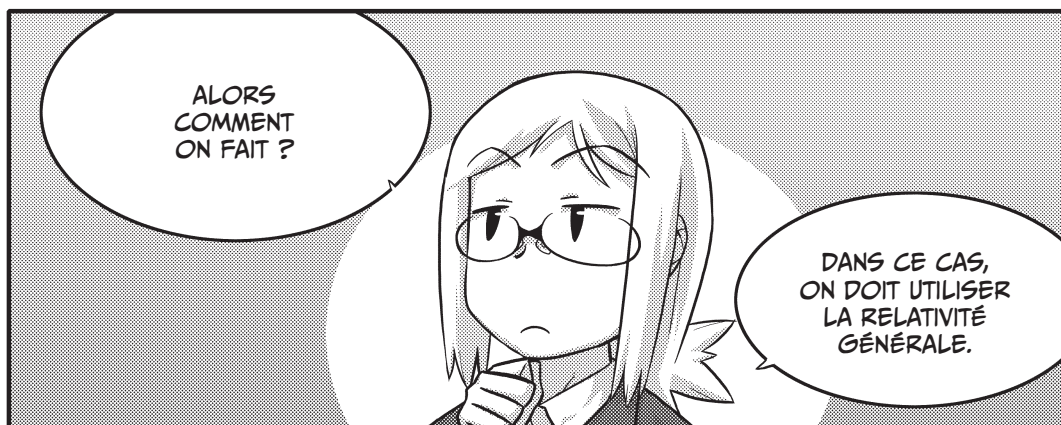
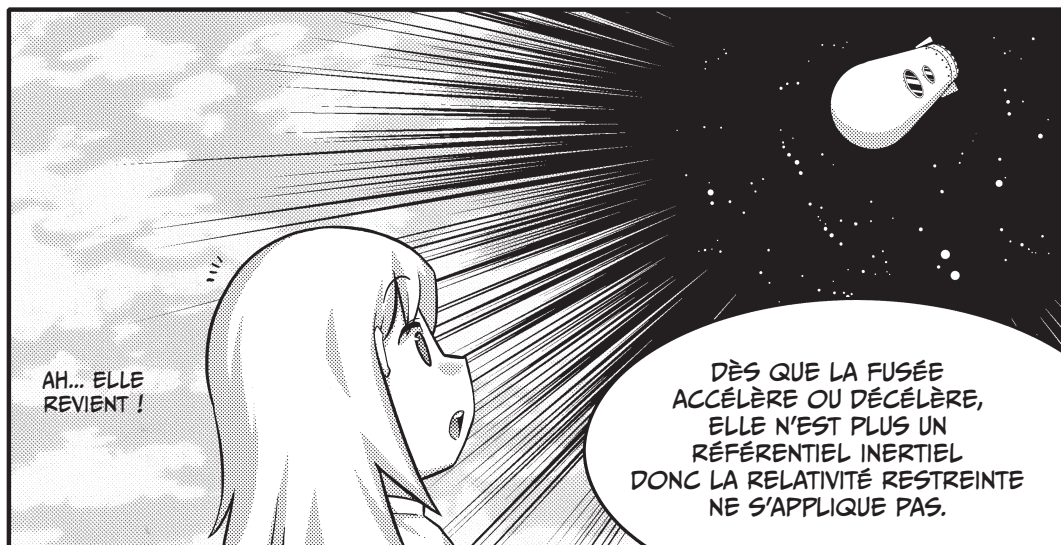


CE CRABE EST ÉTONNAMMENT DÉLICIEUX.

LÀ-BAS, C'EST UNE SPÉCIALITÉ DE MONTAGNE !

JE PEUX GÔTER ?





POUR QUE CE SOIT PLUS FACILE À COMPRENDRE, IMAGINONS UNE FUSÉE...

...SPHÉRIQUE AVEC DES RÉACTEURS À L'AVANT ET À L'ARRIÈRE.

SYSTÈME DE COORDONNÉES OÙ LA TERRE EST AU REPOS



VITESSE

LA FUSÉE SE DÉPLACE À VITESSE CONSTANTE



ACCÉLÉRATION



LA VITESSE DÉCROÎT

LA FUSÉE ALLUME UN RÉACTEUR POUR DÉCÉLÉRER ET CHANGER DE SENS



LA VITESSE S'ANNULE

LA VITESSE S'ANNULE BRIÈVEMENT ET LA FUSÉE PART DANS L'AUTRE SENS

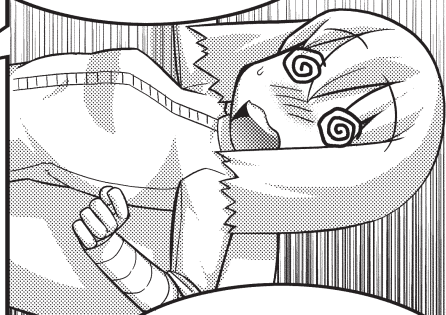


LA VITESSE AUGMENTE DANS LE SENS DU RETOUR



LA FUSÉE ARRÊTE SON RÉACTEUR UNE FOIS SA VITESSE DE CROISIÈRE ATTEINTE

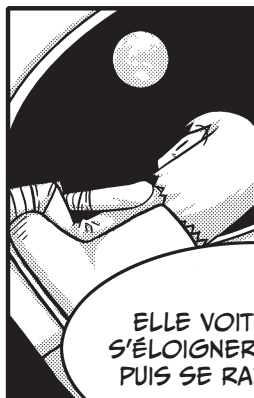
QUAND LA FUSÉE ALLUME SON RÉACTEUR...



...L'AÎNÉE EST ÉCRASÉE CONTRE SON SIÈGE...

...COMME SI ELLE ÉTAIT SOUMISE À UNE FORTE GRAVITÉ.

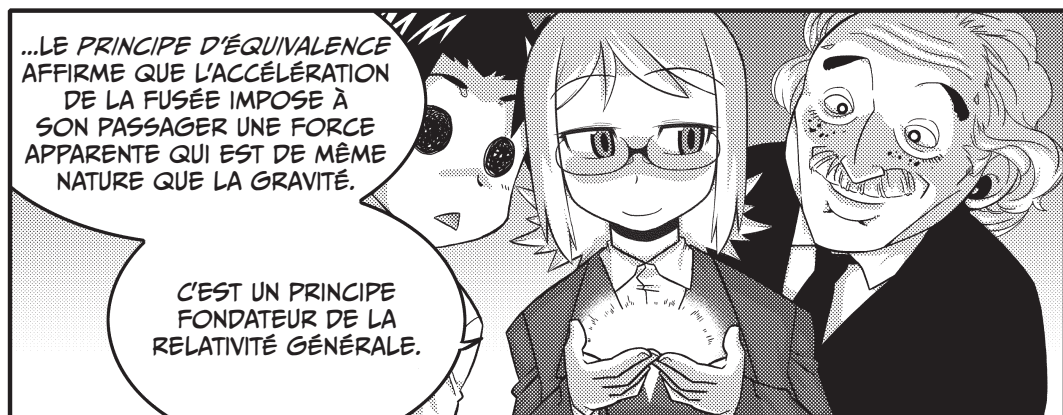
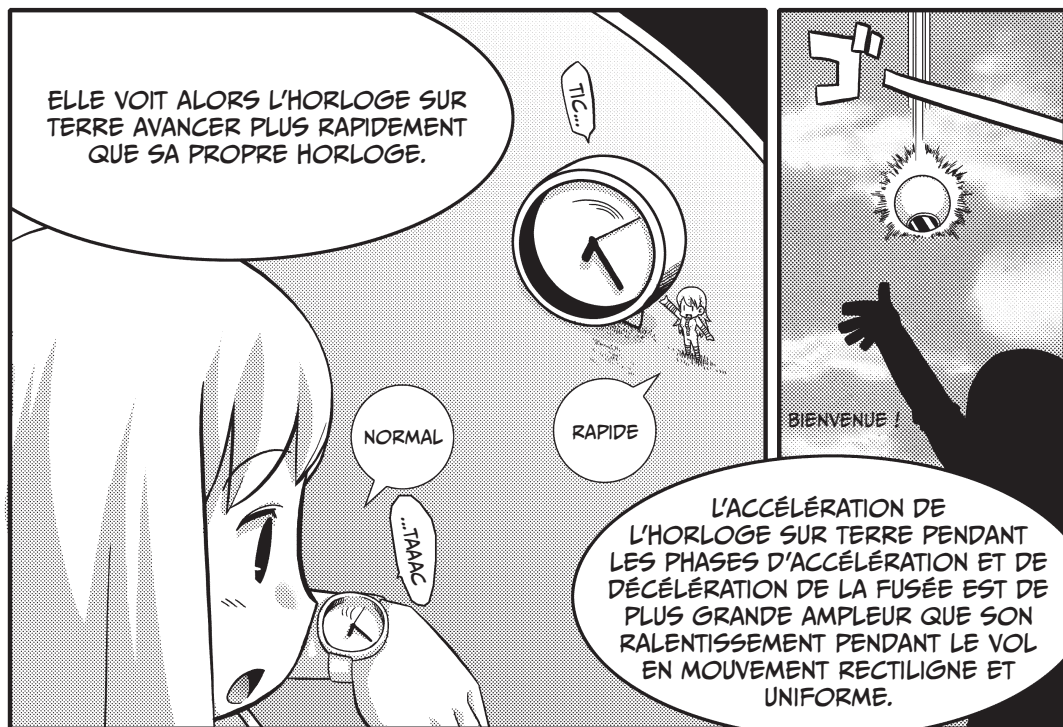
GRAVITÉ

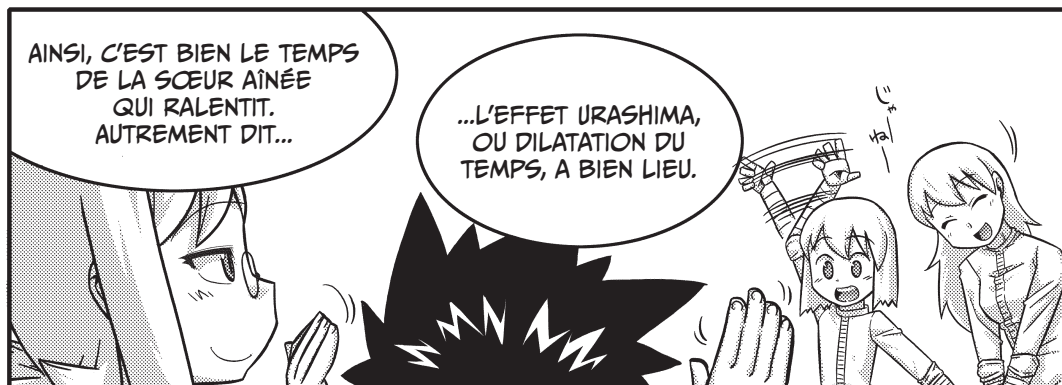


ELLE VOIT LA TERRE S'ÉLOIGNER, S'ARRÊTER PUIS SE RAPPROCHER.

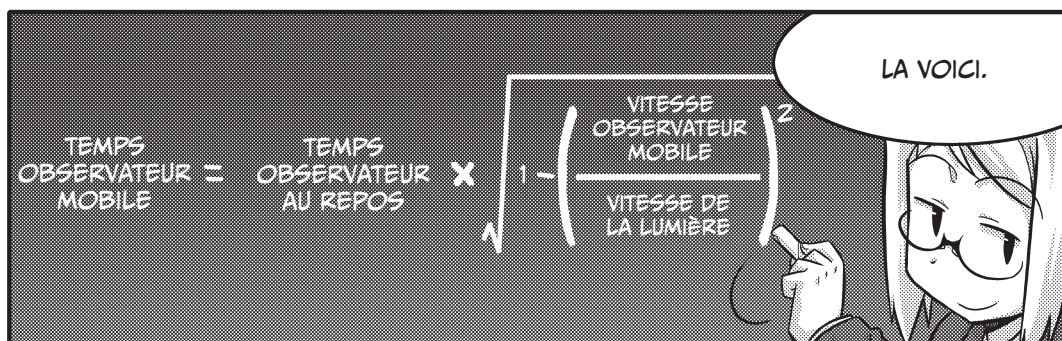
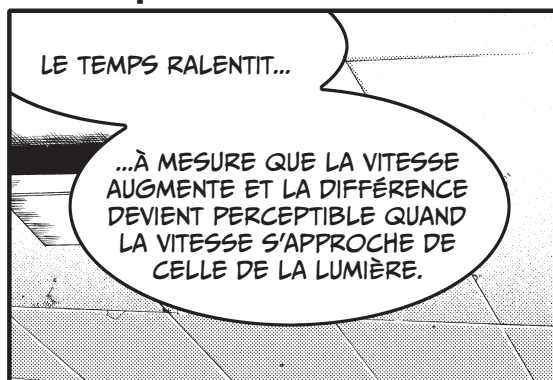


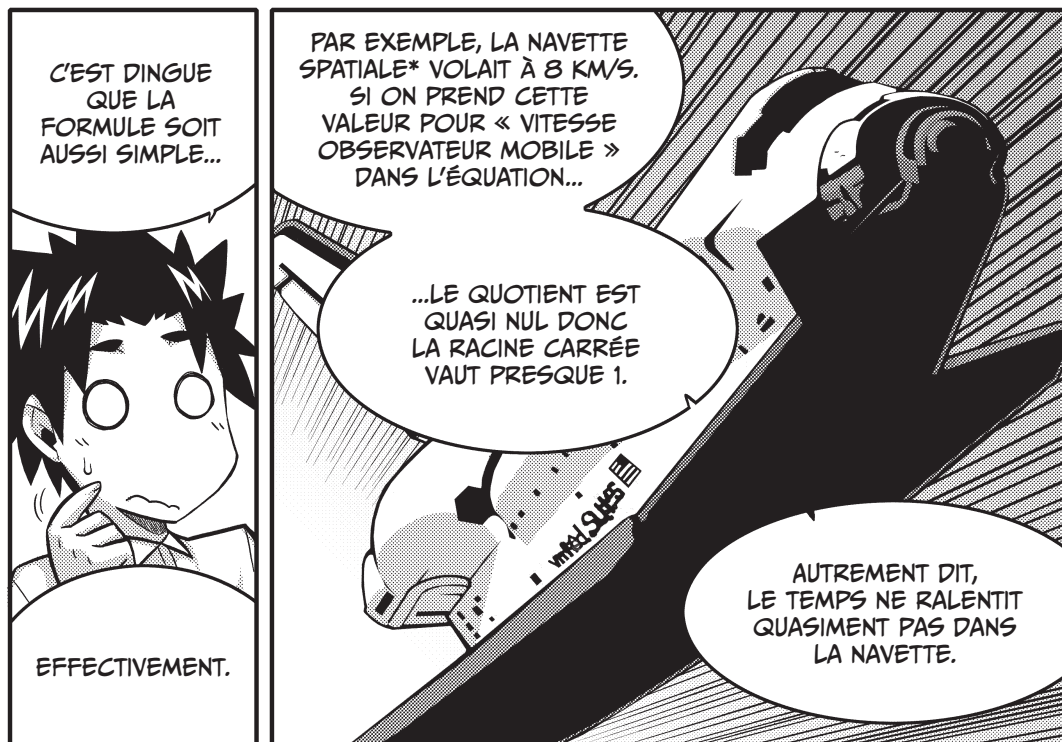
SES YEUX LUI DISENT QUE C'EST LA TERRE QUI TOMBE VERS ELLE.





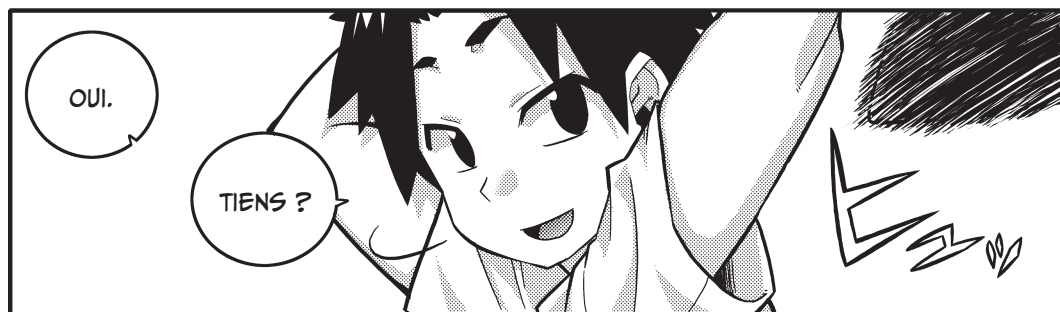
4. Le ralentissement du temps en équation

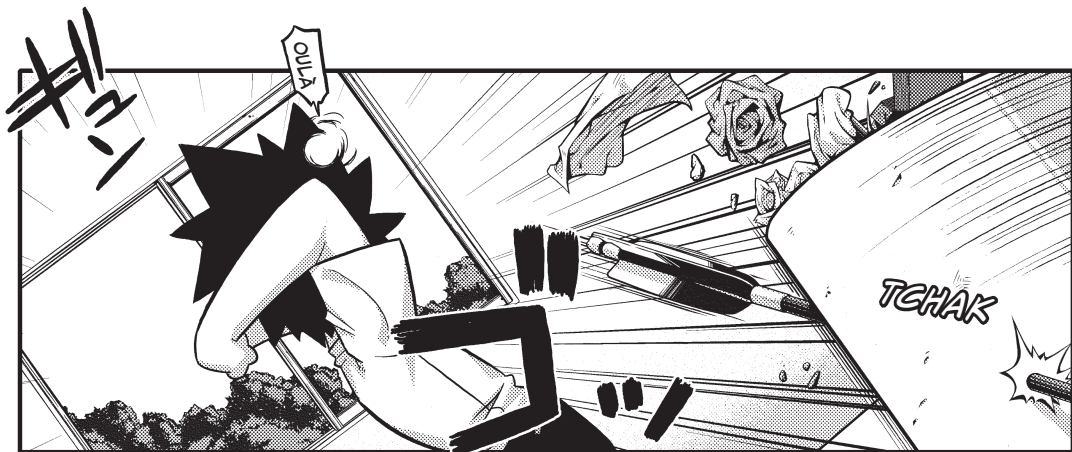




* ENTRE 1982 ET 2011, LES AMÉRICAINS EMPLOYÈRENT UNE NAVETTE PARTIELLEMENT RÉUTILISABLE POUR PLACER EN ORBITE DES SATELLITES ET DES ASTRONAUTES.

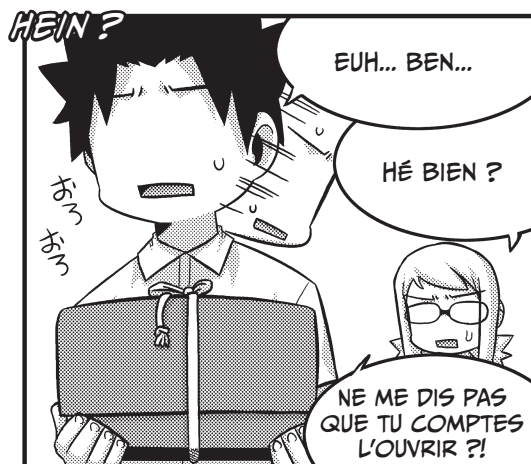
3 DÉCIMALES SUFFIRONT.





* ÉCHEC







POUR ALLER PLUS LOIN



On a vu que le temps ralentit pour un observateur en mouvement. Peut-on quantifier ce ralentissement ?

DILATATION DU TEMPS ET THÉORÈME DE PYTHAGORE

Page 69, M^{lle} Uraga et Minagi ont raisonné sur un cas particulier appuyé sur un triangle rectangle de côtés 3, 4 et 5. Puis, page 79, M^{lle} Uraga a écrit une formule générale. D'où vient cette dernière ?

Reprenons nos deux participants, Minagi dans la station spatiale et M^{lle} Uraga dans une fusée se déplaçant à une vitesse v constante par rapport à la station. Chacun possède une horloge à photons.

Lorsque M^{lle} Uraga regarde son horloge, elle voit le photon décrire des trajets verticaux puisque l'horloge se déplace avec elle. Vu depuis la station, le photon de la même horloge ne se déplace plus verticalement mais suit une droite inclinée.

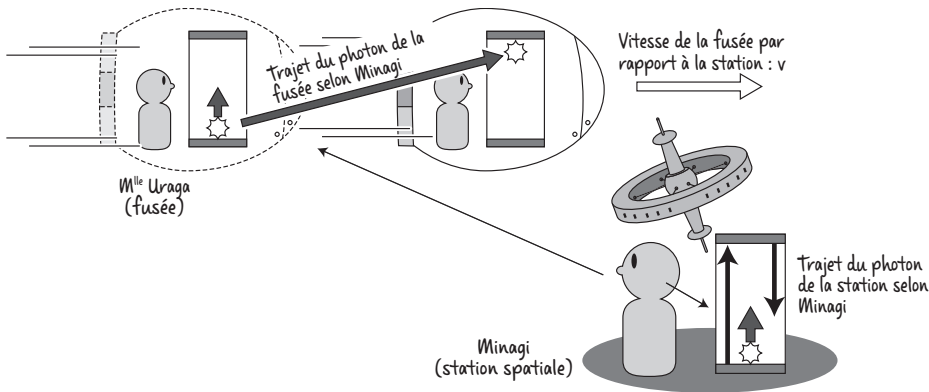


figure 1 — Configuration du voyageur, de l'observateur et des horloges

La traversée de l'horloge de la fusée par un photon (de bas en haut) prend un temps
 t selon Minagi,
 t' selon M^{lle} Uraga.

Puisque la vitesse c de la lumière est un invariant, la distance parcourue par le photon lors d'une traversée de l'horloge est

ct selon Minagi,
 ct' selon M^{lle} Uraga.

Par ailleurs, selon Minagi, l'horloge de la fusée se déplace horizontalement à la vitesse v et a donc parcouru la distance vt quand le photon atteint le haut de cette horloge. Ces trajets peuvent être représentés comme les côtés d'un triangle rectangle.

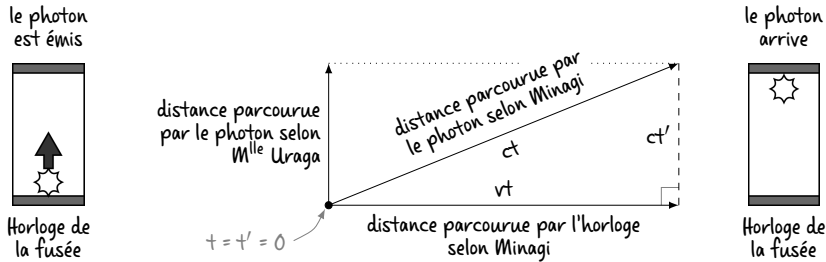


figure 2 — Trajets suivis par la lumière dans la fusée, vus depuis la fusée et la station spatiale

D'après le théorème de Pythagore,

$$(ct')^2 + (vt)^2 = (ct)^2$$

d'où

$$c^2 t'^2 = c^2 t^2 - v^2 t^2$$

puis

$$t'^2 = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) t^2 \quad \text{en divisant par } c^2$$

et enfin

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

car seule la solution positive a un sens physique.

Quand Minagi voit que la lumière a traversé toute l'horloge de la station, il constate que dans l'horloge de la fusée la lumière n'est pas encore en haut, ce qui s'explique puisque ce photon parcourt (à la même vitesse) un chemin plus long. Quand il s'écoule une seconde sur l'horloge de la station, la lumière a traversé un milliard de fois cette horloge ; pendant ce temps, la lumière de l'horloge de la fusée a fait moins de trajets selon l'observateur de la station. Selon Minagi, il s'est donc écoulé moins d'une seconde pour Mlle Uraga. Par suite, selon Minagi, le temps passe plus lentement dans la fusée que dans la station. Cette conclusion se retrouve dans l'équation : $t' \leq t$ car la racine carrée est au plus égale à 1.

Le facteur $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ montre également que pour une vitesse très inférieure à c , la dilatation du temps est négligeable. Elle ne devient perceptible que lorsque v se rapproche de c , et la racine carrée peut alors être arbitrairement petite.

DEUX EXEMPLES D'APPLICATION

La formule précédente nous donne une idée de la manière dont le temps se dilate, mais sa lecture est jusqu'ici restée qualitative : « Plus la vitesse de la fusée s'approche de la vitesse de la lumière, plus le temps ralentit. » Pour mieux comprendre, il faut prendre quelques exemples et faire les calculs.

Où irons-nous ? Les technologies actuelles, qui sont loin de permettre des vitesses quasi-luminiques, permettent déjà à des sondes d'atteindre Mars ou Vénus en quelques mois. Sortons du système solaire ! Direction Alpha du Centaure, la plus proche des étoiles, située à 4,4 années-lumière. L'année-lumière est une unité de longueur usuelle en astronomie ; elle mesure la distance parcourue par la lumière en un an dans le vide soit environ dix mille milliards de kilomètres :

$$1 \text{ al} \approx 300\,000 \text{ km/s} \times 1 \text{ an}$$

$$\approx \frac{300\,000 \text{ km}}{1 \text{ seconde}} \times \frac{60 \text{ secondes}}{1 \text{ minute}} \times \frac{60 \text{ minutes}}{1 \text{ heure}} \times \frac{24 \text{ heures}}{1 \text{ jour}} \times \frac{365 \text{ jours}}{1 \text{ an}} \times 1 \text{ an}$$

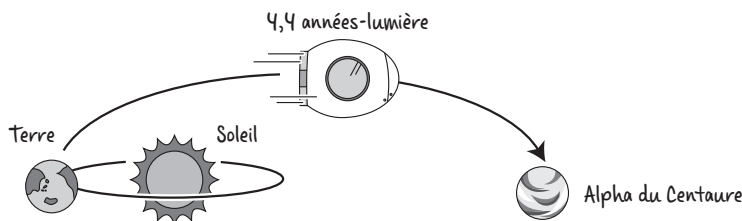
$$\approx 9\,460\,800\,000\,000 \text{ km}$$

Un train à grande vitesse (300 km/h) comme le TGV ou le Shinkansen parcourerait la distance Terre-Alpha du Centaure en

$$\frac{4,4 \times 9\,460\,800\,000\,000 \text{ km}}{300 \text{ km/h}} = 138\,758\,400\,000 \text{ h} = 15\,830\,000 \text{ années}$$

Supposons maintenant que l'on dispose d'une technologie permettant d'accélérer une fusée jusqu'à 90 % de la vitesse de la lumière. En se souvenant que la durée est égale à la distance divisée par la vitesse, le trajet durerait, vu depuis la Terre :

$$\frac{4,4 \text{ années-lumière}}{0,9c} = \frac{4,4 \text{ années} \times c \text{ (en km/an)}}{0,9 \times c \text{ (en km/an)}} = \frac{4,4}{0,9} = 4,9 \text{ années}$$



Le trajet durerait 15 830 000 ans en train (300 km/h).

Avec une fusée volant à 90 % de la vitesse de la lumière, il s'écoulerait sur Terre

$4,4 \div 0,9 = 4,9$ années tandis que dans la fusée la durée du voyage ne serait que de 2,1 années.

figure 3 — Voyage vers Alpha du Centaure

Appliquons la formule obtenue par le théorème de Pythagore : du point de vue des passagers de la fusée, il s'écoulerait seulement

$$4,9 \text{ années} \times \sqrt{1 - \frac{(0,9c)^2}{c^2}} = 2,1 \text{ années}$$

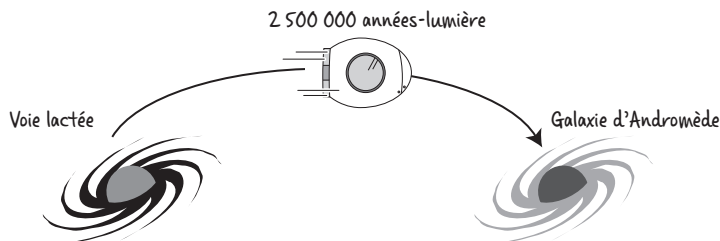
Pour une illustration encore plus spectaculaire, sortons de notre galaxie ! Allons jusqu'à la galaxie voisine, Andromède (ou M31). Dans un ciel hivernal sombre et sans nuage, elle apparaît comme une tache peu lumineuse, mais visible à l'œil nu, dans la constellation d'Andromède. Elle se trouve à une distance d'environ 2 500 000 années-lumière. Ce que nous voyons aujourd'hui est donc la lumière émise par cette galaxie il y a deux millions et demi d'années. Si une explosion s'y produisait maintenant, nous ne le saurions que dans 2 500 000 ans, le temps que la lumière nous parvienne.

Pour une telle aventure, prenons la plus perfectionnée des fusées qui seront peut-être un jour disponibles, celle qui peut accélérer jusqu'à un cent-milliardième de la vitesse de la lumière :

$$99,999\,999\,999\% \text{ de } c = 0,999\,999\,999\,99c = (1 - 10^{-11})c$$

Pour un observateur resté sur Terre, le trajet de la fusée prendrait 2,5 millions d'années puisque la fusée vole pratiquement à la vitesse de la lumière. Pour les passagers de la fusée, cependant, il ne s'écoulerait que

$$2\,500\,000 \text{ années} \times \sqrt{1 - \left(\frac{(1 - 10^{-11})c}{c}\right)^2} = 11,2 \text{ années}$$



Si une fusée faisait le trajet à 99,999 999 999 % de la vitesse de la lumière, il s'écoulerait 2,5 millions d'années sur Terre mais seulement 11,2 années dans la fusée

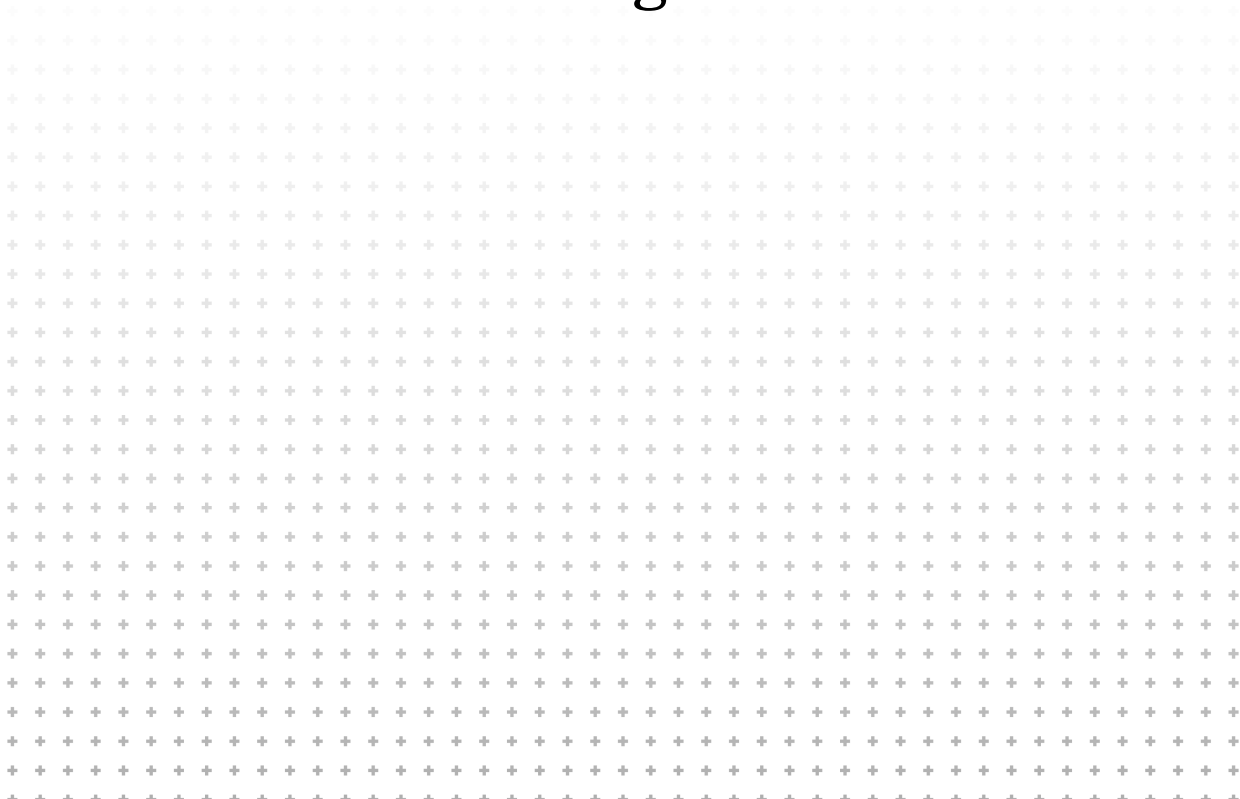
figure 4 — Voyage vers la galaxie d'Andromède



Plus on va vite,
plus on est petit
et lourd



À la découverte de la relativité générale



Index

- accélération 20–22, 75–78, 101–102, 122, 126–134
- action-réaction (loi) 28, 101
- addition des vitesses 31, 50–55
- annihilation de particules 108–109
- anomalie du périhélie de Mercure 163
- antiparticules 108–109
- apesanteur voir impesanteur
- big bang 152–154
- conservation (masse, énergie) 103–104
- contraction des longueurs 92–97, 112
- courbure de l'espace-temps 142, 162
- déviation de la lumière 22, 135–144, 162
- $E = mc^2$ 105–108, 115
- Einstein 40–42, 122, 133, 162
- énergie 103–109, 115
- espace absolu stationnaire 32–41
- espace-temps 43, 141–145, 160–164
- éter 32–39
- $F = ma$ 28, 101, 114
- force
 - centrifuge 129–131
 - centripète 131
 - d'inertie 124–129
- Friedmann 152
- Galilée 23, 53
- GPS 165
- grands cercles 142
- gravité 22, 100, 133
 - accélération 78
 - déformation de l'espace-temps 138–145, 160–164
 - déviation de la lumière 22, 135–144, 162
 - dilatation du temps 76–78, 145–150, 160–162
 - principe d'équivalence 78, 122, 133
- horloge à photons 64–71, 84–86
- Hubble 152–154
- impesanteur 100, 123, 134, 147
- inertie 24, 124–126
- lentillage gravitationnel 137, 163
- loi
 - action et réaction 28, 101
 - conservation de la masse 103–104
 - conservation de l'énergie 103–105
 - de l'inertie 24, 28, 101, 124
 - $F = ma$ 28, 101, 114
- longueur voir contraction
- Lorentz (transformation de) 54, 112
- lumière 30–32, 36, 46–50
 - déviation 22, 135–144, 162
 - horloge à photons 64–71, 84–85
- masse 98–109, 114–116
- Maxwell 30–32
- mécanique newtonienne 28, 53, 101
- Mercure 163
- Michelson 38
- milieu(x) 32–39, 46
- Morley 38
- mouvement 24–28, 41, 136
- Newton 28, 101
- parabole 136, 139–141
- paradoxe des jumeaux 73–79
- particule 108–109, 113
- périhélie 163–164
- poids 98–101 ; voir aussi masse
- principe
 - d'équivalence 78, 122, 133
 - galiléen de relativité 23–28, 39, 53
 - Pythagore (théorème de) 67–69, 84–85

rayonnement		temps	
électromagnétique	30–32, 46, 109	dilatation par l'accélération	76–78, 145–150, 160–162
cosmique	113–114	dilatation par la vitesse	59–72, 79, 85, 94
gamma	46, 108–109	mesure	64–71, 84–85
référentiel	21	paradoxe des jumeaux	73–79
espace-temps	141	Terre	26–27, 41, 100
mécanique newtonienne	24–28	transformation	
relativité restreinte	40, 75–76	de Galilée	53
relativité galiléenne	23–28	de Lorentz	54, 112–113
relativité générale	20–22	trou noir	164
déviation de la lumière	22, 135–144, 162–163	univers	151–154
dilatation du temps	76–77, 145–150, 160–164	Urashima	voir temps
principe d'équivalence	78, 122, 133	vitesse	
relativité restreinte	20–21, 40–43	addition	31, 50–55
dilatation du temps	62–69	de la lumière	29–31, 38–39, 42, 49
paradoxe des jumeaux	73–79	limite	98–99, 114–116
simultanéité	50–52	Voie lactée	41, 87–88