

savoir sans frontieres

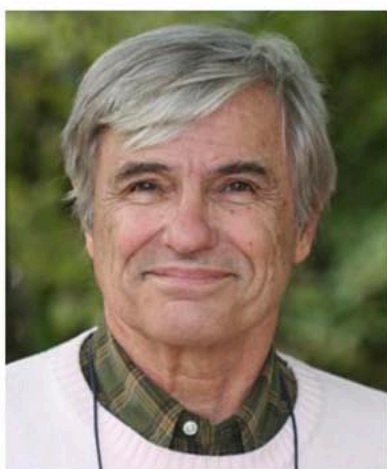
LE TROU NOIR

par Jean-Pierre Petit



Savoir sans Frontières

Association à but non lucratif créée en 2005 et gérée par deux scientifiques français. But : diffuser des connaissances scientifiques en utilisant la bande dessinée à travers des pdf gratuitement téléchargeables. En 2020 : 565 traductions en 40 langues avaient ainsi été réalisées. avec plus de 500.000 téléchargements.



Jean-Pierre Petit

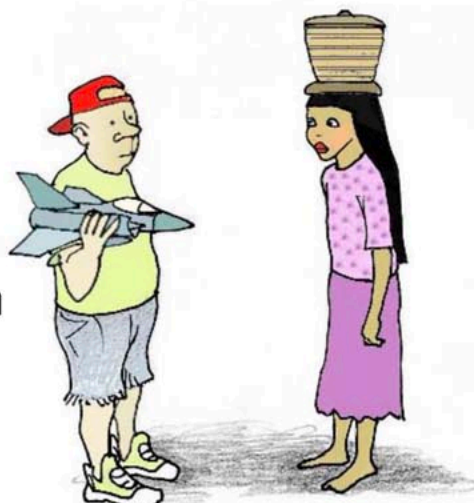


Gilles d'Agostini

L'association est totalement bénévole. L'argent des dons est intégralement reversé aux traducteurs.

Pour faire un don, utilisez le bouton Paypal sur la page d'accueil du site Internet

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>



Coordonnées bancaires France ➔ Relevé d'Identité Bancaire (RIB) :

Etablissement	Quichet	N° de Compte	Cle RIB
20041	01008	1822226V029	88

Domiciliation : La banque postale
Centre de Marseille
13900 Marseille CEDEX 20
France

For other countries ➔ International Bank Account Number (IBAN) :

IBAN
FR 16 20041 01008 1822226V029 88

and ➔ Bank Identifier Code (BIC) :

BIC
PSSTFRPPMAR

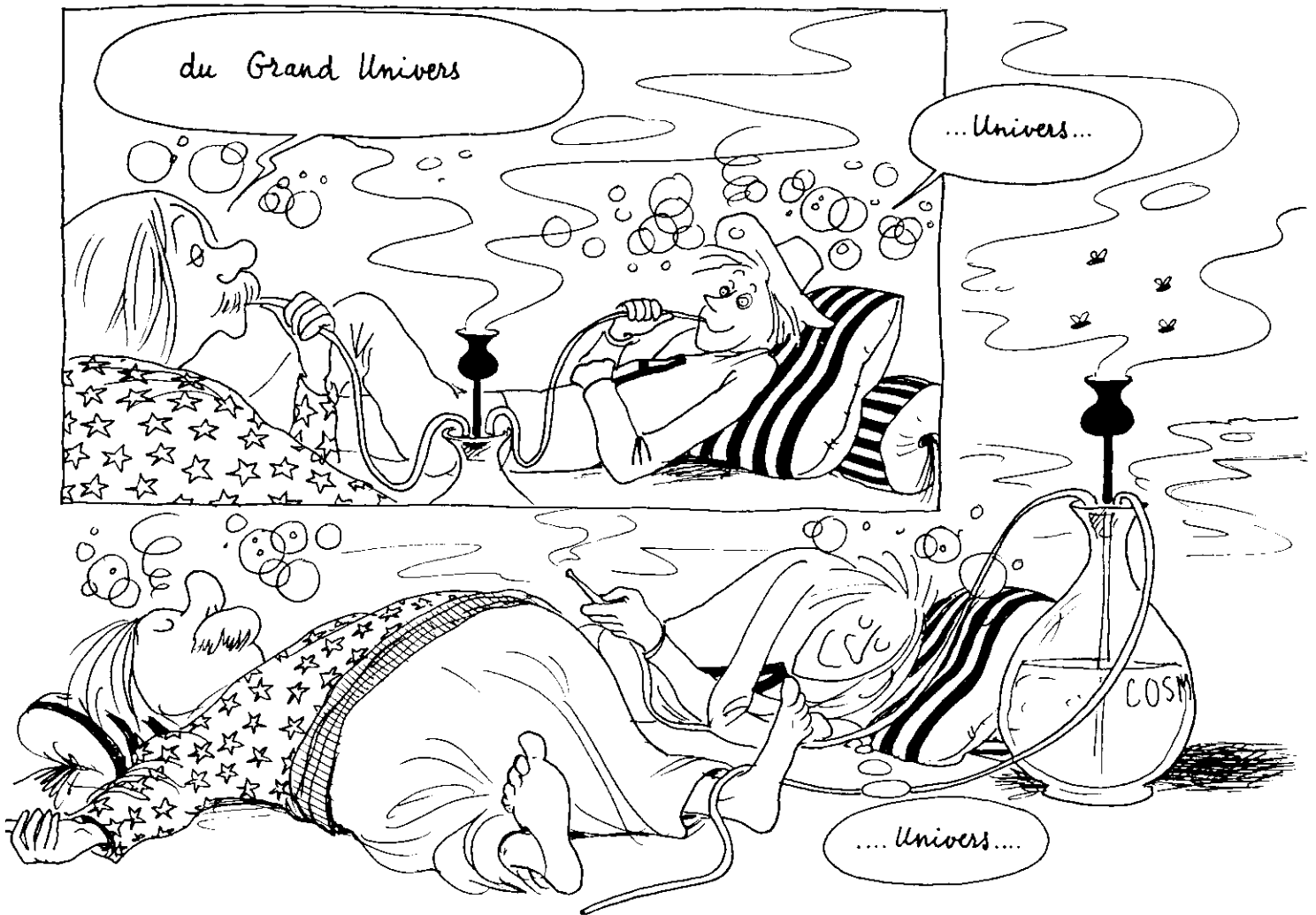
Les statuts de l'association (en français) sont accessibles sur son site. La comptabilité y est accessible en ligne, en temps réel. L'association ne prélève sur ces dons aucune somme, en dehors des frais de transfert bancaire, de manière que les sommes versées aux traducteurs soient nettes.

L'association ne salarie aucun de ses membres, qui sont tous des bénévoles. Ceux-ci assument eux-mêmes les frais de fonctionnement, en particulier de gestion du site, qui ne sont pas supportés par l'association.

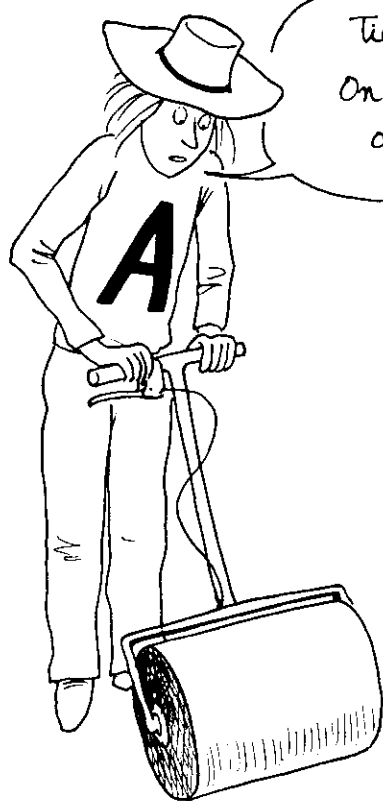
Ainsi, vous pourrez être assurés, dans cette sorte « d'œuvre humanitaire culturelle » que quelle que soit la somme que vous donniez, elle sera *intégralement* consacrée à rétribue les traducteurs.

Nous mettons en ligne en moyenne une dizaine de nouvelles traductions par mois.

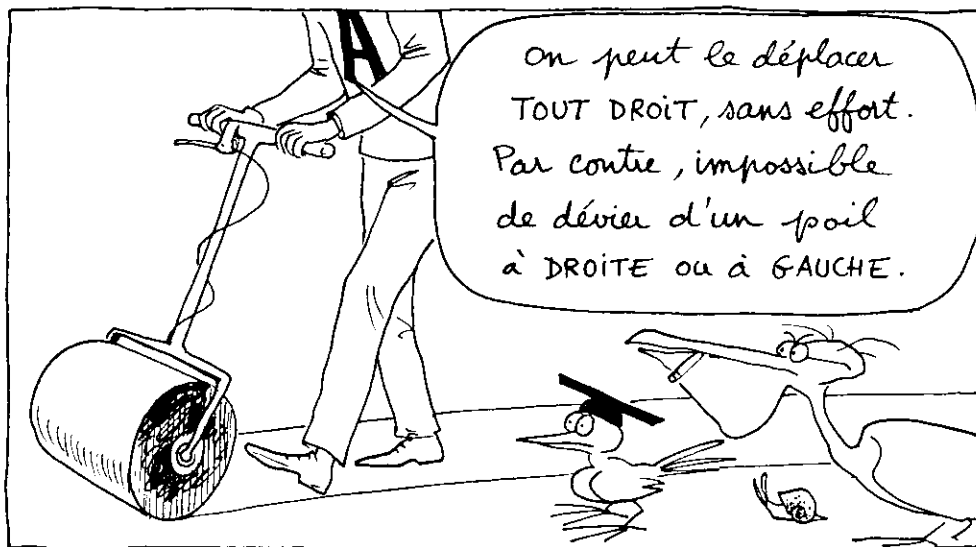




Une fois de plus, Anselme part explorer des mondes nébuleux.

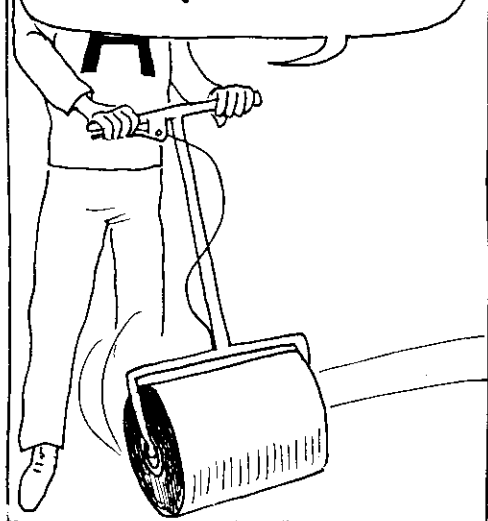


Tiens, qu'est-ce que c'est que ce truc là ?
On disait un rouleau pour court de tennis,
ou une sorte de rouleau à peinture.

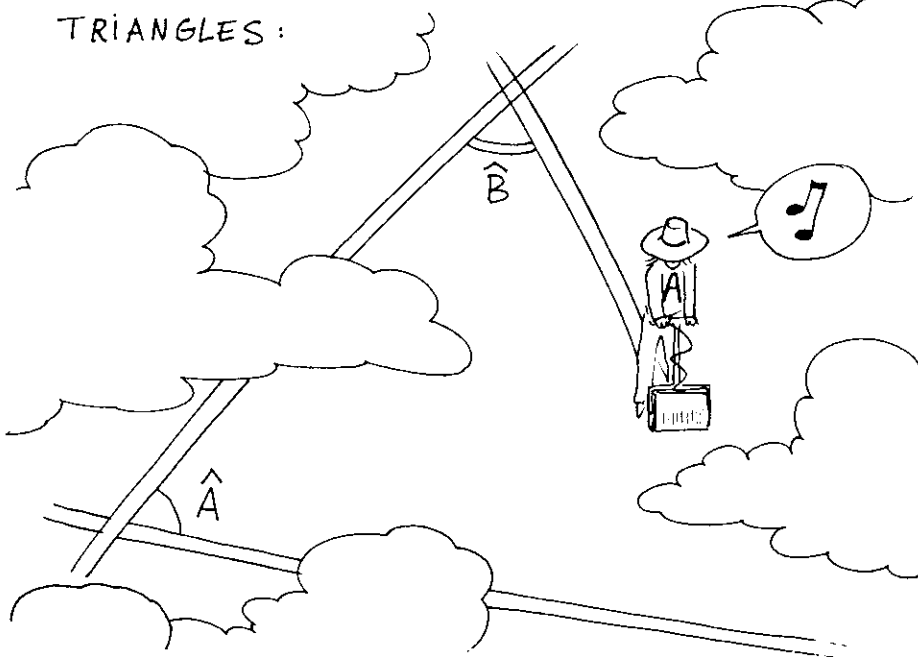


On peut le déplacer
TOUT DROIT, sans effort.
Par contre, impossible
de dévier d'un poil
à DROITE ou à GAUCHE.

A quoi sert cette
poignée ?
Tiens, elle supprime
l'adhérence et me
permet de temps en temps
de changer de direction.

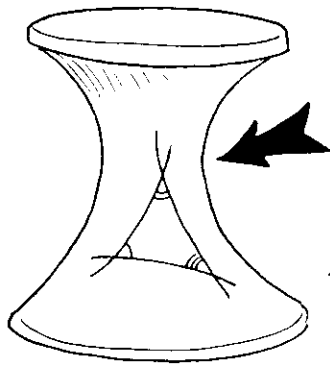
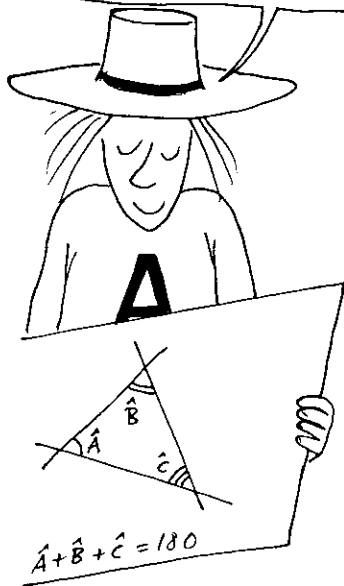


Grâce à cet appareil, Anselme peut tracer
les GÉODÉSIQUES d'une surface. A l'aide de
trois géodésiques, Anselme peut tracer des
TRIANGLES :



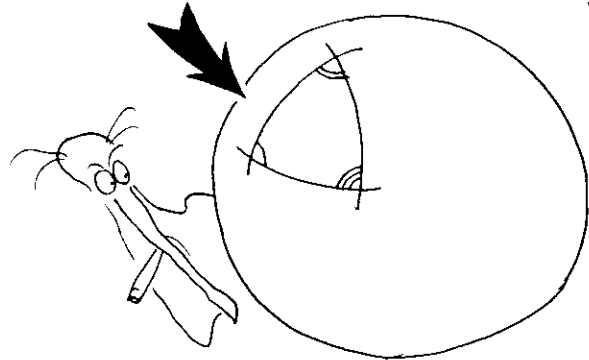
Une surface est un ESPACE À DEUX DIMENSIONS. C'est-à-dire qu'il faut DEUX QUANTITÉS pour
y repérer la position d'un point, deux coordonnées.

Voyons, quand l'espace est EUCLIDIEN, la somme des angles de mon triangle vaut 180° .

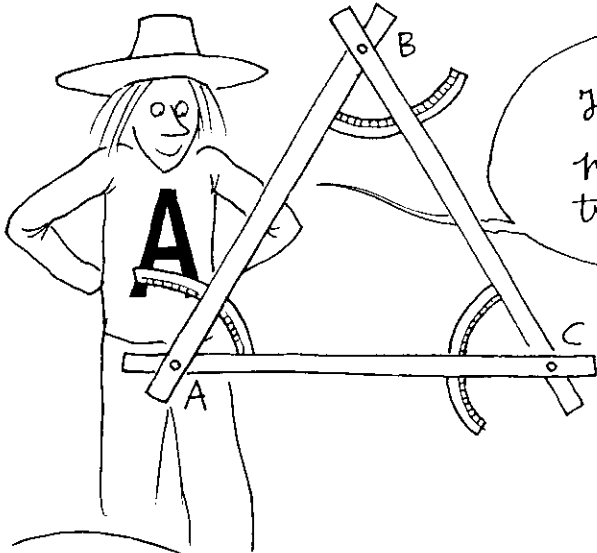


quand l'espace a une courbure négative, cette somme est INFÉRIEURE à 180 degrés

Dans un espace à courbure POSITIVE la somme est SUPÉRIEURE à 180 degrés



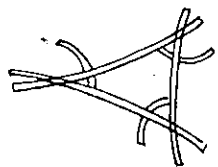
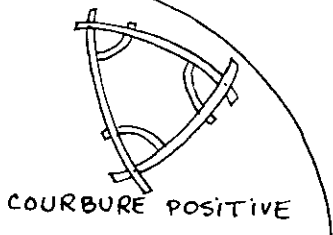
ESPACES A COURBURE VARIABLE:



J'ai inventé un curvimètre
Il est constitué de trois lamelles élastiques
pouvant tourner librement autour de
trois rivets A, B, C.

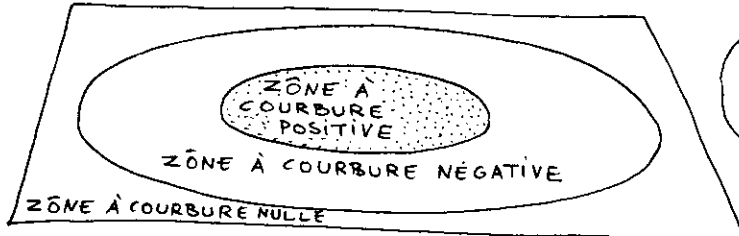
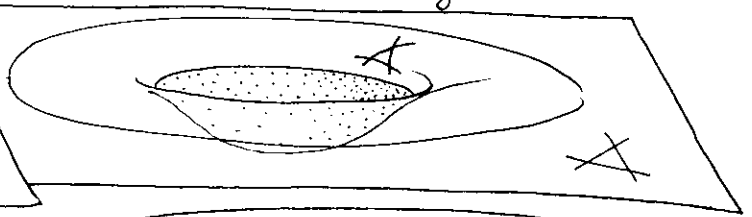
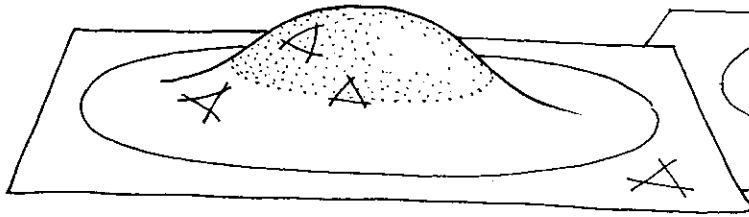


Il suffit de le
plaquer sur une surface
et de mesurer les angles
à l'aide des trois rapporteurs
pour connaître la COURBURE
LOCALE.

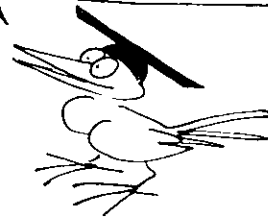


(*) Pour plus de détails, voir le GÉOMÉTRICON, du même auteur, Editions BELIN.

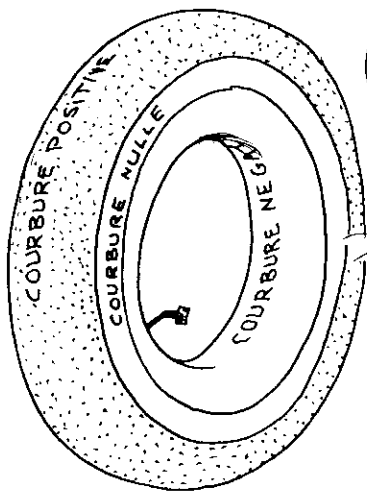
Cette bosse ménagée dans un plan est constituée d'une région centrale à courbure positive, entourée par une région à courbure négative.



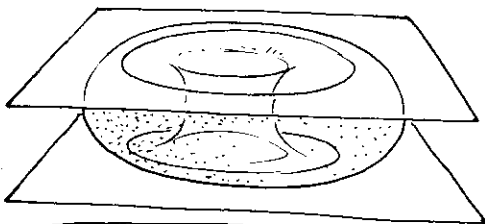
Du point de vue de la COURBURE, le CREUX est identique à la BOSSE



Sauf erreur, ceci est un TORE.



Oui, il y a une bande à courbure positive, une autre à courbure négative, séparées par une frontière où la courbure est nulle.

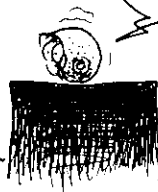
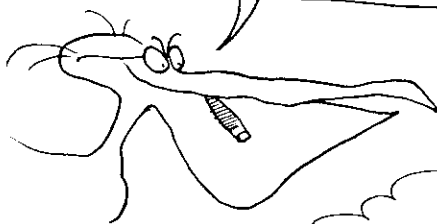


Cette dernière pouvant être déterminée en mettant le tore en sandwich entre deux plans.

mon cher Tirésias, avez-vous réalisé que votre coquille était un espace bidimensionnel à courbure variable ?

Léon, laisse Tirésias tranquille !

mi !...



POINTS CÔNIQUES



Tu vois, Tirésias, je vais MAILLER ma surface en entrecroisant des géodésiques, ce qui me donnera des tas de triangles

Coquille à courbure variable...
je t'en ficherais, moi!!..

Alors là, je n'y comprends plus rien!
Que se passe-t-il autour de ce point P?

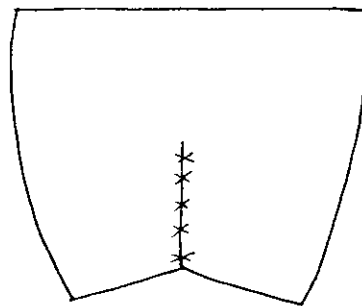
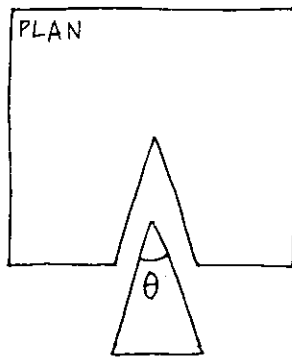
tu n'as qu'à utiliser
ton curvimètre.



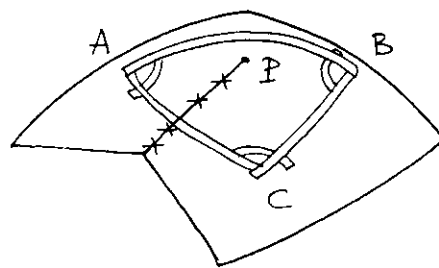
Enfin, Sophie, que se passe-t-il ? Si le triangle du curvimètre ne contient pas ce point P, il indique une courbure nulle.

Mais si le point P est dans le triangle, alors c'est courbe !

C'est un point cœnique. Tiens, regarde, je prends un plan, j'ENLÈVE un secteur d'angle θ et je recouds.



J'obtiens un cône que nous appellerons un POSICÔNE

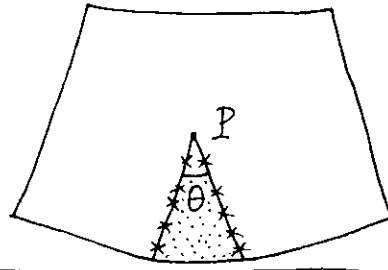
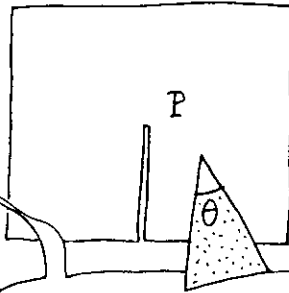


$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 180^\circ + \theta$$

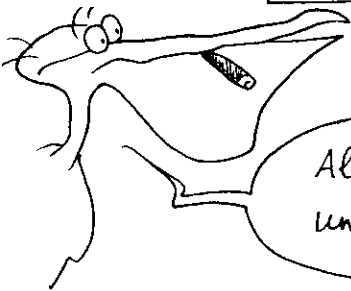


Vous pouvez vérifier, avec du carton. Un rouleau de papier collant vous aidera à matérialiser facilement les géodésiques.

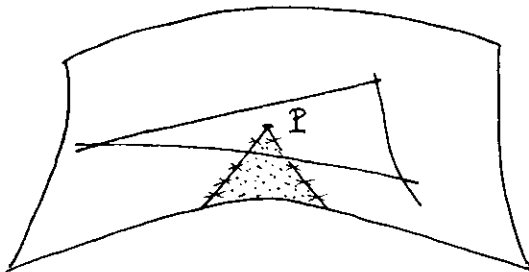
Bon, alors, si mon triangle contient le sommet d'un cône, la somme de ses angles est toujours supérieure à 180° !



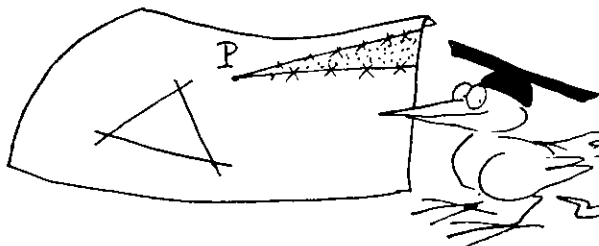
Pas si vite ! En entaillant mon plan je vais maintenant au contraire RAJOUTER un secteur d'angle θ .



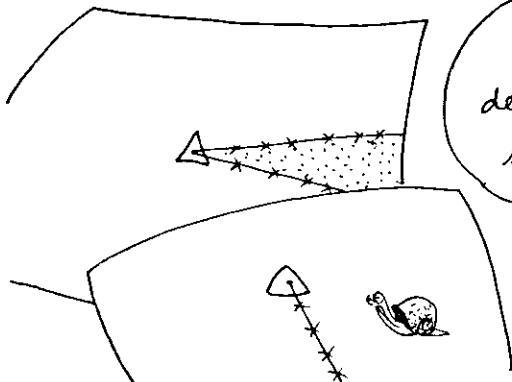
Alors... ça fera un NÉGACÔNE ?



Cette fois-ci, quand le triangle entoure le point P, la somme des angles vaut $180^\circ - \theta$!

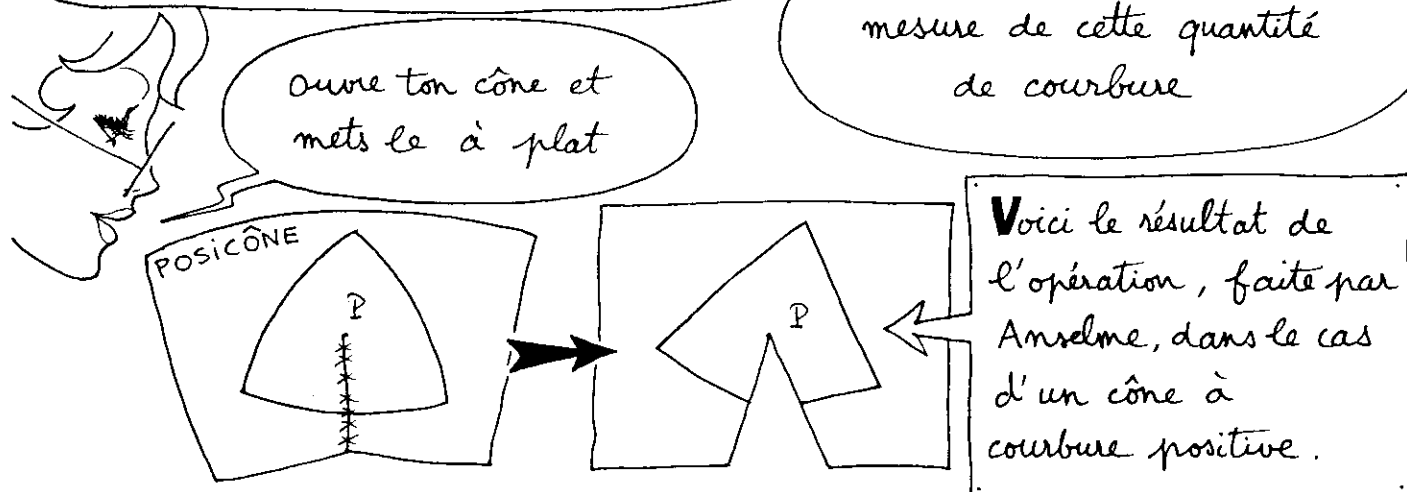
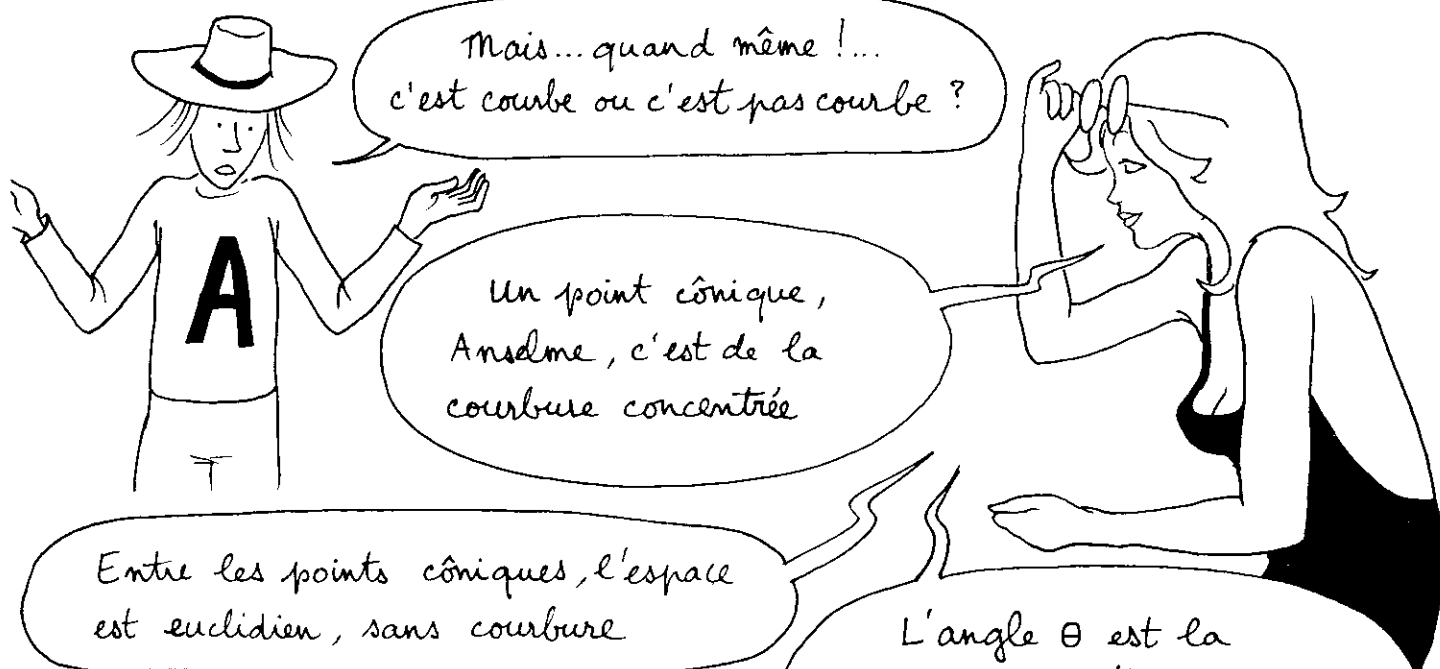


Mais, de nouveau, quand le point est en dehors du triangle, la somme vaut 180° .

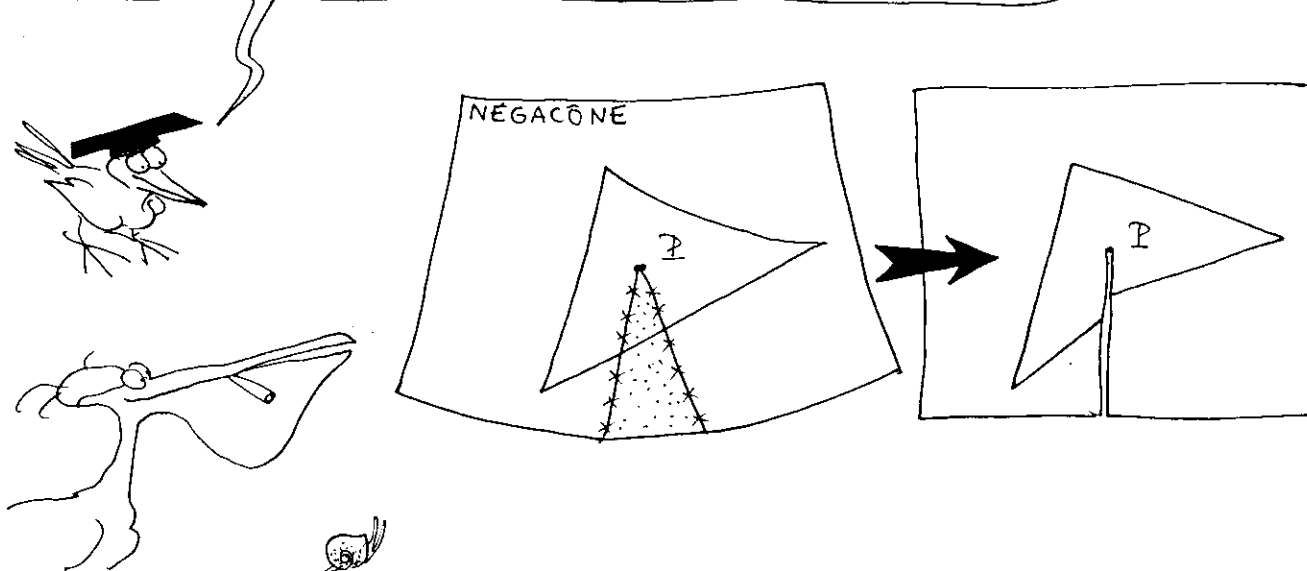


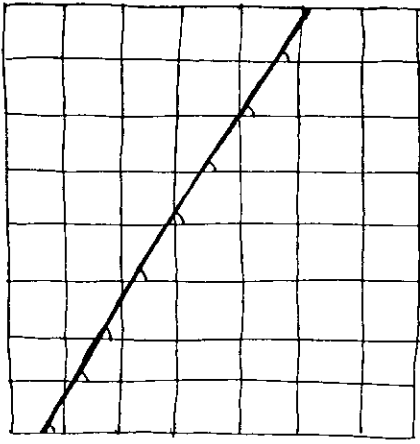
Cette propriété des cônes est indépendante de la taille du triangle, que celui-ci soit minuscule ou gigantesque.





Et dans le cas d'un cône à courbure négative



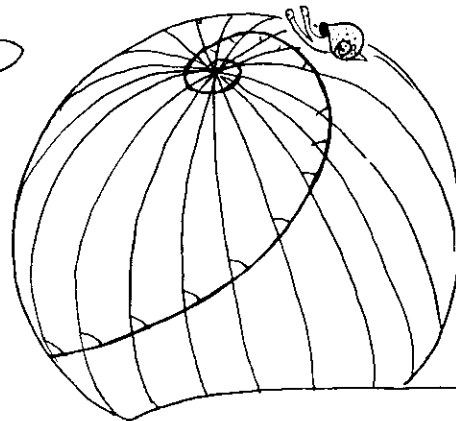


Prenons une surface PLANE et maillons-la avec des géodésiques formant un quadrillage régulier. On dira qu'on a PAVÉ cette surface avec des carrés, tous identiques. Si nous suivons une TRAJECTOIRE, un TRAJET, tel qu'on coupe les côtés des carrés successifs sous un même angle, ce trajet s'effectuera selon une géodésique de la surface

la Direction

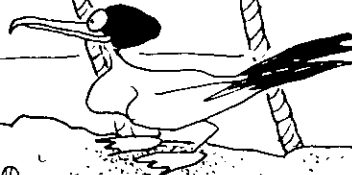
Mais, pourquoi ne pas faire cela sur une sphère ?

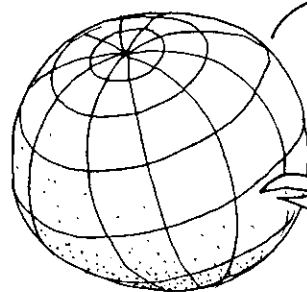
Primo, essaie de PAVER une sphère avec des carrés, bien jointifs, tu m'en diras des nouvelles.



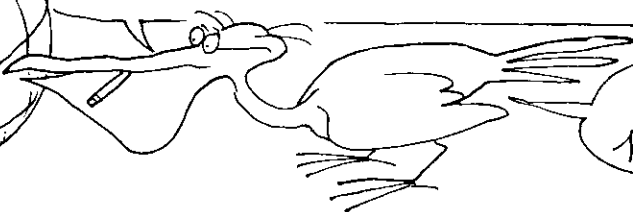
Les méridiens d'une sphère sont des géodésiques de celle-ci. Un trajet coupant ces méridiens sous un angle constant, différent de 90° , mènerait invariablement vers l'un des PÔLES !

Une navigation à cap constant mène... au pôle !

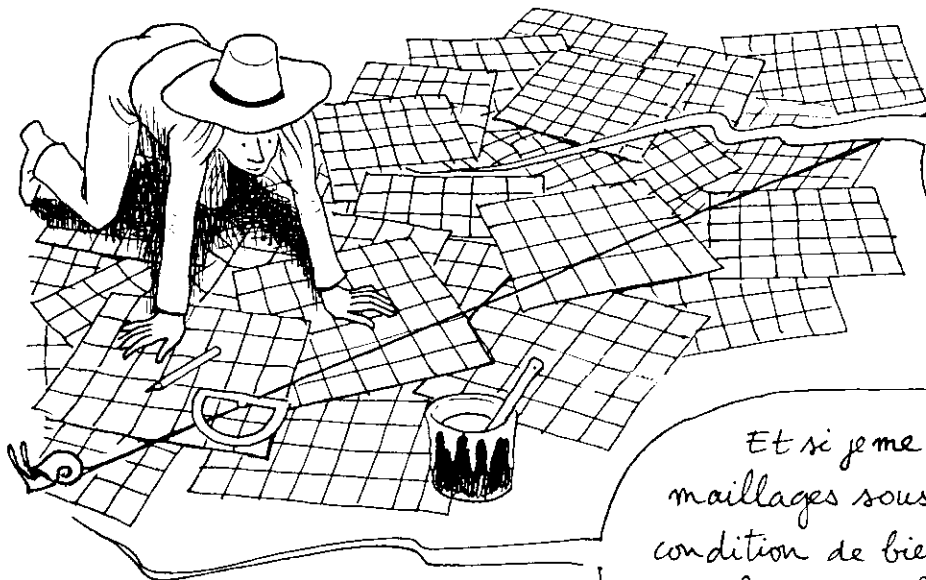




En coupant les méridiens de la sphère à 90° ,
je me déplacerais suivant des parallèles

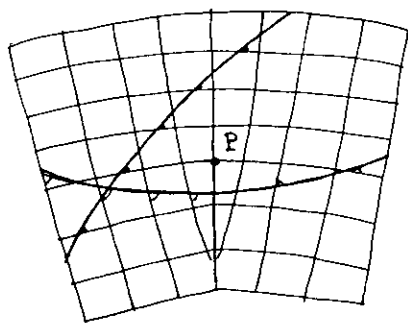


parallèles qui ne sont
pas des géodésiques. Vu ! (*)

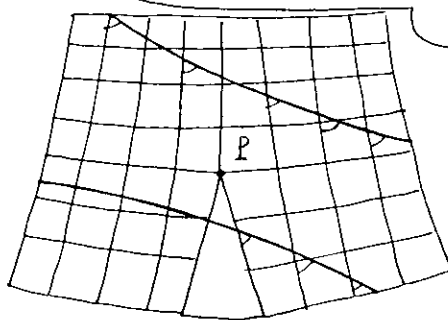


Je peux recouvrir
une surface plane,
euclidienne, à l'aide
d'éléments plans,
quadrillés

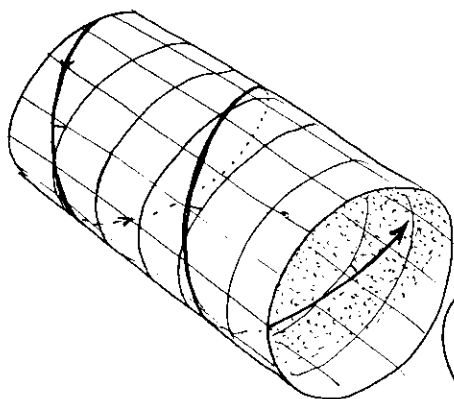
Et si je me déplace en coupant ces
maillages sous un angle constant, à
condition de bien assurer les raccords, de
proche en proche, j'obtiendrai une
géodésique.



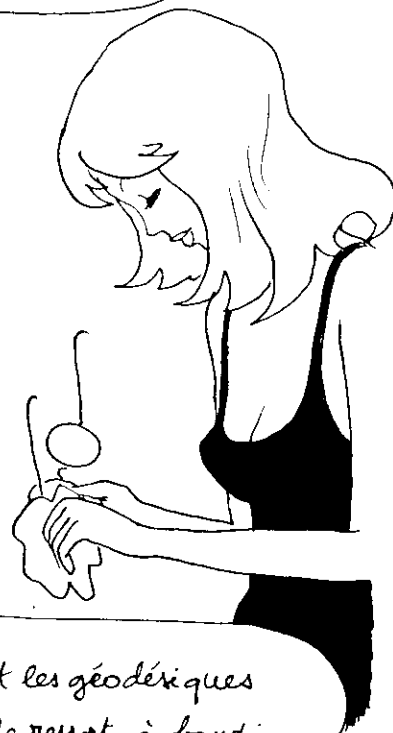
Posicône



Négacône

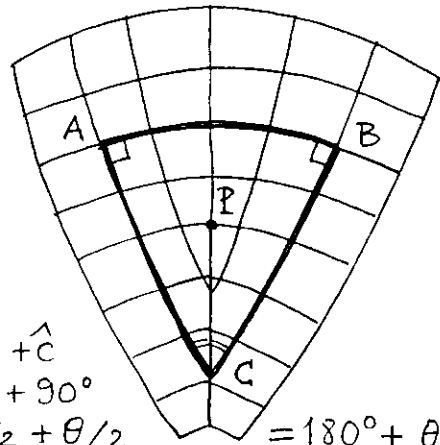
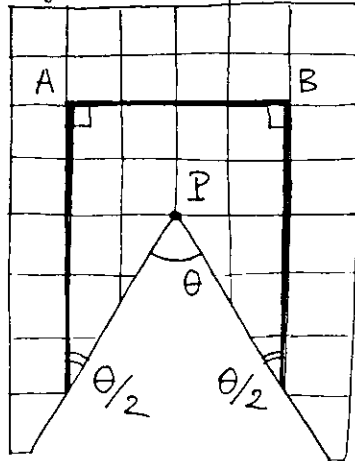
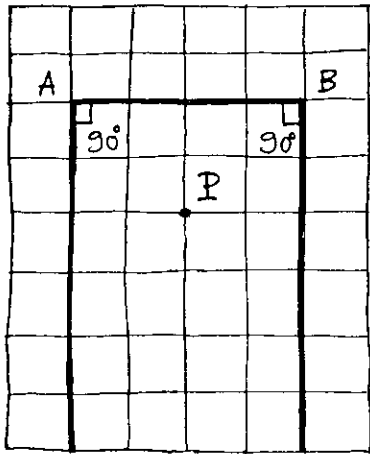


Ce moyen simple donne également les géodésiques
du cylindre, qui sont en forme de ressort à boudin



(*) On ne peut les tracer, sur la sphère, à l'aide de ruban adhésif (sauf l'équateur).

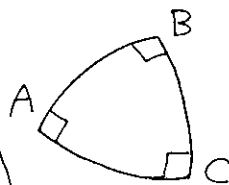
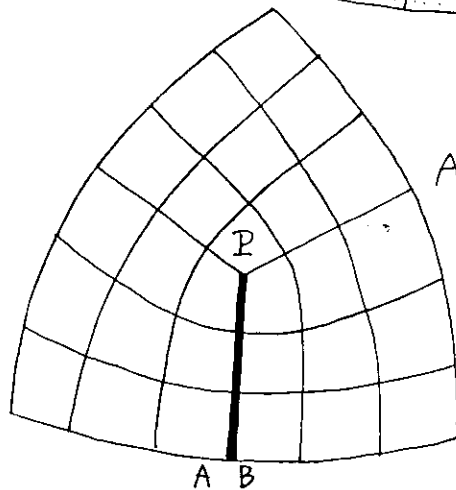
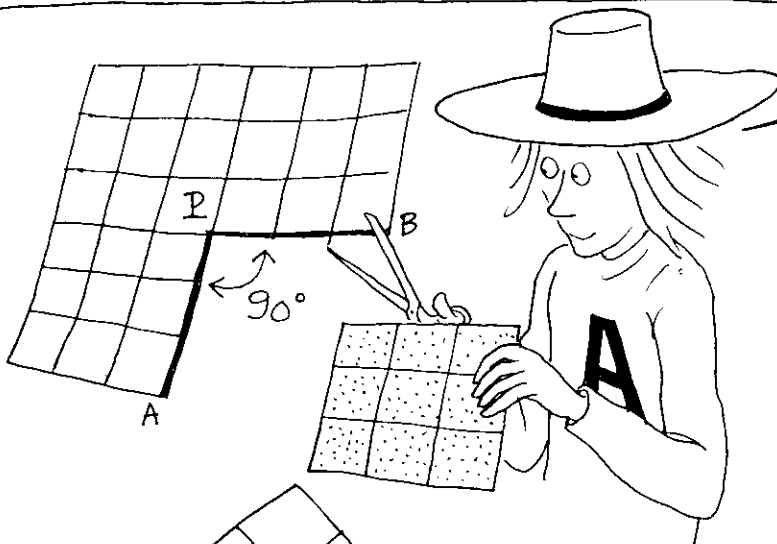
Voici pourquoi la somme des angles d'un triangle, sur un posicône, s'accroît de l'angle de découpe θ :



$$\begin{aligned}\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} &= 90^\circ + 90^\circ \\ &+ \theta/2 + \theta/2 \\ &= 180^\circ + \theta\end{aligned}$$

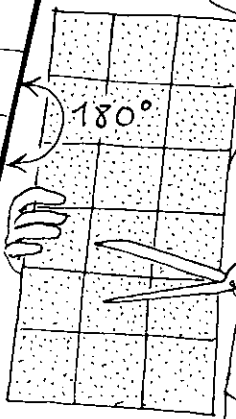
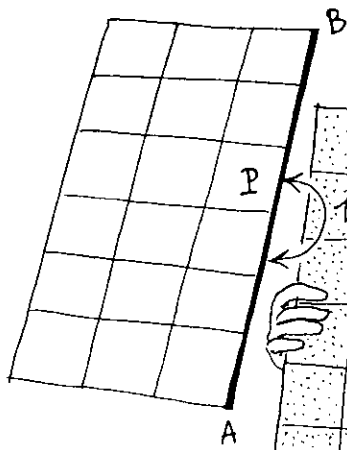
Anselme va maintenant construire des cônes particuliers, dans lesquels la régularité du maillage peut être conservée

La Direction

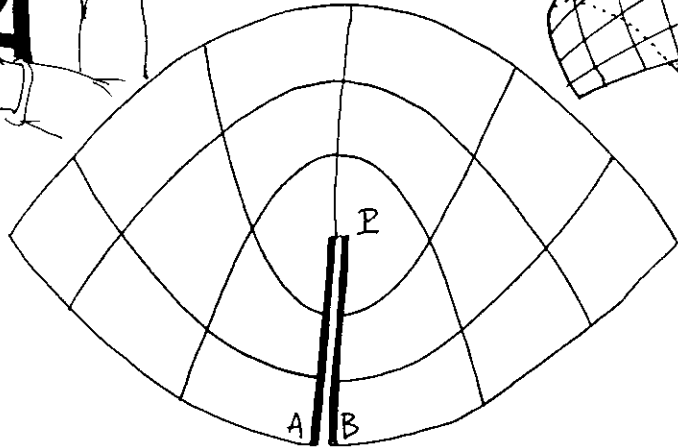
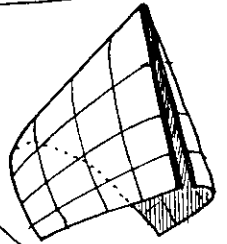


$$\begin{aligned}\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} &= 180^\circ + 90^\circ \\ &= 270^\circ\end{aligned}$$

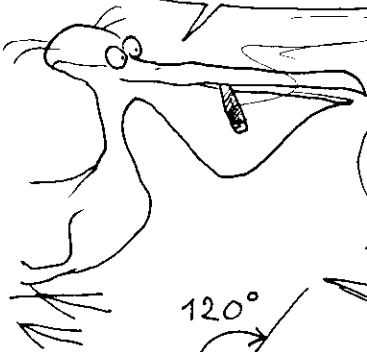
Sur un tel cône, tu peux tracer des triangles rectangles équilatéraux.



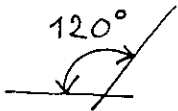
Maintenant, j'enlève
un secteur de 180° .



Sur un tel cône, la
somme des angles d'un
triangle vaut 360°



Ce qui signifie que l'on pourrait tracer
dessus, à l'aide de ses géodésiques, un triangle
ayant trois angles égaux à 120° , donc obtus.

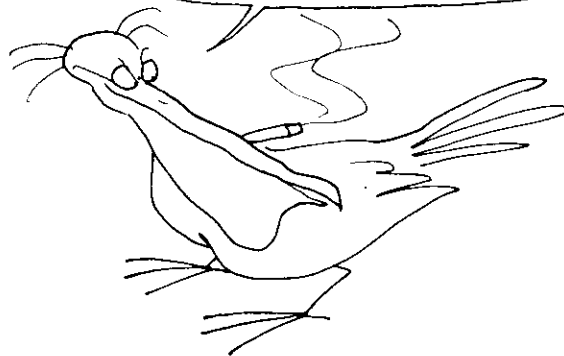


Et il se refermerait quand même ?

Hum...

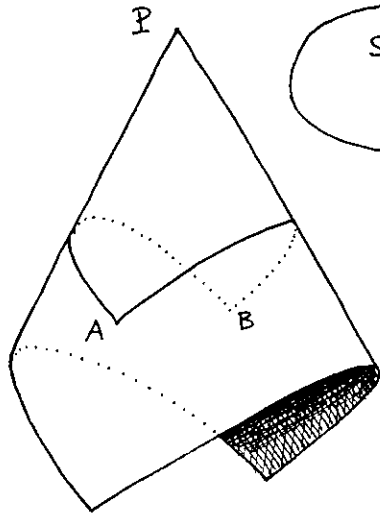


Bien sûr, mon cher Tirésias,
c'est vous qui êtes obtus !

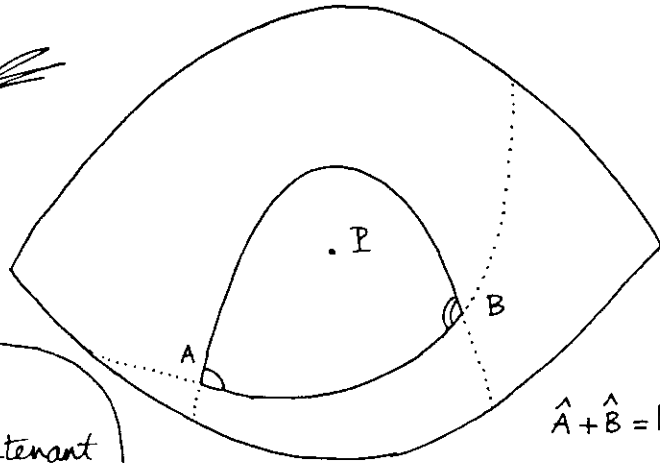


Mi !



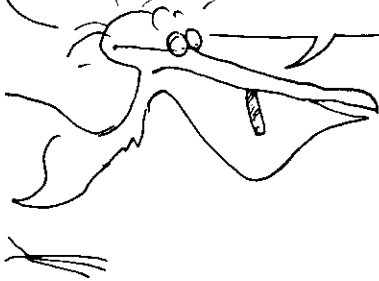


Sur ce cône, on peut tracer des BIANGLÉS, la somme des angles valant 180° .

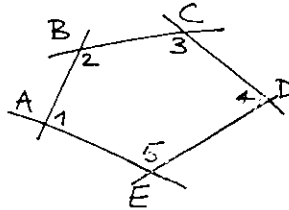
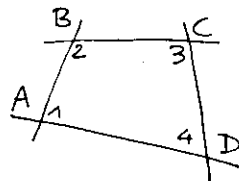
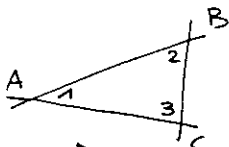


LE CÔNE VU DE DESSUS

Attendez ! là, je ne comprends plus... On parlait de triangles. Voilà maintenant des BIANGLÉS. Pourquoi pas, la prochaine fois, des monoangles ? ! ? ! ...



Tous ces objets sont des POLYGONES

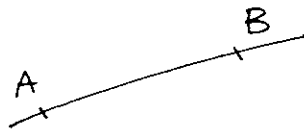


Etc...

Dans le PLAN:

- La somme des angles d'un
- triangle vaut 180°
- quadrangle vaut $180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$
- pentangle vaut $180^\circ + 180^\circ + 180^\circ = 540^\circ$

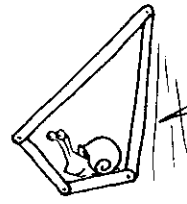
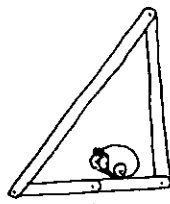
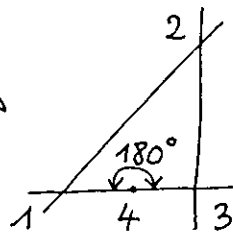
Et dans le cas du BIANGLE, réduit à un segment, cette somme est nulle



je craque...



Pourquoi 180° de plus à chaque fois que l'on rajoute un sommet ?



Hop!

ceci devrait vous éclairer

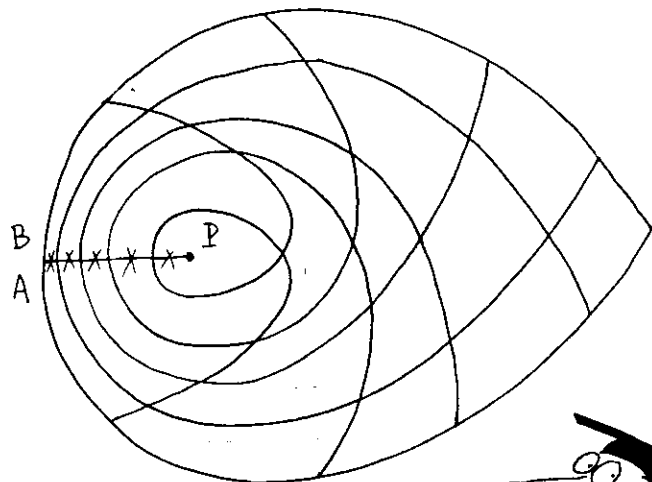
Bon, continuons...

Je vais maintenant enlever
les trois quarts du plan.

on dirait une
serviette de table

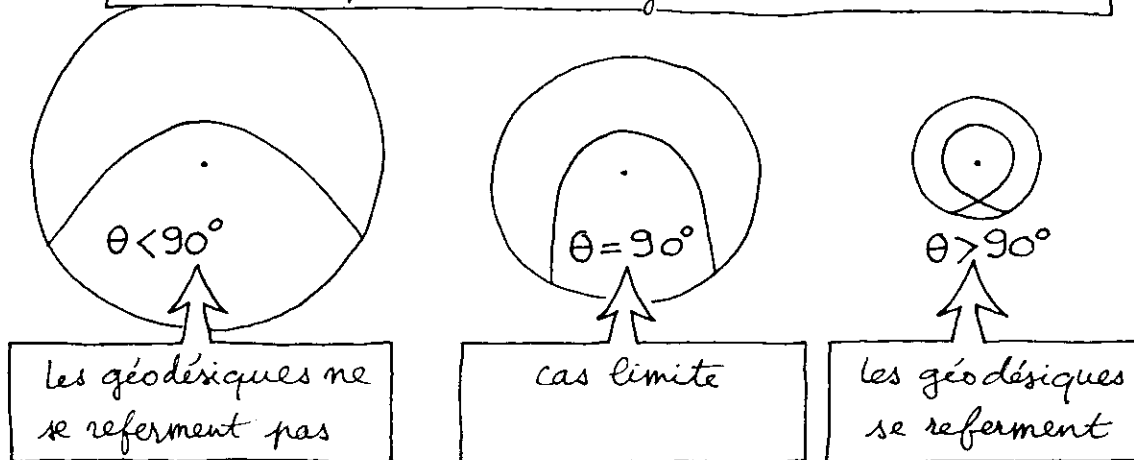
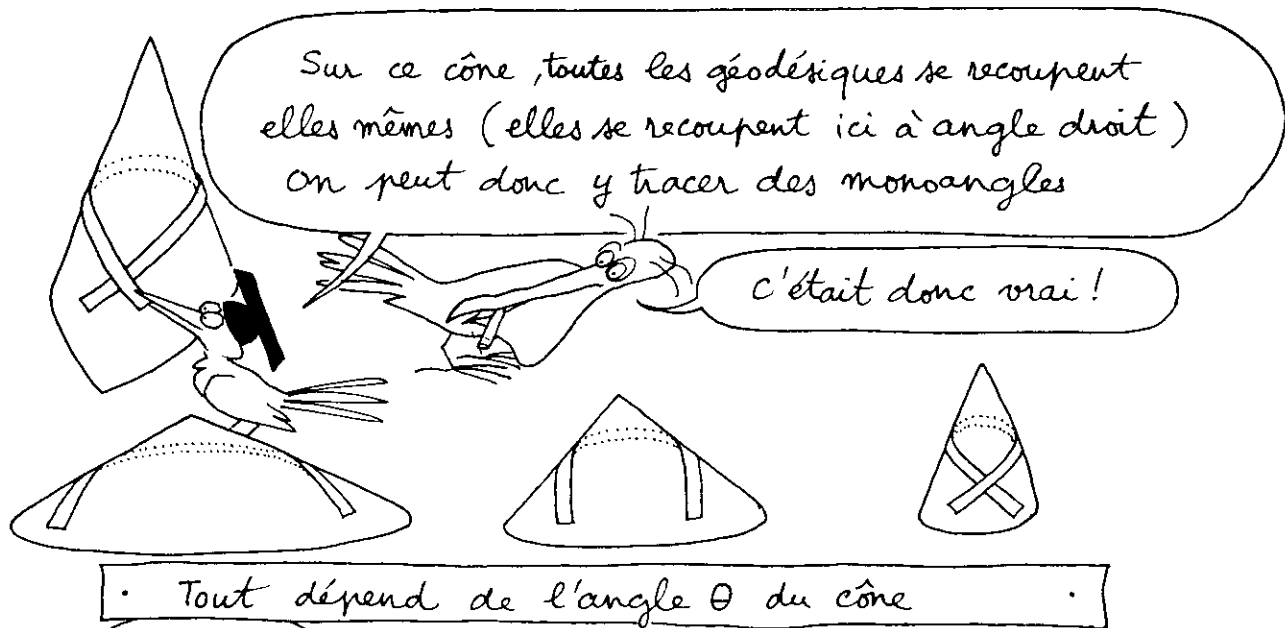


Et quand je la
regarde par le bout

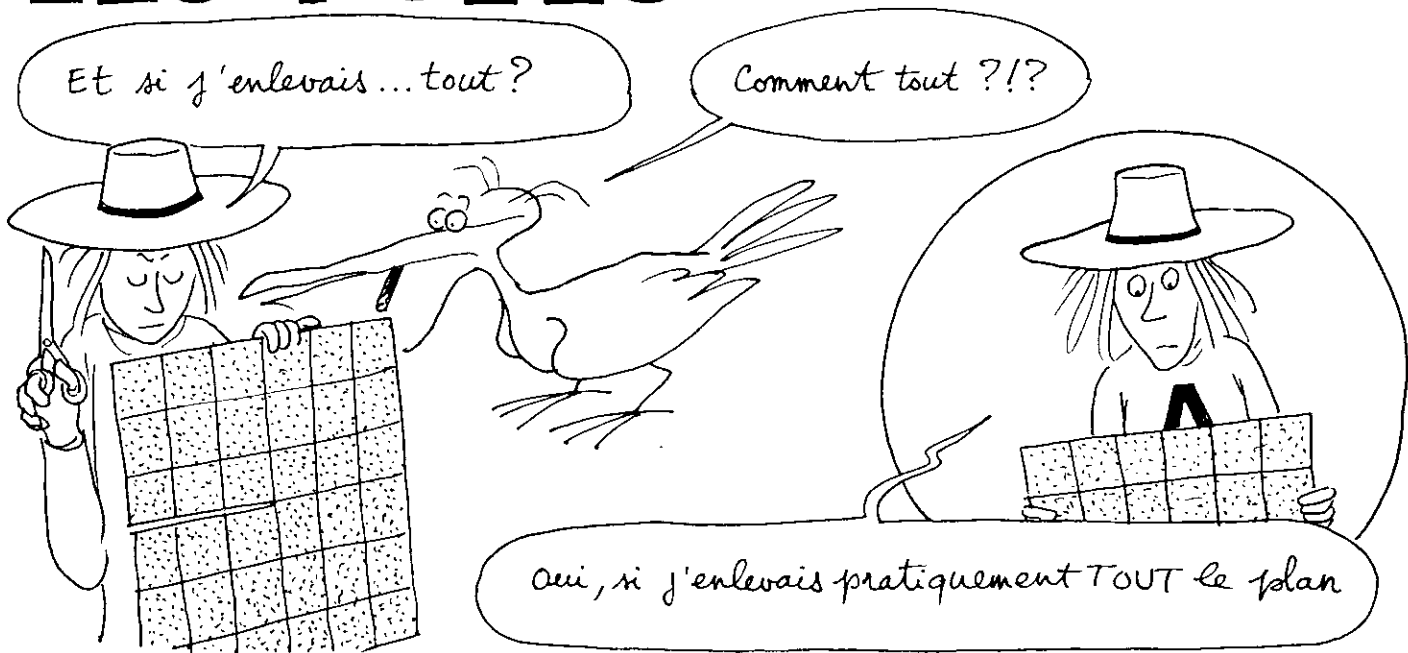


Anselme obtient ceci



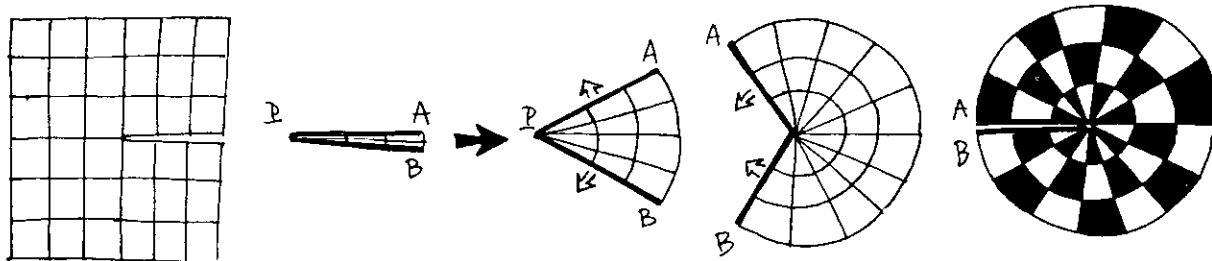


LES PÔLES

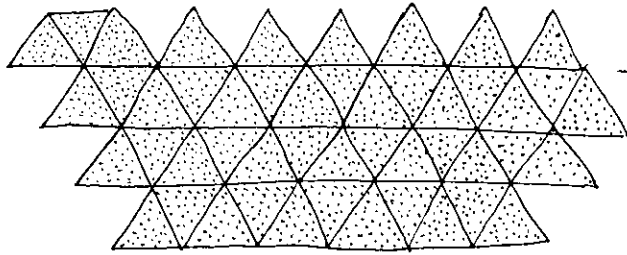




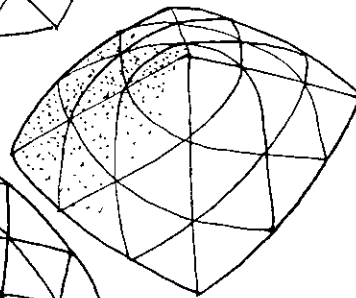
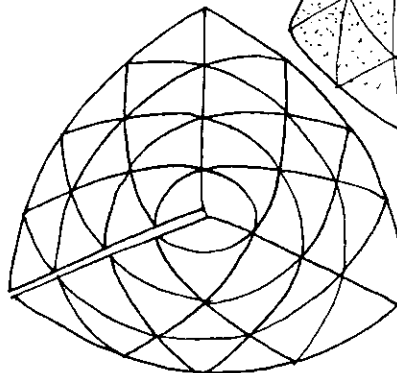
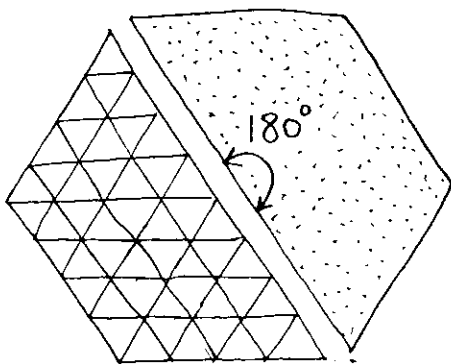
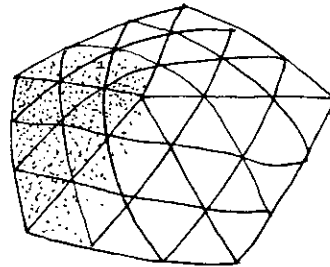
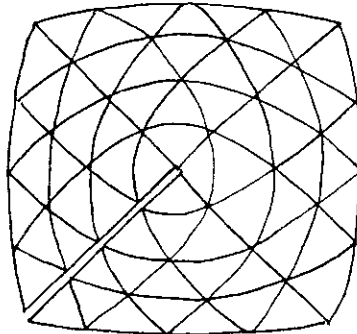
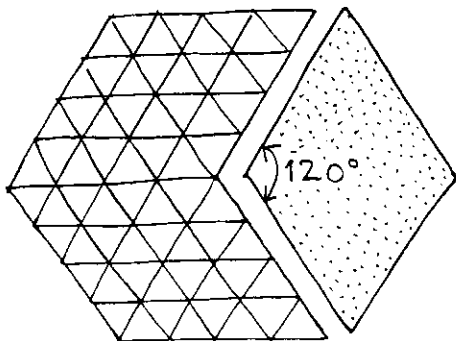
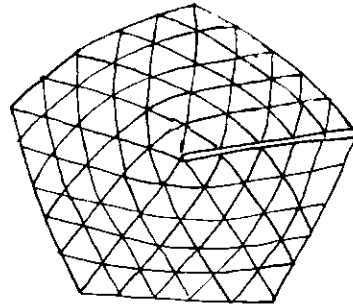
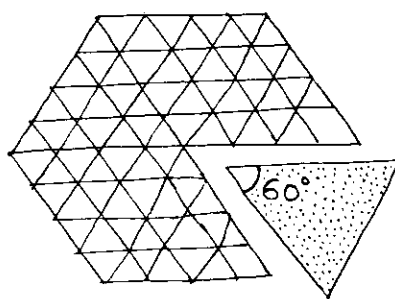
En enlevant pratiquement tout le plan et en appliquant ce procédé, on obtiendrait ceci :



Tout à l'heure, j'avais pavé des espaces à deux dimensions (surfaces) avec des quadrangles. Mais j'aurais aussi bien pu le faire avec des triangles

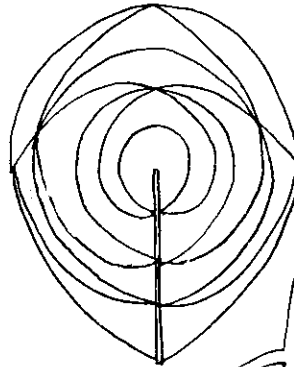
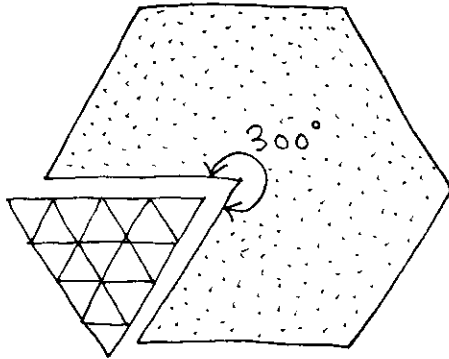
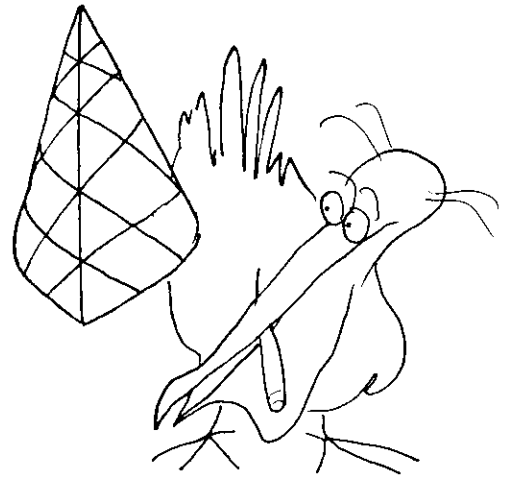
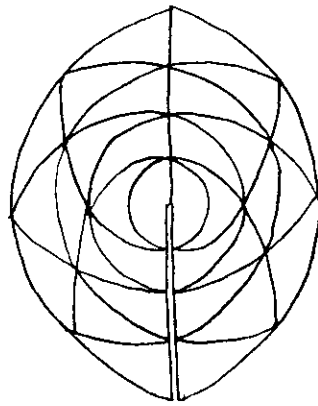
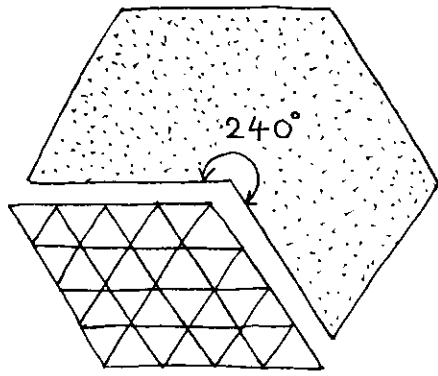


Ou avec des hexagones

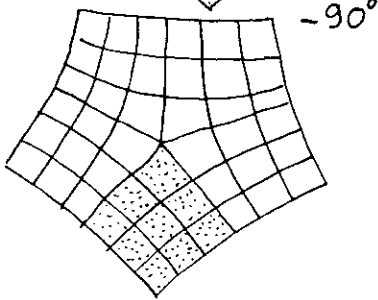
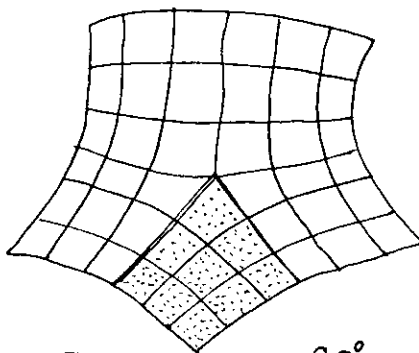


Ces maillages en triangles équilatéraux permettent d'engendrer les cônes d'angle 60° , 120° , 180° , 240° et 300°

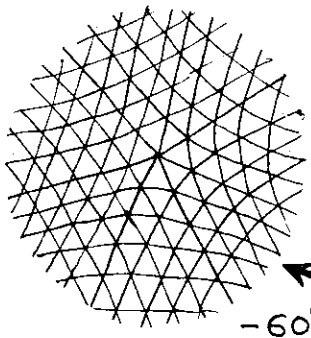
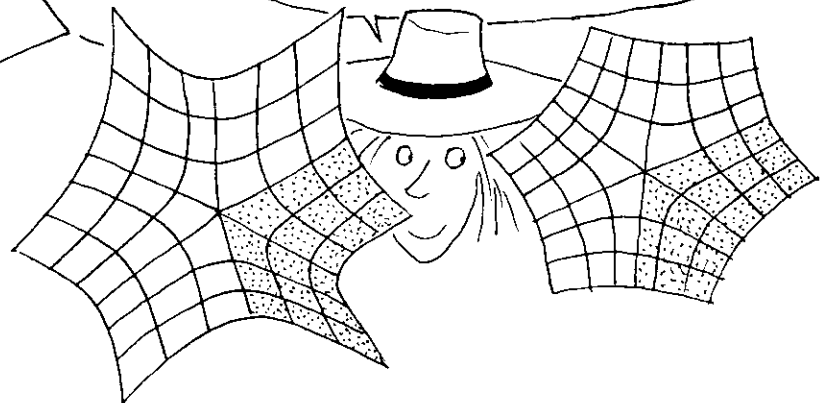




En insérant un secteur d'angle θ , je crée une courbure négative $-\theta$, concentrée au sommet de ce négacône



Quantité de courbure concentrée = -180° , etc...



on peut aussi faire de jolis négacônes avec des maillages triangulaires.



MESURE DE LA COURBURE

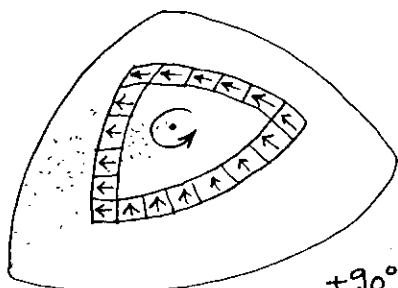
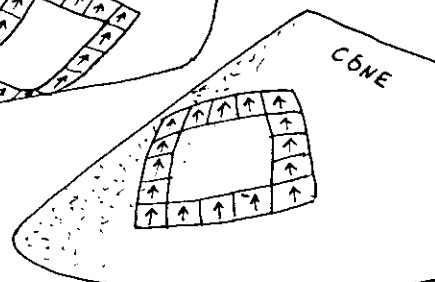
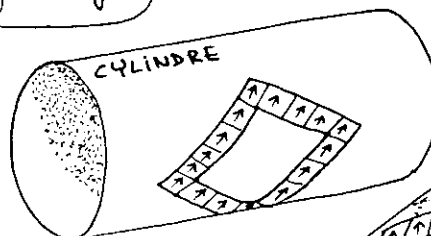
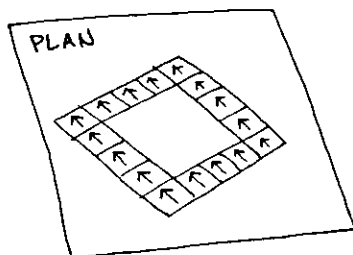
Voici Anselme très occupé à jouer à une marelle d'un nouveau genre

Le jeu consiste à entourer un point de concentration de courbure avec des carreaux en respectant la continuité du fléchage. Quand on a fait un tour autour du point P, l'angle dont la flèche a tourné donne une mesure directe de la courbure Θ

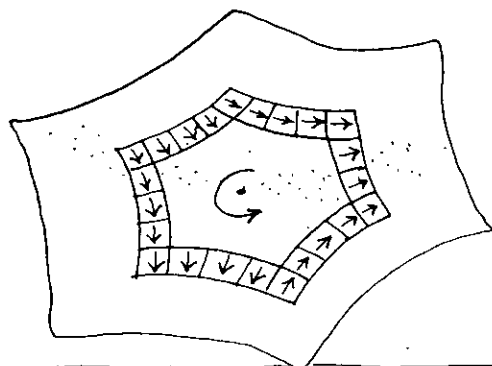
Il faut que mes carreaux soient bien jointifs

Quelques exemples :

Plan, cylindre, cône (sans entourer le sommet) : quantité de courbure : zéro



+90°



-180°

Négacône -180°



Posicône +90°

Tournons autour du point dans un sens quelconque. Si la flèche tourne dans le même sens, il s'agira d'un posicône. Si elle tourne en sens inverse, il s'agira d'un négacône.

Je vais fabriquer des posicônes ayant chacun un très petit angle θ

Des atomes de courbure,
en quelque sorte...

Et puis je
vais les coller
ensemble

J'obtiens une surface sur laquelle je vais
tracer des triangles faits de géodésiques,
obtenues à l'aide de ruban adhésif.

La somme des angles du triangle dépasse 180° d'une valeur
qui est égale à la somme des angles des cônes élémentaires
dont les sommets sont contenus dans ce triangle.

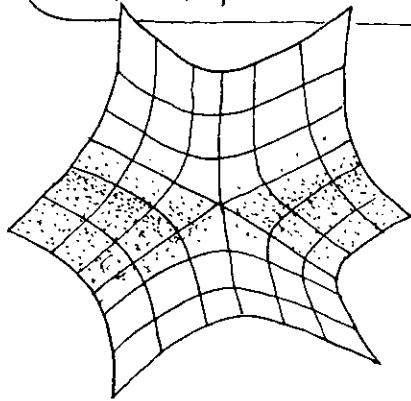
La Direction

Ce que nous appelons habituellement une
surface courbe peut être considéré comme
un assemblage d'un très grand nombre
de microcônes collés ensemble

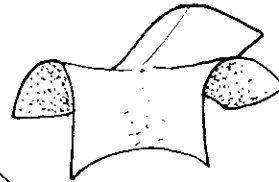
On peut aussi assembler des NÉGACÔNES, ou
des POSICÔNE et des NÉGACÔNES. Dans ce cas, la somme des
angles du triangle vaudra 180° , plus la quantité de
courbure qu'il contient, comptée algébriquement.

PATCHWORK

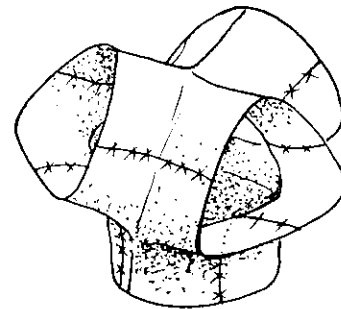
Sophie, qu'est-ce qui se passe si j'assemble des NÉGACÔNES ?



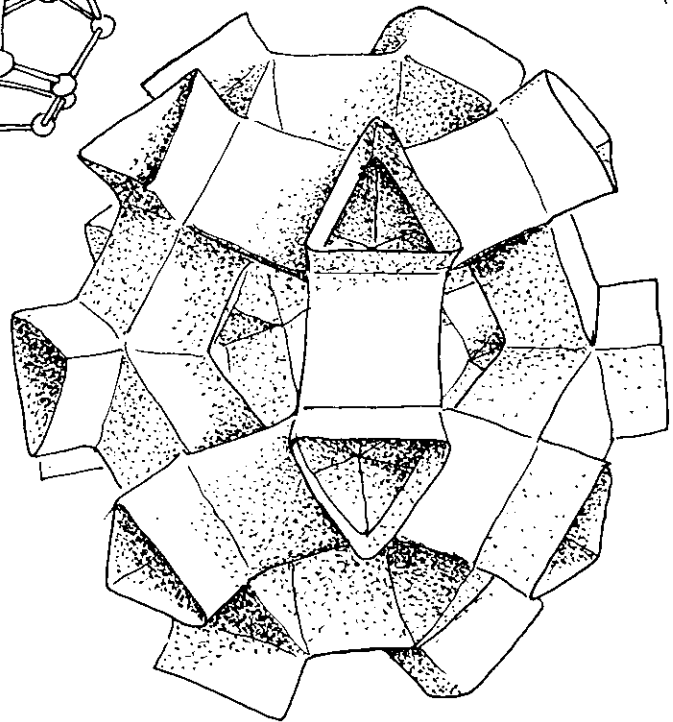
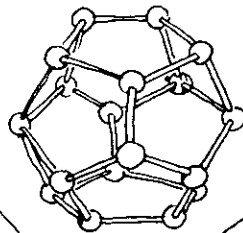
Par exemple
des négacônes
 $\theta = -180^\circ$. Leur
contour correspond
à un hexagone qui
aurait ses six angles droits



on peut d'abord les
assembler quatre par quatre



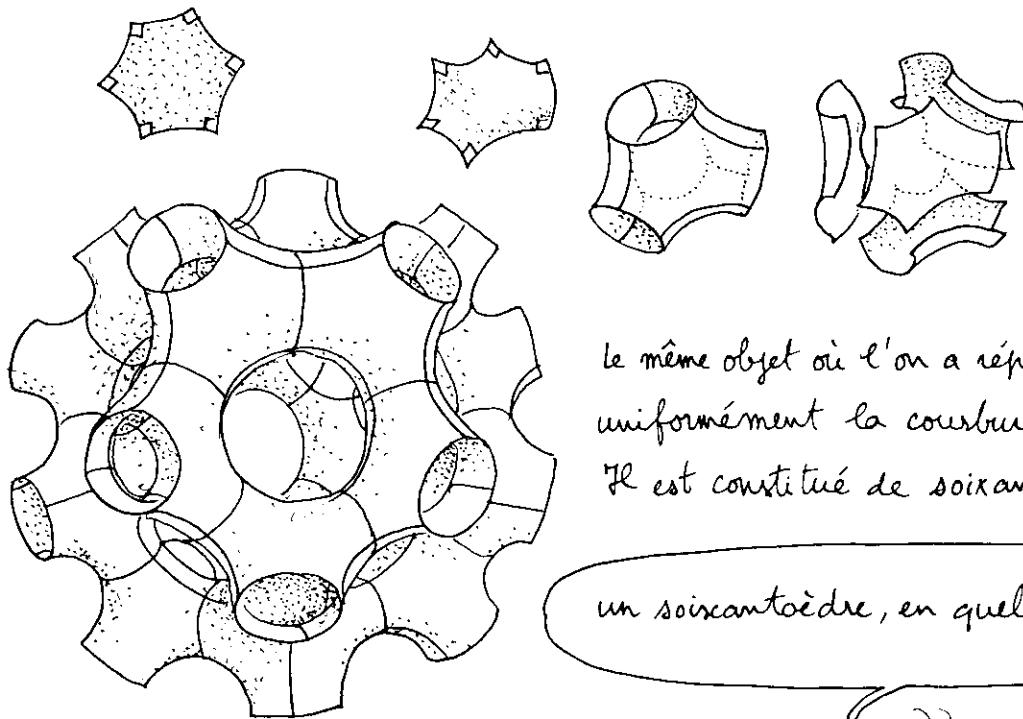
Si tu en
assembles vingt,
tu obtiens cet
élément de surface
à courbure négative,
chacun se plaçant sur
un des vingt sommets
d'un DODÉCAÈDRE (*)



(*) Du Grec

DODEKA = DOUZE

EDRA = BASE



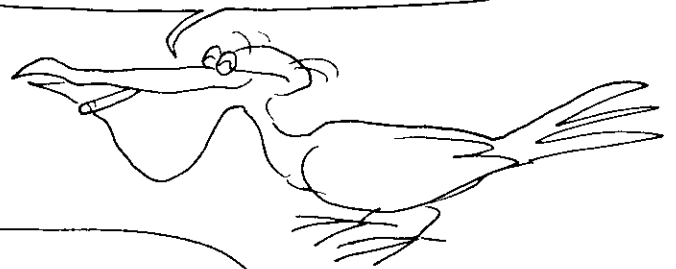
le même objet où l'on a réparti plus uniformément la courbure négative
Il est constitué de soixante hexaorthogones.

un soixantoèdre, en quelque sorte...

on dirait une vertèbre
de DODÉCAÈDRODON



Si vous étiez carreleur, et si vous
utilisiez des carreaux hexaorthogonaux,
voilà à quoi ressemblerait votre sol.



mon cher, je me suis laissé
dire qu'en modifiant les gènes
d'un escargot, on pourrait faire
en sorte que sa coquille

!!!



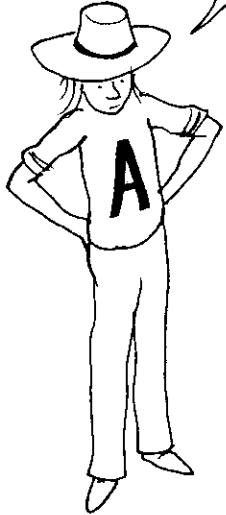
quelle horreur !!!

Cet exemple montre comment
la distribution de la courbure peut
conditionner la forme des objets.

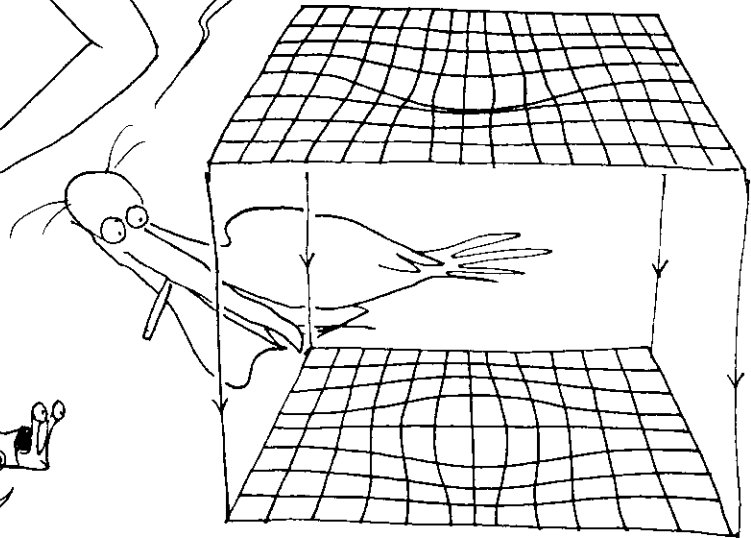
TROIS DIMENSIONS

Sophie, est-ce qu'on peut VOIR
la courbure de notre espace
à TROIS dimensions ?

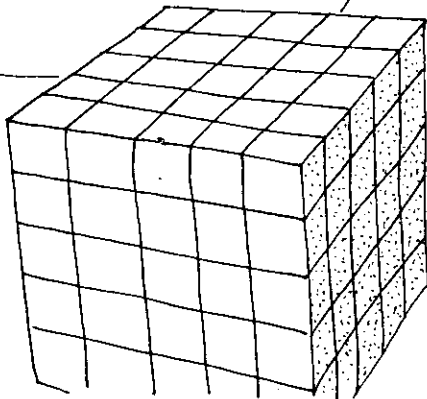
c'est difficile, puisque
tu habites dedans



Voyons, j'ai vu qu'on
pouvait projeter des
géodésiques d'une
surface (à deux dimensions)
sur un plan (2 dimensions)



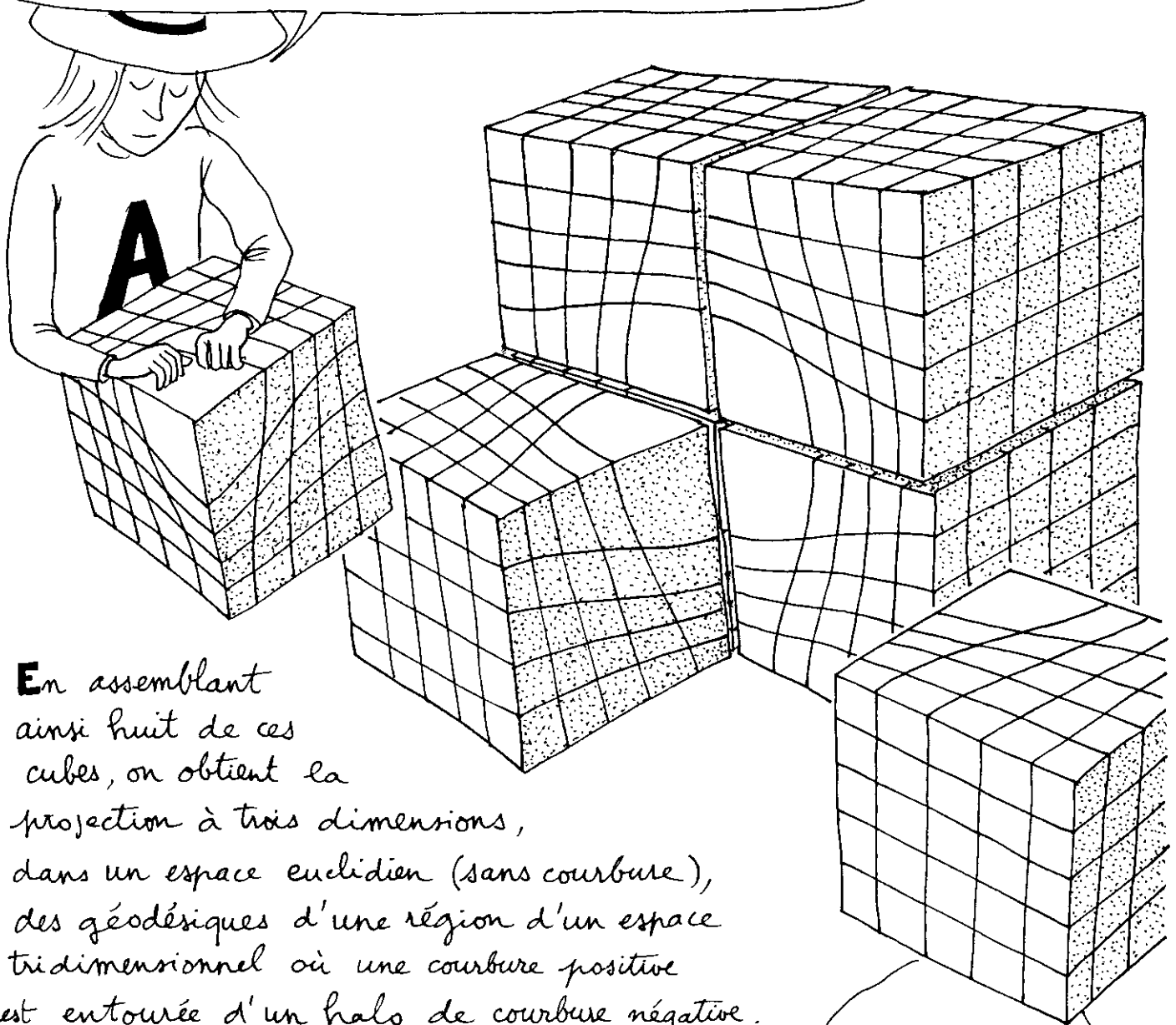
Cette "bosse" correspond à
une concentration de
courbure positive, entourée
d'un halo de courbure
négative.



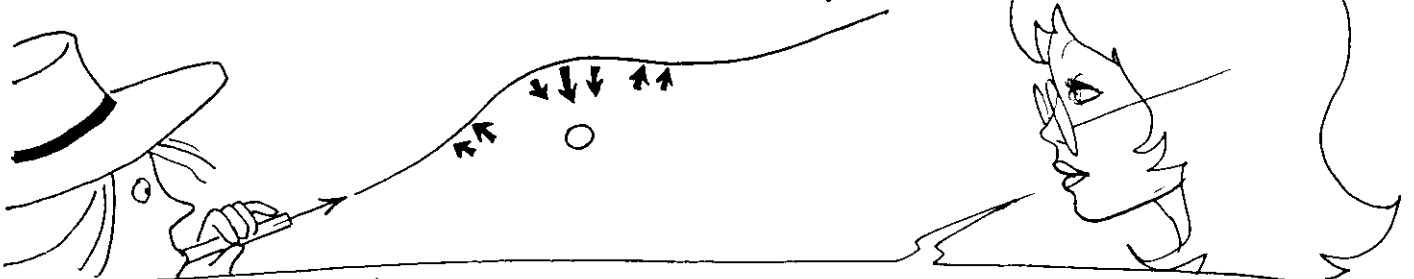
Regarde maintenant un cube
habillé avec de la ficelle



maintenant, je fais glisser les ficelles, comme ceci :

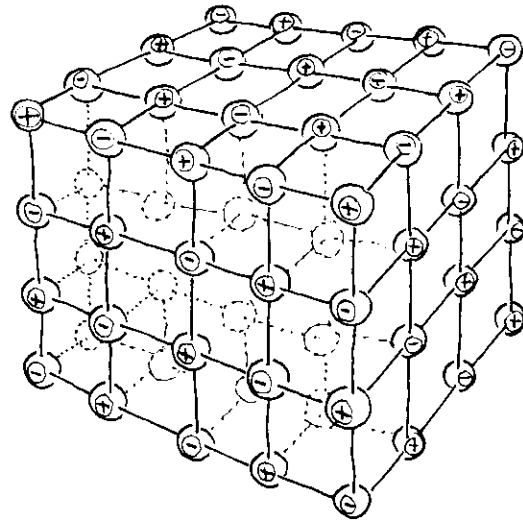
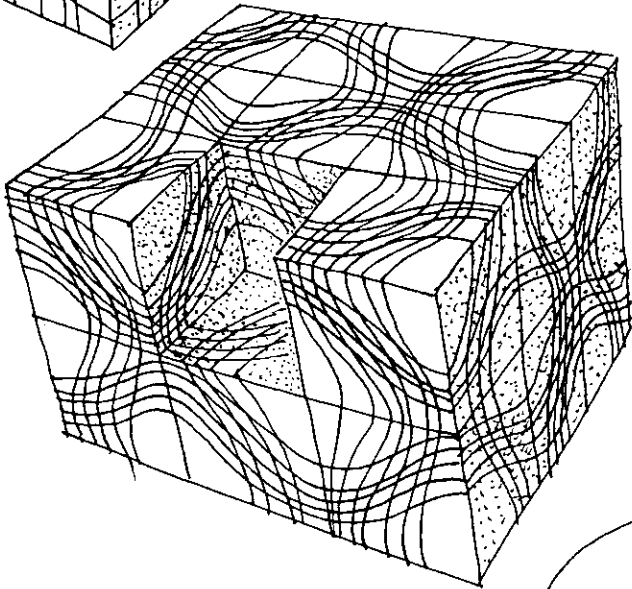
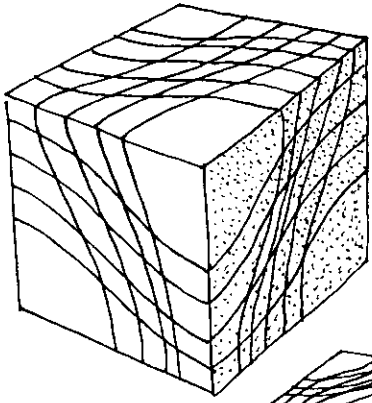


En assemblant ainsi huit de ces cubes, on obtient la projection à trois dimensions, dans un espace euclidien (sans courbure), des géodésiques d'une région d'un espace tridimensionnel où une courbure positive est entourée d'un halo de courbure négative.

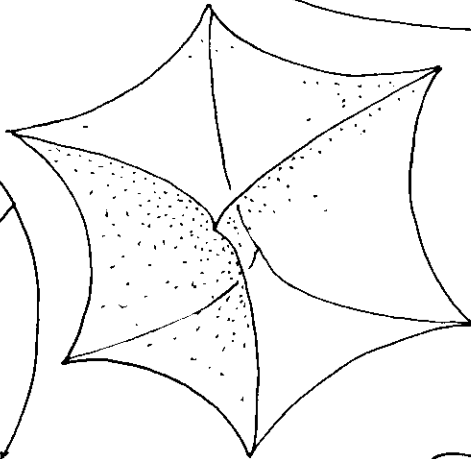
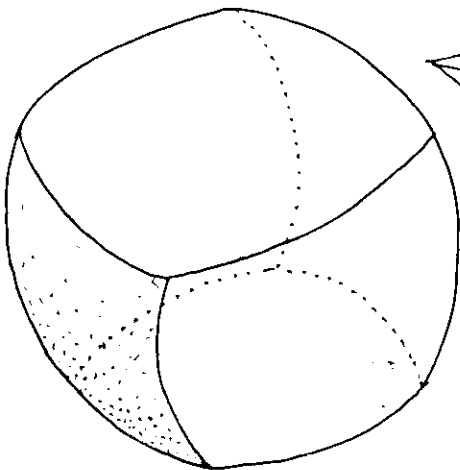


En assimilant ces géodésiques à des TRAJECTOIRES, on trouverait d'abord une répulsion, puis une attraction, puis une répulsion

En faisant glisser les fils de cette façon
et en assemblant convenablement les cubes,
on fabriquerait l'image d'un monde peuplé
de courbures positives et négatives :

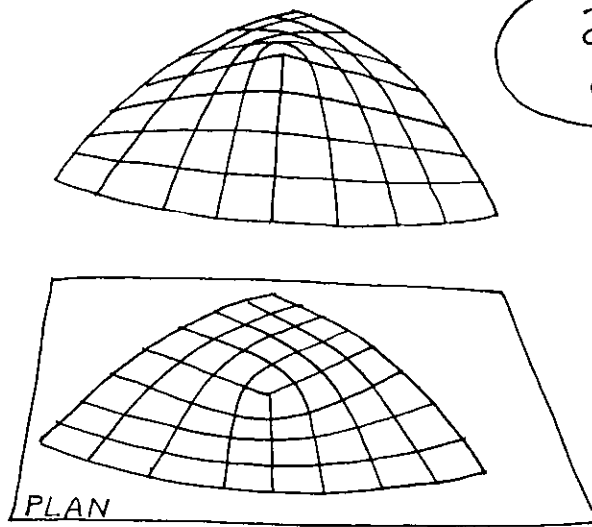


Quand on y regarde de près,
il s'agit de déformations
affectant des CUBES emplissant
l'espace tridimensionnel



Tiens, c'est curieux, je pourrais empiler
tous ces cubes bizarres et remplir l'espace.

PROJECTIONS

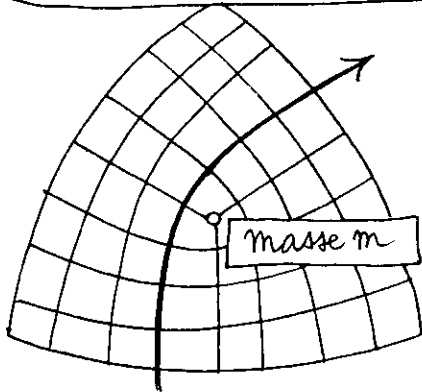


Je peux projeter les géodésiques d'un cône sur un plan.



toutes ces lignes incurvées, cela évoque des TRAJECTOIRES

Exact !



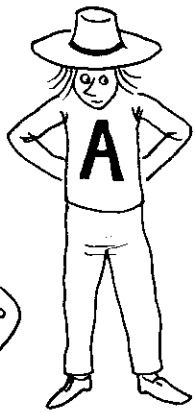
L'idée de base de la RELATIVITÉ GÉNÉRALE consiste à assimiler les MASSES à des altérations locales de la courbure de l'espace.

Vous voulez dire que la masse est un angle?!?

Hi Hi !.. mettez m'en pour $\pi/8$



Oui, dans la mesure où les masses sont des concentrations de courbure



En somme, ce que vous voulez dire, monsieur Albert, c'est que les inflexions des trajectoires, dues aux FORCES, ne sont qu'un effet de PROJECTION, dans notre monde sensible, d'une trajectoire tracée sur une autre surface, et qui est une GÉODÉSIQUE de celle-ci.

encore de la métaphysique !

mais non, c'est de la géométrie

Je vais te donner un exemple. Imagine que nous soyons dans une capsule spatiale, en orbite autour de la Terre.

Nous échappons alors à toute pesanteur

Ah non !

mi !

Nous allons jouer à une sorte de billard

Apparemment, cet objet est constitué de deux surfaces transparentes, pleines de plis, de cloques, mais identiques et proches l'une de l'autre

Ce qui permet de tirer des petites billes entre les deux, et d'observer leurs trajectoires

Celles-ci ne dépendent pas de la vitesse initiale V qui est conservée pendant tout le mouvement

La Direction

Dans ce cas précis, il se trouve que toutes les trajectoires possibles sont des GÉODÉSQUES. (s'il y avait de la pesanteur cela ne serait plus le cas).

Oh, regardez, la lampe projette les trajectoires sur le plancher de notre capsule spatiale !

Quelqu'un qui ne verrait que ces ombres penserait que les objets qui se déplacent sur ce PLAN sont soumis à un CHAMP de FORCES. Alors que cela n'est qu'un problème de courbure d'une surface.

Alors, quand j'observe la trajectoire d'une comète autour du Soleil, en supposant qu'elle s'effectue dans un espace tridimensionnel euclidien, sans courbure, en fait cette comète suit une GÉODÉSIQUE d'une sorte d'espace dans lequel elle va TOUT DROIT!!!!

on ne perçoit que l'ombre des choses

c'est très platonicien, ce que vous dites, mon cher Tirésias

On ne peut aller que TOUT DROIT !

la LUMIÈRE suit aussi une géodésique

Tiens, c'est amusant, les géodésiques, quand on les projette suivant un autre angle, n'ont pas du tout la même tête !

?!?

Tirésias !

Bon, bon....

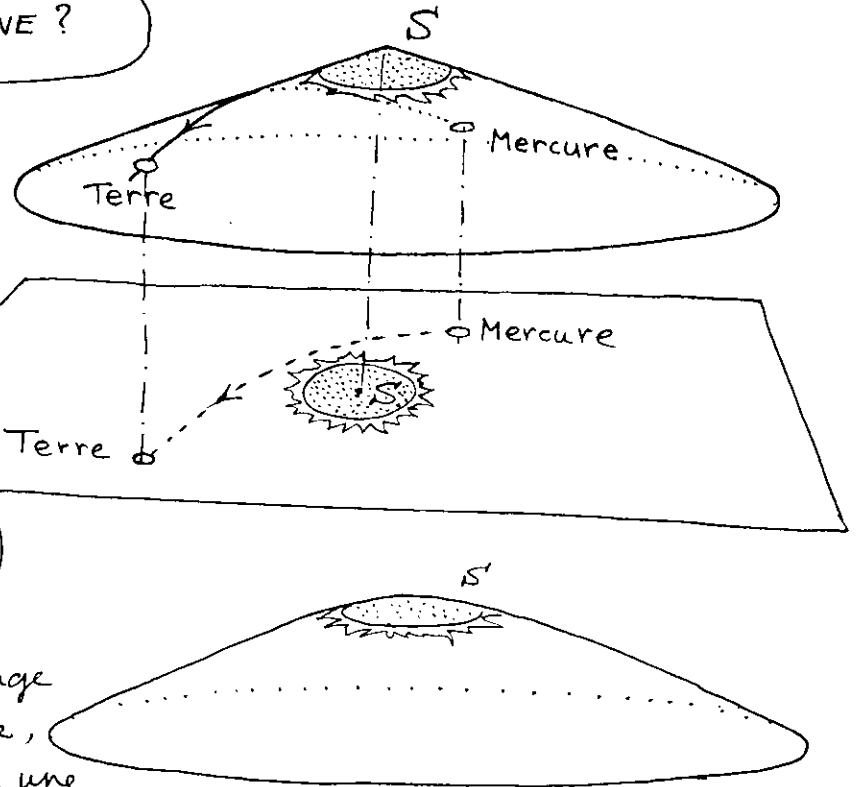


MASSE - MATIÈRE

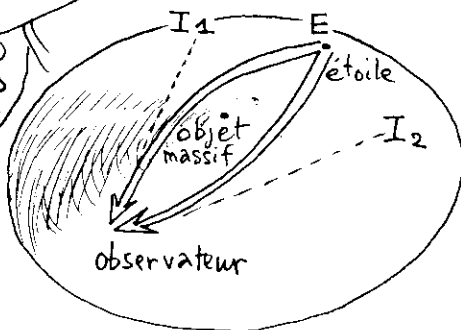
Mais alors, le Soleil est un ... CÔNE ?



on sait que le
Soleil dévie les rayons
lumineux venant de Mercure



Nous croyons que l'espace, au voisinage
du SOLEIL, est PLAT. En fait, cet astre,
par sa masse importante, représente une
certaine quantité de courbure. Mais, comme
le Soleil n'est pas une masse ponctuelle,
nous devons représenter cette région
de l'espace à l'aide d'un cône émoussé :



Des objets extrêmement massifs peuvent courber
l'espace au point qu'un observateur pourra
percevoir DEUX images I_1 et I_2 d'une même étoile E :
c'est l'effet de LENTILLE GRAVITATIONNELLE,
récemment mis en évidence par l'observation.

les masses des atomes, des particules, constituent
la courbure générale de l'Univers.

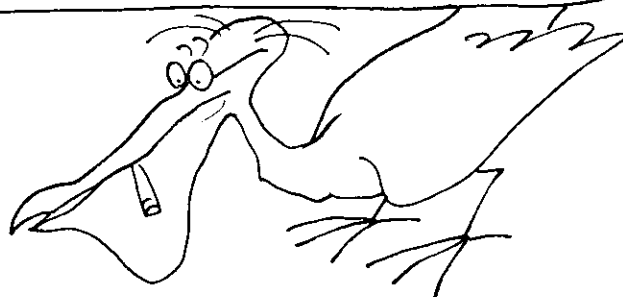
on donne à la MASSE
une signification
GÉOMÉTRIQUE

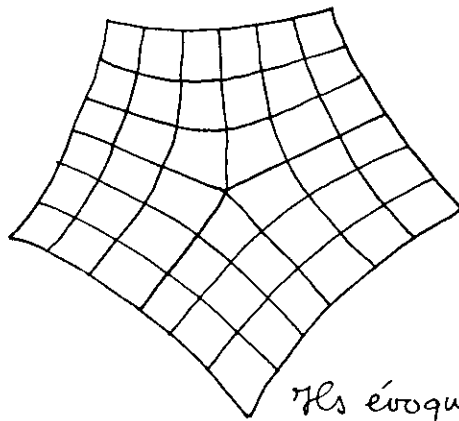
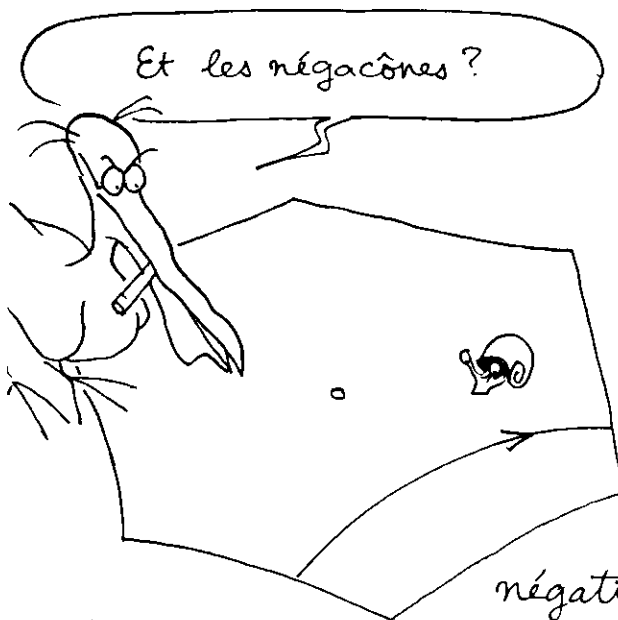
mais, entre les atomes
il y a bien du... VIDE ?

ou alors je ne
comprends plus rien...

mais non, cher ami, cette vieille
opposition entre matière et vide est
complètement dépassée; il n'y a plus
que de la géométrie

Plus que de la
géométrie !!?!

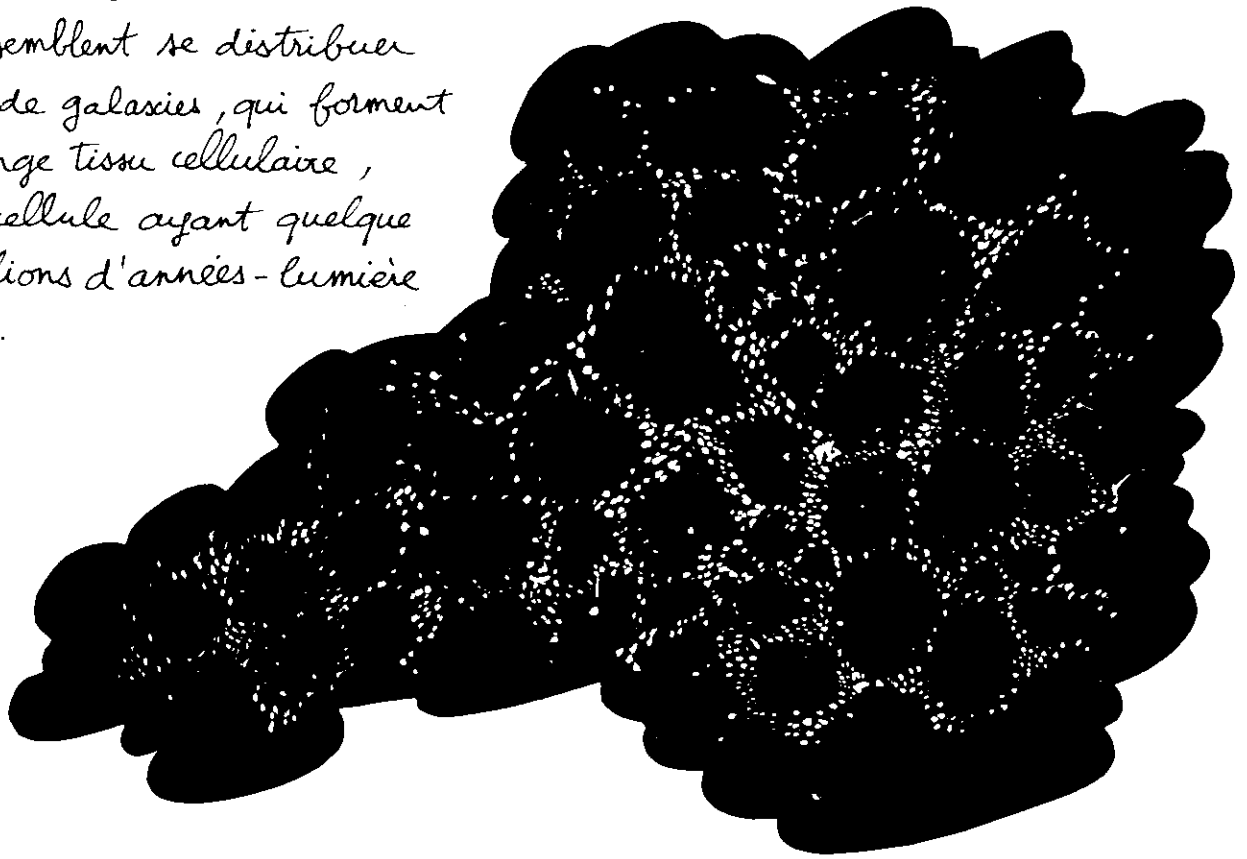




Ils évoquent des "masses négatives", génératrices de forces répulsives. Un univers rempli de masses négatives serait bien étrange. Au lieu

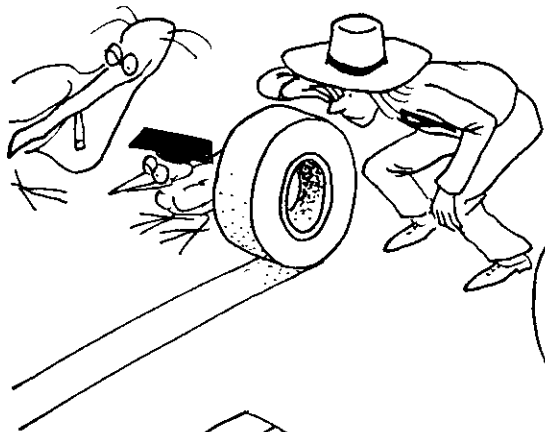
d'engendrer des galaxies, des étoiles, il se peuplerait de bulles, de grands vides :

Ainsi semblent se distribuer les amas de galaxies, qui forment un étrange tissu cellulaire, chaque cellule ayant quelque 200 millions d'années-lumière de côté.

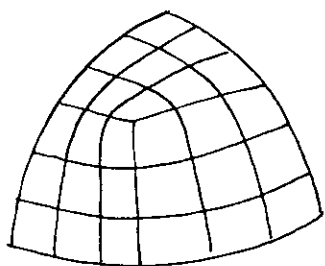


Les forces de gravité pourraient alors se révéler répulsives à très grande distance.

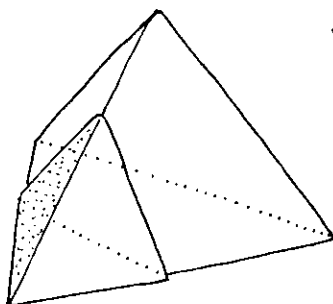
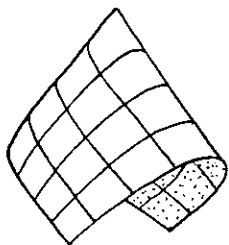
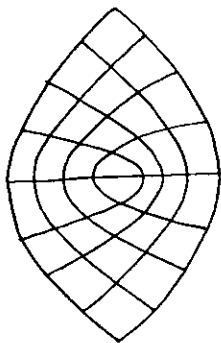
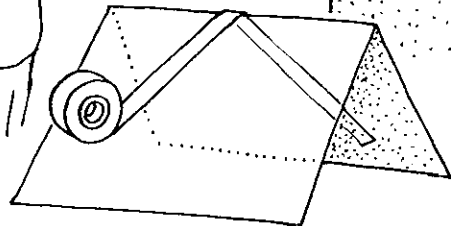
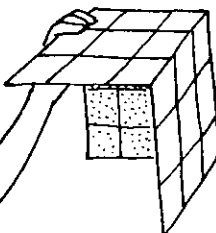
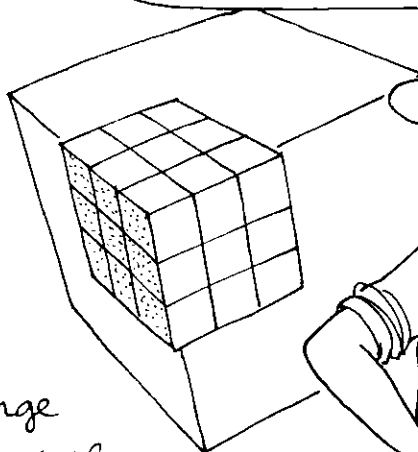
POLYÈDRES



Anselme, tu vas matérialiser les géodésiques d'une surface à l'aide, par exemple, d'un ruban adhésif.



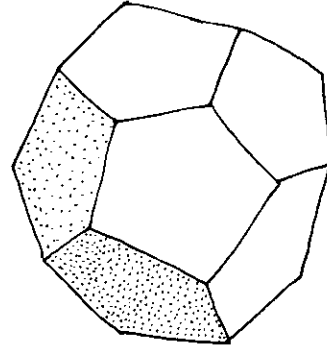
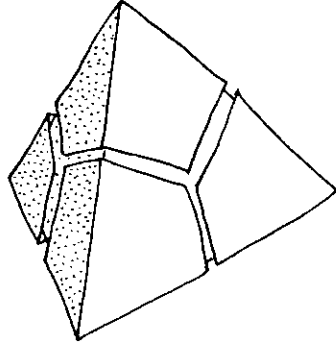
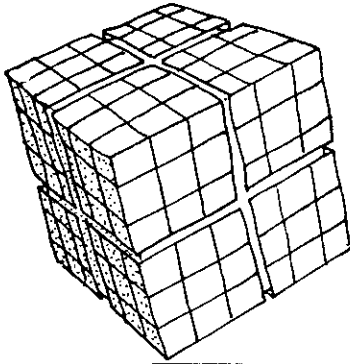
Le fait de plier ce cône ($\theta = 90^\circ$), ne change rien aux géodésiques, et il épouse alors parfaitement le sommet d'un cube.



De même, tu peux ménager trois plis sur ce cône ($\theta = 180^\circ$) pour lui faire épouser le sommet d'un tétraèdre régulier.



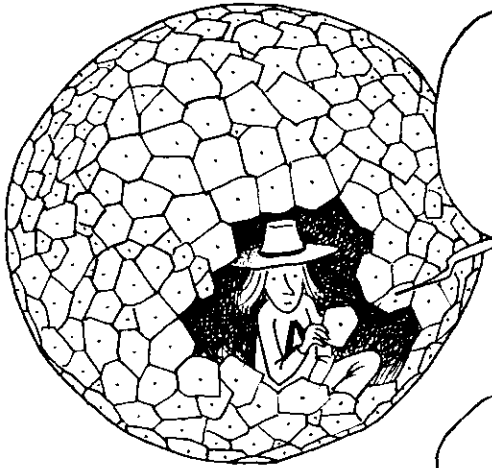
IL FAUT QU'UN ESPACE SOIT OUVERT OU FERMÉ



Huit cônes ($\theta = 90^\circ$)
permettent de fabriquer
un CUBE
 $90 \times 8 = 720^\circ$

Quatre cônes ($\theta = 180^\circ$)
permettent de fabriquer
un TÉTRAÈDRE
 $180 \times 4 = 720^\circ$

Vingt cônes ($\theta = 36^\circ$)
permettent de fabriquer
un DODÉCAÈDRE
 $20 \times 36^\circ = 720^\circ$



En assemblant le plus régulièrement possible un nombre N de microcônes d'angle θ , je constate que lorsque $N \times \theta = 720^\circ$ j'obtiens.... une sphère !

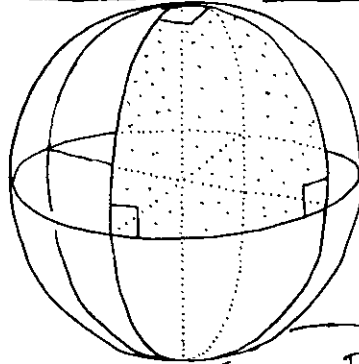
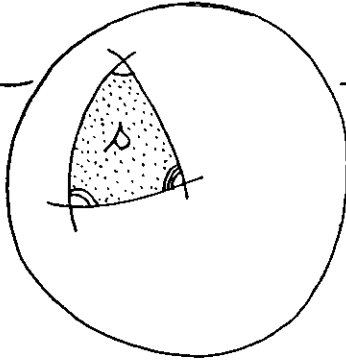
c'est normal puisque la
COURBURE TOTALE de
la sphère vaut 720°

maintenant, sors
de là mon chéri



Sur la sphère, la courbure est uniformément répartie. Ainsi la somme des angles d'un triangle tracé sur une sphère est égale à $180^\circ + 720^\circ \times \frac{S}{S'}$ où S est la surface du triangle et S' celle de la sphère. Le second terme : $720^\circ \times \frac{S}{S'}$ représente la QUANTITÉ de COURBURE contenue dans le triangle.

La Direction (*)



Exemple: ce triangle occupe le huitième de la surface de la sphère

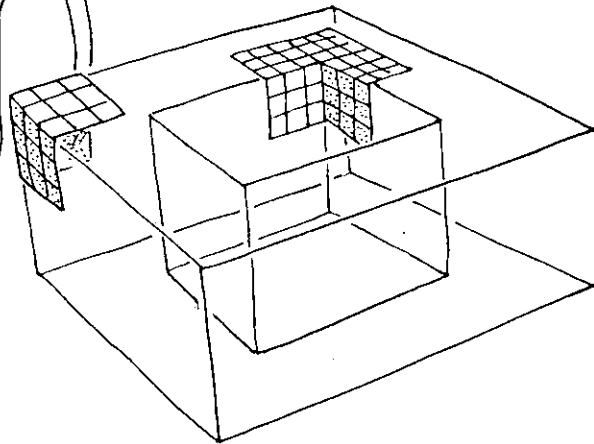
$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 180^\circ + \frac{720^\circ}{8} = 270^\circ$$

Fantastique!...

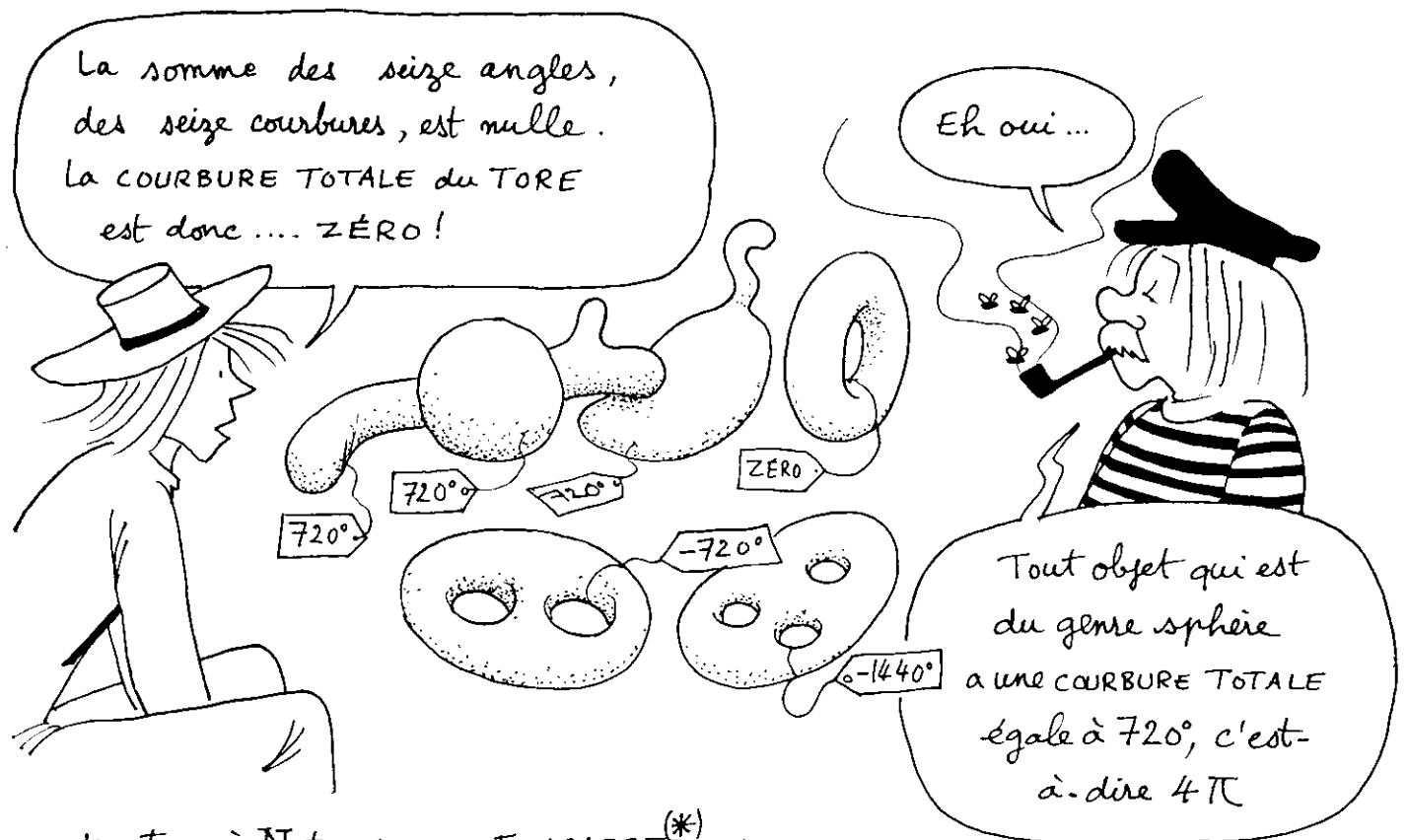
Pour des raisons analogues, si la densité moyenne dans notre espace tridimensionnel (c'est-à-dire la quantité de courbure par unité de volume) dépasse 10^{-29} grammes/cm³ cet espace se REFERMERA sur lui-même.

Dites, monsieur Albert, la courbure totale d'un TORE, ça vaut quoi?

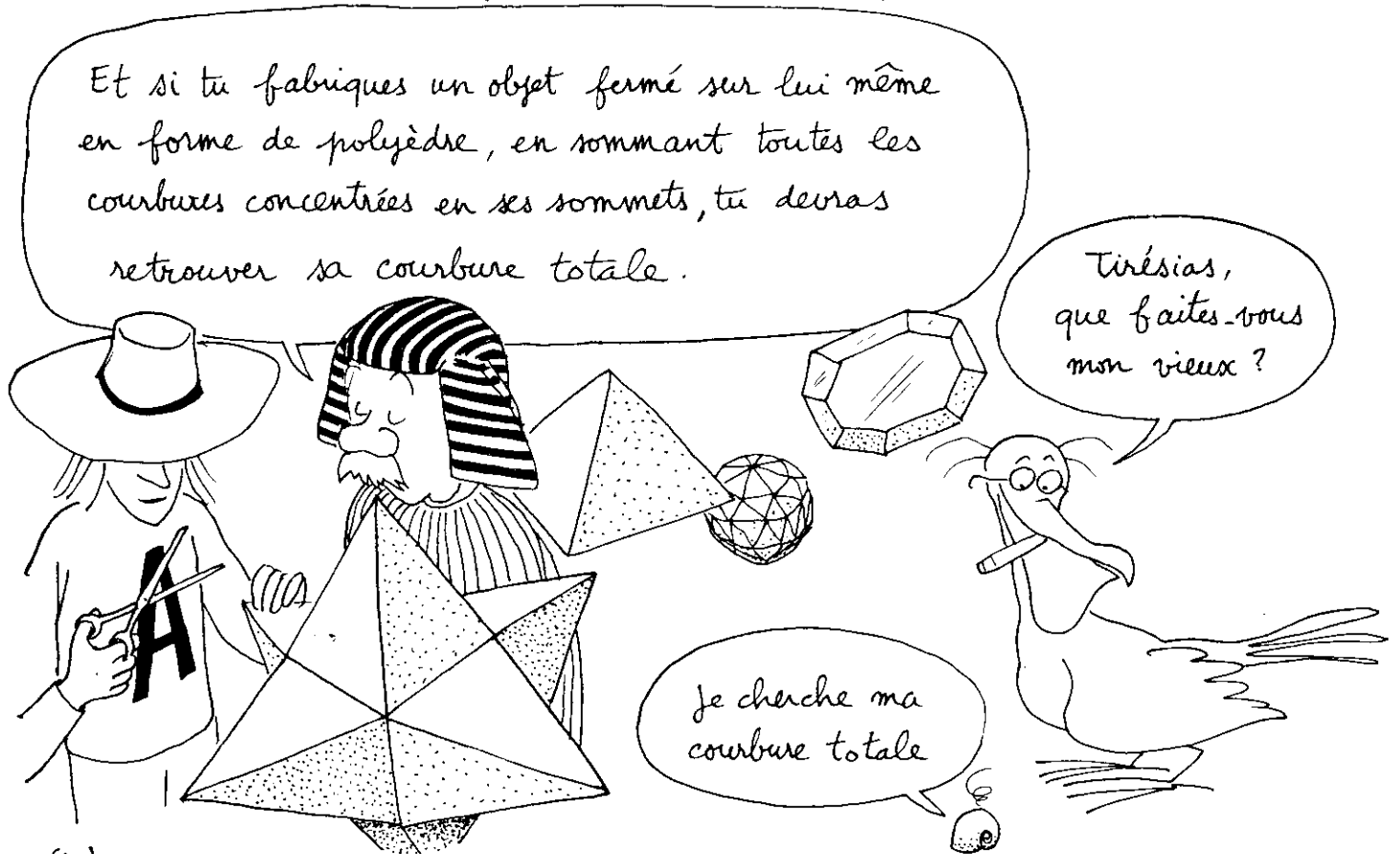
Simple, Anselme, tu n'as qu'à le représenter comme ceci: avec huit posicônes ($\theta = +90^\circ$) et huit négacônes ($\theta = -90^\circ$)



(*) Théorème dû à GAUSS.



un tore à N trous, une FOUGASSE^(*), aura une courbure totale égale à $-4\pi (N-1)$ (on retranche 4π pour chaque trou)

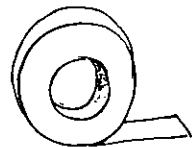
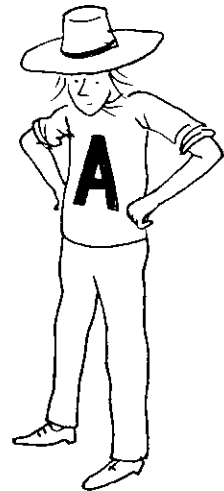


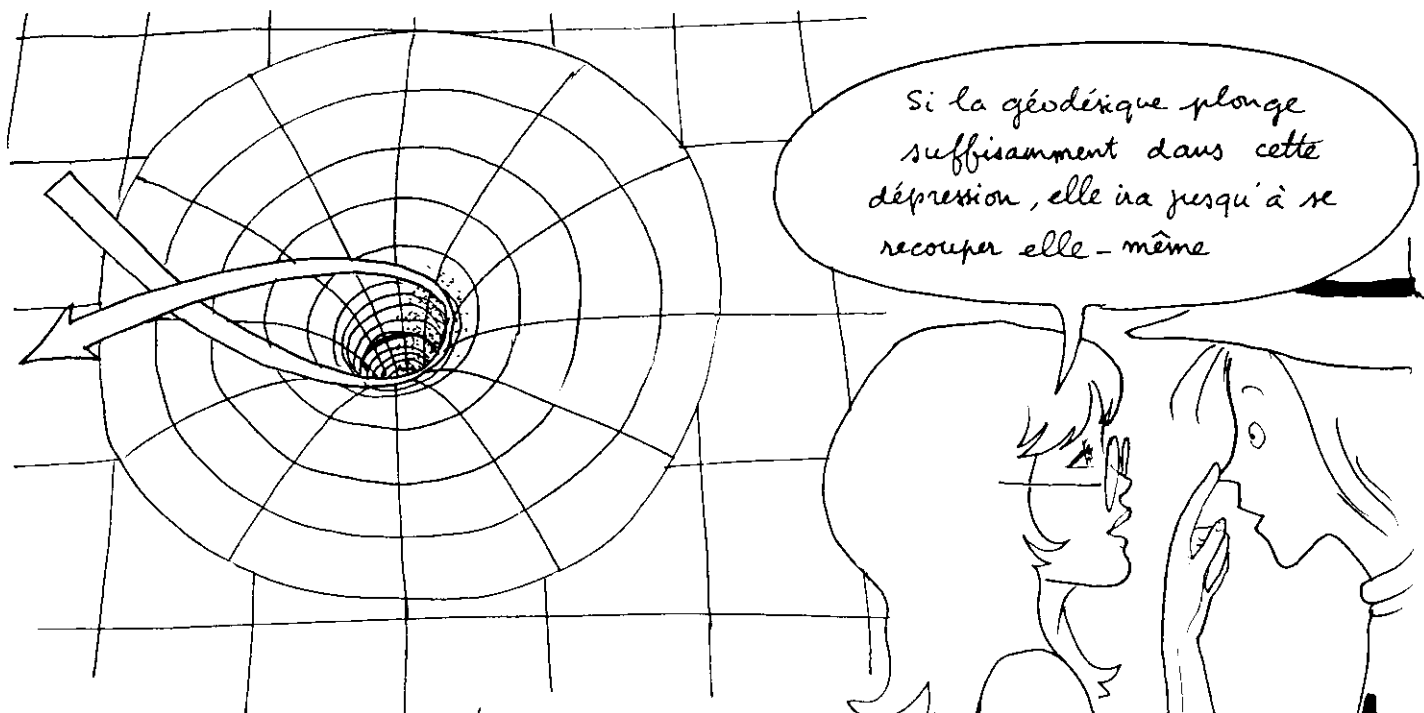
(*) Une FOUGASSE est une sorte de pain que l'on fabrique dans le midi de la France, où habite l'auteur.

PREMIÈRE APPROCHE DU TROU NOIR

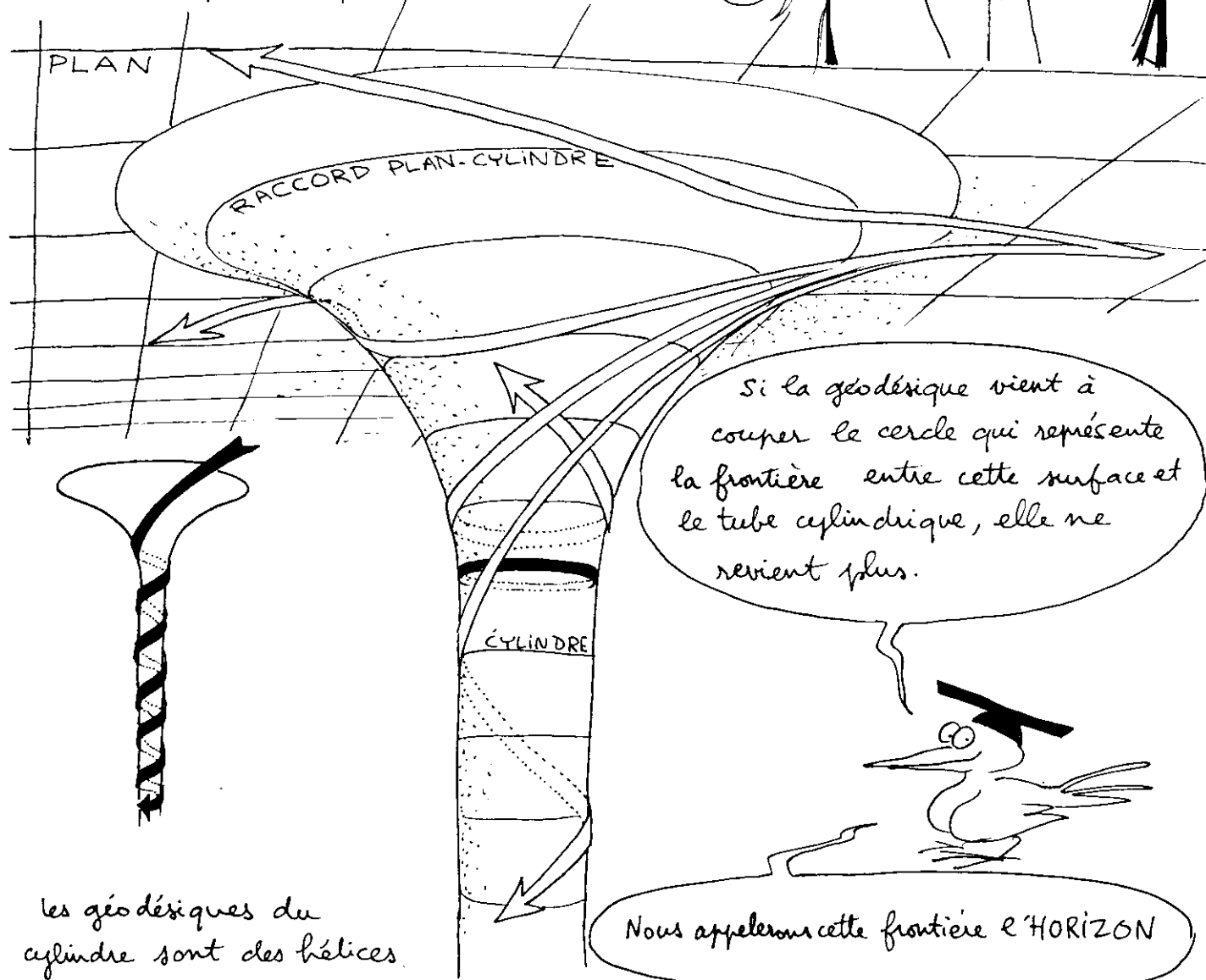
qu'est-ce que c'est
que ce truc ?

Avec mon ruban adhésif,
j'ai tracé quelques géodésiques
de cette bizarre surface.





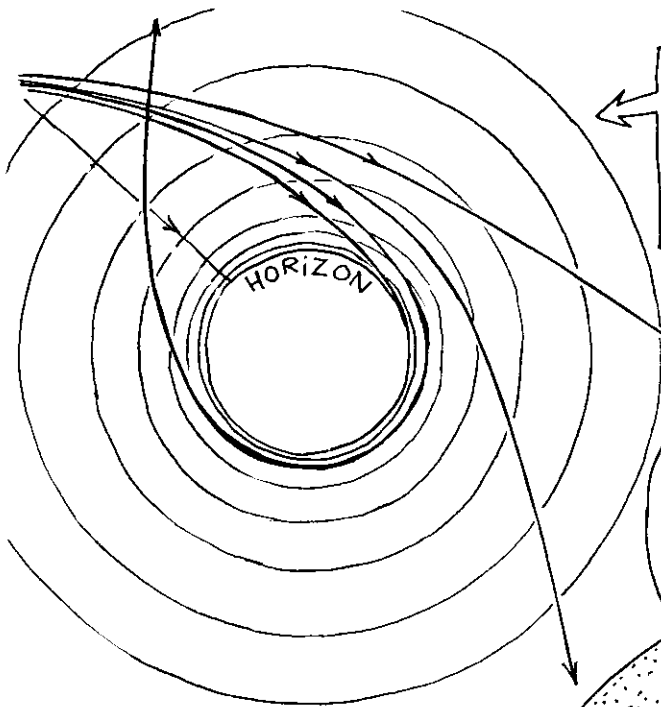
Si la géodésique plonge suffisamment dans cette dépression, elle ira jusqu'à se recouper elle-même



Si la géodésique vient à couper le cercle qui représente la frontière entre cette surface et le tube cylindrique, elle ne revient plus.

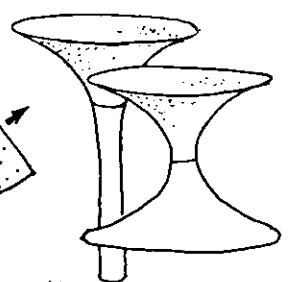
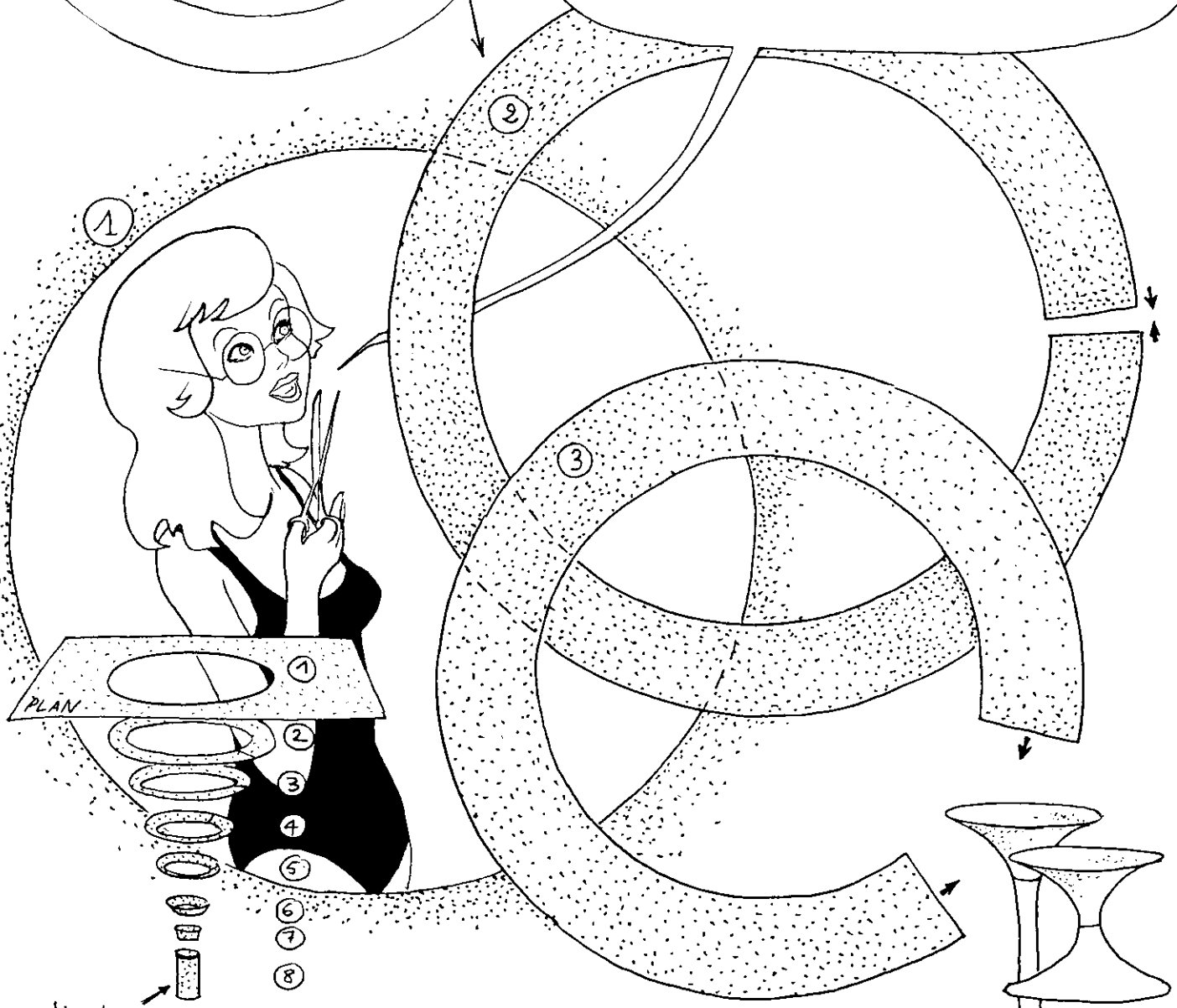
les géodésiques du cylindre sont des hélices

Nous appellerons cette frontière l'HORIZON

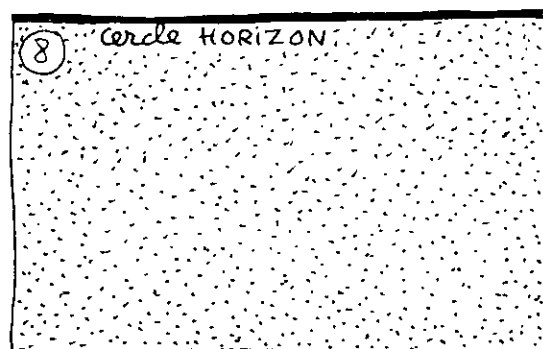
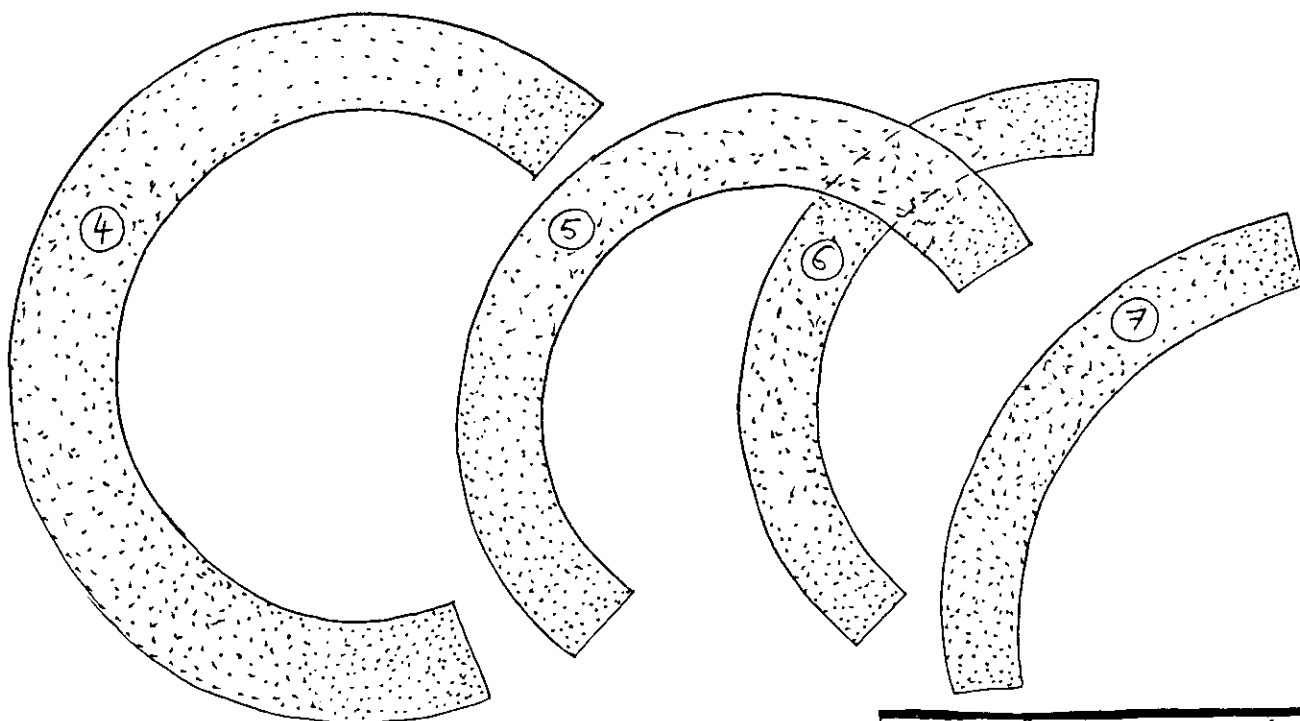


Celui qui aurait l'illusion de vivre dans un monde PLAN concevrait les trajectoires de cette manière.

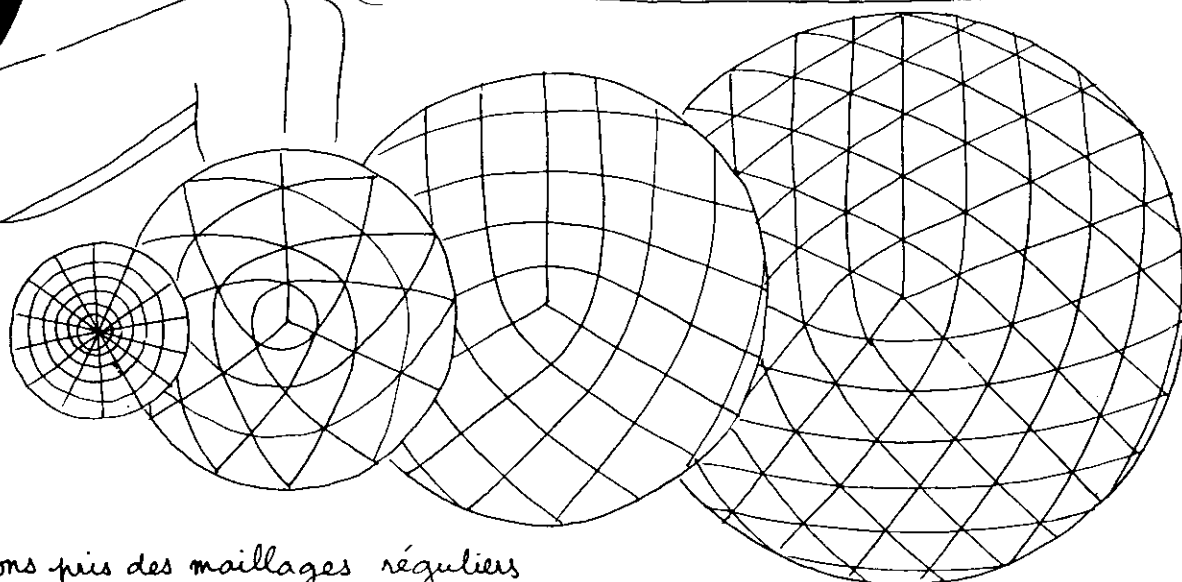
Fabriquez votre trou noir à l'aide d'un plan muni d'un trou (①), de six troncs de cônes (à assembler bord à bord) et d'un cylindre (⑧)



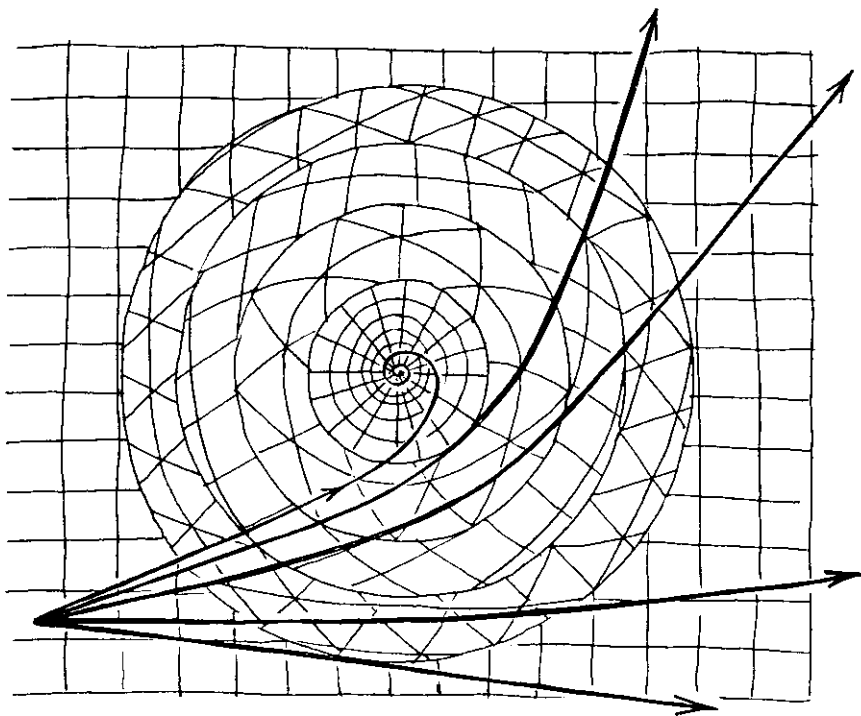
VARIANTES



Voici une autre manière de figurer un TROU NOIR, à l'aide de maillages.



Nous n'avons pas des maillages réguliers que pour des raisons d'esthétique.



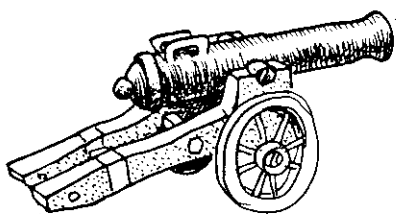
La règle du jeu consiste à couper ces maillages successifs sous un angle constant, en assurant un raccord, une continuité, à chaque frontière circulaire. Plus on s'approche du trou noir et plus son attraction se fait sentir. A l'intérieur du CERCLE HORIZON, la trajectoire s'enroule en spirale. On notera que le maillage central, polaire, peut être assimilé au

maillage d'un cylindre par des géodésiques, vu en perspective.

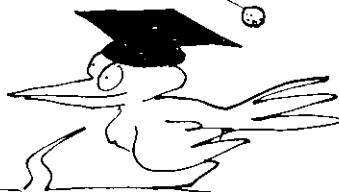
Attention !

Il y a quelque chose qui cloche de A à Z dans votre affaire !

Vous remplacez des masses par des courbures et les trajectoires par des géodésiques. Mais qu'est-ce que vous faites de la VITESSE INITIALE ?

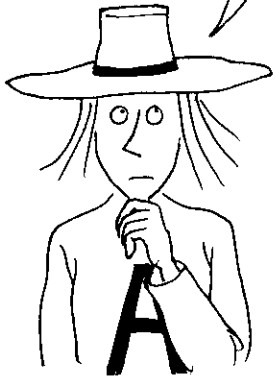


La trajectoire d'un objet dans le champ de force créé par une ou plusieurs masses dépend de sa vitesse initiale V_0



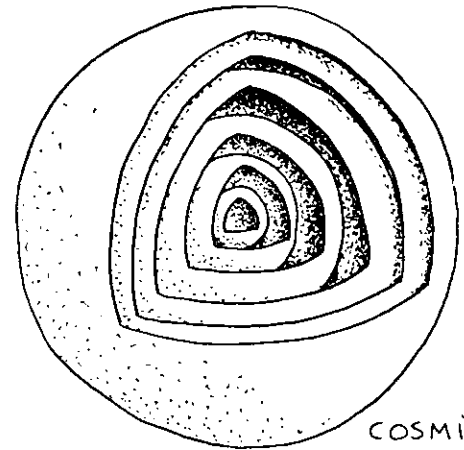
Exemple : l'obus du canon et l'attraction terrestre.

Alors, les dessins de tout à l'heure correspondaient à une valeur particulière de la vitesse initiale V_0 ?



A EN PLONGÉE

Imaginons un monde construit comme un oignon, c'est-à-dire en couches concentriques. (*)

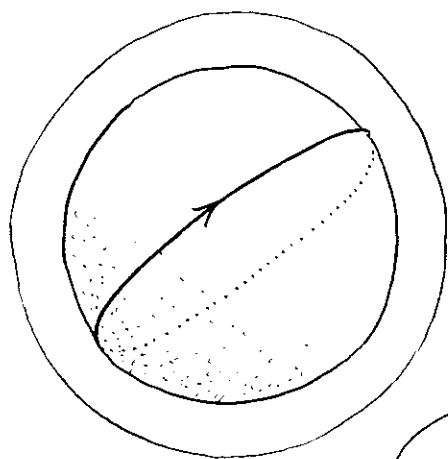


A chaque couche correspond une intensité V de la vitesse. Et, plus on va vite, plus on est profond.

A la vitesse de la lumière, on est au centre de l'oignon.

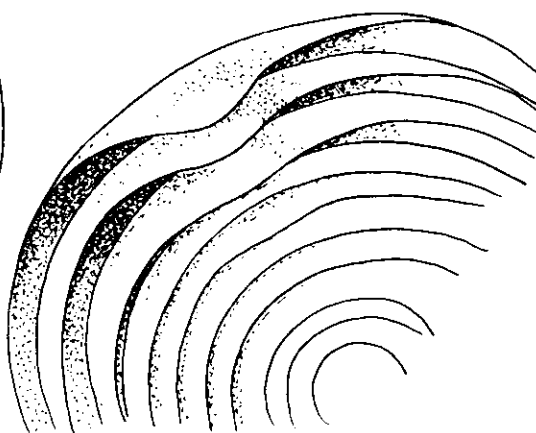
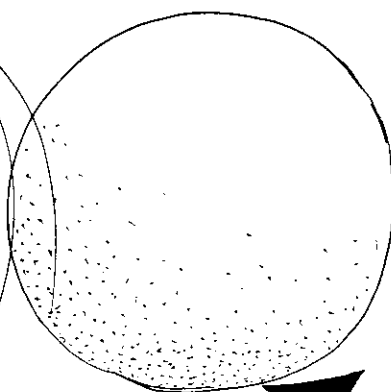


(*) Ce modèle a déjà été présenté dans TOUT EST RELATIF, sous le nom de COSMIC PARK (même auteur, éditions BELIN)

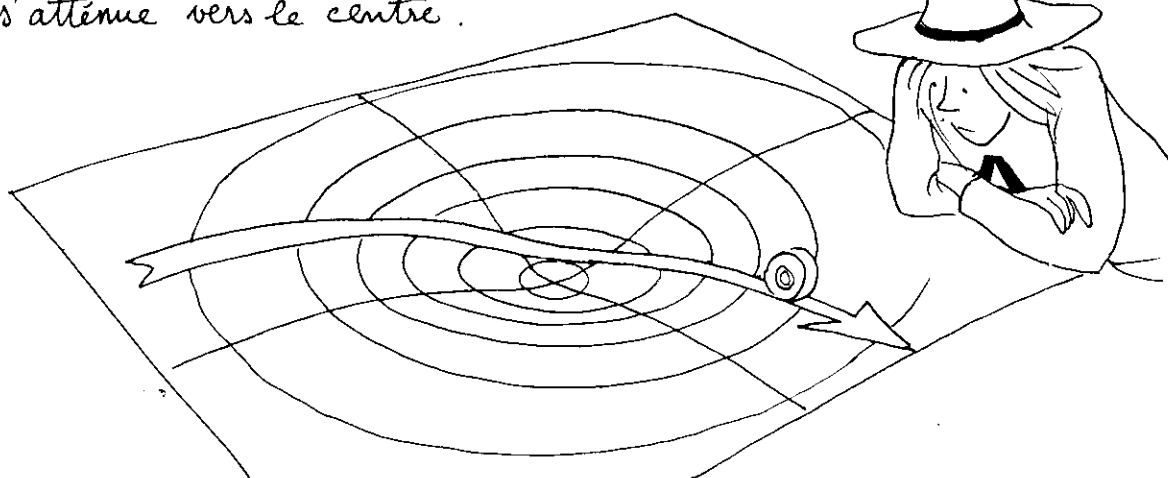


En l'absence de FORCES, un objet conserve sa vitesse V (donc reste à une même distance du centre de l'oignon). Il décrit une GÉODÉSIQUE de la SPHÈRE correspondante c'est-à-dire un GRAND CERCLE.

Et maintenant regardez bien !

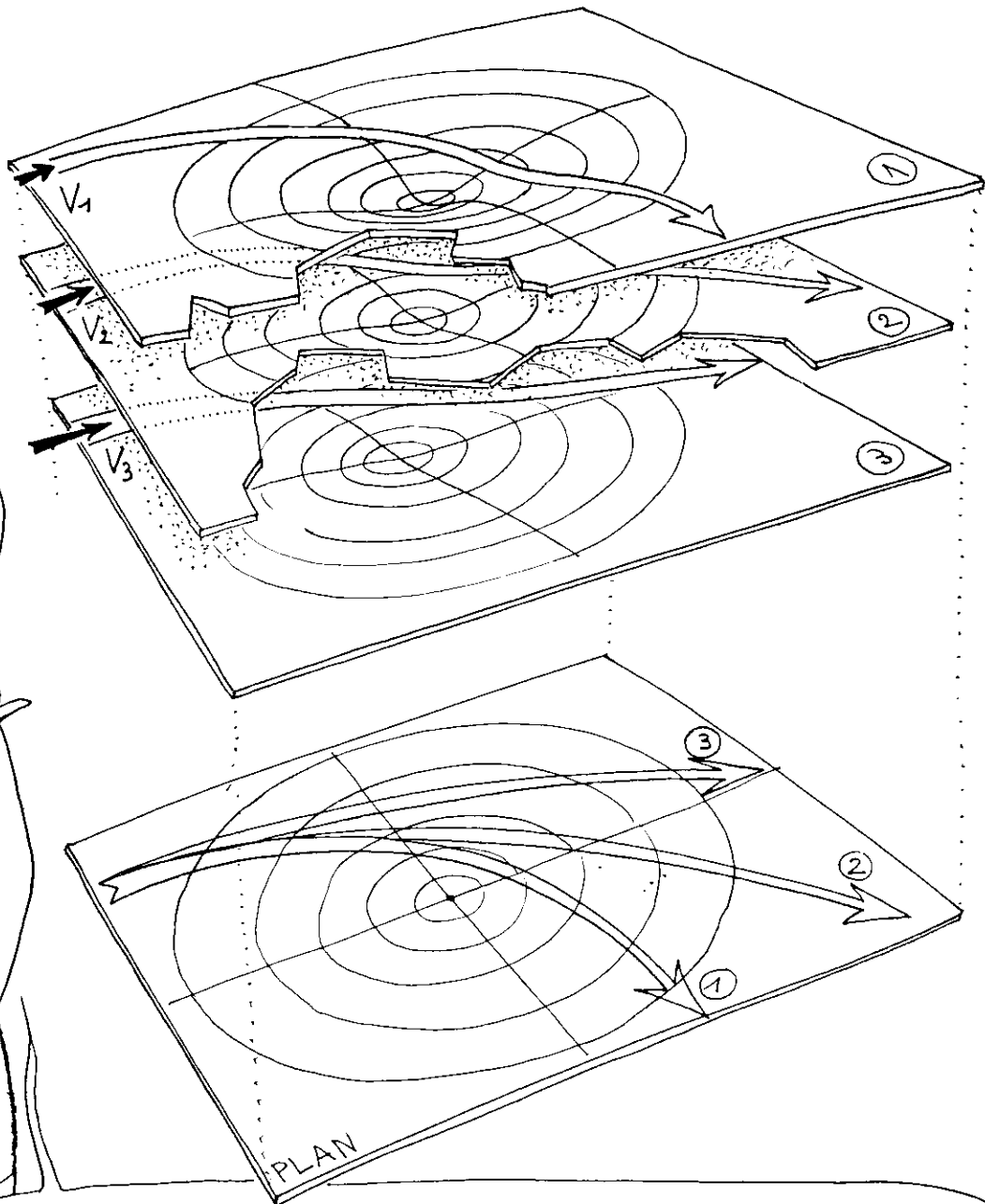


voici le résultat du coup de marteau de monsieur Albert.
Comme on peut le voir,
l'effet s'atténue vers le centre.

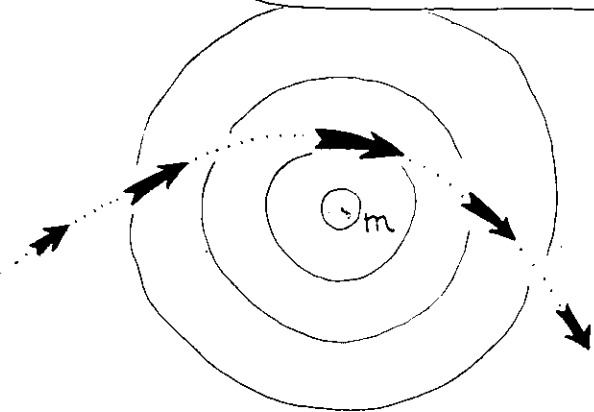


Voici un creux (ou une bosse, c'est pareil...). On a figuré les lignes de niveau (qui ne sont PAS des géodésiques !) et une géodésique particulière.

$$V_1 < V_2 < V_3$$



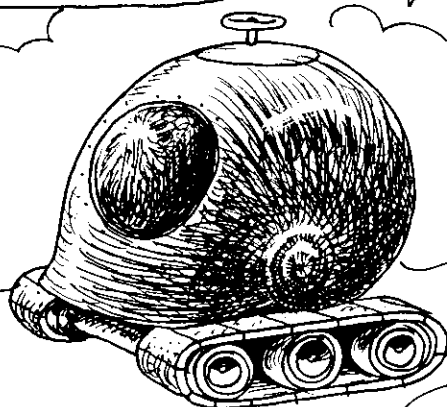
Plus la vitesse initiale est faible, plus la déformation est marquée et plus la trajectoire est incurvée.



Sous l'effet de l'attraction gravitationnelle, la vitesse d'un objet s'accroît d'abord, puis décroît. La vitesse maximale est atteinte lorsque la distance entre l'objet et la masse attractive est minimale (périhélie)

Qu'est-ce que c'est que cet engin ?

c'est le
CHRONOSCAPHE



Il permet de suivre les
géodésiques du cosmic park

Mais pourquoi
s'enfermer dans le
chronoscaphe ?

Tout l'ensemble
du Cosmic park
baigne dans un
fluide : le CHRONOL

Jamais on ne
me fera monter
là-dedans !

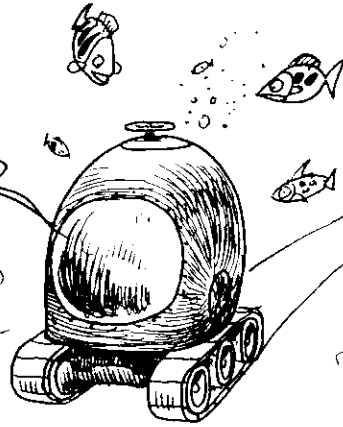
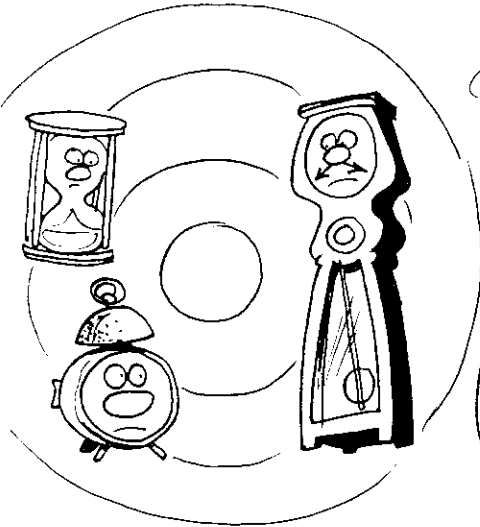
Le trajet suivi par le
CHRONOSCAPHE s'appelle
le DESTIN



(*) Note de SERVICE : Le SECOND PRINCIPE nous dit qu'il est impossible de suivre les géodésiques de l'espace-temps (COSMIC PARK) à rebrousse poil.

La Direction

Comme la pression P_R est supérieure à P_E ,
le chronol s'écoule et le débitmètre
indique le temps qui passe



Plus on s'enfonce dans le chronol
et plus la pression P_E s'accroît. Comme
le débit est proportionnel à l'écart
($P_R - P_E$): le temps s'écoule moins vite.

Et la profondeur, C'EST la
vitesse. Donc plus on va vite et
moins le temps s'écoule (*)

Et lorsqu'on est à la vitesse de
la lumière, P_E devient précisément
ÉGAL à P_R , et le temps se fige.

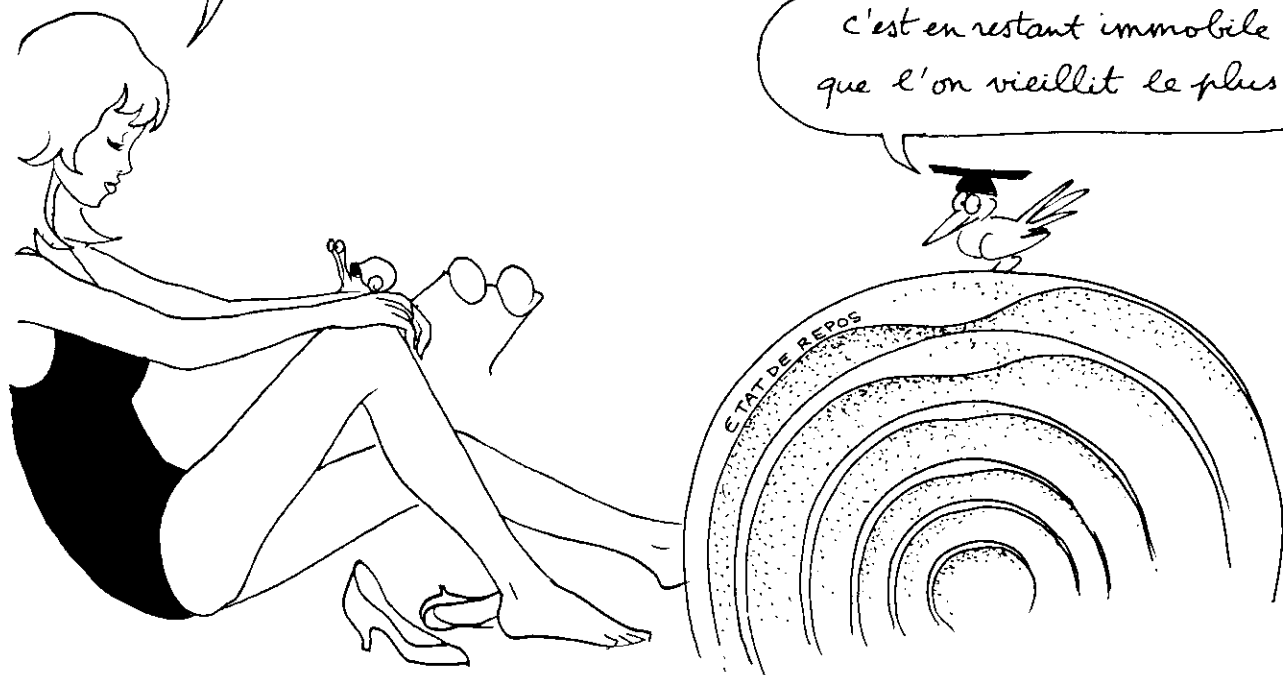


Et on ne peut pas aller plus vite que la vitesse de
la lumière, de même que l'on ne peut pas aller plus profond
que le centre du Cosmic Park.

(*) VOIL TOUT EST RELATIF, même auteur, éditions BELIN.

La surface du cosmic park, c'est l'immobilité, le repos.

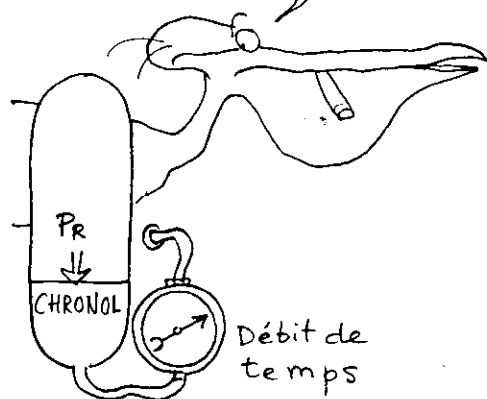
c'est en restant immobile
que l'on vieillit le plus !



Quand un corps est très massif, il courbe fortement l'espace-temps. Ce qui veut dire qu'en cette région, même au repos, un objet baignera dans un CHRONOL à pression plus forte. Et son temps s'écoulera moins vite que celui d'un objet également au repos, mais loin de toute masse. Cela serait le cas au voisinage d'un objet superdense comme une étoile à neutrons.

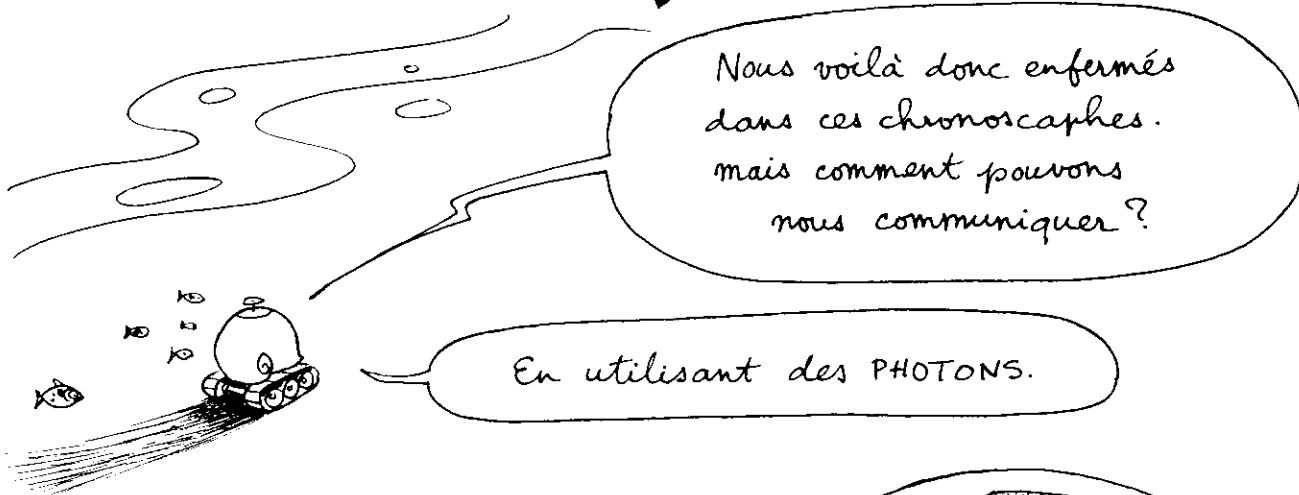
Que se passerait-il si
on sortait brusquement
du chronoscope ?

Peut être qu'on
attraperait un
coup de vieux ?



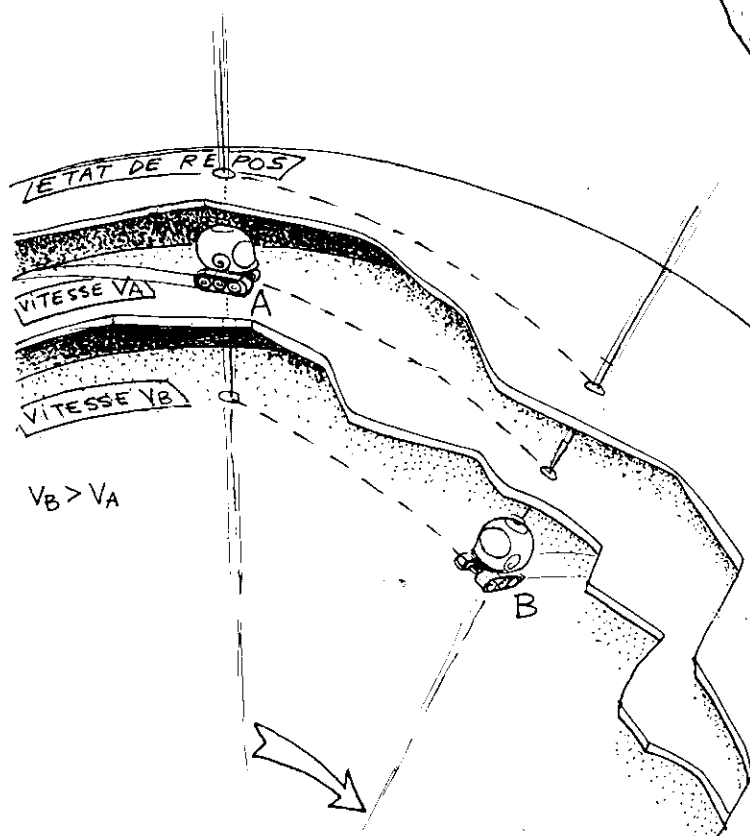
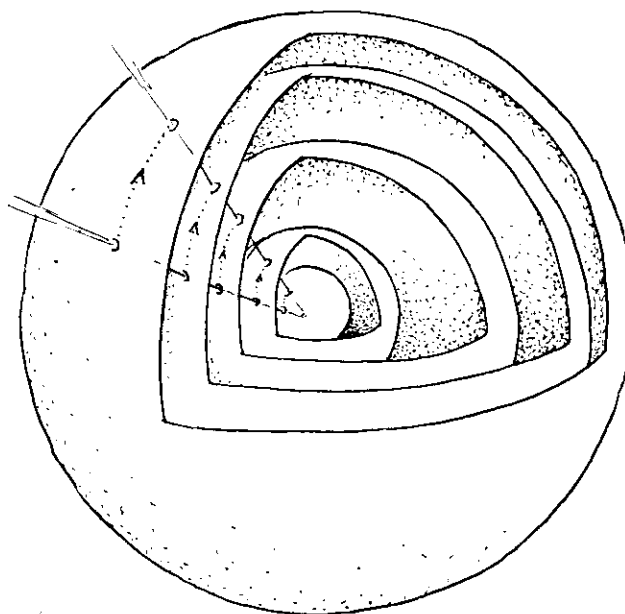
Et quand le chronol du réservoir est
complètement épuisé, c'est... la mort ?..

COMMUNIQUER

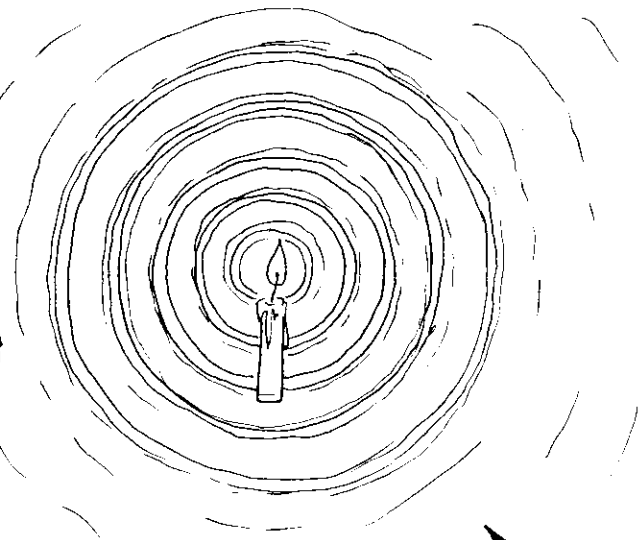
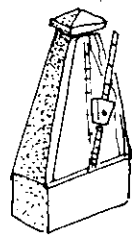


En utilisant des PHOTONS.

Les photons sont comme des pinceaux de phares qui balayeraient toutes les couches du Cosmic Park à vitesse angulaire constante.



Un objet A, cheminant à une vitesse V_A , peut déclencher le départ d'un de ces pinceaux de phares en direction d'un objet B cheminant à vitesse V_B .

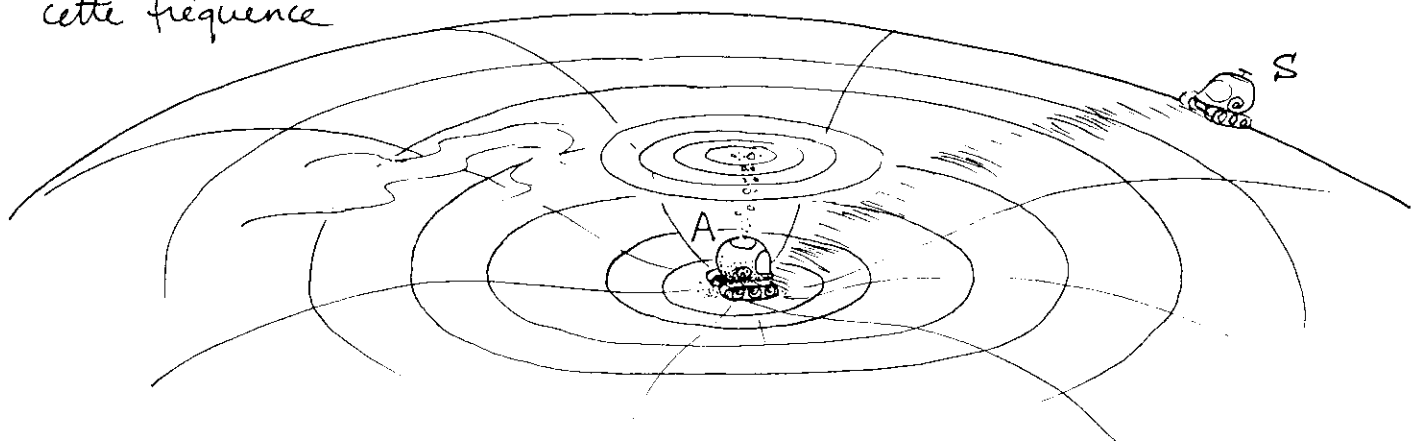


←
Fréquences basses

→
Fréquences élevées

Et la couleur est déterminée par cette fréquence

INFRAROUGE ROUGE ORANGE JAUNE VERT BLEU VIOLET ULTRA VIOLET



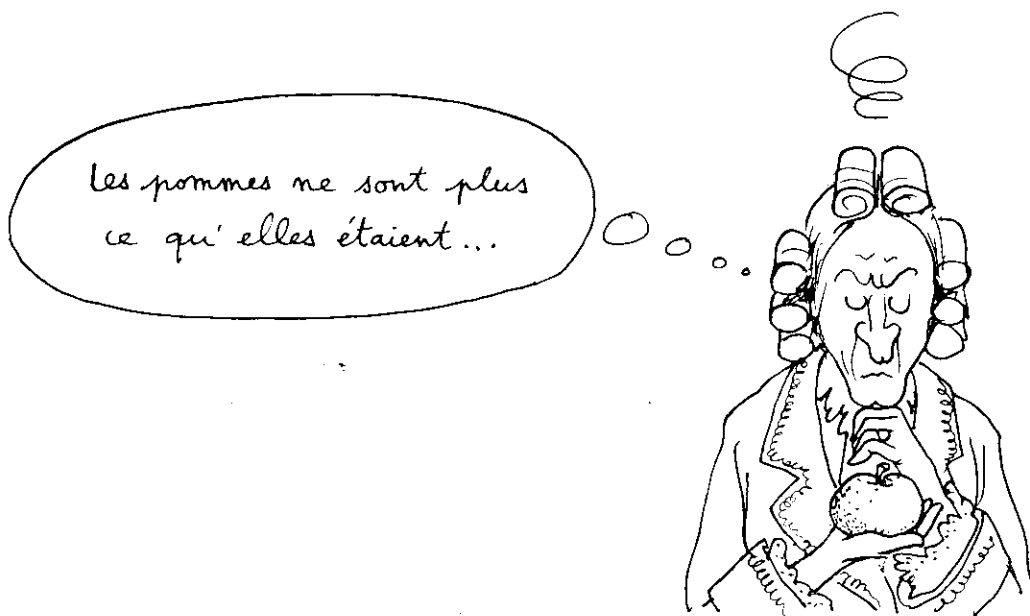
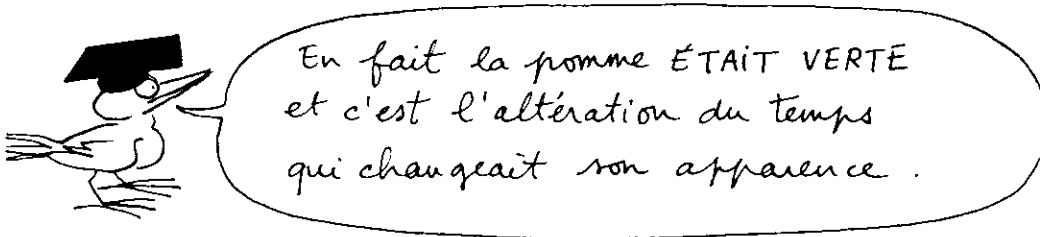
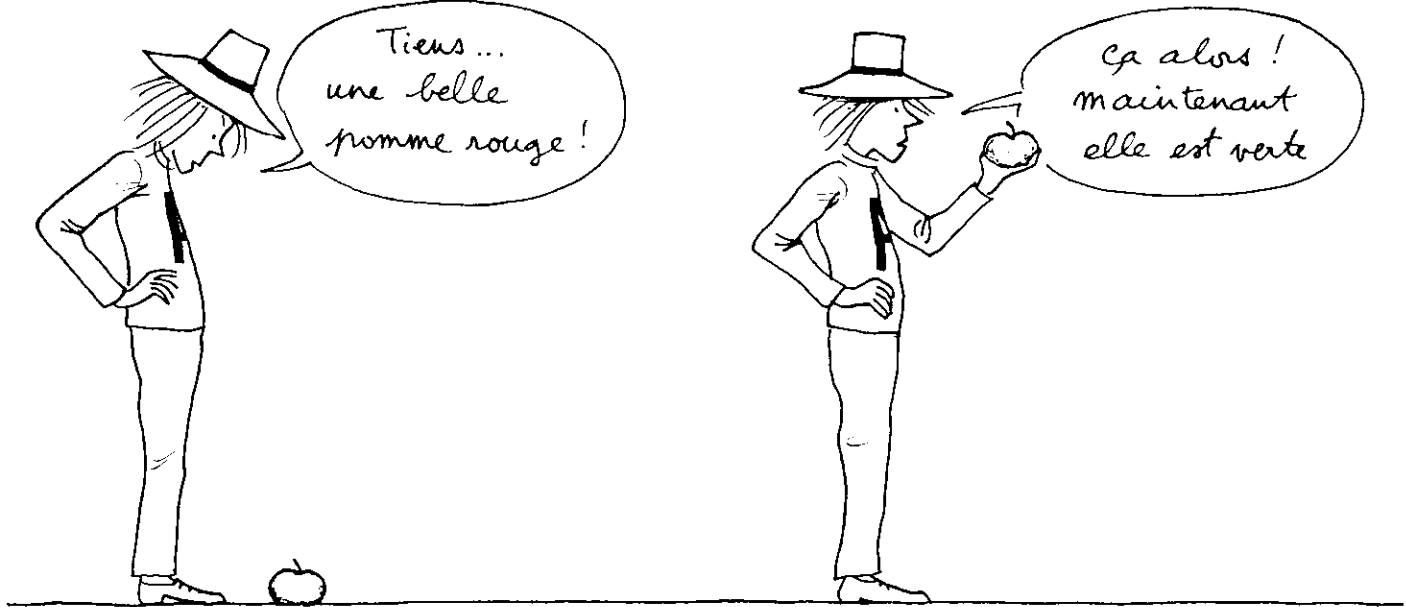
Les fréquences (émises ou reçues) sont mesurées par rapport au temps qui s'écoule dans le chronoscaphes de l'émetteur ou du récepteur. Dans le chronoscaphes A , Anselme émet de la lumière bleue. Il se trouve dans une région de l'espace où règne une forte courbure. Il est par exemple près d'une étoile à neutrons (très massive).

Sophie, dans le chronoscaphes S , reçoit cette lumière. Elle se trouve loin de cet objet supermassif. Donc son temps va s'écouler plus vite et elle mesurera une fréquence plus faible, au point que cette lumière sera, pour elle, décalée vers le rouge.

C'est ce qu'on appelle le RED SHIFT (glissement vers le rouge) d'origine gravitationnelle.

Anselme se trouve sur une étoile à neutrons.

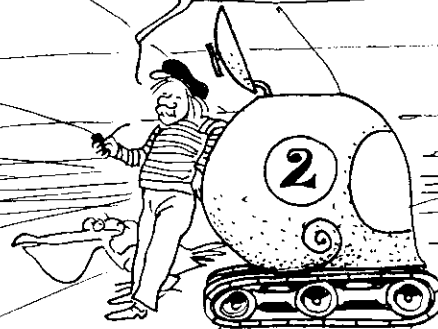
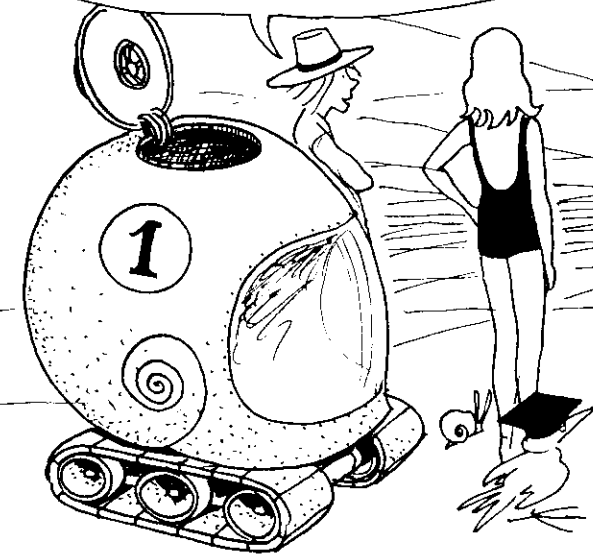
(Nous l'avons affranchi des contraintes de la pesanteur pour qu'il ne soit pas instantanément aplati sur sa surface sous l'effet de son propre poids).



SECONDE APPROCHE DU TROU NOIR

Nous allons continuer
d'explorer le comic park

OK, je monte avec Léon
Bonne géodésique !...

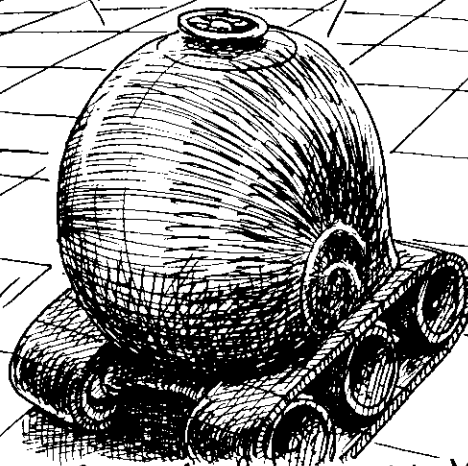


Et j'ai également un contact
en phonie, par radio (*)

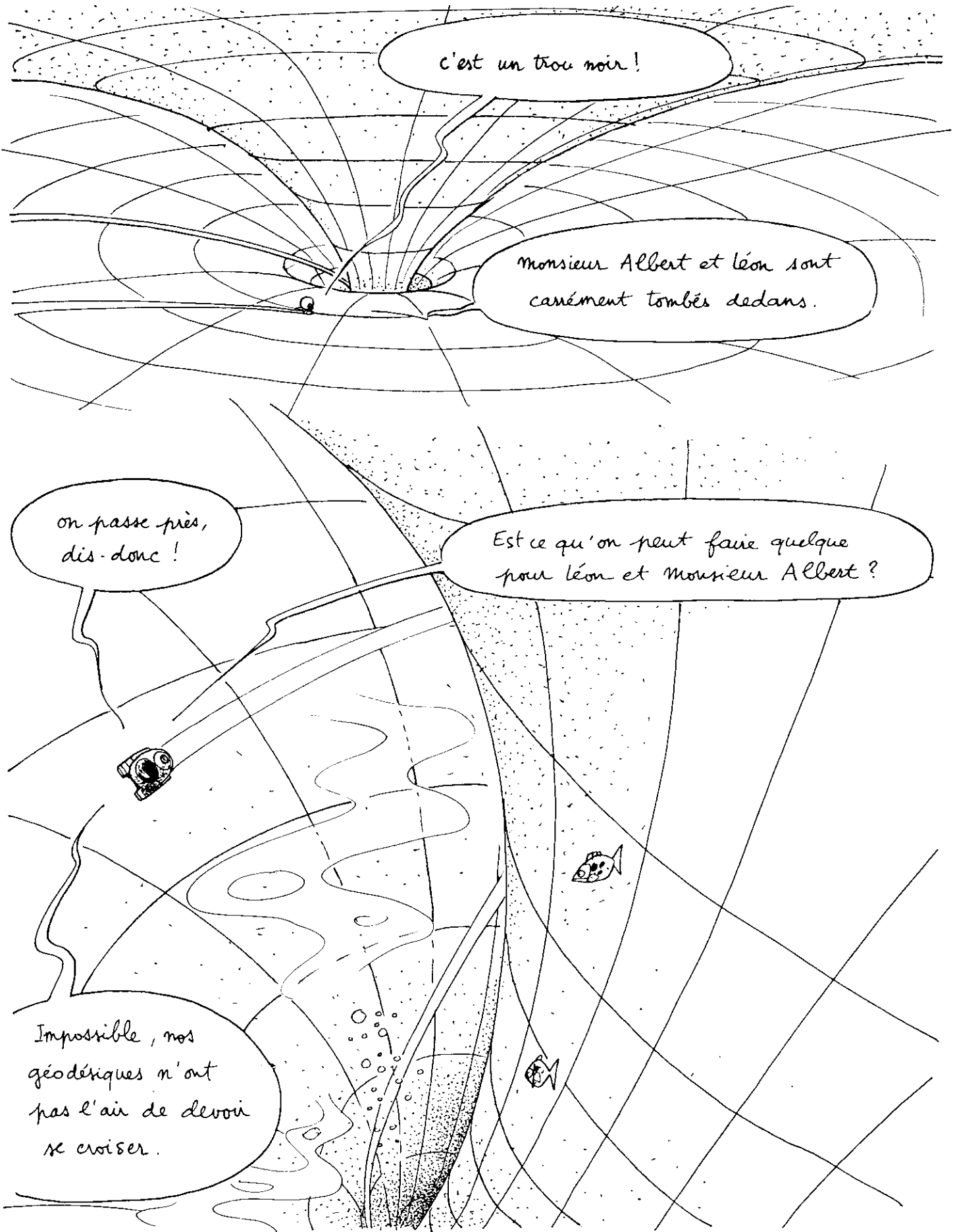
Léon, monsieur Albert,
je les vois, là-bas

Tiens, qu'est-ce que c'est
que ce truc, au loin

on dirait une trombe



(*) les ondes radio sont de même nature que les ondes lumineuses. Même vitesse de propagation c , mais fréquences plus basses.



Est-ce que tu les vois ?

Le fond du trou noir apparaît
complètement opaque.

Je les vois encore, mais leur chronoscope
est devenu d'une couleur rouge sombre

Allô, monsieur Albert, Léon
est-ce que vous me recevez ?

Je n'y comprends rien.
Sa voix est devenue suraiguë
et il parle trop vite


Sa voix est de plus en plus grave.
On dirait un disque qui s'arrête !?!

AHHHTEUHHH...

Problèmes de communication, quand
on vit dans des "bulles de temps"
bien différentes.

QUESTION DE TEMPS

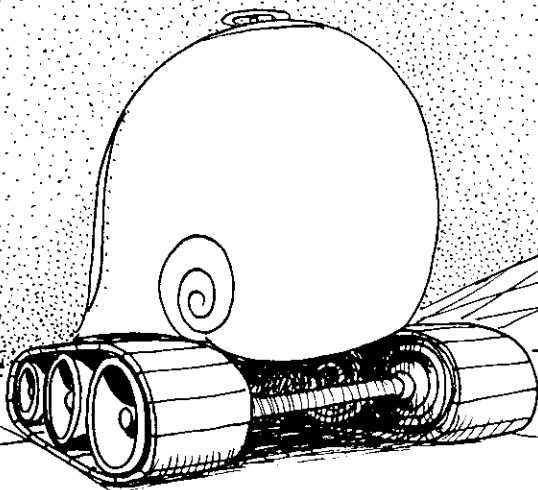
Plus Albert et Léon s'enfoncent profondément dans le CHRONOL et plus la pression extérieure P_E croît, donc moins leur clepsydre débite, moins le temps s'écoule dans leur chronoscaphé.



Quand ils atteindront le fond des choses et la vitesse de la lumière, leur horloge hydraulique de bord aura débité une quantité limitée de chronol, ce qui signifie que ce trajet aura été effectué en un temps FINI.

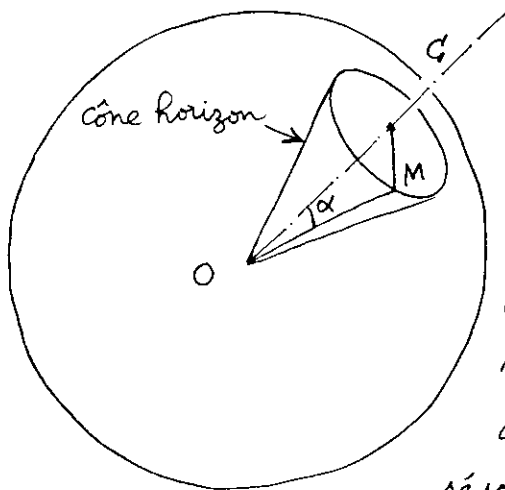
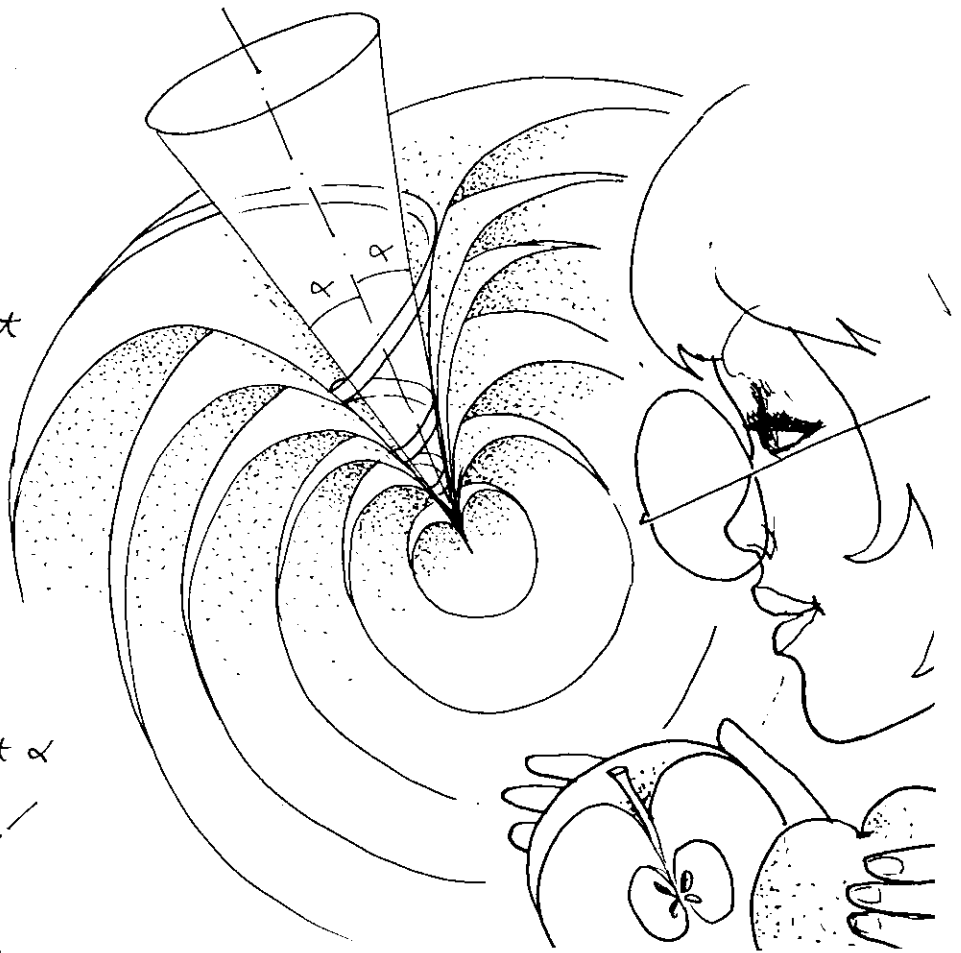
Mais si Sophie, Anselme, Max et Tirésias pouvaient continuer de suivre leur chute, celle-ci leur semblerait interminable.

La lumière émise par leur chronoscaphé sombre vite dans l'infrarouge hors du domaine de la lumière visible, tandis que leur message radio glisse dans l'infra-son.

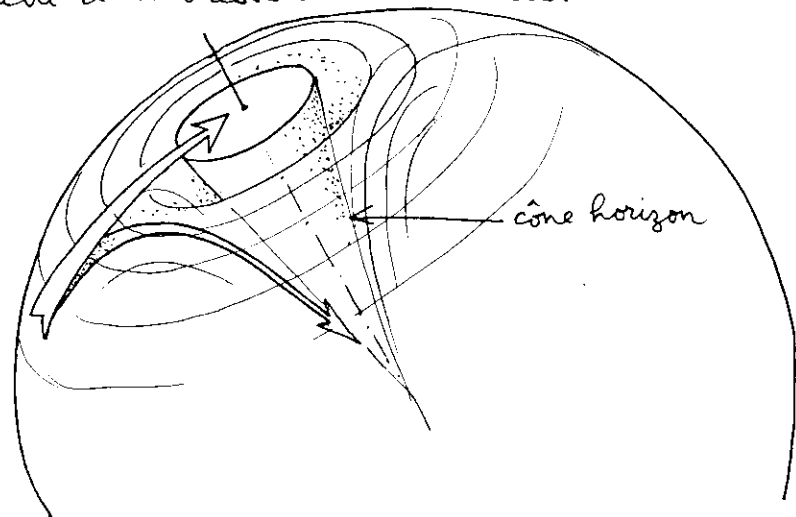


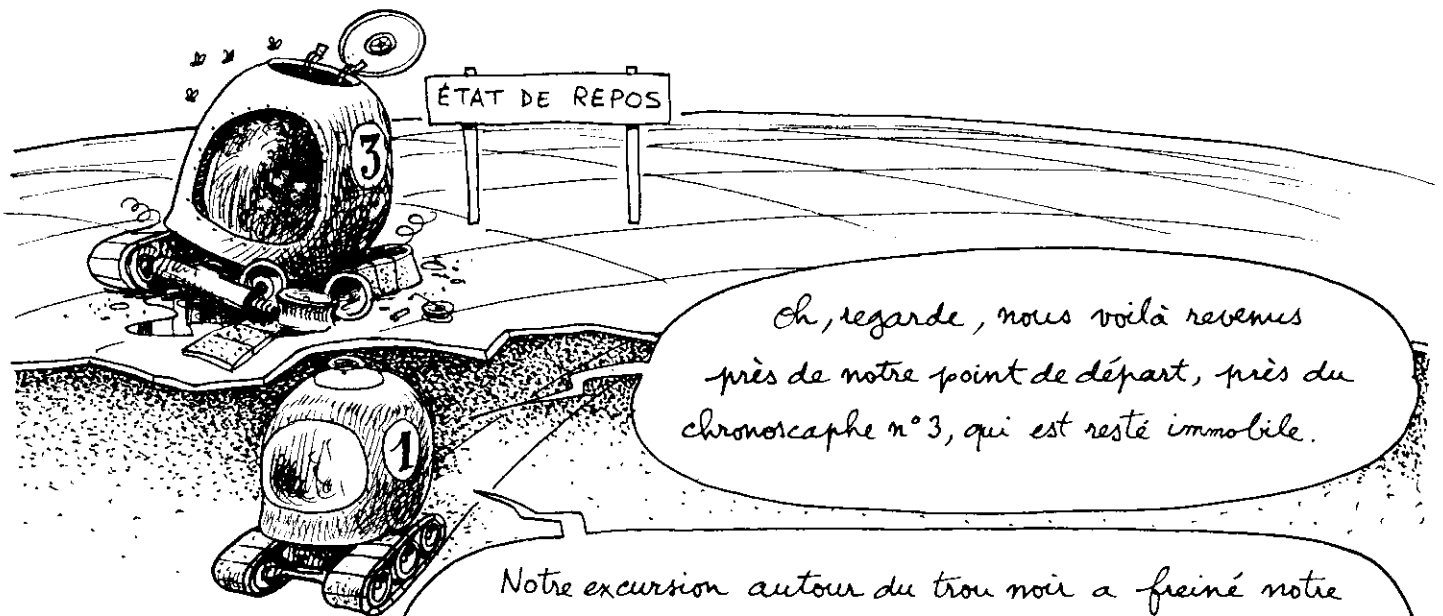
Cela me rappelle le paradoxe d'Achille, qui tente de s'approcher de la tortue en diminuant À CHAQUE FOIS la distance qui l'en sépare par deux. Il y parvient en un temps fini.

Voici, dans ce modèle du COSMIC PARK, une image du trou noir. le poinçon a complètement défoncé l'espace-temps jusqu'au centre, où règne la vitesse de la lumière. Toutes les nappes en ce point deviennent tangentes à un cône de demi-angle au sommet α



Dans ce modèle, la distance est en fait un ANGLE entre deux rayons vecteurs : exemple \vec{OM} et \vec{OC} . En regardant le dessin ci-dessus, on s'aperçoit que l'on ne pénètre jamais à l'intérieur du cône de demi angle au sommet α . Pour un observateur qui séjournerait à la surface du CHRONOL, c'est-à-dire à l'état de repos, et qui ne concernait pas cette courbure de l'espace-temps, cette frontière du trou noir, appelée HORIZON, apparaîtrait suivant un CERCLE qui serait franchi à la vitesse de la lumière.





Oh, regarde, nous voilà revenus près de notre point de départ, près du chronoscaphe n°3, qui est resté immobile.

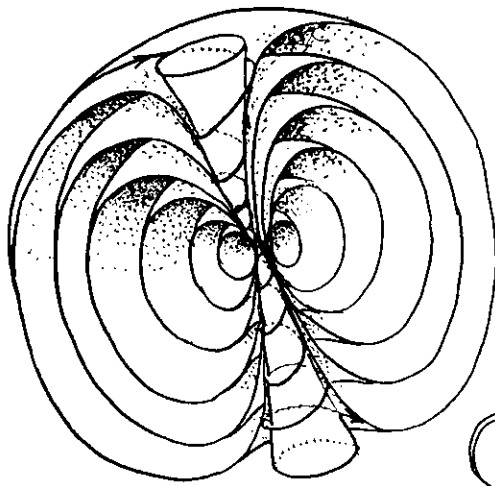
Notre excursion autour du trou noir a freiné notre vieillissement. Si l'un de nous était resté dans ce chronoscaphe au repos, il aurait peut-être attendu notre retour pendant des centaines ou des milliers d'années!

où mènent les trous noirs?

Personne n'en sait rien. La théorie montre qu'un anti trou noir pourrait exister.

c'est-à-dire un objet où on ne pourrait jamais entrer. On ne pourrait qu'en sortir.

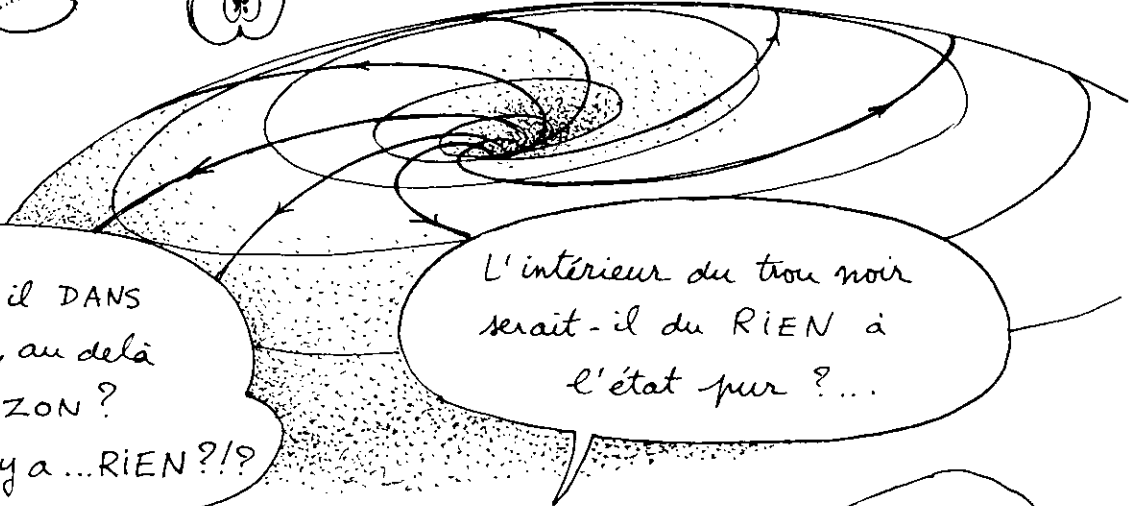
une FONTAINE BLANCHE



Voici, dans le modèle du COSMIC PARK à quoi pourrait ressembler un couple trou noir - fontaine blanche.

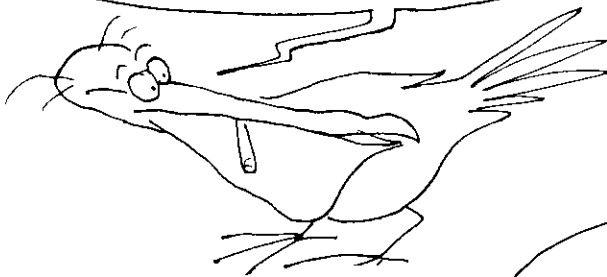


c'est le MÊME objet, mais avec une orientation inverse des géodésiques.



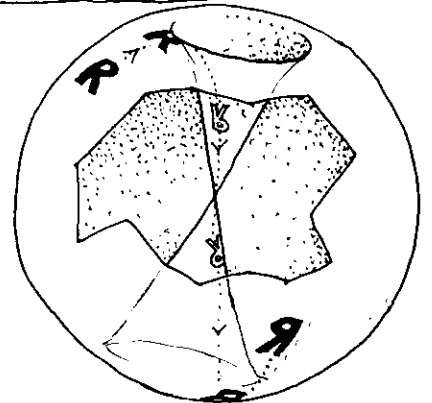
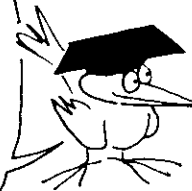
Mais qu'y a-t-il DANS le trou noir, au delà de l'HORIZON ?
Est-ce qu'il n'y a... RIEN ? ! ?

L'intérieur du trou noir serait-il du RIEN à l'état pur ? ...



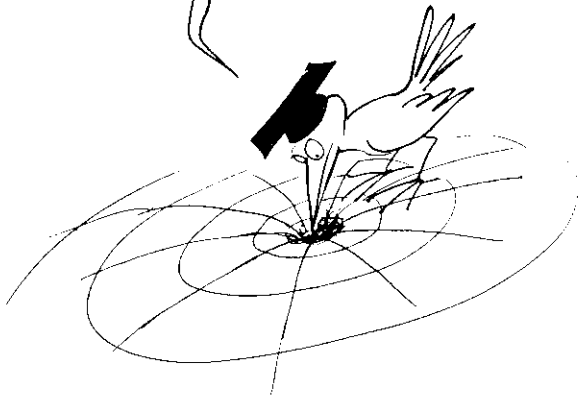
Mais non ! "l'intérieur" du trou noir serait tout simplement l'extérieur de la fontaine blanche associée

On remarquera que, dans ce modèle, la structure TROU NOIR-FONTAINE BLANCHE donne à tous les feuilletés du cosmic Park l'allure de surfaces inorientables, à un seul côté, le "passage" inversant les objets. Par exemple un **R** se retrouve selon un **Я**



LA BOUTEILLE A L'ENCRE

Mais il y a d'autres théories. Certains pensent que les trous noirs mettent notre univers en communication avec un UNIVERS JUHEAU.



Ou même avec un monde où tout serait en miroir y compris le temps



Au demeurant, s'il existe des audacieux qui se sont approchés d'un trou noir, aucun n'est revenu pour le raconter.

au fond, la coquille de Tirésias n'est peut-être qu'un trou noir !



maman !

Léon, laisse Térésias
tranquille !

Allons, Térésias
l'essentiel, c'est d'y
être bien, finalement
dans cette coquille

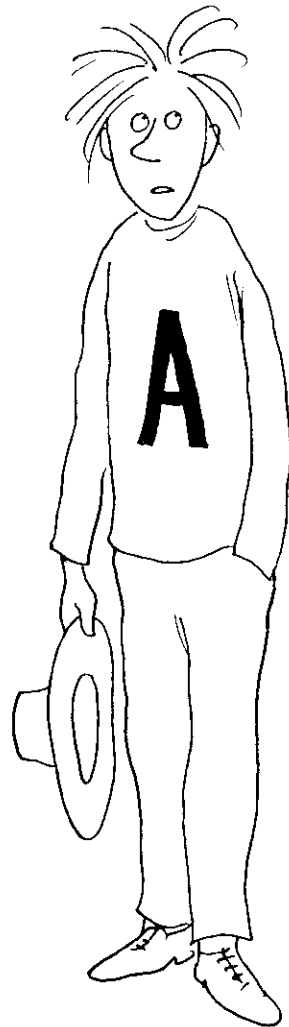
mi!...

ÉPILOGUE

Ouh là là, le cosmol !
j'ai mal à la tête ...

Voyons. Le vide et la
matière, c'est pareil !
L'espace peut se refermer sur
lui-même, et on ne peut
aller que tout droit !

Si cet Univers est le meilleur
des univers possibles, que
sont donc les autres ?



FIN



D'où vient l'eau qui
s'écoule de ce robinet qui
semble flotter dans
l'espace ?

Hmmm...

Et où s'en va-t-elle
puisque le niveau dans
le seau reste constant !

et pourtant,
elle coule !

