

# Pourquoi la Terre est ronde?

La Terre est ronde! La grande affaire me direz-vous! Question anodine qui en valut à certain de méchantes inflammations sur les buchers inquisiteurs. Inquisiteurs, la question, un couple antinomique. Temps révolus où on ne se posait pas de question, où on ne pouvait pas se poser de question. Mais quand est-il de nos jours? Combien de personnes se sont posées cette question? Combien ont cherché la réponse? Sommes nous devenus nos propres inquisiteurs?

Je ne suis pas mon inquisiteur et à cette question: « pourquoi la Terre est ronde? », j'ai cherché la réponse. En vain, les méandres de l'internet ne me posez que des réponses partielles, des éléments mais rien de convaincant, des copier/coller, des interprétations de copier/coller et un lot scientifico-religieux oscillant entre crétinerie fièrement exposée et obscurantisme pédant.

Pourquoi la Terre est ronde?

Drôle de question, simple mais qui cache bien d'autres choses. Et la première d'entre elle, le sujet de l'interrogation: la Terre. Qu'est-ce que la Terre?

Une planète solide ou tellurique en langage savant. Un conglomérat de matière solide pour la majorité.

Continuons le questionnement. Si la Terre est un ramassis de matière solide, qu'est-ce que la matière?

On peut considérer la matière comme un assemblage d'atomes, voir un atome unique pour les plus intransigeants d'entre nous.

Qu'est-ce qu'un atome?

Un ensemble de particules subatomiques (à l'intérieur de l'atome) nommées protons, électrons et neutrons.

Nous pouvons descendre encore plus bas avec les bosons, les fermions et autres leptons qui forment les électrons, neutrons et protons. Mais peut-être ici sommes-nous descendus un peu trop dans l'échelle des tailles. Ici, nous sommes dans les particules à l'intérieur, au fondement même de la matière. Remontons au moins d'un niveau. Pour ceux qui seraient perdus, de l'échelle de la planète 10000000 mètres nous avons zoomé (microscopé n'existe pas désolé) jusqu'à 0,000000001 mètre.

Protons, électrons, neutrons. Drôles de choses! Ils possèdent une masse mais pas de dimension. Ils ne sont pas matériels. Au mieux, ces particules subatomiques possèdent une distribution de charge (i.e. une zone d'influence ou d'interaction avec leur voisin) de l'ordre du femtomètre: 0,000000000000001 mètres. Chose intéressante, cette zone d'influence est parfaitement sphérique. La sphère nous y voilà! Les briques qui constituent les atomes sont sphériques et, chose admirable, quand ces briques se collent entre elles, elles forment un corps plus grand et sphérique: l'atome. L'atome est le plus petit élément matériel, c'est-à-dire possédant une dimension géométrique que l'on puisse imaginer. Merveilleux, l'atome est sphérique! La Terre ne serait donc qu'une copie de l'atome.

Pour former la Terre, il faut plusieurs atomes.

Comment s'établit une liaison entre deux atomes?

Pour simplifier les choses, jetons un coup d'oeil à la figure 1. Sur cette figure, nous observons une courbe de potentiel en fonction de la distance. Chaque couple d'atomes possède sa propre courbe, mais toutes ont cette même allure générale. Bon, nous avançons en compliquant notre problème (diront certains d'entre vous), ce qui n'est pas faux.

Figure XXX: courbe de potentiel entre deux atomes en fonction de la distance les séparant.

Alors, comment lire une telle courbe? L'axe horizontal (ou abscisse) nous donne la distance entre les deux atomes. L'axe vertical (ou ordonnée) nous donne l'énergie de notre couple d'atomes. Ici, il me faut énoncer une loi naturelle, une grande loi de la physique, sans doute la plus importante! Un système tend toujours à minimiser son énergie. En résumé: la nature est fainéante. Moins elle fait d'efforts mieux elle se porte.

Ce principe est à la base de l'évolution. Le plus adapté n'est pas le plus fort mais celui qui possède le plus petit rapport consommation d'énergie divisée par sa force ou intelligence. On peut considérer que les dinosaures ont été les victimes de cette loi. Mais revenons à nos atomes.

La courbe de potentiel de notre couple d'atomes possède un minimum d'énergie (noté par le point rouge sur la courbe). Ce minimum correspond à une distance: la distance d'équilibre. C'est à cette distance que les deux atomes vont se placer car c'est à cette distance que le couple aura son énergie la plus basse. Si les deux atomes sont à droite de ce point, ils vont se rapprocher. S'il sont à gauche, ils se repoussent et vont s'éloigner l'un de l'autre. (Note pour les plus curieux: nous observons sur cette courbe que l'énergie augmente exponentiellement quand la distance tend vers une distance de zéro. Si la distance est de zéro, cela signifie que les deux atomes se sont rentrés dedans. C'est le choc nucléaire avec le dégagement d'énergie qui l'accompagne).

Figure XXX: représentation schématique de l'organisation atomique d'un cristal: en cube, en hexagone, en cubique face centrée.

Donc, pour résumer: deux atomes se placent à une distance fixée par leur courbe de potentiel. Ils ne sont pas trop près, pas trop loin. Ainsi les atomes s'arrangent les uns par rapport aux autres, selon des distance et des angles précis formant des motifs géométriques. La figure 2 illustre ce propos. Deux atomes s'arrangent à une distance fixe. Si un troisième atome apparaît, ils vont vraisemblablement s'arranger selon un triangle de côtés égaux. Les choses se compliquent avec quatre atomes: ils vont s'arranger soit selon un carré, un rectangle ou un losange. Au final, les configurations possibles ne sont pas infinies, mais limitées à 7 structures. Quelques dispositions possibles sont visibles sur la figure xxx.

Figure XXX: différents types d'organisations cristallines en maille hexagonales, orthorhombiques, cubiques et tricliniques. En

bas, l'organisation d'un matériau par superposition de mailles cubiques.

Bon, pour résumer, les atomes s'arrangent entre eux selon des motifs géométriques. Quelle belle affaire! Notre problème est à l'échelle de la planète. Alors? Alors, cet arrangement atomique se reproduit de proche en proche et nous atteignons rapidement les grandes échelles.

De gauche à droite et de haut en bas, cristal de: fluorite (cubique), calcite (triclinique) et corindon (hexagonal)

Ce qui se passe à l'échelle microscopique (au niveau de l'atome) a des conséquences directes sur la forme macroscopique (i.e. à grande échelle). Les images de la figure XXX, montrent des cristaux dont les dimensions respectent l'arrangement atomique.

Donc un planète doit avoir la forme des matériaux qui la compose. On ne peut cependant pas dire que la Terre ressemble à quelque chose comme la figure XXX. Madre de dios, la forme de la Terre ne suit pas la théorie! Ou alors nous n'avons pas appliqué la bonne théorie. Tout est correct mais non applicable au cas de la Terre.

Figure XXX: Un Terre cubique

Vers une nouvelle piste.

Alors, revenons aux fondamentaux. Une rapide recherche sur le net, et hop nous avons une solution! La Terre est ronde à cause de la gravité et de ce gai luron de Newton. C'est bien. Nous sommes heureux de l'apprendre mais creusons quand même l'affaire.

Que nous raconte la loi universelle de la gravitation?

Deux corps ponctuels de masse  $M$  et  $m$  s'attirent avec une force proportionnelle à chacune des masses, et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Cette force a pour direction la droite passant par le centre de gravité de ces deux corps.

Figure XXX: La masse  $M$  attire la masse  $m$  avec une force  $F$  dont l'intensité est donnée par la formule de droite.

Autre détail, cette force est de type centrale. Si on place une masse  $M$  au centre d'une sphère et une masse  $m$  à la surface de la sphère, la force de gravitation qui agit sur  $m$  possède la même intensité, quelque soit la position de  $m$  sur la sphère. De même, la force d'attraction qui agit sur  $m$  est toujours dirigée vers  $M$ .

Figure XXX: Représentation schématique d'une force centrale. La force (symbolisée par une flèche) d'attraction de  $M$  sur  $m$  a une intensité équivalente, quelque soit la position de  $m$  sur la cercle. Seule la direction de la force change.

Pour résumer, deux corps possédant des masses s'attirent mutuellement. Nous avons là, la définition de la gravité. Nous sommes fixés au sol car nous sommes attirés par la masse de la Terre (et réciproquement). A ce stade, je ne vois pas très bien le rapport avec la forme ronde de la Terre. Il y a bien dans la loi de la gravitation des éléments (une force centrale) qui me rappellent la forme de la sphère. Mais, en quoi cette force peut modéliser une planète?

Si je regarde la figure, je vois que plus un objet est loin d'un autre objet (plus  $r$  est grand), plus la force d'attraction est faible. Si je prend mon principe de fainéantise de la nature, je dirais donc que naturellement, soit les objets s'agglutinent rapidement entre eux pour faire disparaître cette force de gravitation, soit les objets restent loin les uns des autres pour avoir la force de gravitation minimale.

Mais quoi qu'on en pense, cette loi de gravitation fait inéluctablement s'agglomérer, sur une durée plus ou moins longue, les corps. L'effondrement n'est évité que par le mouvement. Képler a ainsi énoncé des lois sur le mouvement des planètes. Les planètes tournent autour d'un corps de masse plus important: une étoile. Ce mouvement circulaire, ou plutôt elliptique, empêche les planètes de partir en ligne droite rapidement vers leur soleil et contre ainsi l'effet de la force de gravitation. Ici nous venons de mettre en avant les fameuses forces d'inertie que vous ressentez lorsque vous prenez un virage en voiture. Ce sont également ces forces qui entrent en jeu dans les pizzerias: si vous faites tourner une boule de pâte à pizza, sous l'effet des forces d'inerties, la boule se transforme en disque.

Figure XXX: La Terre plate.

Képler + Newton nous amènent à une disposition de la matière en disque. Nous arrivons donc à la conclusion que la Terre est plate. Une fois de plus, cette théorie amène à un résultat qui est valable pour la matière à l'échelle de la galaxie mais pas à l'échelle de la planète. Nous ne pouvons donc pas expliquer clairement la forme de la Terre par des lois d'échelle, que ce soit en partant du plus petit pour arriver au plus grand, ou du plus grand pour arriver au plus petit. Il va falloir observer que ce qui se passe à l'échelle de la planète entière.

Comment naissent les planètes?

Ici, je vais décrire brièvement un modèle de formation. A l'origine, il y a la formation d'une étoile. Une étoile en formation s'entoure d'un nid de poussières et de gaz de la forme d'un disque. Dans ce disque, on retrouve les éléments atomiques les plus légers et les plus communs: hydrogène (H), Hélium (He), carbone (C), oxygène (O), azote (N), silicium (Si), minéraux (Mg, Na, Al...) et du Fe. Ces gaz ou grains de matières ont été expulsés de l'étoile naissante. A force égale, nous jetons plus loin un objet léger qu'un objet lourd. Il en est de même pour l'étoile en formation. Ainsi le centre du disque concentre des éléments lourds (Fe, C, Si) et la périphérie des éléments légers. Cette discrimination des éléments est de plus accentuée par les hautes températures: les éléments réfractaires (qui supportent la chaleur) restent près du centre du disque tandis que les gaz, victime de l'agitation thermique, s'éloignent du centre. Ce disque primordial, appelé disque protoplanétaire, est donc stratifié: proche du centre on trouve de l'alumine, des composés réfractaires à base de calcium, magnésium, des oxydes métalliques... loin du centre, les températures baissent et on trouve des glaces d'éléments légers: eau, méthane, ammoniac, oxyde de

carbone...

Figure XXX: Disque protoplanétaire entourant une étoile en formation. Nébuleuse d'Orion. Photo HST/NASA

On retrouve ici, un modèle expliquant pourquoi les planètes proches des étoiles sont riches en éléments lourds (métaux, oxydes...) et pauvres en éléments légers (H et He) tandis que les planètes les plus à l'extérieur sont d'une nature gazeuse et composée d'éléments légers.

Nous avons donc un disque de matière qui sert de terreau à la formation des planètes et autres objets dérivant dans l'espace. Maintenant, c'est une affaire de hasard ou de chaos qui entre en jeu. Nous avons d'un côté des éléments possédant une masse, de l'autre la force gravitation et de l'agitation thermique. Que les regroupements commencent! Les poussières sous l'effet de l'agitation thermique vont s'agglomérer d'abord en floccule de taille centimétrique. Puis on arrive à un point où les poussières se font rares et les floccules nombreuses. La probabilité de chocs entre floccules augmente et les floccules se regroupent alors en corps de masse plus élevée: les planétésimaux. Ces premiers processus de regroupement sont principalement dus à l'agitation thermique. Lorsque les planétésimaux sont formés, la température du disque de matière s'est considérablement refroidie.

Figure XXX: Astéroïdes, des descendants des planétésimaux.

Les planétésimaux ont des tailles de l'ordre du kilomètre et devaient ressembler aux astéroïdes observés de nos jours. L'agitation thermique est maintenant le processus faible, et les planétésimaux devaient probablement orbiter autour du soleil. Les planétésimaux sont nombreux et on peut penser que les forces de gravitation les ont fait se regrouper en corps encore plus massifs: les protoplanètes (1/100ème de masse de la Terre par exemple). Une fois tous les planétésimaux disparus, ou presque, on se retrouve avec quelques dizaines ou centaines de protoplanètes qui vont elle-aussi, par attraction gravitationnelle, se percuter et se coller entre elles (accrétion). On forme alors des corps massifs: les planètes qui, toujours par gravitation, absorbent tous les débris aux alentours. Chaque planète fait ainsi le ménage sur son orbite et se retrouve seule et suffisamment éloignée de sa voisine pour ne pas subir de manière sensible sa force d'attraction. Le système est alors dans l'état d'équilibre ou de pseudo-équilibre que nous connaissons.

Voilà de manière très succincte et certainement discutable le processus de formation d'une planète tellurique (i.e. solide). En quoi cette description permet de trouver une trace de la sphéricité des planètes?

Un détail important.

Comme nous venons de le voir, les planètes ont leur genèse dans un environnement chaud et se forment par collisions successives. Les collisions sont également des sources de chaleur. Si je prend de la matière et que je la chauffe que se passe-t-il? Elle fond, c'est-à-dire elle se perd sa cohérence. Vous souvenez-vous de la figure XXX? Chauffer de la matière revient à lui fournir de l'énergie, ce faisant, on déplace la position d'équilibre des atomes. Quand ils ont plus d'énergie, les atomes s'écartent les uns des autres. La cohésion du solide diminue, on passe alors par un corps visqueux puis à un liquide et enfin un gaz. On peut donc penser que la formation des planètes telluriques se fait avec de la matière rendue visqueuse par la chaleur donnée par l'étoile en formation et par les chocs successifs.

A quoi ressemble un liquide ou une matière visqueuse?

A ces éléments, nous pouvons également inclure les gaz. Nous appellerons fluide l'ensemble liquide + gaz + solide visqueux, même si au sens stricte du terme les solides visqueux ne font pas parti des fluides. Donc je repose la question à quoi ressemble un fluide?

La réponse est: à rien. C'est même la définition brutale d'un fluide. Un fluide est un corps qui n'a pas de forme propre et prend la forme du récipient qui le contient. L'eau en bouteille a la forme de la bouteille, la même eau dans verre prend la forme du verre.

Alors quoi ressemble le contenant d'une planète en formation?

Une planète se forme dans le vide. Elle n'a pas de contenant. Mais par contre on sait à quoi ressemble un liquide ou un gaz sans contenant. Je pense que tout le monde ou beaucoup en tout cas ont déjà vu un liquide en suspension dans une station spatiale ou, beaucoup plus simplement, la pluie tomber. Un fluide sans support ou contenant prend une forme sphérique (et oui, la goutte d'eau!).

Figure XXX: A gauche, un atome dans le volume. Il possède 6 liaisons avec ses voisins. Le même atome à la surface, il ne peut avoir que 5 liaisons.

Ici, c'est le principe de fainéantise de la nature qui agit. Chaque matériau possède une énergie de surface. Cette énergie sert à maintenir la cohésion entre les atomes situés sur une surface. Et oui, pour ces atomes, il y a un problème comme le montre la figure XXX. Ici chaque atome en volume possède 6 voisins. C'est la courbe de la figure XXX qui a déterminé ce nombre. Mais voilà les atomes de la surface n'ont que 5 voisins; ils ne sont donc pas en équilibre. Il existe un déséquilibre sur les surfaces de chaque objet. Et pour compenser ce déséquilibre, il faut apporter de l'énergie (un avion vole (déséquilibre) quand on lui fournit de l'énergie (rééquilibrage)). Cette énergie à fournir est l'énergie de surface.

Mais la nature fainéante va toujours aller dans le sens où elle doit fournir le minimum d'énergie. Comment faire? Il lui suffit de diminuer au minimum sa surface. Et quelle forme possède la plus petite surface pour le plus grand volume? Autrement dit comment arranger le maximum de matière pour avoir le minimum de surface? Très simple, il faut former une sphère.

Comme nous l'avons vu, dans un fluide les atomes sont faiblement liés ce qui leur permet d'adopter la forme qu'on veut. Un fluide libre (sans support ou contenant) adopte la forme sphérique car c'est la forme qui lui demande le moins d'énergie.

Pourquoi la Terre est ronde?

De là, on peut imaginer que lors de sa formation la Terre peut être considéré comme un solide visqueux avec un comportement fluide. Ainsi, la Terre a pris une forme sphérique pour minimiser son énergie de surface. On peut alors imaginer la Terre comme la boule incandescente des films catastrophes. Une fois le processus de formation accompli, un refroidissement s'est opéré. Ce

refroidissement ne s'est pas effectué de manière homogène. L'extérieur s'est refroidi plus rapidement que l'intérieur et a donc adopté la forme du support: la sphère.

Il ne reste plus qu'une seule question à poser.

Pourquoi la Terre reste-t-elle sphérique?

En effet, la Terre s'est refroidie alors pourquoi ne cristallise-t-elle pas selon les formes géométriques imposées par la nature?

Bonne question.

La Terre se refroidit lentement, elle expulse encore la chaleur primordiale emmagasinée lors de sa création. Nous sommes toujours une planète active, i.e. une croûte solide flottant sur manteau visqueux. De plus, la Terre produit de la chaleur par divers mécanismes: radioactivité dans le manteau terrestre, chaleur latente produite par les forces de frottement lors des mouvements de convection dans le manteau, solidification du noyau externe liquide, par exemple.

Donc en tant que planète active, la Terre garde sa forme sphérique pour encore quelques milliards d'année au moins.

Figure XXX: Répartition sur une sphère (à gauche) et un cube (à droite). Les forces de même couleur s'annulent deux à deux. Toutes les forces représentées sur la sphère ont même intensité. Sur le cube, les forces sur les sommets ont une intensité plus faibles que celles sur les cotés car elles sont plus éloignées du centre du cube.

Mais il y a un autre avantage de la forme sphérique, c'est sa symétrie parfaite. Comme le montre la figure XXX, en un point de la surface de la Terre s'exerce une force d'attraction dirigée vers le centre de la Terre. Au point opposé, on retrouve une force de même intensité, mais de sens opposé. Ces deux forces s'annulent. Et il est en de même pour toutes forces appliquées sur la surface de la sphère. Ceci signifie que, si on somme toutes forces, on arrive au total de 0: les forces s'annulent entre elles. De plus, toutes les forces sont équivalentes. Il n'y a pas un endroit où une force est plus intense. Nous sommes finalement dans un état d'équilibre. Cet état d'équilibre serait plus difficile à maintenir dans le cas d'une forme cubique. Dans le cas d'un cube la somme des forces est nulle mais toutes les forces ne sont pas équivalentes (figure XXX). Les forces appliquées au centre des faces sont plus importantes que les forces appliquées sur les arrêtes. Il y a donc un déséquilibre local et qui dit déséquilibre dit apport d'énergie. A cela se rajoute, l'apport d'énergie provoqué par l'augmentation des surfaces. Donc, d'un point de vue purement énergétique, il y a peu de chances pour qu'une planète sphérique, même morte (c'est-à-dire totalement solide) deviennent un jour cubique.

*Par*

**Publié sur Cafeduweb - Sciences le mardi 27 juillet 2010**

Consultable en ligne : <http://sciences.cafeduweb.com/lire/11936-pourquoi-la-terre-est-ronde-spherique.html>