

# Peregrinages astronomiques



1. Mesure de la Terre avec le temps qui passe.....	2
2. Fiat lux !... en vitesse !.....	16
3. La terre gigote ! .....	22
4. Analemme, vous avez dit analemme! .....	24
4. Analemme perso.....	25
5. Sens des aiguilles d'une montre ? .....	27
6. Mesure de la Terre .....	28
7. Marées - Différence d'attraction lunaire au pôles et à l'équateur.....	29
8. Astromologie .....	30
9. Anaximandre enseignant l'art du gnomon .....	31

La Terre tourne, mais pas que ! Elle gigote et, dans ses multiples gigotages, le soleil de midi n'est pas vraiment à midi, en retard ou en avance, chacun peut le constater avec des moyens très simples. La Terre n'est pas plate et beaucoup ont entrepris de la mesurer, y compris avec le temps qui passe et le dernier rayon du soleil.

L'astronomie est parfois poétique. Prenons le temps de nous sidérer !

Au premier chapitre, découvrez comment les Egyptiens et les Grecs ont peut-être mesuré la Terre.

# 1. Mesure de la Terre avec le temps qui passe

Diogène, ses parents l'avait appelé ainsi parce qu'ils vénéraient la Grèce antique et son cortège de savant-philosophes d'une belle actualité.

Diogène montait souvent au Cap Canaille.

D'un côté il dominait La Ciotat avec les portiques des chantiers navals où gisaient les yachts de luxe en cale sèche. A deux encablures au large, d'autres yachts insolents attendaient leur tour d'être caressés par les descendants de ceux qui depuis 1835 avaient fabriqué des paquebots prestigieux. On racontait encore sur les quais du port la construction de l'Ava, le paquebot qui ralliait Marseille à l'Indochine ou du Maréchal Pétain qu'on rebaptisera La Marseillaise. De ce vieux temps, il restait encore le cinéma l'Eden, qui trônait face à la mer, en référence au surnom de l'amiral Cuverville<sup>1</sup>.

De l'autre côté, il voyait la Méditerranée à perte de vue et, à chaque fois, il espérait apercevoir la réfraction du sommet du Monte Cinto en Corse, malgré la courbure de la terre, de la même façon que les Marseillais pouvaient voir les Pyrénées depuis Notre Dame du Chateau sur la colline qui domine Allauch.

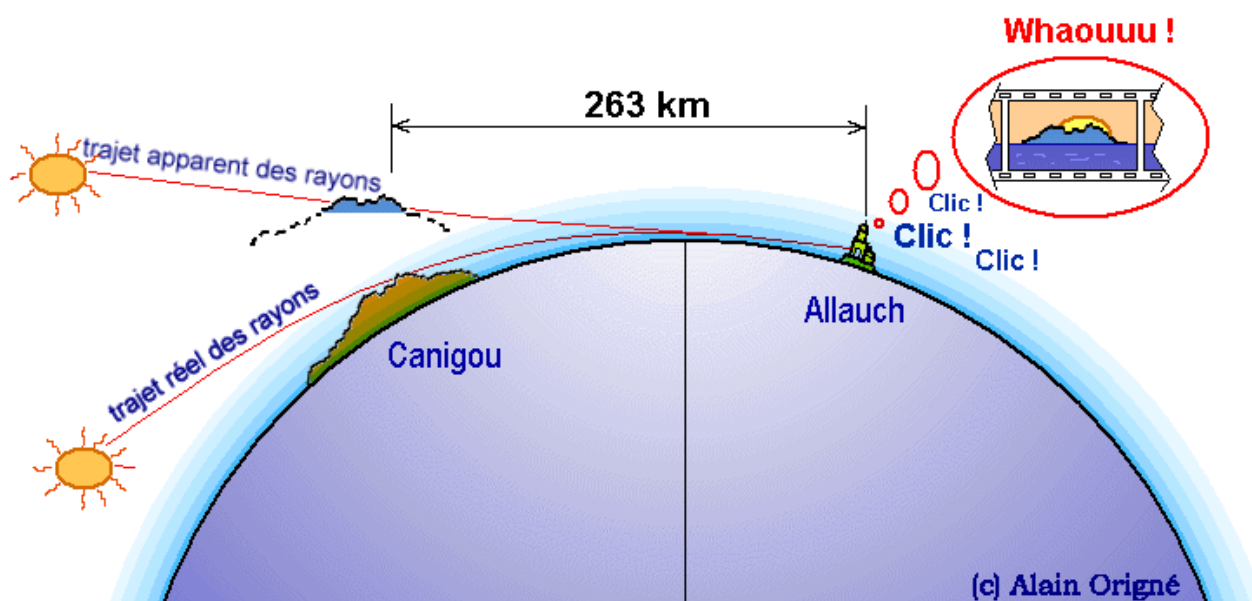


Photo : <http://canigon.allauch.free.fr/Explications.htm>

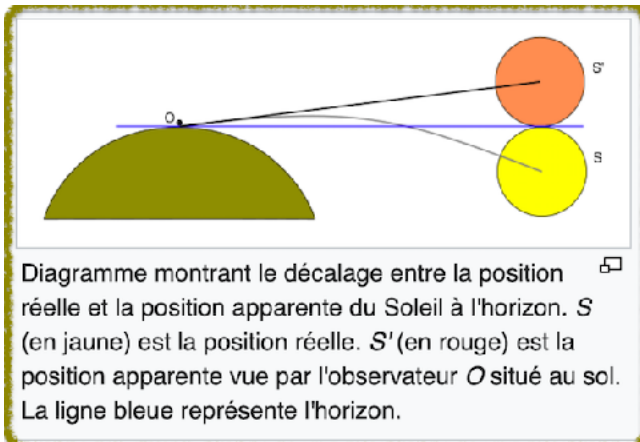
Mais le Monte Cinto était à 290 km du cap Canaille. Les 2706 m de la montagne ajoutés aux 363 m d'altitude en haut du Cap Canaille étaient insuffisants. A 3069 m de hauteur, l'horizon est à 200 km.

Mais Diogène avait lu La Fontaine, qui avait écrit :

"Quand l'eau courbe un bâton, ma raison le redresse"

<sup>1</sup> Ah ! Ah ! Ah !

L'atmosphère, chargée d'humidité ne courbait pas le bâton, mais courbait le rayon lumineux, créait la réfraction, cette réfraction atmosphérique qui fait que, selon le dicton, lorsque "le soleil du soir touche l'horizon, en réalité, il est déjà entièrement couché".

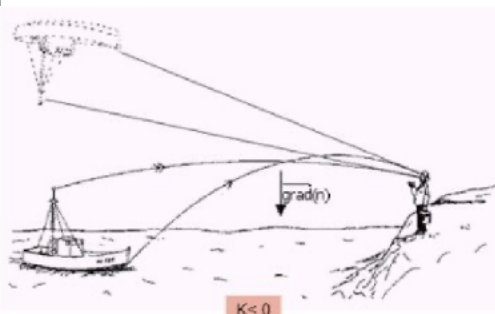
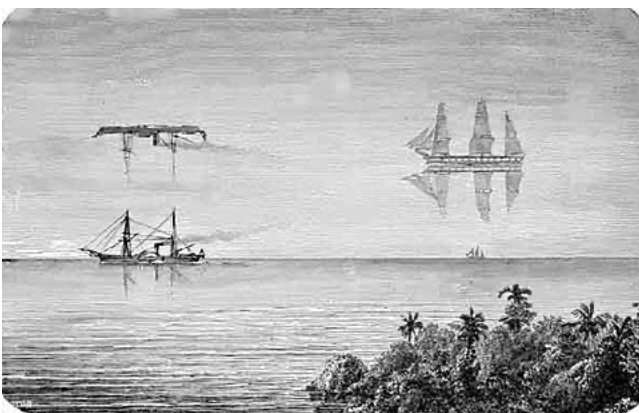


Le diamètre angulaire du soleil est à peu près de  $1/2$  degré soit 50 km de visibilité en plus. On peut chipoter en disant que la réfraction augmente avec la pression et avec le froid mais cela ne comble pas la différence. Plus l'air est dense et plus la réfraction est importante ; mais un air dense est chargé en humidité et la visibilité est réduite. Il espérait donc que

l'effet de réfraction permettrait d'allonger la distance de visibilité de 90 km.

Mais Diogène était trop optimiste. Son ami Gravetou l'avait plongé dans une grande tristesse un peu jalouse en lui disant que si, depuis les collines d'Allauch, à 310 m au-dessus de Marseille, on pouvait voir le Canigou qui culmine à 2784 m, à 263 km de là, c'était là le mieux que le ciel pouvait faire.

Pour refaire son moral, Diogène regarde la mer, toise la Méditerranée plus bleue que jamais, piquetée de quelques voiles. A l'horizon, un cargo, sans doute un porte-conteneurs géant, fait route vers Fos-sur-mer. L'idée de la réfraction revient le questionner. Voit-il le vrai navire ou bien l'image du navire déjà derrière l'horizon ? A l'envers ou à l'endroit, cela dépend de l'éloignement du navire par rapport à l'horizon. Un joli tour de la Fée Morgane - la Fata Morgana - comme les Italiens nomme ce phénomène magique.



[https://www.researchgate.net/figure/Mirages-inferieur-superieur\\_fig4\\_350567076](https://www.researchgate.net/figure/Mirages-inferieur-superieur_fig4_350567076)

Alors il repense à ce jour de Toussaint où il visitait en famille le phare de Chassiron, au bout de l'île d'Oléron. Le soleil se couchait et, au dernier rayon, son fils lui avait fait

remarquer que, vu du haut du phare, il verrait le dernier rayon plus tard que vu d'en bas du phare. Il avait ajouté qu'en mesurant cet écart de temps, on pourrait calculer la circonférence de la Terre.

La mesure de la Terre avait occupé les hommes depuis longtemps, depuis qu'ils pensaient que la Terre était ronde. Si le prophète Isaïe, sept siècles avant notre ère, pensait que la Terre était plate et qu'elle avait des confins - un peu fort de café pour un prophète ! -, Thalès de Milet, qui vécut 100 ans plus tard, changea d'avis après un voyage en Egypte ; Pythagore pensait plus rationnel qu'elle soit ronde ; Platon trouvait plus esthétique le concept de rotondité ; Aristote, qui, comme les Egyptiens<sup>2</sup>, avait observé la courbe de l'ombre de la Terre sur la Lune lors d'une éclipse, en avait aussi déduit qu'il vivait sur une boule. Eratosthène, deux siècles avant JC, Fernel en 1528, Snellius, vers 1615, Riccioli, vers 1660, Picard en 1669, ont participé à cette épopée de la [mesure de la terre](#)<sup>3</sup>, chacun à sa manière, avec les moyens de l'époque.

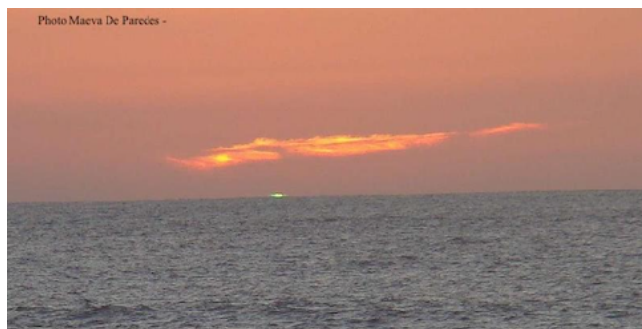
L'idée du fiston le titillait un peu, certains soirs quand il s'endormait. Comment les Grecs ou les Egyptiens auraient-ils fait avec leurs sabliers ou leur clepsydres pour mesurer le temps de la course du soleil du haut en bas d'une pyramide ou du phare d'Alexandrie ? Comment saisir précisément l'instant où le soleil disparaît ?

Diogène se souvint de ces moments calmes des journées ensoleillées sur la Côte Basque où il guettait ce que Jules Verne lui avait fait miroiter : l'instant du Rayon vert !

Euréka ! Jules Verne avait la réponse.

Diogène s'était relevé pour retrouver dans sa bibliothèque ce gros bouquin avec sa grosse reliure rouge, d'une agréable et désuète écriture. A la page 35, Jules Verne citait l'article du Morning Post qui devait déclencher de nombreuses fièvres encore aujourd'hui.

*"Avez-vous quelquefois observé le soleil qui se couche sur un horizon de mer ? Oui ! sans doute. L'avez-vous suivi jusqu'au moment où, la partie supérieure de son disque effleurant la ligne d'eau, il va disparaître ? C'est très probable. Mais avez-vous remarqué le phénomène qui se produit à l'instant précis où l'astre radieux lance son dernier rayon, si le ciel, dégagé de brumes, est*



---

<sup>2</sup> Achille Tatius (II<sup>ème</sup> siècle après JC) prétend que les Egyptiens auraient mesuré la Terre et un certain [Jomard](#) (en 1809) aurait ratiociné que les 924 mètres du périmètre de la base de la pyramide de Khéops représentent 1/2 degré du 27<sup>ème</sup> parallèle, espérant démontrer que l'évaluation des grandes distances géographiques reposait sur la valeur du degré égyptien, ce qui sous-entend que les Egyptiens auraient calculé la circonférence terrestre !!!

<sup>3</sup> [http://ertia2.free.fr/Niveau2/Blogrinages/Blogrinages\\_ici\\_et\\_la/La\\_terre\\_gigote.pdf](http://ertia2.free.fr/Niveau2/Blogrinages/Blogrinages_ici_et_la/La_terre_gigote.pdf)



*alors d'une pureté parfaite ? Non ! peut-être. Eh bien, la première fois que vous trouverez l'occasion – elle se présente très rarement – de faire cette observation, ce ne sera pas, comme on pourrait le croire, un rayon rouge qui viendra frapper la rétine de votre œil, ce sera un rayon "vert", mais d'un vert merveilleux, d'un vert qu'aucun peintre ne peut obtenir sur sa palette, d'un vert dont la nature, ni dans la teinte si variée des végétaux, ni dans la couleur des mers les plus limpides, n'a jamais reproduit la nuance ! S'il y a du vert dans le Paradis, ce ne peut être que ce vert-là, qui est, sans doute, le vrai vert de l'Espérance !"*

Un paragraphe plus loin, Jules Verne mettait un peu de magie dans la physique :

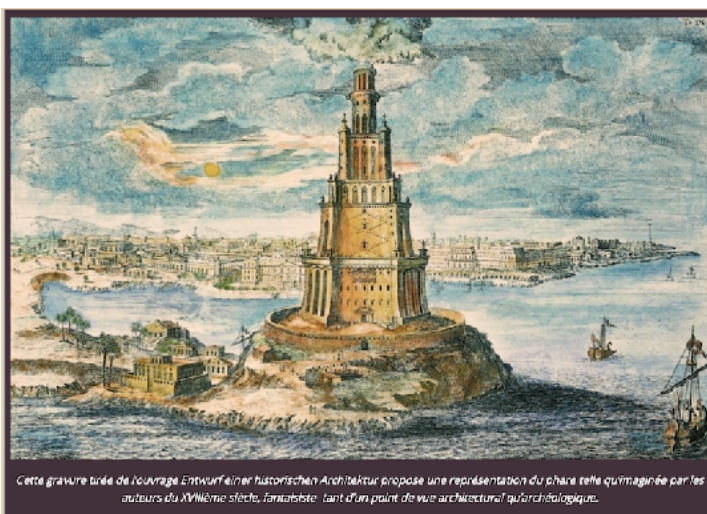
*"Mais, ce que Miss Campbell ne leur dit pas, c'est que précisément ce Rayon-Vert se rapportait à une vieille légende, dont le sens intime lui avait échappé jusqu'alors, légende inexplicquée entre tant d'autres, nées au pays des Highlands, et qui affirme ceci : c'est que ce rayon a pour vertu de faire que celui qui l'a vu ne peut plus se tromper dans les choses de sentiment ; c'est que son apparition détruit illusions et mensonges ; c'est que celui qui a été assez heureux pour l'apercevoir une fois, voit clair dans son cœur et dans celui des autres."*

Mais Jules Verne, entretenant le suspense jusqu'au bout avec les interventions grotesques de Aristobulus Ursiclos (il fallait oser !), a décidé que Miss Campbell ne verrait pas le rayon vert, mais qu'elle trouverait l'amour.

Diogène pensa qu'il pouvait peut-être redonner une dimension mythique au Cap Canaille, en réponse aux habitants d'Allauch qui se targuent de voir le Canigou depuis leur colline. Sans doute ne verra-t-on jamais le Monte Cinto depuis le Cap Canaille, mais quelle satisfaction serait que le Cap Canaille serve à mesurer à peu près la circonférence terrestre, d'une manière anecdotique, celle des Grecs ou des Egyptiens d'il y a plus de 2 000 ans !

De l'idée à la réalisation, il y a toujours un infini, ou presque...

Il imagina un esclave égyptien grimpé en haut du phare d'Alexandrie, à 110 mètres au-dessus de sa base, chargé de frapper un gong au moment où le soleil vient de disparaître



Trouvé sur <https://compediart.com/index.php/2018/08/23/quest-il-arrive-aux-7-merveilles-le-phare-dalexandrie/>

Au pied du phare, Claude Ptolémée, qui guettait lui aussi la disparition du soleil à l'horizon, a déjà déclenché à cet instant une clepsydre qu'il a spécialement fait construire sur le modèle de Ctésibios, en hommage à son illustre homonyme, le pharaon Ptolémée II.

Au son du gong, Ptolémée coupe l'eau et note le temps que le dernier rayon du soleil a mis à grimper jusqu'en haut du célèbre phare.

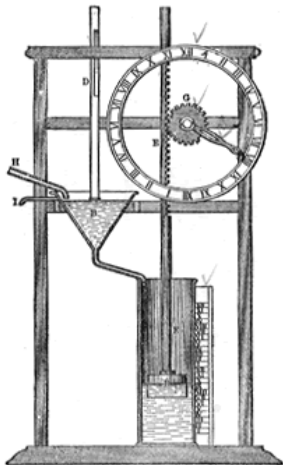


FIG. 29. — A COMMON FORM OF CLEPSYDRA IN GREEK AND ROMAN TIMES.

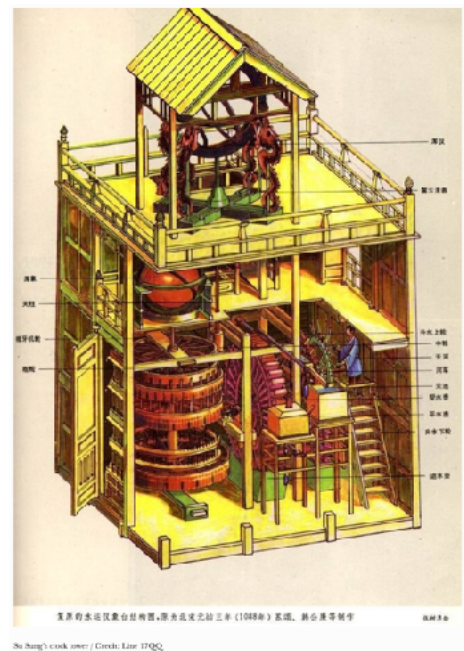
Les clepsydes sont des mécanismes qui mesurent le temps en fonction du volume d'eau écoulé, adaptés pour mesurer le temps d'un discours ou une nuit entière.

Ici, il s'agissait de mesurer aussi précisément que possible une durée de moins de dix secondes, suivant les premiers essais qu'il avait réalisés. Pour être précis, il fallait que la fontaine remplisse le cylindre receveur avec un débit constant. À l'intérieur du cylindre, un flotteur en liège supportait une tige verticale graduée qui sortirait à mesure du remplissage.

Pour le plaisir, citons les sophistications chinoises de l'[horloge armillaire à eau](#)<sup>4</sup>

Aujourd'hui, nous avons de superbes chronomètres et Diogène imagina le plus simple : il déléguerait à son fils le soin de signaler l'instant de la disparition du soleil en bas du Cap. Lui serait en haut pour déclencher le chronomètre et l'arrêter au moment où il verrait le soleil disparaître.

Le reste était affaire de calcul. Connaissant la distance à l'horizon à 10 mètres au-dessus de la mer et celle à 300 mètres au-dessus de la mer, il était facile d'en déduire la course de l'ombre entre les deux horizons.



<sup>4</sup> <https://montrespubliques.com/new-1minute-reads/early-chinese-horology-su-sungs-water-clock>

Et là Diogène se frappa la tête : "Je suis celui qui est !", l'exemple d'une très vieille tautologie biblique, puisqu'elle est attribuée à Moïse.

Que vient faire la tautologie dans cette histoire : en utilisant les distances à l'horizon données mathématiquement en partant de la valeur de la circonférence terrestre, on se sert du résultat pour démontrer le résultat !

Grave erreur ! Combien se sont déjà fait prendre à ce mauvais jeu, de bonne ou de mauvaise foi ?

Il fallait donc trouver une méthode autre pour avoir les distances à l'horizon. L'usage d'un sextant serait aussi tautologique puisque le calcul de la position se base sur la circonférence terrestre. De même l'usage d'un chronomètre moderne lui apparut comme de la triche.

Diogène se demanda alors comment aurait pu faire le subtil Ptolémée.

Puisqu'il voyait les voiles des bateaux disparaître avec l'éloignement, il pensa qu'il suffirait d'affréter un bateau, de l'envoyer au delà de l'horizon et de la faire revenir vers le phare.

Lorsque le capitaine verrait le haut du phare, il hisserait un grand drapeau visible de plusieurs endroits sur la côte. Les anciens connaissaient déjà le calcul trigonométrique qui permet de calculer le côté d'un triangle en connaissant un angle et un autre côté.

Sur 10 km, cela va, mais sur 40 km, sans télescope, cela est un peu olé-olé.

Restait une solution, basée sur la vitesse du bateau venant d'au-delà de l'horizon et tirant droit sur le Cap. Il faudrait alors mesurer la durée entre l'instant où le capitaine distinguait le haut du phare et l'arrivée à terre.

Diogène avait alors rêvé : Ptolémée aurait embarqué une clepsydre et une corde à noeuds, à laisser défiler dans les mains du matelot qui en comptait les noeuds. On commençait à compter dès que le capitaine distinguait le haut du phare, en même temps que l'on déclenchait la clepsydre. A bout de cordage, on notait l'heure sur la clepsydre, on calculait la vitesse et on recommençait. En passant, on notait aussi l'heure où le capitaine distinguait la base du phare. Le temps que le navire touche terre, on calculait la vitesse moyenne depuis le déclenchement de la clepsydre et de là, la distance parcourue. La distance à l'horizon à l'envers : élémentaire, mon cher Watson !

Avec une vedette moderne équipée d'un GPS, la chose serait plus simple, mais Diogène avait sa fierté, parce que là encore il y avait tautologie : dans les savants calculs du GPS, il y a la circonférence de la Terre, justement celle-là que l'on veut calculer.

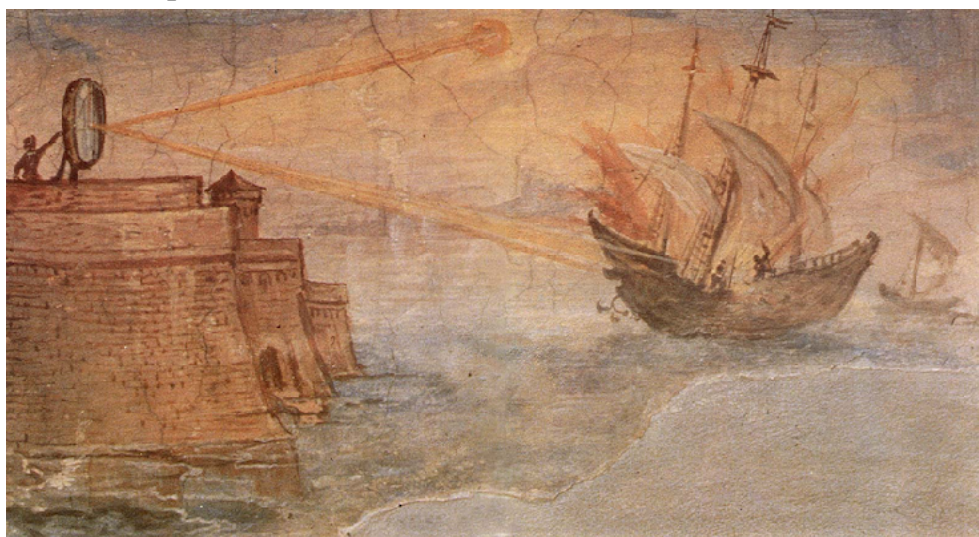
La seule concession à la modernité furent l'utilisation du système métrique, pour éviter les éternelles querelles sur la valeur d'une coudée, d'une toise, d'une brasse, d'une encâblure, d'un stade ou d'un mille romain, sans parler des pieds de Paris et autres aunes dévolues aux mesures de distance. Diogène concéda aussi que les essais pourraient se

faire avec un bateau à moteur, à condition que les essais ultimes se fassent avec un voilier. C'eût été mieux avec un [trirème](#)<sup>5</sup>, mais n'exagérons pas !

Il fabriqua une clepsydre qui pourrait durer tout le voyage du bateau depuis que le Capitaine verrait le signal en haut du CAP jusqu'à la falaise, soit au moins 6 heures d'autonomie. Encore fallait-il étalonner la clepsydre en se référant à un déplacement du soleil de 30°, soit deux heures de notre temps moderne. Pour éviter les à-coups du tangage ou du roulis, Diogène avait prévu de la suspendre dans un bain d'huile. Gravetou suggéra que l'on aurait pu faire l'inverse et mesurer le temps depuis le cap, à partir du moment où l'on verrait apparaître le haut du navire. On hésita,... et puis on fit les deux méthodes.

Puis Diogène confectionna un [loch à flotteur](#) d'au moins une encablure avec un bouchon de liège enchassé tous les 10m, de couleur rouge tous les 50 mètres. Il avait choisi une encablure en référence à la Corderie Royale de Rochefort-sur-mer, bâtie de 374 mètres de long, où se tressait les cordages de chanvre de la Marine de Colbert et en particulier les câbles d'ancre qui faisaient en moyenne 200 mètres. Pour bien faire, il aurait fallu de la fibre de roseau, mais, quant il apprit que dès 2800 av. JC, les Chinois utilisaient déjà le chanvre, Diogène se fit une réflexion humoristique : l'usage du chanvre ne serait pas une tautologie !

L'imprécision venait de situer le lieu d'où l'on commence à voir le haut du Cap puis le bas du Cap. Pour améliorer la précision, Diogène avait prévu qu'en haut et en bas du Cap soit installer des projecteurs pointés vers l'horizon. Il aurait préféré un brazero avec un miroir concave pour concentrer la lumière du feu vers l'horizon, comme Archimède l'aurait fait pour brûler la flotte romaine.



Giulio Parigi (1571-1635), aux Offices, à Florence.

---

<sup>5</sup> <https://youtu.be/INGl8LB9Zxo?t=120>



Finalement, il opta pour ce qu'il appela son bouclier d'airain : une grande feuille de carton, un bon coup de peinture au bronze métallisée, devrait bien réfléchir la lumière du soleil. Il imagina le Grec Lysandre à la bataille du cap Mycale donnant le signal de l'attaque avec son bouclier d'airain. Encore fallait-il que le soleil y soit réfléchi vers la direction d'arrivée du bateau géomètre.

Diogène, qui pêchait souvent sur le voilier de Gravetou, lui proposa cette étrange aller-retour plein Ouest où, à la place d'une palangrotte, il lui faudrait dévider un loch. A l'ancienne ! A l'ancienne ! lui avait-il dit.

On installa le QG au Cinéma l'Eden, dominant le port de plaisance, qui fut célèbre aux beaux jours des Chantiers Navals de la Ciotat. Le plus dur fut de faire comprendre aux copains d'abord qu'en aucun cas il fallait se référer à une dimension de la Terre telle qu'on la connaît aujourd'hui puisque le but de la manip était justement d'en calculer la valeur. On le surnomma le tautologue ! En dehors de la partie de boules quotidienne et de tous ses à-cotés, les retraités rigolèrent d'abord puis se prirent au jeu de l'histoire des sciences d'il y a 20 siècles et plus. Chaque jour, l'un ou l'autre rapportait au QG une anecdote, une fable, une découverte qui les rapprochait de l'antiquité. L'émulation aidant, le mouvement fit tâche d'huile vers les enfants, les petits-enfants, les neveux et même les classes de l'Ecole élémentaire Louis Marin, dont on voyait parfois les plus grands marcher jusqu'au Sémaphore et puis bien sûr la Classe Aventure du Collège des [Matagots](#).

On fit plusieurs essais pour bien cadrer la méthode. On alla même jusqu'à installer le bouclier d'airain en haut du Pic de Bertagne sur la Sainte Baume, à 17 km à vol d'oiseau au nord-nord-est du cap Canaille, ce qui supposait de placer le bouclier sur un support orientable au degré près, en s'ajustant en permanence à la position du soleil en élévation et en azimuth. Gravetou eut même l'idée de placer au cap Canaille un miroir plat de un mètre de côté, strictement perpendiculaire à la direction du Pic de Bertagne, espérant ainsi que lorsqu'il recevrait le rayon du soleil ré-émis par Bertagne, ceux de Bertagne pourraient vérifier visuellement leur réglages. Cela ne marcha pas vraiment. Par contre, ceux de Bertagne pouvaient voir leur rayon balayer les collines, surtout dans les pentes à l'ombre. Ils pouvaient alors faire un réglage à vue et pointer facilement ceux du cap Canaille qui, alors criaient : "J'l'ai vu ! J'l'ai vu !". On trichait un peu en utilisant le téléphone, mais pouvait-on canaliser l'enthousiasme des plus jeunes ?

Enfin commencèrent les essais maritimes.

Le collège des Matagots emmena la classe Aventure sur l'un des "promène-touristes" dont le capitaine était à la fois le fils de Gravetou et le mari de la directrice. La vedette s'en alla au large, jusqu'à ce que l'on ne voie plus la côte.

*Les jeunes eurent même droit à un poisson-lune, à la visite d'une bande de dauphins et en prime à voir au loin le jet d'une baleine. Ce n'était pas une galéjade, les naturalistes savent bien que des baleines bleues, qui peuvent atteindre 20 mètres, viennent souvent chasser au bord de la fosse marine qui s'enfonce au large des côtes du Var. Pour égayer l'excursion, Gravelon raconta aux jeunes la légende biblique de Jonas qui passa trois jours dans le ventre d'une baleine avant d'être rejeté sur le rivage. Cette légende pourrait avoir un fondement, car il est arrivé qu'un homme soit avalé par une baleine, puis recraché, sans doute parce qu'il n'était pas au goût du cétacé, qui ne se nourrit que de krill ou de petites proies. Au retour, le jeu consistait à guetter un point blanc qui apparaîtrait en premier pour signaler le cap Canaille, à manipuler la clepsydre qui servirait à mesurer le temps de retour et à se servir du loch pour apprécier la vitesse. La Grèce antique allait revivre à la Ciotat !*

Ce fut un petit jeune de 7 ans qui cria le premier "J'l'ai vu ! J'l'ai vu !". Le point blanc en haut du cap commençait à se voir à chaque fois que la vedette montait avec la houle. Alors, on déclencha la clepsydre et à dérouler le loch. En même temps, les téléphones se firent la vidéo de la terre à l'horizon, de la clepsydre qui gouttait, et du loch qui se dévidait.

*A un moment du retour, l'un des écoliers signala un point qui brillait à peu près aux 2/3 de la hauteur de la falaise.*

*Il y avait là un mystère parce que la falaise était inaccessible. Il y a bien de temps en temps des grimpeurs de l'extrême qui venait se faire des passages de 7 et 8. En escalade, les passages sont notés selon leur difficulté, de la cote 3 où l'escalade était encore facile à la cote 5 pour les grimpeurs aguerris, à la cote 7 ou 8 pour les professionnels qui passent leur vie à s'entraîner, suspendus à un doigt dans leur garage, ou recherchant le passage qui les rendrait célèbres dans le petit monde qui s'accroche aux parois. Au niveau du Sémaphore, les grimpeurs ont le choix entre une dizaine de voies très difficiles.*

*Et le point qui brille, est-ce un grimpeur qui déploie je ne sais quoi de réfléchissant ? et puis le point brillant disparut. La vedette s'approche de la falaise. On sort les jumelles, on scrute. Et non, il n'y a aucun grimpeur en cette fin d'après-midi.*

*Le mystère restera entier !*

A l'arrivée au port, les parents retrouvèrent de jeunes enthousiastes qui purent leur parler de la Terre qui était ronde, des baleines qui soufflaient, du poisson lune, des dauphins, de la vitesse du bateau, de l'est et de l'ouest et des horloges des grecs.

On ne parla pas encore du rayon vert, parce que les chances de le voir étaient faibles et que l'on ne voulait donner un faux espoir à ces jeunes. Il serait temps de leur faire lire Jules Verne, après... En attendant, les promoteurs de l'idée parlaient du dernier rayon du soleil. L'essentiel était que le dernier rayon soit perçu à une ou deux secondes près.

Ce fut l'occasion pour le prof de maths de faire un cours d'astronomie appliquée et des mathématiques qui vont avec, sans oublier le difficile concept de tautologie et les

réponses aux éternels : "A quoi ça sert !". Le collègue décida que l'an prochain, le mémoire des troisième aurait pour sujet : "Histoire de la mesure de la Terre". En cherchant bien, on pourrait trouver dans l'Histoire une bonne vingtaine de savants et tout autant de technologies, avec des résultats très variables. Souvenons-nous de Christophe Colomb qui pensait que la Terre était beaucoup plus petite qu'en réalité, à tel point qu'il crût avoir mis le pied en Inde alors qu'il était aux Caraïbes. Si le continent américain n'avait pas été là, il aurait dû faire 10 000 km de plus pour arriver à Taïwan. L'erreur est humaine, mais à ce point !

Puis vint le moment des essais en mer. Le bateau partait plein ouest jusqu'à ce que le cap Canaille disparaisse sur son arrière. Alors, il faisait demi-tour et sur la route du retour, le capitaine guettait l'apparition du point lumineux du réflecteur installé au sommet du cap. Ainsi, il pouvait dire qu'il était à la distance d'horizon du point haut du cap Canaille.

A ce signal, il lançait son loch et notait aussi souvent que possible l'heure sur la clepsydre et relevait la vitesse. Arrivé aux falaises, on calculait la vitesse moyenne et le temps total et, de là, bien sûr, on avait la distance à l'horizon tant espérée.

Plusieurs fois, on revit le point brillant signalé par les enfants depuis la vedette.

Plusieurs essais montrèrent que la procédure n'était pas si mauvaise, avec des résultats variant au plus de 200 mètres, souffrant la comparaison avec les relevés tautologiques GPS. La difficulté venait du fait que le bateau qui voguait vers l'est n'était pas souvent sur la ligne droite qui le reliait au sommet du cap. Alors Diogène pensa à une parabole légèrement convexe qui étalerait la réflexion du soleil et donc le cône de perception de celle-ci.

La vitesse moyenne était de 6,34 noeuds, soit 11,74 km/h. Le bateau avait mis 5h25 pour aller de la distance à l'horizon du point haut jusqu'à la falaise, soit 64 km. Pour aller de la distance à l'horizon à la falaise, il avait mis 3h20, soit 38,300 km.

### **Le dernier rayon qui monte**

Il fallait encore mesurer le temps qui s'écoule entre l'instant du dernier rayon en bas du cap et l'instant du dernier rayon 350 mètres plus haut. Au QG, on se gratta la tête :

Un coup de sifflet, avec le bruit du ressac, cela ne s'entendrait pas forcément. Un signal optique obligerait à se pencher attentivement trop longtemps au bord de la falaise. Du téléphone ou d'une radio onde courte, il n'en était pas question.

Gravetou proposa de dévider un fil de pêche sur toute la hauteur. A l'instant de la disparition, l'observateur d'en bas n'aurait qu'à tirer sur le fil qui, en haut déclencherait une sonnette et actionnerait la clepsydre.

Là, les choses se compliquèrent, parce que Diogène savait que le bas de falaise était inaccessible, sauf en bateau.

Fallait-il qu'il abandonnent le cap Canaille pour chercher quelques lieux plus pratiques ? Gravetou remarqua que la mesure de l'horizon à 10m de hauteur devait être très imprécise et qu'il ne serait pas plus pénalisant d'être un peu plus haut. D'autre part, il n'était pas nécessaire que le point haut et le point bas soient strictement à la verticale l'un de l'autre. Même un kilomètre ou deux, à droite ou à gauche, pourvu qu'il ne soient pas trop décalés sur l'axe est-ouest, ne devrait pas fondamentalement entacher la précision générale.

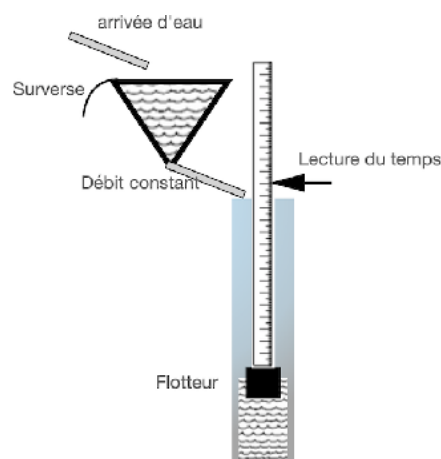
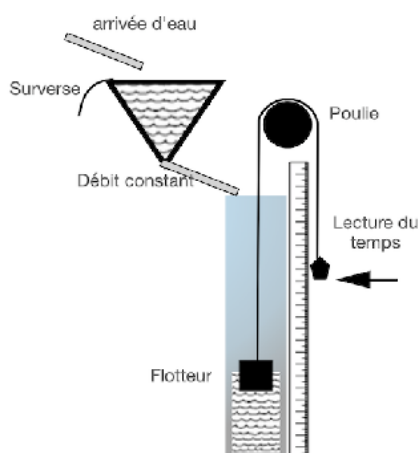
Finalement, il optèrent pour le plus pratique : le point haut au Sémaphore du Bec de l'Aigle, à 320 mètres d'altitude et le point bas la Chapelle ND de la Garde, pas la Bonne Mère de Marseille, mais celle de la Ciotat à 115 mètres d'altitude, à 1700 mètres au sud-est, pratiques d'accès. Il suffit de monter sur la colline au-dessus de la Chapelle pour avoir une vision directe sur le Sémaphore.

Avant de se lancer dans l'opération, Gravetou proposa de voir le problème avec des moyens modernes. Les ordiphones d'aujourd'hui connaissent l'heure avec une grande précision. Ils peuvent l'afficher sur l'écran d'une séquence vidéo. Pour s'en persuader, Diogène et Gravetout se mirent à filmer le coucher du soleil chacun avec leur téléphone. Le temps incrusté sur le film s'affichait par dixième de seconde. Chacun, revoyant son film, se mit sur pause au moment exact du dernier rayon. L'heure était bien la même, au dixième de seconde près. Ô surprise, il s'agissait du Rayon vert. Quel beau présage ! L'après-midi suivante, Gravetou était à la Chapelle et Diogène était au Sémaphore. Ils déclenchèrent le film au même moment, quand le soleil était à moitié couché et l'arrêtèrent deux minute après sa complète disparition. Cette fois, la différence entre les deux instants était de 75,5 secondes.

Il fallait donc que la clepsydre servant de chronomètre entre les deux disparitions mesure la durée jusqu'à 2 minutes. Une grande éprouvette en verre graduée de 60 cm pouvait suffire, mais la technologie de la Grèce

antique n'aurait pas pu produire ce verre.

Diogène se résigna à un pot cylindrique droit contenant le flotteur soutenu par un fil à un contrepoids se déplaçant le long d'une règle graduée. Un tuyau avec un robinet assurait le remplissage de l'éprouvette en 2 minutes, à partir d'un entonnoir muni d'une surverse pour qu'il soit toujours plein et fournisse





une pression constante à l'entrée du robinet.

Parallèlement, le QG proposa aux écoles un concours de la clepsydre la plus précise et la plus robuste pour la mesure d'une durée de 2 minutes.

On installa la clepsydre au Sémaphore et on donna au guetteur en chef de la Chapelle un grand drapeau blanc qu'il lèverait au dernier rayon.

Ce signal vu par le guetteur en chef du Sémaphore déclencherait la clepsydre, qui par ailleurs étaient filmée avec en arrière plan le site de la Chapelle.

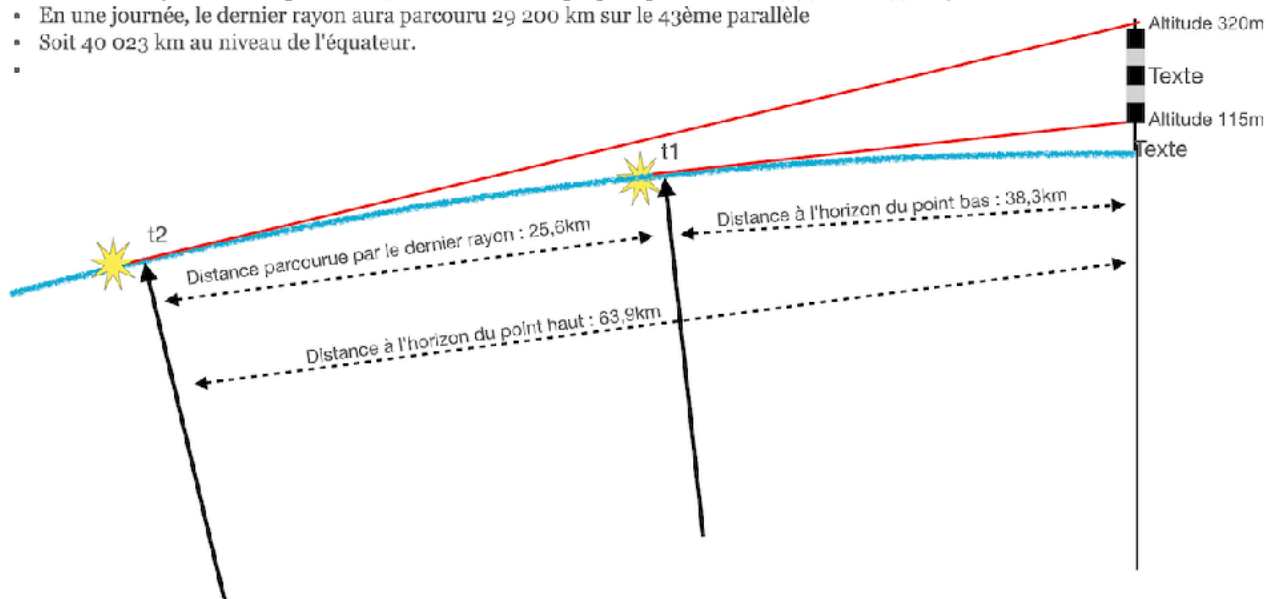
Par sécurité, il fut envisagé de refaire l'opération au moins cinq soirs, si possible successifs, sous réserve du beau temps. Fin août, la Provence n'en est pas avare !

Le lundi, on mesura 73,5 secondes, le mardi, 74,0 secondes, et l'on aperçut le Rayon vert depuis la Chapelle, mais non depuis le Sémaphore, le mercredi, une forte brume cacha l'horizon. Le jeudi, on mesura 75,5 secondes, contre 76,1 secondes le vendredi et 75,2 secondes le lundi, parce que le WE fut pluvieux. Ce dernier jour, on aperçu aussi la Fata Morgana d'un cargo flottant à l'envers au-dessus de l'horizon. Quant au Rayon vert, on s'en retourna bredouille. L'idée avait été lumineuse mais on ne saurait mesurer la Terre avec cet elfe facétieux qui apparaît lorsqu'on ne l'attend pas et qui n'est jamais au bon rendez-vous.

Au QG, on se félicita que les mesures les mesures soient bien groupées, ce qui permettait de dire que le procédé était fiable. Il fallait donc en moyenne 74,9 secondes au soleil pour monter son dernier rayon de 115 m d'altitude à 320 m, il en fallait autant pour qu'il passe la distance à l'horizon de 38,3 km à 63,9 km, soit 25,6 km en 74,9 secondes, sur le 43ème parallèle. Ramenée à l'unité, la vitesse était donc de 338 mètres par seconde.

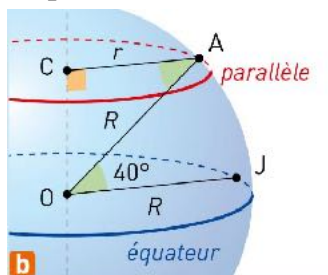
#### Estimation de la circonférence de la Terre

- À l'instant  $t_1$ , le soleil disparaît à l'horizon d'un observateur placé à 115 m au dessus du niveau de la mer,
- À l'instant  $t_2$ , le soleil disparaît à l'horizon d'un observateur situé à 320 m d'altitude,
- Le dernier rayon de soleil parcourt 25,6 km dans le temps qui sépare  $t_1$  de  $t_2$  : 74,9 s, soit 338 m/s
- En une journée, le dernier rayon aura parcouru 29 200 km sur le 43ème parallèle
- Soit 40 023 km au niveau de l'équateur.



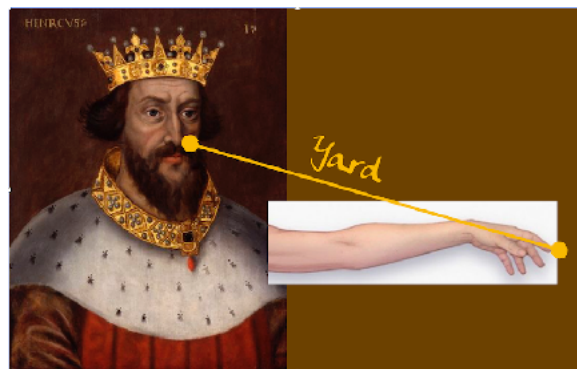
Comme il y a 24 heures de 3600 secondes dans une journée, le dernier rayon du soleil parcourait 29 500 km sur le 42ème parallèle.

Connaissant la circonférence d'un parallèle, il est facile d'en déduire la circonférence de l'équateur.



$$C_{\text{Equateur}} = C_{43^\circ} / \cos(43^\circ) = 29500 / \cos(0,74\text{rad}) = 40\,023 \text{ km}$$

*Souvenons-nous que les savants de la Révolution ont voulu satisfaire les cahiers de doléances voulus par Louis XVI quant un étalon de mesure qui soit universel et basé sur un phénomène naturel et non pas comme l'anglais Henri II qui a défini le yard comme la distance entre son nez et le bout de son doigt?*



*En 1791, Borda, Condorcet, Lagrange et Monge furent commis à proposer la base du mètre. Le pendule battant la seconde ne fut pas jugé suffisamment précis. Ils choisirent la 10 millionième partie du quart du méridien terrestre, ce qui, par définition, fixa la circonférence terrestre à 40 000 km.*

*Ce résultat montrait que l'on pouvait mesurer la circonférence de la Terre en utilisant les seuls moyens connus dans la Grèce antique et donc, qu'il n'était pas impossible que dès l'antiquité, à Athènes ou à Alexandrie, nos anciens aient mesuré une Terre ronde, alors que pour beaucoup elle devait être plate.*

Diogène avoua quand même que la procédure avait été grandement facilitée par les connaissances et les moyens modernes, ne serait-ce que d'échapper au fouillis des unités de mesure de longueur et de temps utilisées à l'époque de Pythagore. Comme on savait d'avance les résultats à obtenir, il était plus facile de construire une procédure efficace et précise. Au travers de toutes les imprécisions, l'équipe avait quand même eu la chance que les erreurs se compensent et construisent l'honorable résultat.

Au QG, on sabra le champagne avec le sabre que Gravetou avait conservé de son passage à Polytechnique. Pour les jeunes, ce fut du Champoumi. Le sirtaki se dansa jusque tard dans la soirée sur la terrasse de l'Eden. Le Consul de Grèce, dont le yacht coulait ses hivers paisibles au Port de la Tasse, s'était invité. Les Ciotadins de passage

furent conviés à célébrer la nouvelle Grèce antique qui renvoyait Christophe Colomb à ses Indes indues et laissait les Marseillais entrevoir le Canigou depuis la colline d'Allauch. Entre deux danses, les conversations allaient bon train sur tous les sujets liés à la performance. Clepsydre, Rayon vert, Chapelle de ND de la Garde, histoire du Sémaphore, Anaxymandre, Ptolémée, les falaises... Quelqu'un raconta le point brillant sous le Sémaphore et chacun alla de son hypothèse, y compris les extra-terrestres, ou une batterie allemande oubliée. Un grand rouquin barbu éclata de rire. "La prochaine fois, je vous rapporterai quelque chose !". Il en avait trop dit ou pas assez. Alors on le supplia de s'expliquer. Il parla de la géologie des falaises et comme dans les Alpes, il y avait parfois des formations cristallines qui pouvaient affleurer. Ici, c'était un amas de quartz d'environ 50 cm de large qu'il se souvenait avoir vu en grim pant sous le sémaphore. Et alors ! Il était fort possible que le soleil se reflète dans ce bloc de cristaux et que cela puisse se voir depuis le bateau qui revenait droit sur la falaise. C'était le même phénomène que celui de " l'Oeil de verre. " de la Calanque de l'Oeil de verre, que les pêcheurs marseillais voyaient briller quand ils rentraient au Vieux Port en fin de journée. Légende urbaine rigolait-on - L'Oeil de verre, le véritable Oeil de verre serait cet oeil en céramique incrusté par un artiste dans la paroi. Et pourtant, sur le plateau des Calanques, il y avait aussi un autre amas de cristaux de quartz qui pouvait laisser y croire. Dans la presse, le cap Canaille pourrait prendre une nouvelle dimension mythique. Le pigiste local parla des petites canailles du cap Canaille qui avaient participé à l'aventure et rappela la grande aventure de la [mesure de la Terre](http://ertia2.free.fr/Niveau2/Blogrinages/Blogrinages%20ici%20et%20la/La%20terre%20gigote.pdf)<sup>6</sup>.



---

<sup>6</sup> [http://ertia2.free.fr/Niveau2/Blogrinages/Blogrinages ici et la/La terre gigote.pdf](http://ertia2.free.fr/Niveau2/Blogrinages/Blogrinages%20ici%20et%20la/La%20terre%20gigote.pdf)

## 2. Fiat lux !... en vitesse !

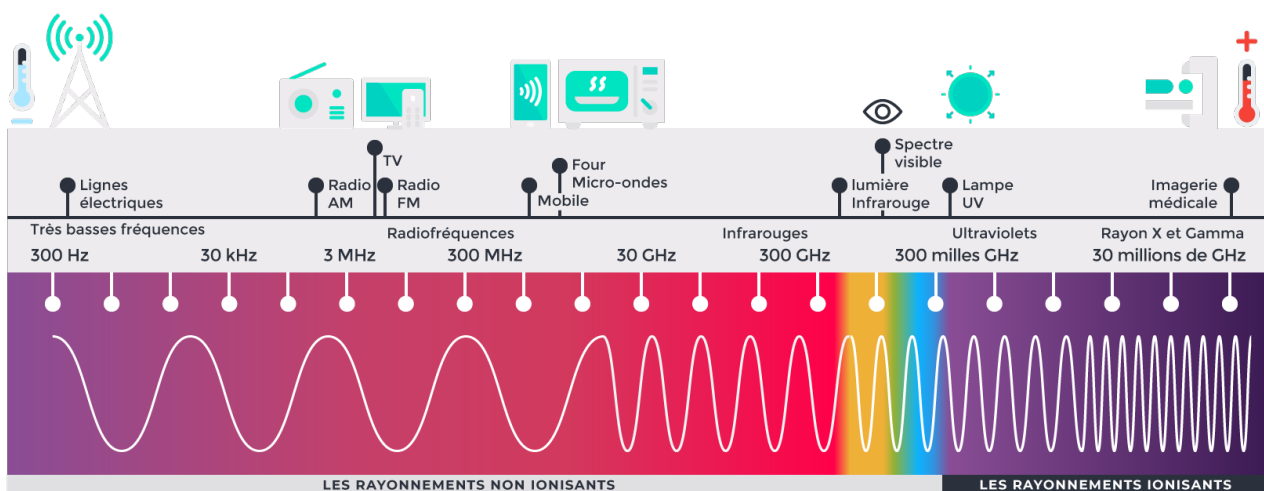
*De l'ombre jaillit la lumière !*

*De l'ombre jaillit le temps !*

D'où l'idée de ce cadran solaire :



Sans la lumière, que serions-nous ? La lumière existe donc, la science nous dit comment elle surgit, elle ne nous dit pas pourquoi. Ergo, elle ne reste qu'hypothèses.



Cette image trouvée sur [Life Maxx](http://LifeMaxx) montre que la lumière est une radiation électromagnétique parmi d'autres, à la limite entre les rayonnements ionisants et non-ionisants.

Pour Aristote la lumière est instantanée - Aristote est un grand observateur mais il est « anthropocentrique ». La vitesse de la lumière doit être infinie puisque l'on voit des objets distants, telles les étoiles, dès qu'on ouvre les yeux (Héron d'Alexandrie).

Pour Platon, qui sait que les choses ne s'arrêtent pas à ses propres perceptions (mythe de la caverne) et que la destinée de l'Homme est la finalité de la Nature (et non pas l'inverse), la lumière est



constituée de traînées de tétraèdres imperceptibles pour les yeux et se déplaçant à grande vitesse. (Timée).

Il y a ceux, encore nombreux, qui pensent que la vision est produite par des rayons lumineux émanant du foyer de l'oeil et dirigés sur l'objet et ceux qui, comme Alhazen (965-1039), pensent que ce sont les objets qui émettent la lumière.

Platon innove puissamment sur le plan philosophique et métaphysique, en concevant le monde et tous les êtres vivants qui le composent comme une création qui n'avait rien de nécessaire, comme un acte de pure générosité.

La lumière n'est pas là parce que nous avons des yeux, mais sans la lumière, nous aurions beaucoup de mal à exister. Certains animaux arrivent à vivre dans un noir perpétuel, mais leurs chances d'évoluer sont très faibles. Nous avons donc évolué vers la lumière, mais tous les animaux ne voient pas de la même manière. Les yeux de certains animaux sont beaucoup plus performants que les nôtres et nos sens sont aussi limités. Songeons à l'odorat des chiens, à l'ouïe des serpents. Mais avec l'ensemble de nos sens, associé à notre intelligence, nous avons hérité d'une polyvalence incroyable. Nous pouvons « voir » des choses que nous ne voyons pas !

Les anciens, avec Empédocle (-490 à -430) ont eu l'intuition que la vitesse de la lumière n'est pas infinie. Bacon (1614), qui semble reprendre les idées d'Empédocle, écrit dans son ouvrage *Perspectiva* :

*Si ergo lucis multiplicatio est in instanti et non in tempore erit instans sine tempore quia tempus non est sine motu. Sed impossibile est instans esse sine tempore sicut nec punctum sine linea*

« Si donc la propagation de la lumière se faisait instantanément et non temporellement, il y aurait instant sans temps, parce que le temps n'existe pas sans mouvement. Mais l'instant sans le temps est aussi impossible que le point sans la ligne »

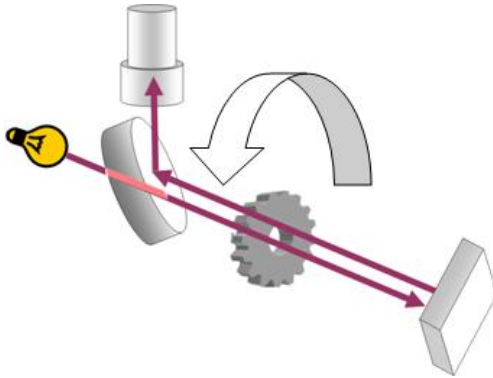
Encore faut-il démontrer que cette vitesse n'est pas infinie. Dire que nous avons mesuré cette vitesse ne suffit pas expliquer la logique de cette finitude. Dire que cela cadre avec la relativité restreinte qui découle d'un postulat ne démontre pas le postulat.

Galilée a essayé de montrer la finitude de la vitesse de la lumière avec deux lanternes placées à quelques kilomètres l'une de l'autre, mais la lumière allait visiblement trop vite pour être ainsi piégée. La vitesse de la lumière ne peut être lente à l'échelle humaine. Par exemple, avec une vitesse lente de la lumière, la nuit paraîtrait obscure faute de recevoir assez vite la lumière des étoiles.

Cassini (1668), grand observateur mais mauvais théoricien (géocentrique), publie des tables d'événements astronomiques (pour améliorer les horloges), par exemple, les instants d'éclipses des satellites de Jupiter. C'est Roemer (1676) qui en observant la variation de durée de l'éclipse de Io selon la position de la Terre sur son orbite en déduira une première mesure de la vitesse de la lumière.

*« Monsieur Romer expliqua très ingénieusement une de ces inégalitez qu'il avoit observées pendant quelques années dans le premier satellite, par le mouvement successif de la lumière, qui demande plus de temps à venir de Jupiter à la Terre lorsqu'il en est plus éloigné, que quand il en est au plus près; mais il n'examina pas si cette*

*hypothèse s'accommodait aux autres Satellites qui demanderoient la même inégalité de temps » ( Mémoires de l'académie royale des sciences, tome VIII, page 317, Les hypothèses et les tables des satellites de Jupiter, réformées sur de nouvelles observations, la citation est page 391 )*



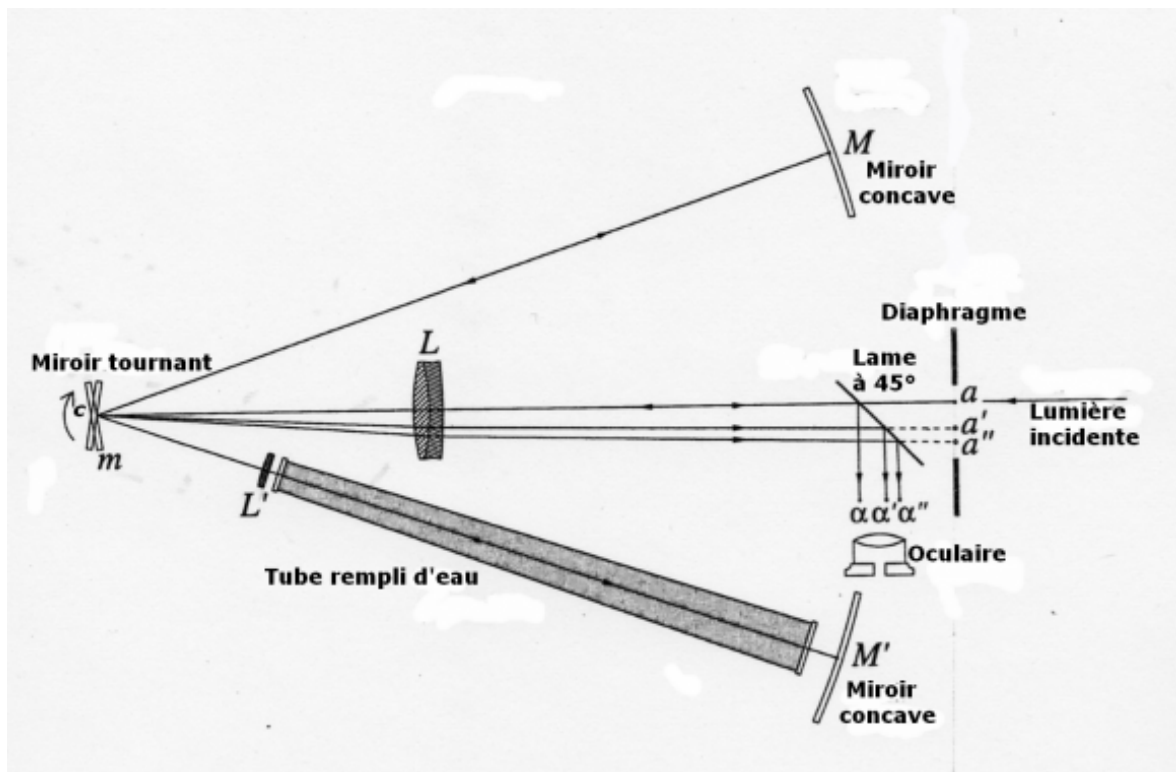
**Hippolyte Fizeau** reprend l'expérience de Galilée avec un ingénieux dispositif compatible avec la vitesse de la lumière.

Il émet un faisceau lumineux de Suresnes à Montmartre (8633 m) haché par une roue dentée de 720 dents. Le signal réfléchi montre un décalage avec le signal émit. A 12,6 tours par seconde, le décalage est synchronisé sur 2 dents successives. Il en déduit que la vitesse de la lumière est de 315 300 km/s.

Fermat (1657) expliquait que la lumière choisit le moindre parcours. Quand elle entre dans l'eau, elle va vers le moindre parcours. Cela ne peut s'expliquer que si la vitesse de la lumière n'est pas infinie.

James Bradley (1725) explique que l'**aberration de la lumière** est un phénomène optique qui se traduit par le fait que la direction apparente d'une source lumineuse dépend de la vitesse de celui qui l'observe (plus exactement de la composante de cette vitesse perpendiculaire à la direction d'observation), de la même façon que pour un passager d'un véhicule qui se déplace par exemple à l'horizontale, la pluie semble tomber depuis une direction située vers l'avant, et non selon la verticale. (une histoire de vent relatif pour les marins).

Léon Foucault fait tourner un miroir à 500 tr/s pour voir le décalage du double reflet d'un faisceau lumineux, dans l'air et dans l'eau. Il vérifie ainsi que la lumière va moins vite dans un milieu plus dense.



## Illustrons le problème

Deux ampoules éloignées de plusieurs kilomètres et reliées à un interrupteur situé au milieu s'allument simultanément. Cependant, un observateur placé au niveau de l'ampoule de droite verra la lumière de l'ampoule de gauche plus tard parce que la vitesse de la lumière est n'est pas infinie.

- Si la vitesse de la lumière était infinie, il devrait voir les ampoules s'allumer au même moment, ce qui, à notre échelle humaine, peut sembler le cas, mais à l'échelle cosmique ne peut être le cas. Il en va de la cohérence de l'Univers : **tous les photons seraient alors partout en même temps et l'on pourrait avoir une information sur un évènement avant qu'il se soit produit !**
- Si la vitesse de la lumière avait été trop lente, les décalages entre action lumineuse et réaction physique n'auraient pas permis à l'Univers de se développer tel qu'il est en réalité.

On ne saurait envisager une succession d'essais/erreurs qui auraient conduit à la vitesse  $c$  comme seule possibilité. Il y a donc une raison « mathématique » qui reste à trouver : la vitesse maximale à laquelle une particule de masse nulle peut se mouvoir.

Pour l'instant, ce sont uniquement des résultats d'expériences qui montrent que la vitesse de la lumière est de  $\approx 300\,000$  km/s, très vite pour notre monde planétaire, très lentement à l'échelle de l'Univers. Einstein (1905) postule qu'un photon circule à cette vitesse là quelle que soit sa trajectoire dans l'univers et quelle est indépendante du mouvement de sa source et du mouvement des observateurs.

Notons cependant que certains phénomènes peuvent aller plus vite que la lumière :

- Ainsi, une ombre portée au très lointain peut y passer « à toute vitesse ». Cela rappelle la métaphore d'Archimède qui disait « Donnez moi un levier et un point d'appui et je soulèverai la Terre »<sup>7</sup>.
- Ainsi, l'intersection de deux droites de longueur infinie, proches et presque parallèles, peut se déplacer à une vitesse infinie.

Lorsqu'une [goutte d'eau](#) tombe sur un liquide au repos, elle génère une succession de vagues circulaires centrifuges. Le sommet de la vague se déplace horizontalement tandis que le liquide se soulève verticalement. Il n'y a pas de déplacement horizontal de matière. Quand on jette un caillou dans le lac, il crée des vagues (des ondes). De la rive, je vois la vague d'eau se propager avec une vitesse constante de quelques centimètres par seconde. Si je la regarde en passant au dessus en avion, la vague se déplacera toujours à cette vitesse constante. Transposé à la lumière, le photon est sur une de ces vagues, il se déplace avec elle. Il est « immatériel »

---

<sup>7</sup> Pour l'anecdote, Jacques Ozanam (1640-1717) traduisit la métaphore en imaginant un moufle à poulies multiples, qui permettrait à un homme de déplacer la Terre d'un pouce en 3 653 745 175 808 siècles !

et pourtant il existe. Dès qu'il est émis, il voyage à 300 000 km/s. S'il est émis par un mobile qui va très vite, la vitesse du mobile ne s'additionne pas.

*À noter : en mécanique on peut avoir des ondes de cisaillement (vibrations latérales) et des ondes de compression (vibrations longitudinales).*

*Exemples :*

- *Si vous frappez un barreau de verre, vous n'aurez pas le même son que si vous passez un doigt mouillé dessus, créant ainsi une onde sonore plus aigüe.*
- *Si vous secouez l'extrémité d'un câble horizontalement, vous créez une onde polarisée horizontalement ; si vous la secouez verticalement, l'onde sera polarisée verticalement ; si vous la secouez circulairement, elle sera polarisée circulairement.*
- *Si le câble traverse une fente verticale, vous ne verrez plus que la composante verticale de cette onde circulaire.*
- *Le son dans un gaz ou un solide est une onde de compression. L'onde n'est pas polarisée*

Si l'on constate que la vitesse de la lumière est une vitesse maximale et que la masse d'un corps est infinie à cette vitesse maximale, on ne dit pas pourquoi cette limitation existe et pourquoi sa valeur est une constante (postulat d'Einstein), à quel concept il faut se rattacher pour comprendre ce phénomène contre intuitif :

- Si je vois quelqu'un passer vite devant moi, son horloge ralentit. Plus sa vitesse est grande plus son horloge est lente par rapport à la mienne.
- Si ce quelqu'un me regarde, alors je passe vite devant lui et il voit mon horloge ralentir
- La vitesse à laquelle se déplace la lumière dans le vide est à la fois indépendante de la vitesse de la source et du référentiel inertiel de l'observateur.
- Si je pouvais regarder un photon se déplacer et mesurer la vitesse de son déplacement par rapport à moi, sa vitesse serait  $c$ .

*Imaginons deux observateurs qui veulent régler leurs montres par des signaux optiques ; ils échangent des signaux, mais comme ils savent que la transmission de la lumière n'est pas instantanée, ils prennent soin de les croiser 83 [...] les montres marquent la même heure au même instant physique, mais à une condition, c'est que les deux stations soient fixes. Dans le cas contraire, la durée de transmission ne sera pas la même dans les deux sens, puisque la station A, par exemple, marche au-devant de la perturbation optique émanée de B, tandis que la station B fuit devant la perturbation émanée de A. Les montres réglées de la sorte ne marqueront donc pas le temps vrai, elles marqueront ce qu'on peut appeler le temps local, de sorte que l'une d'elles retardera sur l'autre.*

*(Comment le jeune et ambitieux Einstein s'est approprié la Relativité restreinte de Poincaré, Jean Hladik, p86)*

**Question subsidiaire :** Imaginons un énorme astéroïde frôlant la lune. La variation de la gravitation terrestre serait-elle infiniment (absolument) synchrone ou décalée dans le temps nécessaire à la propagation de la lumière de la lune à la terre ? Autrement dit : quelle est la vitesse des ondes gravitationnelles ?



### Connaissance subsidiaire : qu'est-ce qu'un kilogramme ?

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01245089/file/these-thomas-2015-balance-du-watt-pour-TEL.pdf>

Les étalons physiques officiels du kilogramme, copies de l'étalon prototype du BIPM, 90% de platine et 10% d'iridium, cube de 39mm de côté ont un poids qui croît en moyenne de 3 microgrammes/an (sur 100 ans). Ces contrôles se font après un protocole de nettoyage qui nécessite le regroupement des étalons pendant au moins 2 ans (tous les 50 ans).

La précision du kg étalon impute la mole, le kelvin, le candela et l'ampère (et toutes données électriques associées).

La science d'aujourd'hui nécessite une nouvelle définition, à savoir : relier une masse macroscopique à des constantes fondamentales, indépendamment de tout artefact matériel. La science implique aujourd'hui dans la définition du kilogramme la constante de Planck, la vitesse de la lumière et la fréquence de la transition entre deux niveaux de la structure du césium-133.

Un kilogramme est constitué d'un nombre donné d'atomes (constante d'Avogadro, rapport entre le volume molaire et le volume atomique), mais la constante de Planck (mécanique quantique : énergie d'un photon multiplié par sa fréquence)) est plus signifiante.

Temps de Planck :  $10^{-43}$  secondes

Longueur de Planck :  $10^{-33}$  centimètre

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  joules.secondes

En 1900, Max Planck a dérivé empiriquement une formule pour le spectre observé. Il a supposé qu'un hypothétique oscillateur chargé électriquement dans une cavité contenant le rayonnement du corps noir ne pouvait changer son énergie que dans un incrément minimal,  $E$ , qui était proportionnel à la fréquence de son onde électromagnétique associée. D'où l'idée de la discrétisation quantique. Planck a donc proposé sa constante, de façon empirique, à partir des données expérimentales sur le rayonnement du corps noir (avec une précision de 1%).

### 3. La terre gigote !

Vue de notre chaise longue - sauf tremblement de terre - nous ne sommes guère secoués. Nous ne percevons les mouvements de notre planète qu'en regardant le ciel.

Notre subjectivité nous a fait dire que le soleil tournait autour de la terre, mais à force de sonder le ciel, nous avons compris que nous étions sur un des bras d'une galaxie parmi tant d'autres dans l'univers.

Notre galaxie tourne, notre bras tourne avec, notre soleil tourne avec, ses planètes tournent avec...

La terre tourne sur elle-même, tourne autour du soleil, tourne dans la galaxie, tourne dans l'univers.

*Et nous sur notre chaise-longue, sous les nuages  
qui nous cachent le soleil,  
nous gigotons dans l'univers  
sans nous en apercevoir !*

*Et nous sur notre chaise-longue, sous les nuages  
qui nous cachent le soleil,  
nous gigotons dans l'univers  
sans nous en apercevoir !*

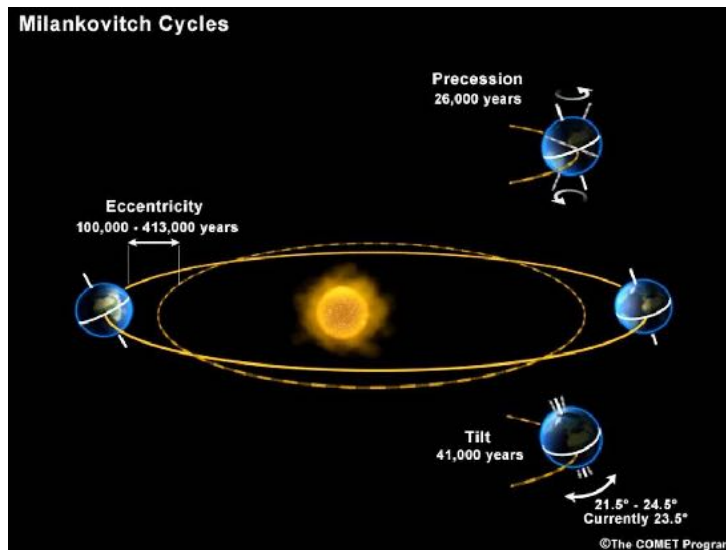
S'il fallait démontrer, sans voir le ciel, que la terre tourne :

*Si la terre était une bille seule au milieu d'un univers infini et totalement vide, elle serait sans référentiel. Sans référentiel, on ne saurait dire si elle tourne sur elle-même. Et si elle tourne, on ne saurait repérer son axe de rotation.*

*Le moyen de le savoir serait de tirer un obus verticalement. La gravité le fera retomber. Si la terre ne tourne pas, l'obus retombera exactement dans le fût du canon. Si la terre tourne, l'effet Coriolis le fera retomber à côté. Combien faudra-t'il de canons pour déterminer la vitesse de rotation et l'axe de rotation de la terre ? Est-il nécessaire de savoir que la terre est une bille de 40 000 km de circonférence et que sa masse correspond à l'accélération de la gravité de 9,81 m/s/s ?*

Heureusement, il y a le ciel, que les astrophysiciens scrutent de plus en plus loin. Ce n'est pas qu'une histoire d'ensoleillement diurne et saisonnier !

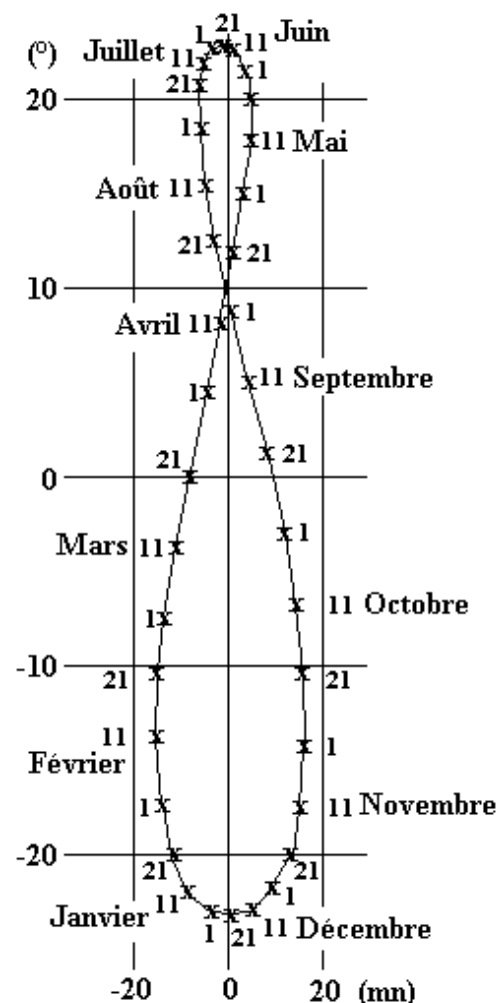
En résumé :



- La distance terre soleil varie annuellement entre sa périhélie et son aphélie, respectivement de 147,1 millions de km au 3 janvier et 152,1 millions de km au 6 juillet. Le rayonnement reçu par la terre varie de 6% (entre 1408 et 1326 W/m<sup>2</sup>). L'ellipse de l'orbite terrestre varie sur de longues périodes. Par exemple, l'énergie solaire reçue variait de 16% dans l'année voici 128 000 ans.
  - L'excentricité de l'orbite terrestre varie sous l'influence des autres planètes. (Elle sera nulle dans 24 000 ans) et la droite qui relie aphélie et périhélie bouge aussi sous l'influence des autres planètes (cycle d'environ 20 000 ans. Actuellement la terre passe au plus près du soleil le 4 janvier, augmentant le rayonnement solaire lié à la saison de 6%.
- La vitesse de la terre sur son orbite varie entre 30,287 et 29,291 km/h, avec pour conséquence une variation du midi solaire entre -16 et + 14 minutes (équation du temps, qui tient aussi compte de l'obliquité de l'axe de rotation de la terre)
- La rotation de la terre ne se fait pas autour de son centre, mais autour du centre de gravité Terre-lune (à 1710 km sous la surface de la terre), ce qui stabilise l'axe Nord-Sud. Quant à expliquer pourquoi la rotation de la lune est synchrone de sa rotation autour de la terre, qui fait qu'elle nous cache toujours son dos... ?!. Il existe une théorie complexe où les marées auraient un rôle à jouer. Une autre hypothèse est que la densité de la lune n'est pas homogène....
- La précession des équinoxes est due au renflement équatorial de la terre : l'axe nord-sud épouse un cône, actuellement pointé sur l'étoile polaire, avec une inclinaison de 23°26'21" sur l'écliptique (plan de l'orbite terrestre autour du soleil - là où se passe les éclipses), mais il fait son cône en 25780 ans (horloge de Strasbourg)
- La direction du soleil à l'équinoxe de printemps est appelée « point vernal » ou point « gamma », à l'origine de notre système de coordonnées célestes alpha et delta (égaux à 0).
- Le plan de notre équateur et le plan de l'écliptique varient entre +23° et -23° selon une sinusoïde annuelle qui se traduira lentement selon un cycle de 25 780 ans. Cette obliquité se balance de 2° environ selon un cycle de plusieurs dizaines de milliers d'années (équation du temps).
- Sur le cône de précession s'ajoute la nutation, mouvement elliptique faible lié à la rétrogradation des noeuds de l'orbite lunaire, selon un cycle de 18,7 ans (19°/an).
- Le centre de gravité du système solaire bouge selon la position des 4 planètes géantes gazeuses. Le soleil se déplace en hélice vers la constellation d'Hercule (apex solaire).
- Notre galaxie tourne sur elle-même...

## 4. Analemme, vous avez dit analemme!

Or donc ! Si, étant à Angoulême - à peu près sur le méridien de Greenwich - je marque l'emplacement du bout d'un gnomon tous les jours à 12h00 UTC, je tracerai non pas une droite "Sud-Nord", mais l'analemme de l'équation du temps, qui montre que le sud n'est pas à midi pile, parce que la Terre ne tourne pas à vitesse constante autour du soleil - *pas comme dans la voiture où plus le virage est prononcé, plus on va moins vite !* - et parce que la trajectoire apparente du Soleil est vue de la Terre (écliptique) de façon changeante car l'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au rayon du Soleil - *la Terre gigote !*. Par ailleurs, la Terre gigote de façon beaucoup plus subtile : son centre de gravité de la terre est faussé par la lune, entraînant un mouvement hélicoïdal du système Terre-Lune autour de son orbite.



La lune aussi gigote par rapport à nous

Or donc ! L'horloge astronomique de Strasbourg, merveilleusement décrite par Jean-Jacques Ludwig, est équipée d'une roue faisant un tour en 25769 années pour figurer la précession des équinoxes - J.B. Schwilgué fecit en 1842 -

Un site aux explications claires :

<http://serge.bertorello.free.fr/astrophysique/mouvements/mouvements.html>

Quand à la lune, ses mouvements sont décrits sur un document de l'Université de Lyon, adapté de la Cosmographie de Danjon :

[https://cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/cdroms/docu\\_astro/mouvements/mouv\\_lune.pdf](https://cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/cdroms/docu_astro/mouvements/mouv_lune.pdf)

Emporté par son élan, le bourrelet des marées a tendance à devancer la Lune au lieu d'être parfaitement aligné sur sa trajectoire. Le satellite tire donc en permanence ces masses d'eau en arrière, freinant la totalité du globe : la Terre ralentit de deux millisecondes par siècle. Donc, tous les 200 millions d'années environ, il lui faut une heure de plus pour boucler un tour complet.

Et puis, à propos de Ptolémée, une petite histoire d'éclipse.

## 4. Analemme perso

Ptolémée a ouvert la voie (lactée :-)) à tous ceux qui aimaient à comprendre notre Univers. En 2020, cela se fait avec des moyens considérables, qui différencient le Génie de l'Imbécile.

Dans ma chambrette, ma fenêtre regarde au Sud. Exactement au sud ? Exactement face au soleil de midi ? Quel Midi ?

Non pas celui de Greenwich, ni une heure avant comme en France en hiver ou deux avant comme en France en été. Non, sur la mappemonde, ma chambrette voit le jour chaque jour 20 minutes avant qu'il n'apparaisse à Lourdes (n'est-ce pas Bernadette ?) qui, comme chacun sait, est quasi au sud de Greenwich.

Cependant, le soleil n'est jamais bien à l'heure de Greenwich. Le soleil est en retard ou en avance de lui-même selon la saison. Il s'octroie jusqu'à un quart d'heure d'avance à la fin de l'hiver et jusqu'à un quart d'heure d'avance en automne.

Les astronomes nomme ceci l'équation du temps. En scrutant le ciel, il ont compris que la terre tournait autour du soleil selon une orbite légèrement ovale : plus près du soleil, elle va plus vite que quand elle en est loin. La terre ne prend pas toujours le soleil du zénith à la même heure. Et puis la terre regarde le soleil de travers. Si vous enfiler un bâton du Pôle nord au Pôle sud, cet essieu de la Terre sera penché. Le "penchement" est presque constant.

*On appelle cela l'obliquité, que Eratosthène calcula presque exactement à  $23^\circ$  voici 2200 ans. Cela complique un peu le calcul, d'autant que ce penchement évolue lentement selon un cycle de 25 769 années environ et que l'Etoile polaire n'est pas toujours au nord. Hipparque, qui naquit peu après la mort d'Eratosthène mit le phénomène en évidence. Les Aztèques aussi semble-t-il. Ce qui nous ramène à l'histoire de l'Horloge astronomique de Schwilgué dans la cathédrale de Strasbourg.*

On pourrait ajouter que la Terre n'est pas toute seule. La Lune lui donne un balourd qui fait que sa course autour du soleil est comme le bout d'une hélice qui s'enroule autour du fil de son orbite. Mais c'est peanuts dans l'équation du temps.

Bref, le soleil entrerait dans ma chambrette, par la fenêtre que voici et qui tel un gnomon avait son ombre sur le carrelage. Alors, j'ai pensé qu'en marquant chaque jour, à la même heure, le coin inférieur du montant central de la fenêtre, je verrais comment le soleil est en retard ou en avance avec lui-même.

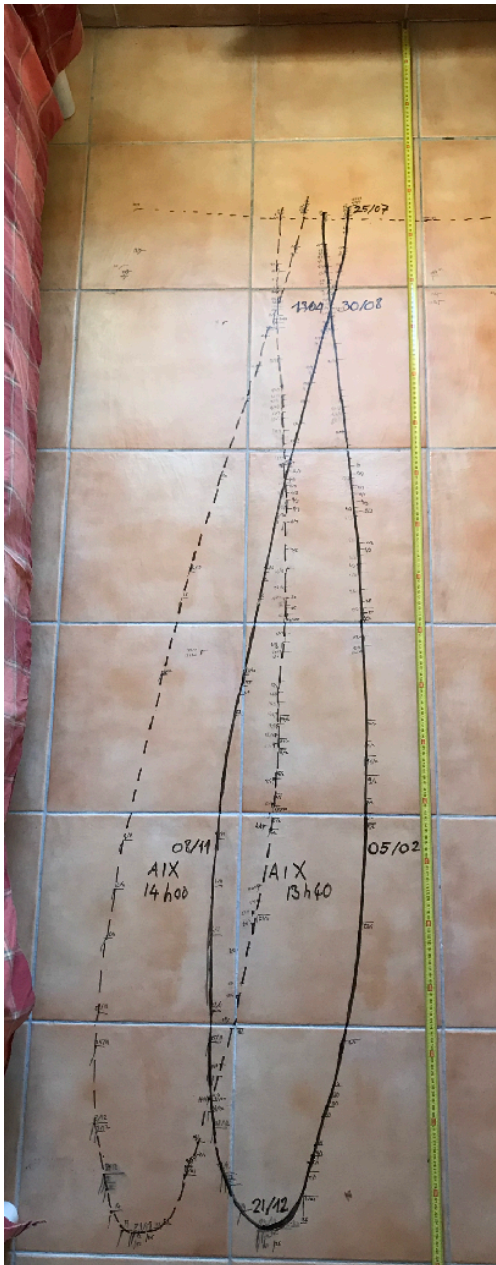
La courbe en trait pointillés relie les points marqués à 14h00, heure d'été en France.

La courbe en trait plein relie les points marqués à 13h40, heure d'été en France. Cette heure, en avance de 20 mn tient compte du décalage local par rapport à Greenwich.

La partie haute des courbes n'a pas pu être tracée

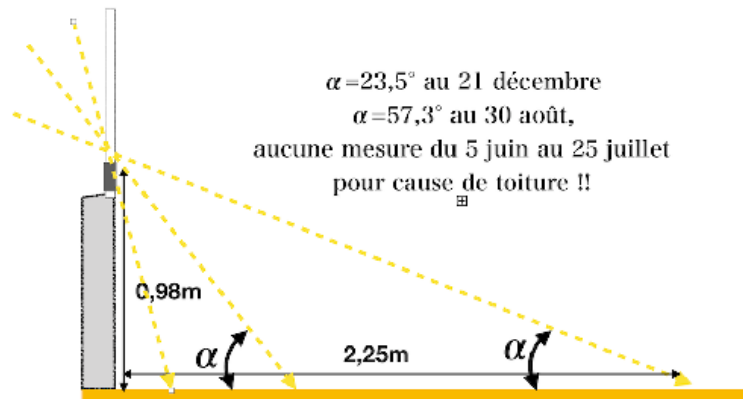




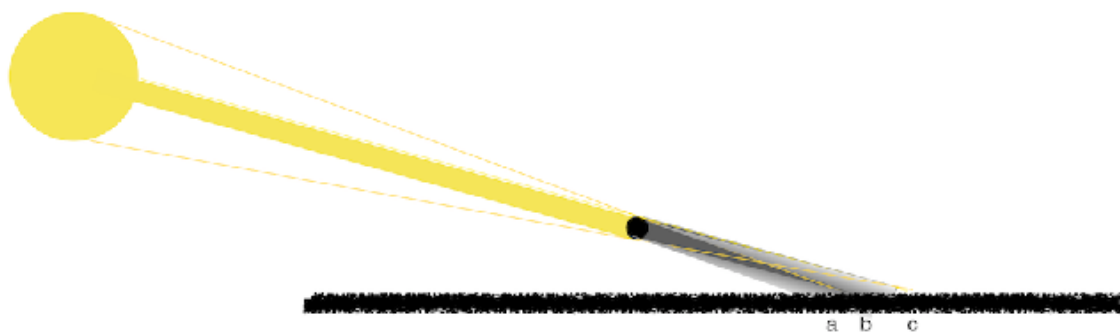


car en juin-juillet, la bordure du toit empêche le soleil trop haut dans le ciel de pénétrer dans la chambre :-(

Ce n'est pas très scientifique, mais pendant une année, j'ai joué à être Eratosthène ou Hipparque : j'étais un espace-temps où le soleil n'attend pas. Son ombre fuit !!



Il faut aussi noter que l'ombre du soleil n'est pas un point net, mais une surface diffuse sombre au centre et d'autant plus diaphane vers les bords que l'ombre s'allonge. (les bords de l'ombre reçoivent la lumière issue des bords du soleil). L'ombre est moins précise l'hiver que l'été.



Les points a et c, éclairés par la totalité du soleil, n'ont plus d'ombre  
Le point b a une ombre maximale, correspondant à un diamètre complet du soleil

## 5. Sens des aiguilles d'une montre ?

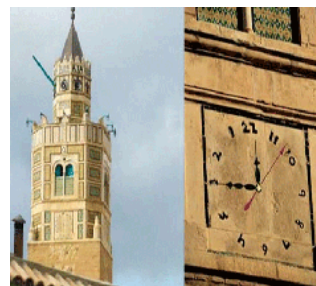
Si le **gnomon** est vertical dans l'hémisphère nord, l'ombre tournera dans le sens horaire.



Si le gnomon est fixé sur un mur (en biais vers le bas) de l'hémisphère nord, l'ombre tournera dans le sens trigonométrique, comme sur le **cadran ci-contre**.

Faisons l'hypothèse que les premiers horlogers de l'hémisphère nord auraient donc regardé leur ombre pour décider que les aiguilles tourneraient de gauche à droite, comme le sens de l'écriture chez les grecs et les romains.

Néanmoins quelques horloges ont regardé l'heure sur les murs pour décider que l'heure tournerait de droite à gauche : Les horloges de l'Hotel de Ville Juif à Prague, de la Cathédrale Santa Maria à Florence, ou du Sénat à Venise, sur 24h ou de la mosquée de Testour (Tunisie)



Et depuis 2014 au fronton du Parlement bolivien (dans l'hémisphère sud), Nos conventionnaires, qui avaient décidé de "décimaliser" le temps, ont eu aussi leurs horloges



Les Ethiopiens, qui préfèrent être de plus en plus en retard, sont fidèles au Calendrier de Jules César (remplacé par le Calendrier de Grégoire, le 15 octobre 1582). Leur année est faite de 12 mois de 30 jours et d'un mois de 5 ou 6 jours. Ils comptent les heures en base 12 : à 7h du matin, il es 1h ; à 1h, il est 7h : à 19h, il est de nouveau 1h et à 1h du matin, il est 7h. Tout cela est 3 heures avant l'heure de Greenwich.

## 6. Mesure de la Terre

### Eratosthène

D'Alexandrie à Assouan, à vol d'oiseau, il y a 830 km, pour 1100 km par la route. Eratosthène en estima 5000 stades. En gros, un stade fait 200 mètres.

En gros aussi, le zénith à Alexandrie et à Assouan sont à la même heure. Et comme Assouan est juste sur le tropique du Cancer, le soleil est à sa verticale à midi le 21 juin.

A midi, le 21 juin, le soleil pointe à  $7^\circ$  vers le sud, soit  $1/50$  de la circonférence de la Terre, qui sera donc égale 50 fois 5000 stades. En gros 50 000 km. C'était en 200 avant JC. Pas mal !

### Snellius

Snellius, vers 1615, avec de multiples triangulations a trouvé qu'il faudrait faire environ 38600 de nos kilomètres. Notre mètre n'a été fixé qu'en 1791. On comptait donc en Toises. Philippe Lebel (1285-1314) aurait mesuré 1,95m. La légende dit que sa taille a défini l'étalon de mesure de la Toise, qui fut graver dans le marbre au Grand Châtelet.

### Riccioli

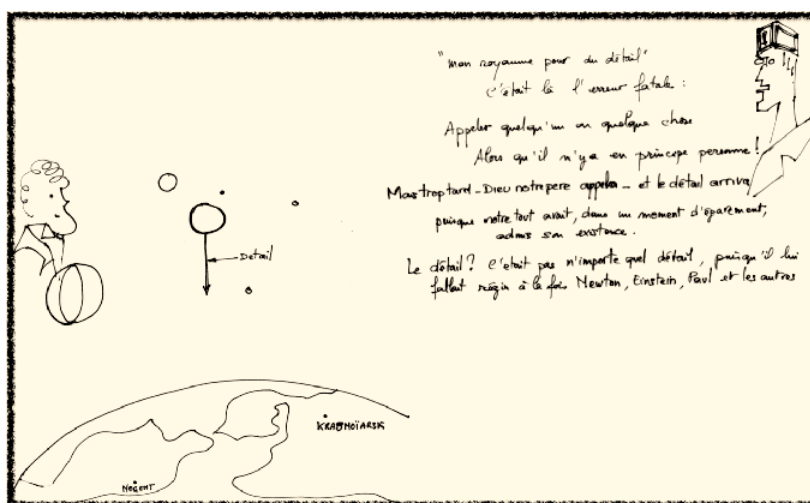
Le Père Riccioli, vers 1660, avec le même principe appliqué entre la Tour de Modène et la Montagne de Paterne, sur 122 km (un peu long pour l'erreur de réfraction), donne la Terre pour environ 44000 de nos kilomètres.

### Fernel

Fernel, en 1528, partit de Paris vers le nord et s'arrêta lorsqu'il eut parcouru un degré de latitude, puis il revint à Paris en comptant les tours de roue de son carosse. Son tour de la Terre faisait 39835 de nos kilomètres. Génialement pragmatique.

### Picard

L'abbé Jean Picard, en 1669, expose dans son livre "**Mesure de la Terre**" le détail les procédés et procédures qui lui ont permis, dès avant la Révolution, d'établir la circonférence terrestre avec une exactitude remarquable à 20 541 600 Toises de 1,949 m, soit 40 035,578 km, grâce au "Quart-de-cercle" avec lunettes d'approche, par triangulations successives entre Montlhéry et Amiens et à des observations "célestes" pour la détermination des Latitudes. Un exemple de démarche scientifique de grande rigueur.



Ertiamel, au chapitre 1 vous propose une autre méthode.

## 7. Marées - Différence d'attraction lunaire au pôles et à l'équateur

D'après : <http://www.astrosurf.com/agerard/quesako/interactions.html> :

Dans sa loi de la gravitation universelle, Newton nous indique que deux corps ponctuels exercent l'un sur l'autre des forces d'attraction directement opposées, dirigées suivant la droite qui les relie, d'intensités proportionnelles à leurs masses et inversement proportionnelles au carré de leur distance.

Sur ce schéma, la Terre (à gauche) et la Lune (à droite) sont approximativement représentées à l'échelle.



Si on considère qu'un corps non ponctuel peut être remplacé par une masse ponctuelle coïncidant avec son centre de gravité, alors on peut écrire :

$$F = G \cdot (m \cdot m') / d^2$$

$F$  est la force de gravité, exprimée en Newtons.

$G$  est la constante de gravitation universelle ; elle vaut  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$ .

$m$  est la masse, exprimée en kilogrammes.

$d$  est la distance, exprimée en mètres.

La masse de la Lune étant de  $7,3 \cdot 10^{22} \text{ kg}$  pour un rayon de 1737 km

Sauf erreur de ma part :

L'attraction lunaire  $F1$  sera de 285 Newtons à l'équateur

L'attraction lunaire  $F2$  sera de 280 Newtons aux Pôles

**La variation de l'attraction lunaire entre l'équateur et les pôles est d'environ 1,5%, ce qui apparaît faible pour l'action sur les marées.**



## 8. Astromologie

*“Il y avait longtemps qu’on avait plus entendu parler de cette curieuse chose qui veut que l’on soit curieux de ce qui se dérobe à la vue, mais que l’on soit beaucoup moins curieux de ce qui se dérobe à l’esprit. D’un côté l’attrait du mystère, et de l’autre sa pleine acceptation. Heureusement, le genre humain, dans sa sage diversité, a laissé croître les chercheurs de l’esprit, ceux qui savent ne pas croire au loto, qui ne confondent pas la coïncidence statistique et le surnaturel.”*

*Je ne sais plus l’auteur de cette citation.*

*Scientifiques ! Ne bondissez pas de votre siège et cherchez un instant à voir le cosmos avec des références “impies” :*

*Vous êtes né sous les ides de Mars. Voilà qui détermine votre caractère et votre destinée. Difficile à croire pour un physicien, qui sait très bien que l’effet gravitaire de la planète Mars est tout à fait négligeable devant l’effet gravitaire de la colline près de laquelle vous êtes né.*

*Le statisticien pour sa part, vous répondra que les diseuses de bonne aventure un brin intuitives, sont capables de prédire avec un certain succès une prochaine coïncidence. Si vous êtes jeune et bien fait, il serait tout à fait illogique que vous ne rencontriez pas dans les prochains jours un être merveilleux, d’autant plus que cette prédiction, en laquelle vous tenez à croire pour ne pas vous déjuger de votre visite à la boule de cristal, vous incite à rechercher inconsciemment l’heureux évènement. L’astrologie se rattache à la prestidigitation : il s’agit d’un “art divinatoire”*

*Pour ma part, à la statistique, je rajouterai l’astronomie. Vous êtes né au lever du jour, dans une contrée froide, au bord de l’océan, et les nuits commençaient à raccourcir. Nul doute que votre caractère sera trempé à votre découverte précoce du cycle solaire du jour et de l’année alors que si vous naissez en plein milieu d’un suffocant jour d’été, votre premier contact avec la nature sera terriblement différent et aura une certaine incidence sur votre caractère. Tous ceux qui sont nés dans les mêmes conditions astronomiques ont connus à leur naissance des conditions météorologiques proches et “auraient” ainsi des traits de caractères communs... que les “mages” auraient reconnus.*

*Mais qu’est-ce donc qu’un horoscope, sinon la définition astronomique du lieu, du jour et de l’heure de votre naissance. Comme cette définition revêt un caractère très poétique (avec Vénus, Jupiter, Orion et les autres), l’astrologue épaissit le mystère et attire les crédules. L’astrologie n’est pas une science, mais peut-être existe-il des scientifiques qui étudient les corrélations entre le caractère des hommes et les conditions météorologiques de leur naissance ?*

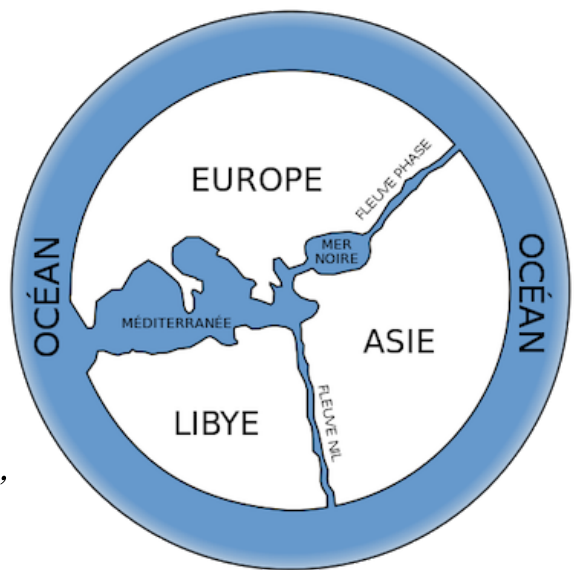


## 9. Anaximandre enseignant l'art du gnomon



*Cette pendule de table est l'oeuvre de la Manufacture de Sèvres, visible à la Cité de la Céramique. Le tableau représentant Anaximandre enseignant l'art du gnomon est une peinture d'Antoine Béranger (1785-1867), peintre sur porcelaine et graveur, longtemps attaché à la Manufacture de Sèvres.*

Anaximandre vécut au 6<sup>ème</sup> siècle avant notre ère. Cette reconstitution hypothétique de sa représentation du monde pourrait faire croire à une terre plate. Il semble qu'Anaximandre concevait la terre comme un cylindre dont nous habiterions sur la face plate, immobile au milieu du cosmos.



« Anaximandre de Milet estimait que de l'eau et de la terre réchauffées étaient sortis soit des poissons, soit des animaux tout à fait semblables aux poissons. C'est au sein de ces animaux qu'ont été formés les hommes et que les embryons ont été retenus prisonniers jusqu'à l'âge de la puberté ; alors seulement, après que ces animaux eurent éclaté, en sortirent des hommes et des femmes désormais aptes à se nourrir. »

— Sur le jour natal, IV, 7. Traduction de J. Mangeart, Paris, 1843.

Le gnomon est (du lat. *gnomon*, onis dérivé du grec ancien γνώμων « indicateur, instrument de connaissance ») est un instrument astronomique qui visualise par son ombre les déplacements du Soleil sur la voute céleste.

Il est naturel que Antoine Béranger ait représenté une scène de la Grèce antique autour de gnomon en illustration de l'heure affichée par la pendule.

*Antoine Béranger réussit une composition très intéressante pour représenter Anaximandre enseignant l'usage du gnomon :*



*Les personnages sont en costumes de la Grèce antique, himation pour les hommes, chiton court pour les jeunes.*

*Le personnage central est un jeune garçon à qui parle Anaximandre. Celui-ci désigne du doigt le soleil. Son bras est aussi au centre de la scène.*

*Le jeune garçon tient une canne bien droite dont on voit l'ombre projetée par un soleil à  $45^{\circ}$  environ au vu de l'ombre des jambes du garçon, c'est à dire*

possiblement au zénith, qui est le midi solaire à la latitude de Paris - comme l'indique la pendule - vers le mois d'avril, l'époque des jeunes feuilles de l'arbre. Il ne semble pas faire froid, puisque l'histoire se passe en Grèce. Bien qu'absent, le sujet principal du tableau est le soleil, celui qui donne l'heure.

En bas à droite du tableau, un jeune disciple note au sol la position de l'ombre du bâton. Dans quelques instants, tous les personnages pourront alors voir que l'ombre a tourné, comme le soleil à tourné.

Derrière Anaximandre se tient l'un de ses disciples qui prête l'oreille à l'enseignement du maître et le note sur une tablette.

À gauche, sous l'arbre, un homme âgé semble dire à son fils l'importance de l'enseignement. En retrait sa belle fille écoute aussi et incite son nourrisson à profiter lui aussi de la leçon, tandis que vers le milieu, un garçon et sa jeune soeur qu'il tient par l'épaule semblent avides de comprendre la leçon de choses.

En bas, à gauche, une femme au chapeau est assise. On peut comprendre que c'est la mère du jeune garçon qui tient le gnomon.

Les attitudes de tous ces personnages convergent vers l'unique sujet du tableau :

*l'art du Gnomon.*

