

THÈME : LA TERRE

Et oui, elle tourne !



Photos : P. Causeret

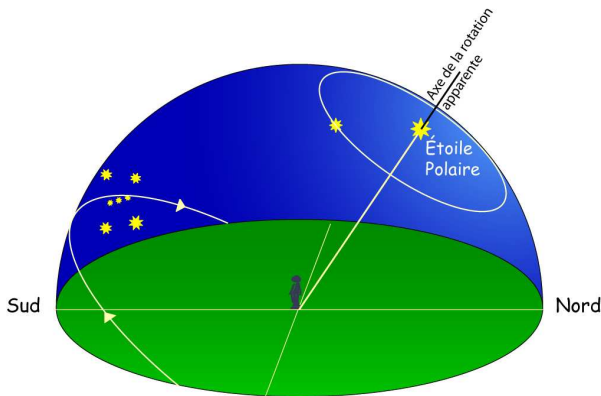
Notions de base et repères historiques

Pierre Causeret, Esbarres

Sur la rotation de la Terre

Le mouvement apparent du ciel

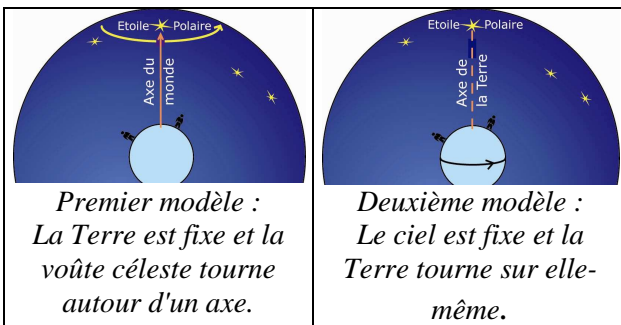
Au cours de la journée, on voit le Soleil se lever et se coucher. Au cours de la nuit, on voit les étoiles se déplacer et l'ensemble de la voûte céleste tourner autour d'un axe passant à proximité de l'étoile Polaire avec une période de 23 h 56 min. C'est ce qu'on appelle le mouvement apparent du ciel.



Le mouvement apparent des étoiles

Modèles explicatifs

A l'époque grecque, on pensait que c'était le ciel qui tournait autour de la Terre. Actuellement, on dit que c'est la Terre qui tourne sur elle-même.



Les deux modèles sont strictement équivalents. Tout dépend du repère choisi. Alors, y a-t-il un bon et un mauvais modèle ?

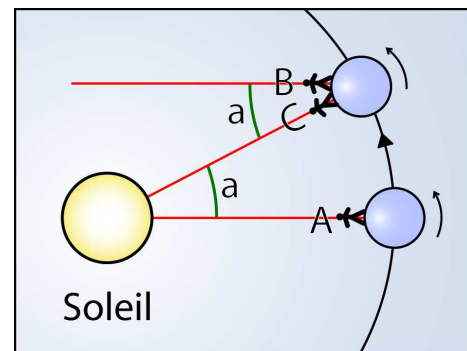
En 1902, Henri Poincaré écrivait dans *"la science et l'hypothèse"* : L'espace absolu n'a aucune existence objective. Dès lors, cette affirmation : "la Terre tourne" n'a aucun sens (...) ou plutôt ces deux propositions "la Terre tourne" et "il est plus commode de supposer que la Terre tourne" ont un seul et même sens".

Si l'on considère que la Terre est fixe, les étoiles tournent autour de la Terre à des vitesses dépassant la vitesse de la lumière. Il devient alors difficile de faire de la physique. Il est donc plus commode de dire que c'est la Terre qui tourne sur elle-même. Certains repères sont plus pratiques que d'autres si on veut que le monde soit compréhensible. Mais, en toute rigueur, il n'est pas faux de dire que le Soleil tourne autour de la Terre. C'est vrai dans un repère lié à ma maison, mon environnement, mon horizon.

Ce n'est pas un problème simple et il faut être prudent quand on en parle à nos élèves. Mais il me semble important de leur montrer qu'il y a deux modèles et que l'on choisit celui qui est le plus pratique.

Périodes de rotation

La période sidérale de rotation de la Terre (mesurée par rapport aux étoiles) est de 23 h 56 min 4 s. La durée du jour solaire moyen est de 24 h. La différence vient du fait que, pendant que la Terre tourne sur elle-même, elle se déplace aussi autour du Soleil.

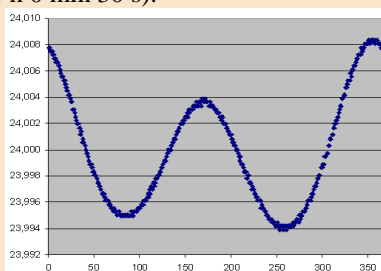


Pour le personnage en A, il est midi au Soleil. Après 23 h 56 min 4 s, la Terre a effectué un tour sur elle-même mais elle a aussi avancé sur son orbite. Le personnage se retrouve en B mais pour lui il n'est encore pas midi. Il faut environ 4 min pour qu'il se retrouve en C, à midi solaire.

La période sidérale est stable, du moins sur une année. Par contre la durée du jour solaire varie au cours de l'année entre 23 h 59 min 39 s et 24 h 0 min 30 s. En effet, l'écart d'environ 4 minutes n'est pas constant, il dépend de la vitesse de la Terre sur son orbite et de la position du plan de l'équateur (voir encadré). Cette variation est à l'origine de ce qu'on appelle l'équation du temps.

La durée du jour solaire

On définit le jour solaire comme l'intervalle de temps compris entre deux midis solaires consécutifs, le midi solaire vrai étant l'instant du passage du centre du Soleil dans le plan du méridien. L'institut de mécanique céleste donne l'heure TU de passage du Soleil au méridien. Par une simple soustraction, on obtient la durée du jour solaire vrai. Pour 2009, on trouve le minimum le 15 septembre (jour solaire de 23 h 59 min 38 s) et le maximum le 25 décembre 2009 (24 h 0 min 30 s).



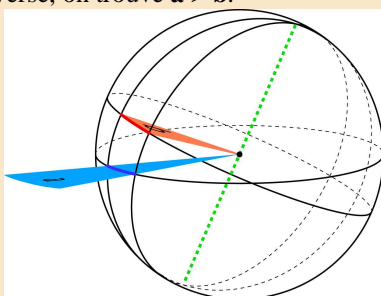
Durée du jour solaire en 2009

D'où viennent ces variations ?

Tout d'abord, l'angle a (du dernier schéma de la page précédente) dépend de la vitesse de la Terre sur son orbite. Or celle-ci varie de 29,3 km/s à l'aphélie début juillet à 30,3 km/s au périhélie début janvier. Quand la Terre va plus vite, l'angle a est plus grand et il faudra plus de temps pour que le personnage passe de B à C.

Deuxième raison, quand la Terre tourne sur elle-même autour de son axe, l'angle de rotation que l'on notera b se mesure dans le plan de l'équateur alors que l'angle a est dans le plan de l'écliptique.

La figure ci-dessous montre qu'au solstice d'hiver, $b > a$. L'angle dont doit tourner la Terre est plus grand que l'angle a , ce qui contribue encore à allonger les jours solaires de décembre et janvier. Aux équinoxes, c'est l'inverse, on trouve $a > b$.



Au solstice d'hiver, l'angle rouge b dont doit tourner la Terre dans le plan de l'équateur est supérieur à l'angle bleu a dans le plan de l'écliptique. C'est la même chose au solstice d'été.

Ces deux variations peuvent s'expliquer aussi en utilisant un soleil moyen se déplaçant à vitesse constante sur l'équateur céleste. Cela revient exactement au même.

L'équation du temps est la somme des écarts entre le jour solaire vrai et le jour solaire moyen de 24 h.

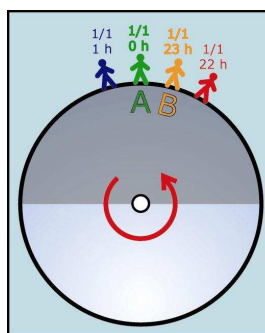
Fuseaux horaires et ligne de changement de date

En 1876, un Canadien (Sir Sandford Fleming) avait proposé de partager la Terre en 24 fuseaux horaires, le méridien de Greenwich servant d'origine et le méridien de changement de date étant situé à l'opposé. Son système finit par être adopté par la plupart des pays avant 1929.

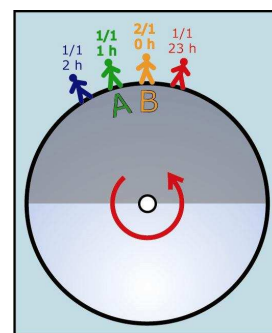
L'heure légale est en général définie comme étant l'heure du fuseau le plus proche (avec parfois une heure d'été et une heure d'hiver). Les pays les plus grands couvrant plusieurs fuseaux, certains comme les États-Unis, la Russie ou l'Australie ont plusieurs heures différentes alors que d'autres comme la Chine ou l'Inde n'ont qu'une seule heure.

La ligne de changement de date n'est pas évidente à concevoir. Pourrait-on s'en passer (en supposant que l'on continue à changer de date à minuit) ?

Imaginons qu'à un moment donné, la date est la même sur toute la Terre, le 1er janvier par exemple. Une heure plus tard, une personne A pour laquelle il était 23 h passe à 0 h et se retrouve donc le lendemain, le 2 janvier. Par contre, une personne B pour laquelle il était 0 h passe à 1 h et reste le 1er janvier.



Ici les quatre personnages sont à la même date, le 1er janvier



Une heure plus tard, seul B a passé minuit et a changé de date

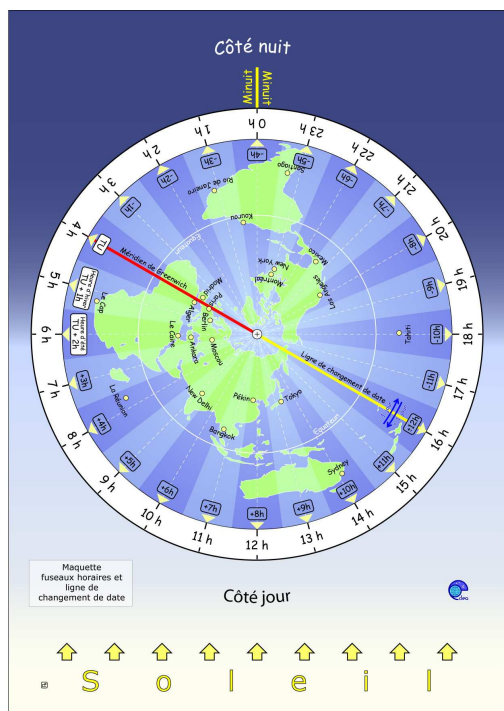
A et B n'ont donc plus la même date. Entre les deux, se trouve donc une ligne de changement de date dont on ne peut se passer. Quand on traverse cette ligne d'est en ouest, on ajoute un jour alors que d'ouest en est, on enlève un jour.

Quelques remarques :

- La ligne de changement de date aurait pu être mise sur n'importe quel méridien. Mais placée ainsi à l'opposé du méridien de Greenwich, elle traverse le Pacifique dans des régions peu habitées ce qui est plus pratique.
- En réalité sur la Terre, il y a une deuxième ligne de changement de date : c'est le méridien minuit, à l'opposé du Soleil. Mais cette ligne est mobile.

- Quand il est 12 h en Temps Universel, il est minuit sur la ligne de changement de date. A ce moment là, tous les habitants de la Terre sont à la même date.
- Les limites des heures légales suivent les frontières et non les méridiens. On peut trouver sur Internet le détail de toutes ces heures (www.theuds.com/fuseau-horaire.php).

Une maquette des fuseaux horaires



Maquette des fuseaux horaires (déjà parue dans le n° de septembre 2008 de la revue Cosinus)

Vous pouvez télécharger et imprimer cette maquette sur le site Internet du CLEA à l'adresse <http://www.ac-nice.fr/clea/SommCC126.html>.

Elle est constituée de deux parties, un disque mobile représentant la Terre du pôle Nord à la latitude de 60° sud et une partie fixe graduée en heure.

Pour l'utiliser, on tourne le disque pour que la flèche choisie (TU, TU+1 pour l'heure d'hiver ou TU+2 pour l'heure d'été) corresponde à l'heure désirée. On peut alors lire l'heure des différents fuseaux. On peut voir aussi de manière très approximative dans quel pays il fait jour et dans quel pays il fait nuit. On pourrait améliorer cette maquette en y ajoutant un transparent sur lequel on aurait tracé les limites jour - nuit à différentes dates.

Repères historiques

Platon (IV^e s av JC) prouve la rotondité de la Terre en avançant deux arguments :

- lors d'une éclipse, la forme de l'ombre de la Terre sur la Lune apparaît toujours comme un disque
 - la hauteur des étoiles au-dessus de l'horizon varie avec la latitude.
- Plus tard, Strabon (I^e s av JC) donne un autre argument : quand un bateau s'éloigne, la coque disparaît avant son mât.

Héraclide du Pont, disciple de Platon, propose une Terre en rotation sur elle-même au centre du monde.

Aristote énumère des arguments contre la rotation de la Terre :

- Ce serait un mouvement forcé qui ne peut être éternel.
- Si la Terre tournait d'ouest en est les objets ne tomberaient pas à la verticale (le sol se déplaçant pendant la chute).
- La rotation de la Terre devrait s'accompagner d'un fort vent d'est...

Eratosthène (III^e s av JC) calcule la circonférence terrestre à partir de la hauteur du Soleil et de la distance entre Syène (Assouan) et Alexandrie.

D'autres mesures du rayon de la Terre sont réalisées, par Posidonius à partir de la hauteur de Canopus (I^e s av JC) et plus tard par les astronomes arabes dans le désert de Syrie.

Copernic propose (comme Héraclide du Pont) de supposer que la Terre tourne sur elle-même.

Galilée démonte les arguments d'Aristote contre la rotation de la Terre. Il explique que la Terre peut tourner sans que l'on s'en rende compte. Il croit trouver dans les marées une preuve de ce mouvement mais son argumentation est fautive. Il explique aussi dans son livre, le Dialogue, que le tir d'un canon vers le nord ou le sud doit être dévié vers la droite deux siècles avant Coriolis mais pense que cette déviation est négligeable.

Son seul argument recevable est finalement celui de la simplicité : "...qui voudrait croire que la nature (tous s'accordent à penser qu'elle ne met pas en œuvre beaucoup de moyens quand elle peut se contenter de peu) ait choisi de mouvoir à une vitesse inconcevable un nombre immense de très grands corps, pour produire un résultat auquel suffirait le mouvement modéré d'un seul corps tournant autour de son propre centre ?"

En 1672, Richer s'aperçoit qu'un pendule battant la seconde doit être plus court à Cayenne qu'à Paris. Ce phénomène montre la plus faible pesanteur à l'équateur ; on l'explique par un plus grand éloignement du centre (aplatissement de la Terre)

pour 1/3 et par l'accélération centrifuge pour les 2/3 et. Les deux phénomènes, accélération centrifuge et aplatissement proviennent de la rotation de la Terre. Mais à l'époque de Richer, l'explication du phénomène fut beaucoup discutée. Pour certains, il s'agit là de la première preuve mécanique de la rotation de la Terre.

Les expéditions au Pérou et en Laponie (1737) montre que, comme l'avait prévu Newton, la Terre est bien aplatie aux pôles à cause de sa rotation, un degré de méridien étant plus court vers l'équateur que vers les pôles (voir CC n° 98). Un certain Clairaut montrera que la valeur de cet aplatissement dépend non seulement de la vitesse de rotation mais aussi de la répartition des masses. La valeur donnée actuellement est de 1/298.

En 1790, le mètre est défini comme la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre (le méridien étant ici un cercle complet).

En 1804, des expériences de chute libre dans un puits de mine en Allemagne montrent la déviation vers l'est. En effet, plus un objet est haut, plus sa vitesse linéaire horizontale est importante (il parcourt un cercle plus grand en un jour). La déviation est de 11 mm pour une hauteur de chute de 85 m.

En 1835, Coriolis publie son article "Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps" décrivant sa fameuse force. En conséquence, toute particule en mouvement dans l'hémisphère nord est déviée vers sa droite (vers sa gauche, dans l'hémisphère sud).

En 1851, le célèbre pendule de Foucault montre visuellement la rotation de la Terre. Rappelons que la période de rotation du plan des oscillations à Paris est de 31 h 47 min. Il n'y a qu'aux pôles que la période est de 23 h 56 min et que le plan des oscillations reste fixe par rapport aux étoiles.

Quelques références :

A lire, l'excellent livre de Jacques Gappaillard "Et pourtant elle tourne, le mouvement de la Terre" au Seuil.

A voir aussi le site de l'ENS de Lyon http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM_historique.xml

Voici quelques articles anciens relatifs à la Terre avec leur référence, notée CC pour Cahiers Clairaut suivi du n° de la revue et du n° de la page (comme dans le DVD) et HS pour le hors série suivi du n° et du n° de la fiche.

Articles généraux : CC106-02 (Cours)

Sur le mouvement apparent du ciel (étoiles ou Soleil) : CC095-II, CC090-13, CC088-32, CC058-07, CC009-29, HS01 (relevés d'ombres...), HS09-1

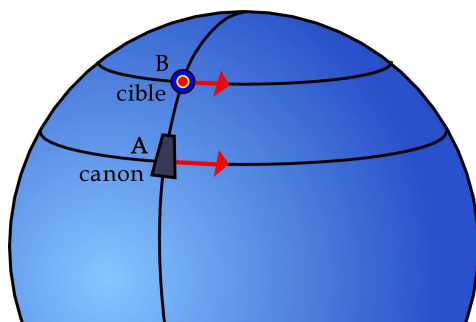
Sur les preuves de la rotation de la Terre CC114-25, CC101-17, CC098-18, CC094-32, CC084-10, CC054-02 (Pendule de Foucault), CC088-11 (Lavabos et Coriolis)

Sur le ralentissement de la Terre : CC020-33

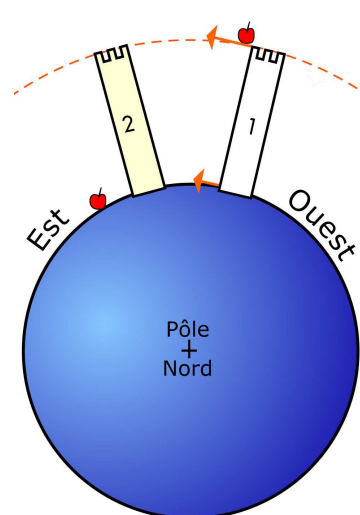
Sur la mesure du rayon de la Terre : CC107-14, CC107-17, CC007-27, CC098-08, CC102-30.

(méthode d'Eratosthène ou méthode proche) CC011-33 (distance de l'horizon).

Sur la forme de la Terre : CC113-25



Déviations d'un tir de canon vers le nord. Le canon est situé sur un parallèle plus long que celui de la cible, il parcourt donc une plus grande distance en 24 heures. Sa vitesse linéaire étant supérieure à celle de la cible, le boulet va arriver à droite de la cible. Galilée avait déjà imaginé cette déviation vers la droite dans l'hémisphère nord (force de Coriolis).



Chute des corps et déviation vers l'est. Le haut de la tour décrit en 24 heures un cercle légèrement plus grand que le bas, sa vitesse linéaire est donc supérieure. Une pomme lâchée du haut d'une tour verticale ne tombe pas exactement au pied mais légèrement à l'est. La déviation est faible mais mesurable.

RÉFLEXION

Le jour et la nuit : conceptions initiales des élèves

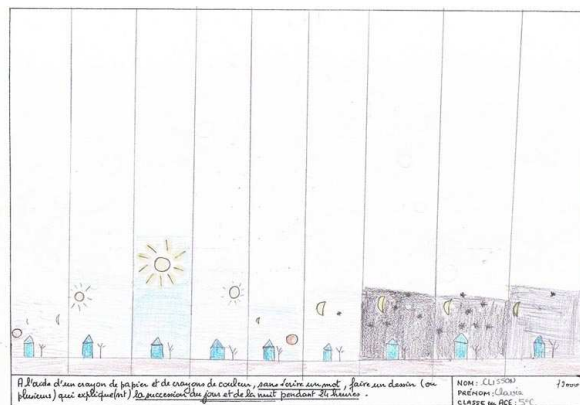
Jean-Luc Fouquet, île de Ré

Résumé : Depuis plusieurs années, Jean-Luc Fouquet a interrogé plusieurs milliers d'élèves sur quelques notions de base en astronomie. Il nous livre ici le résultat de son enquête sur le jour et la nuit.

L'astronomie est affaire d'observation et d'expérimentation. Dans ce domaine, les enfants entrent ensemble à l'école dans un champ nouveau de savoirs, à armes égales. Les forts en math, les cancrs en orthographe, tous auront ce riche vécu commun, ce tremplin tout neuf, même les élèves en échec ou socialement défavorisés. Des enfants ayant un peu de bon sens expliquent souvent les phases de la Lune, le jour et la nuit,... à d'autres plus doués pour l'abstraction. Et l'obligation du dessin renforce cette impression. Que ce soit dans un test de représentation initiale sur un concept ou dans un relevé d'observations, l'élève apprend à se repérer, à être plus précis dans sa manière de regarder, à travailler en groupe et à faire participer ses parents et son entourage. Le passage mental d'un horizon local à une planète Terre vue de loin n'est d'ailleurs jamais évident, quel que soit l'âge. Comme professeur "ressource" du Muséum de La Rochelle, j'ai pu depuis plusieurs années rencontrer des enseignants dans les écoles pour les aider à mener à bien des projets ayant pour thème l'astronomie. J'ai souvent proposé au moment des premières rencontres avec des élèves que je ne connaissais pas, de tester leurs savoirs en leur proposant de faire un dessin. Cette démarche a ses limites, mais le grand nombre d'épreuves récoltées (plusieurs milliers) m'a permis de dégager quelques conclusions intéressantes. J'ai poussé par curiosité l'expérience en collège puis en lycée, au cours de l'élaboration de projets avec les professeurs, l'astronomie n'étant pas une matière en soi mais étant perçue comme située à la charnière de plusieurs disciplines. Dans ce contexte, le dessin de l'un est facilement commenté par les autres, les confrontations d'idées sont facilitées ainsi que le suivi des conceptions exprimées suivant l'âge des élèves, de l'école primaire au lycée.

Étudiions plus particulièrement le thème du jour et de la nuit. Le sujet proposé des centaines de fois était ainsi libellé: "A l'aide d'un crayon de papier et de crayons de couleur, sans écrire un mot, faire un dessin (ou plusieurs) qui explique(nt) la succession du jour et de la nuit pendant 24 heures".

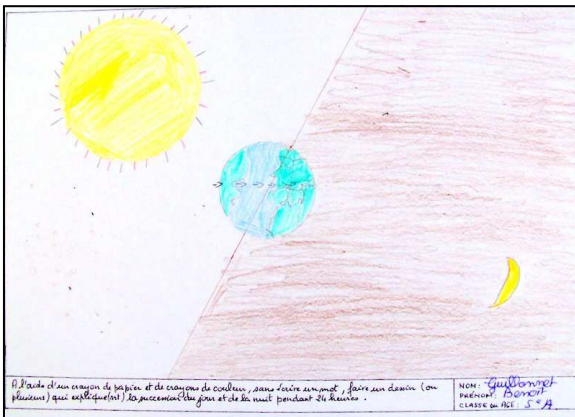
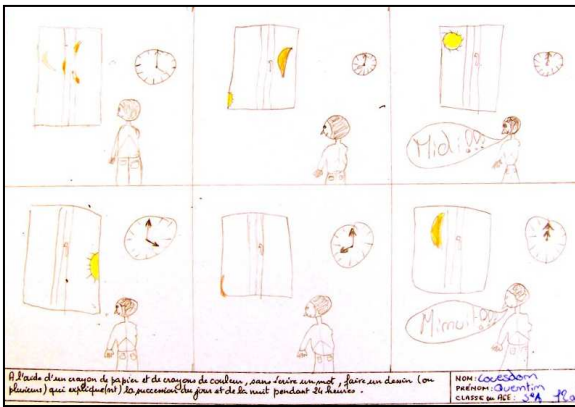
À l'école, la notion de dessin « explicatif » n'est pas toujours bien perçue. Certains enfants proposent une frise avec arbres et maisons, une succession de paysages contenant chacun un soleil à différentes hauteurs, puis des ciels noircis portant Lune et étoiles (5% des épreuves).



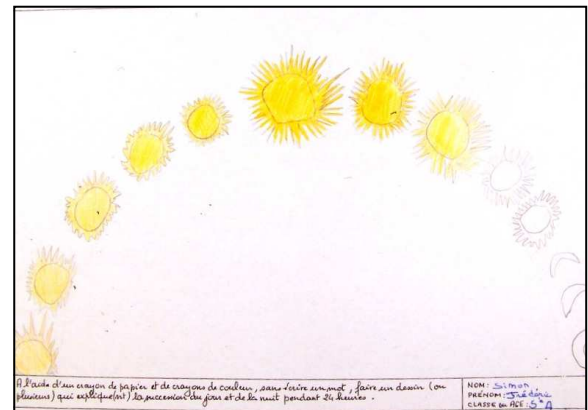
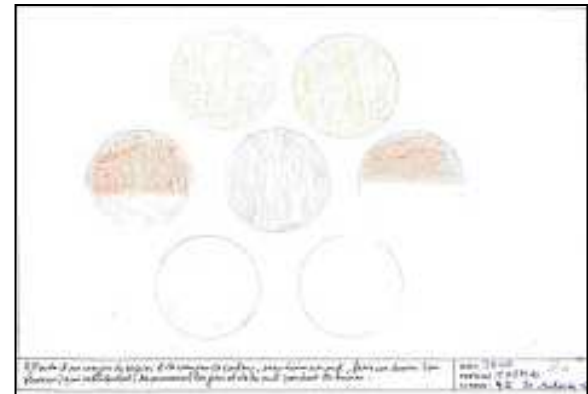
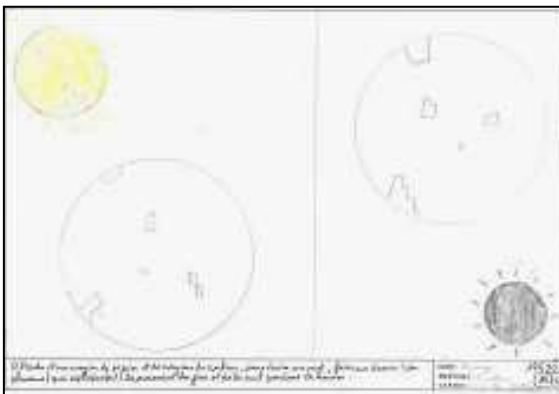
D'ailleurs, les plus petits parfois ont quelques difficultés à imaginer une planète Terre vue de l'espace, et préfèrent représenter le Monde tel qu'ils le voient.

Il arrive même que soit symbolisé le temps qui passe, ou que l'espace soit séparé en deux par une ligne délimitant le monde blanc avec son Soleil symbole du jour et le côté "nuit" noirci avec application et habité par la Lune et quelques étoiles. Ces dessins rejoignent les mythes anciens

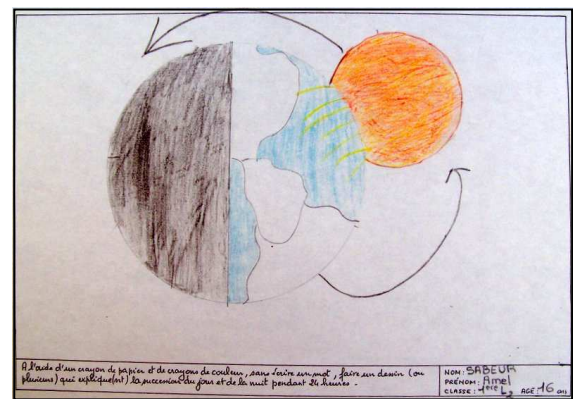
où la nuit était personnifiée par la Lune, soeur de son rival le Soleil, ou encore reine du royaume des morts (8% des épreuves).

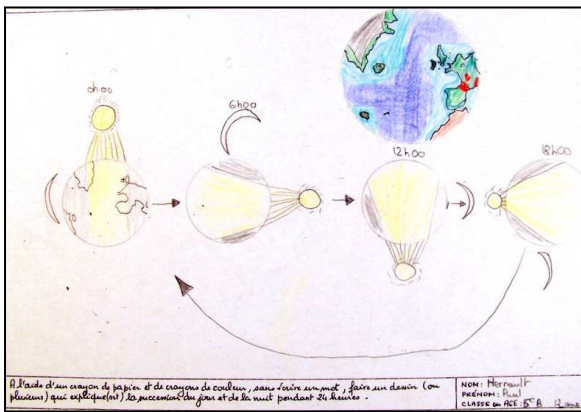


Trop fréquents sont les dessins qui proposent une Terre immobile, au centre des rotations suggérées par des cercles à plat ou en perspective, du Soleil et de la Lune. Ces exemples atteignent parfois un quart des épreuves dans certaines classes, et on peut même les rencontrer dans tous les niveaux du collège. La nuit dans quelques cas (2% des épreuves) devient une absence de lumière provoquée par une défaillance du Soleil qui peut alors s'éteindre, ou traverser une zone de "brouillard", ou pour les plus jeunes parcourir tour à tour des domaines de jour et de nuit comme pouvait le suggérer de très anciennes légendes égyptiennes.



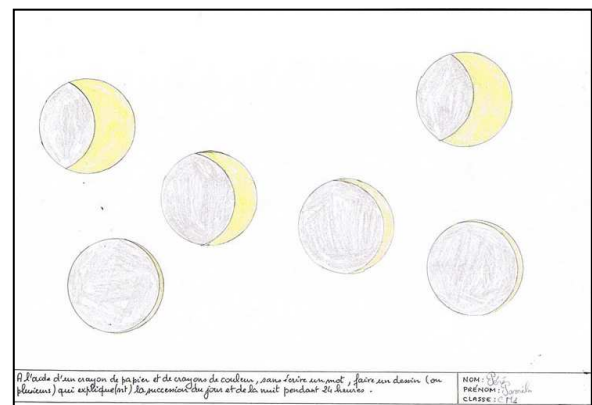
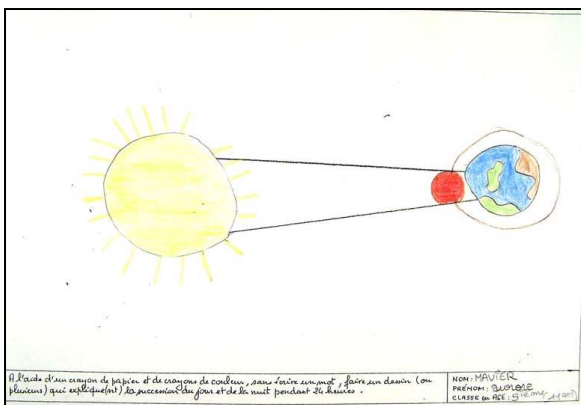
Et quand enfin "une sphère solaire" occupe le centre du dessin avec une "boule Terre" portant un axe de rotation semblant décrire une trajectoire circulaire, quelques enfants et parfois des adolescents du lycée confondent rotation et révolution, et donc jour et année (8% des épreuves).



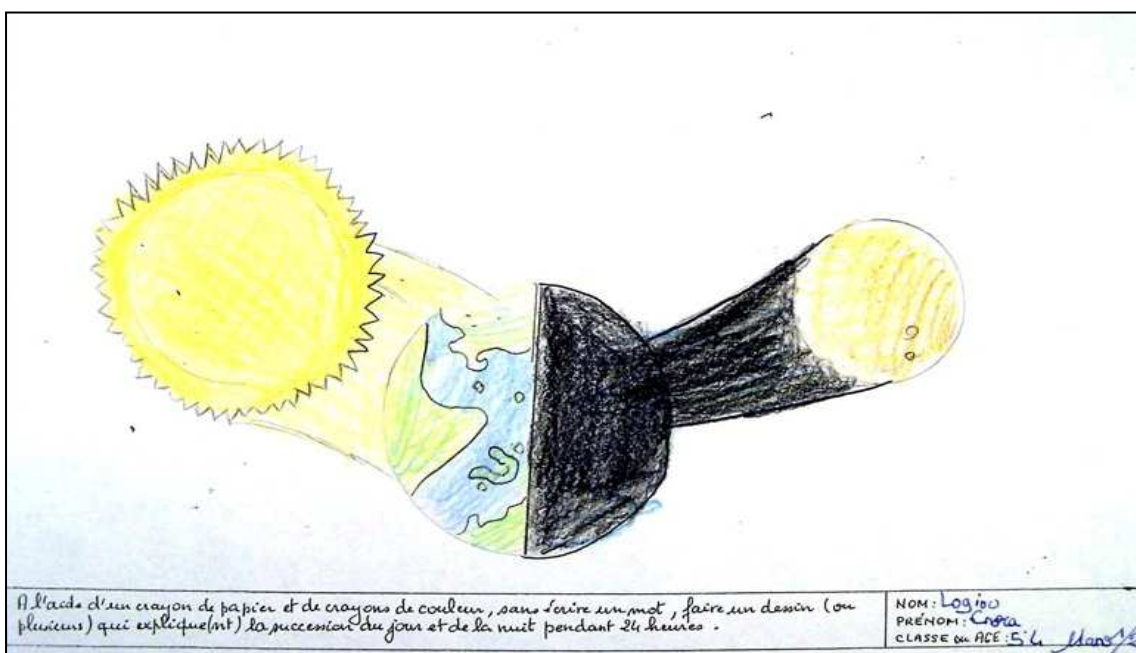


Effectivement, certains élèves plus grands, ayant été parfois confrontés en géographie ou en sciences, à des cours explicatifs sur les mouvements de la Terre, ont pu malgré tout garder en tête un schéma erroné.

D'autres confusions sont possibles, comme nuit et éclipse de Soleil, ou avec les plus petits cette idée que la nuit un objet (boule, nuage, planète, ...) vient s'interposer entre eux et le Soleil.



Une lecture plus précise des dessins les plus caractéristiques a pu se faire au cours de séances de suivi et de remédiation auxquelles il fallait apporter toute l'attention nécessaire. Dans chaque classe, une dizaine de dessins du groupe ont été repris, dans une projection collective, mêlés à une quinzaine d'épreuves les plus représentatives dans les différentes classes d'âge. Cette séance de projection servait de support à une discussion et à un jeu de questions-réponses avec les élèves. Il ne s'agissait pas de corriger ou d'évaluer le travail de chacun, mais d'essayer d'analyser le pourquoi des différentes représentations proposées. Parfois, surtout dans les classes de collège ou de lycée, ce travail a pu donner l'impression d'un temps gaspillé. Il est évidemment nécessaire de concilier activités et programmes, mais le risque de cette démarche "lente" n'est-elle pas pleinement profitable, ne serait-ce que deux ou trois fois sur certains thèmes judicieusement choisis ?



Le saladier, un modèle ?

Le mouvement apparent du Soleil à l'école primaire : de l'observation à la modélisation

Catherine Lecoq, IUFM de Haute Normandie, catherine.lecoq@univ-rouen.fr

Résumé : *Le dispositif dit du "saladier" permet une représentation en trois dimensions du mouvement apparent du Soleil. Pourtant son utilisation par des élèves pour enregistrer ce mouvement n'a de sens que si le dispositif a été auparavant construit comme un modèle du réel observé. L'article décrit les étapes d'une démarche de construction de ce modèle, démarche effectivement mise en oeuvre dans une classe de CM2 d'école primaire.*

Chaque jour, pour un observateur terrestre (en dehors des zones polaires), le Soleil apparaît le matin au-dessus de l'horizon ("lever"), puis "monte" dans le ciel d'est en ouest jusqu'à sa culmination pour ensuite "redescendre" et enfin disparaître sous l'horizon ("coucher"). Ce mouvement est communément appelé *mouvement "apparent" du Soleil*. Il peut être décrit dans un système de coordonnées horizontales par les mesures de l'azimut et de la hauteur angulaire du Soleil à chaque instant.

L'étude du *"mouvement apparent du Soleil"* figurait aux programmes 2002 et 2007 de l'école primaire. Les compétences visées (2002) étaient de rendre l'élève *"capable de représenter qualitativement la trajectoire du Soleil dans le ciel et son évolution au fil de l'année"*. À ce niveau de la scolarité, la représentation de la trajectoire du Soleil ne peut être que "qualitative". En effet, la notion d'angle est connue des élèves, mais la mesure des angles et l'utilisation du rapporteur n'ont pas été abordées.

Les programmes 2007 fixaient comme compétence non exigible de "savoir relever la trajectoire du Soleil par rapport au sol (horizon)", sans préciser la méthodologie de ce "relevé".

Les documents d'application de ces programmes stipulaient que *"l'objectif est en tout premier lieu d'observer les phénomènes les plus quotidiens et d'engager les élèves dans une démarche de construction d'un modèle scientifique"*.

Or, la méthode bien connue au CLEA sous le nom de "relevé du saladier"¹ et initiée au sein des EEA

depuis les années 1990, répond à ce double aspect de "représentation qualitative de la tra-jectoire du Soleil" et de "modèle" représentatif du réel.



Les commentaires des programmes 2002 précisait encore que *"tout en étant attentif aux dangers de l'observation directe du Soleil, il est toutefois possible de se rendre compte des évolutions du mouvement apparent du Soleil, lequel peut être représenté sur une feuille plane comportant le profil de l'horizon du lieu d'observation"*.

Ce commentaire appelle lui-même un commentaire. En effet, à moins de se situer en un lieu où l'horizon est extrêmement réduit, dessiner sur une feuille plane le profil de l'horizon d'un lieu d'observation n'est pas aussi simple qu'il y paraît. En effet cet exercice nécessite un pivotement de l'observateur sur lui-même s'il veut un angle de vision de plus de 180 degrés.

Pierre Causeret a fort bien explicité dans les CC n°119 d'automne 2007 les problèmes de représentation du mouvement apparent du Soleil. Il y a développé tout l'éventail des projections possibles pour la trajectoire du Soleil, en analysant pour chacune d'elles leurs intérêts et leurs limites. Il a,

¹ Voir les CC n° 119 ou l'ouvrage "Le ciel à portée de main, 50 expériences d'astronomie" CAUSERET, P., FOUQUET J.-L., SARRAZIN-VILAS, L., (2005). Belin. Le saladier a été introduit dans les Écoles d'Été par Roland Szostak de l'université de Munster.

par là même, montré toutes les difficultés de "lecture" et d'interprétations liées à toutes les représentations planes, représentations qui pourtant émaillent la plupart des manuels scolaires. Il termine son article par cette conclusion : "*mis à part le saladier, il n'y a pas de représentation parfaite du mouvement apparent du Soleil*". De plus, comme le souligne Hélène Merle (Merle, 2003), cette représentation en trois dimensions renforce le caractère angulaire du concept de "hauteur d'un astre au dessus de l'horizon".

L'étude de ce mouvement confronte donc les élèves à des difficultés de divers ordres :

- En premier lieu des difficultés d'observation et de repérages : comment repérer la position du Soleil sans observer directement ce dernier ? Comment repérer cette position (en azimut et en hauteur angulaire) quand on ne maîtrise pas la mesure des angles ?
- En second lieu des difficultés de représentation : comment représenter le plus fidèlement possible le phénomène, sachant que toute représentation plane peut inférer des idées fausses ?
- En dernier lieu des difficultés de mémorisation des données : comment garder une trace, comment enregistrer ce mouvement de façon à le décrire et à pouvoir comparer ses variations possibles d'une saison à l'autre ?

Le dispositif dit "du saladier" permet une représentation qualitative et relativement fidèle de ce mouvement. Il constitue une représentation en trois dimensions qui, de ce fait, n'infère pas d'interprétations erronées comme pourrait le faire une représentation plane. De plus, il ne sollicite aucune mesure angulaire et est donc tout à fait adapté à des élèves de cycle 3 d'école primaire.

Pourtant, il n'est pas envisageable, de le proposer directement à des élèves de cet âge. En effet, pour que ce dispositif soit accepté, compris, il est nécessaire de lui donner du sens. Pour cela, on peut engager les élèves dans une démarche de modélisation qui les amène à construire eux-mêmes ce dispositif en tant que "modèle" apte à représenter cette réalité qu'ils cherchent à décrire et à expliquer.

En quoi le dispositif "saladier" peut-il être considéré comme un "modèle" ?

Nous définirons un modèle comme une construction intellectuelle théorique qui représente la réalité (ou une partie de celle-ci) et qui peut se substituer à elle pour réfléchir, expliquer, prévoir.

Pour le préciser, nous emprunterons l'outil proposé par J-M. Rolando (Rolando, 2003) qui consiste à mettre en correspondance respectivement les éléments retenus comme pertinents de la réalité avec les éléments du modèle qui les représentent.

Le modèle "saladier"	La "réalité de l'observateur"² terrestre
Planche horizontale	Le sol horizontal
Le bord circulaire du saladier	L'horizon céleste de l'observateur
Le centre du cercle (bord circulaire du saladier)	La position de l'observateur
La gommette	La position du Soleil sur la voûte céleste de l'observateur
Le saladier hémisphérique	La voûte céleste locale de l'observateur

Quelle démarche pour construire le modèle ?

La démarche de modélisation va consister à faire construire le modèle par les élèves, pas à pas, à partir de leurs observations et en fonction de leurs connaissances antérieures.

Les principales étapes de la construction du modèle seront donc :

- les représentations de l'horizon circulaire et de l'observateur ;
- l'acceptation d'une voûte céleste hémisphérique locale comme surface sur laquelle on représente les objets du ciel ainsi que sa matérialisation ;
- la matérialisation de la position du Soleil par une gommette sur la "voûte-saladier".

Un exemple de démarche effectivement réalisée dans une classe de CM2.

La démarche présentée a été mise en œuvre dans une classe de CM2 d'une école située en zone urbaine classée en Réseau d'Éducation Prioritaire. Elle vise à faire construire le "modèle du saladier" en vue de son utilisation comme dispositif d'enregistrement du mouvement apparent du Soleil à différentes dates de l'année.

En préalable à cette étude, les élèves ont acquis des connaissances qu'ils vont devoir mobiliser. Ils ont découvert les caractéristiques essentielles de la formation d'une ombre : ils savent que la lumière suit un trajet rectiligne dans un milieu homogène et

² Nous utilisons le terme "réalité de l'observateur" puisque la voûte céleste n'est pas un objet réel, mais un objet construit par l'observateur.

que pour qu'un objet soit vu par un observateur, il est nécessaire que la lumière issue de cet objet entre dans l'œil de cet observateur. Ils maîtrisent le repérage des points cardinaux à l'aide d'une boussole et ont construit une "rose des vents" par pliages successifs d'une feuille de papier, leur permettant ainsi de pouvoir repérer quelques points intermédiaires remarquables (nord-est, nord-ouest, sud-est, sud-ouest).

Nous ne relaterons pas dans ce qui suit l'ensemble de la démarche d'investigation. Nous n'évoquerons pas les phases de questionnements et nous nous bornerons à décrire uniquement les étapes du scénario correspondant à la construction du modèle par les élèves.

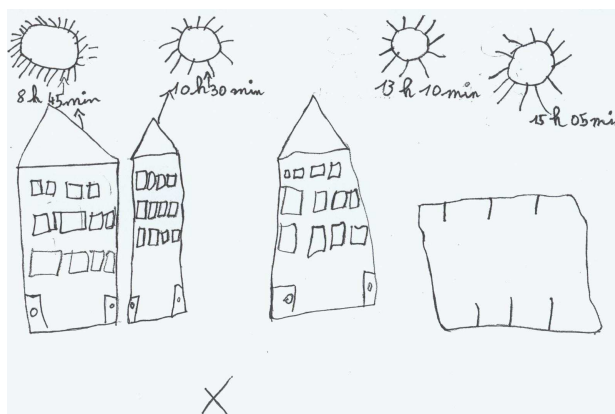
Étape 1 : observation peu guidée du mouvement du Soleil au cours d'une journée

Les élèves sont invités à observer la position approximative du Soleil dans le ciel depuis leur place dans la classe. Pour décrire oralement la position du Soleil, ils prennent des repères terrestres de l'environnement : le Soleil "est au-dessus de l'école maternelle" ou "du côté du parking". Puis, un jour, ils doivent lors des moments d'interclasse "observer et dessiner de la façon qui leur semble la plus précise" cette position depuis la cour de récréation. Afin d'effectuer cette observation sans danger, ils sont entraînés à cacher le Soleil avec un ballon de basket tenu à bout de bras, dont l'ombre portée se forme sur leur tête. La direction de leur bras indique alors la direction du Soleil. Ils s'aperçoivent alors que la position repérée depuis la cour par rapport à des objets de l'environnement proche diffère de celle repérée précédemment depuis la classe. Ce constat les amène à admettre la nécessité de conserver un même lieu d'observation

si l'on cherche à comparer les positions successives du Soleil au cours de la journée.

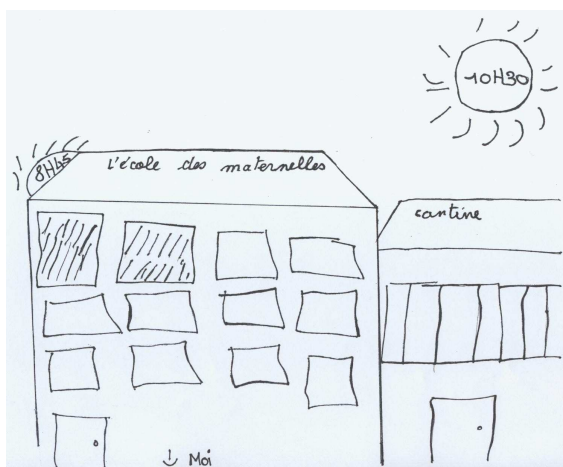
Les représentations dessinées depuis la cour varient. Certaines (comme celle de Flora) s'attachent à figurer fidèlement l'environnement ("l'école maternelle", "la cantine", le "parking", etc.) et à montrer le lieu d'"apparition" du Soleil le matin au niveau du "toit de l'école maternelle". Mais la feuille s'avère trop petite pour représenter les autres positions du Soleil et l'environnement et trois feuilles sont finalement nécessaires à Flora pour poursuivre son dessin.

D'autres élèves, comme Mamadou, relatent principalement le sens de déplacement du Soleil de

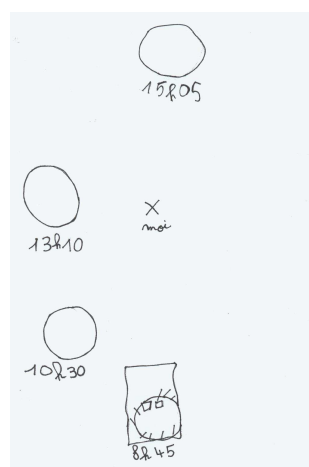


Dessin de Mamadou

la gauche vers la droite de l'observateur s'il est face au Soleil. La variation de la hauteur angulaire du Soleil n'est pas perçue, ce qui semble peu surprenant vu l'absence de repérage possible par rapport à un élément de l'environnement. D'autres encore, comme Colas, proposent des "vues de dessus de la cour", le Soleil tournant autour de l'observateur. Ils veulent peut-être mettre en évidence le changement de direction (en azimut) du Soleil par rapport à l'observateur.



Dessin de Flora



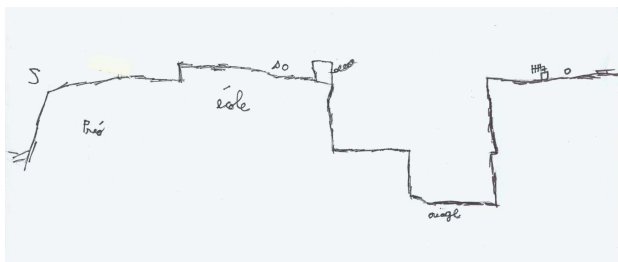
Dessin de Colas

Étape 2 : discussion orale autour des représentations

Suite à la présentation des différents dessins, une discussion s'engage dans la classe sur les observations et sur les représentations proposées. Un point commun s'impose : "quand on est face au Soleil, celui-ci se déplace de la gauche vers la droite". Chacun explique son mode de représentation. Colas a voulu montrer que "le Soleil tourne autour de nous". Les dessins de Flora (trois feuilles accolées) retiennent l'attention de la classe par leur précision, mais certains détails (comme les fenêtres des bâtiments) sont jugés superflus par rapport à l'objectif fixé. La nécessité d'un repérage précis pour pouvoir comparer les positions successives du Soleil fait consensus auprès des élèves. Les éléments de l'environnement pertinents à dessiner avec précision sont sélectionnés. Ainsi, le profil de l'horizon défini comme ligne délimitant le ciel et l'environnement terrestre pour l'observateur, est retenu ainsi que certains repères caractéristiques de la vue comme des cheminées, des arbres, des antennes, etc. Il est décidé aussi d'utiliser la boussole et la "rose des vents" de façon à repérer les points cardinaux de l'observateur sur la ligne l'horizon.

Étape 3 : tracé du profil de l'horizon local (par groupe)

Chaque groupe de 4 élèves s'organise de façon à tracer un profil de l'horizon. Tous décident de partager le travail de façon à ce que chacun prenne en charge le dessin d'un quart d'horizon (ex : du sud-est au sud-ouest ou bien de l'est au sud). Les élèves prennent alors conscience qu'ils doivent pivoter d'un tour complet sur eux-mêmes pour dessiner l'horizon complet.

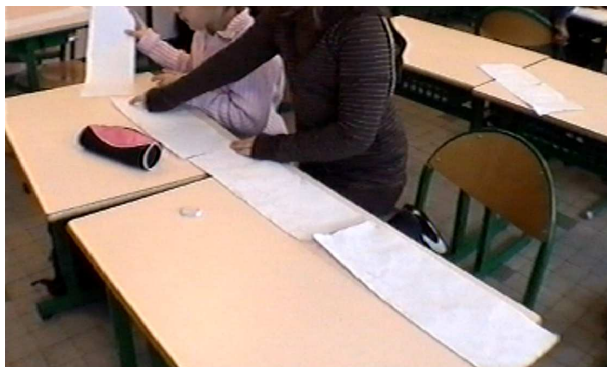


Dessin d'élève d'une portion de profil d'horizon

Étape 4 : assemblage des profils d'horizon, présentation, discussion, position de l'observateur.

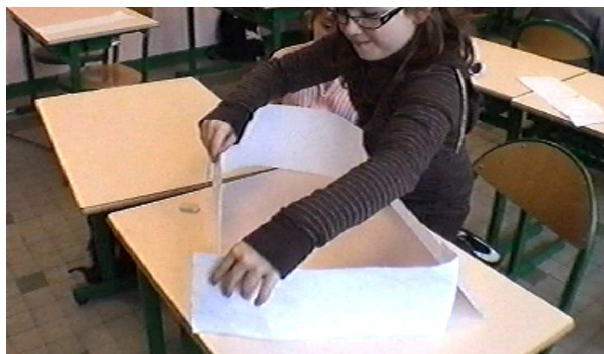
De retour en classe, les morceaux de profils sont assemblés. Tous les groupes proposent une frise plane. Les frises sont affichées au tableau et comparées. Il s'avère que les frises ne se super-

posent pas. Un assemblage est mis en défaut "d'ordre" des points cardinaux, tous les autres sont corrects et respectent bien l'ordre de la boussole (N-E-S-O).



Assemblage des 4 portions du profil d'un même horizon

Mais les frises débutent par des points cardinaux différents. Qui a raison ? Les élèves prennent alors conscience que l'horizon n'a ni "début" ni "fin". La solution qui met d'accord tous les groupes réside dans la réalisation d'une frise circulaire. L'horizon de l'observateur est donc circulaire.



Mise en forme circulaire du profil de l'horizon

La mise en forme circulaire de la frise scinde la classe en deux camps : les uns placent le dessin de la frise à l'intérieur du cylindre ainsi formé, alors que les autres le placent à l'extérieur. Une rapide discussion s'engage. Les uns affirment qu'il faut "tourner pour voir tout l'horizon" et ils montrent du doigt le tour du cylindre. Les autres confirment qu'il faut "tourner, oui mais comme ça", et ils miment le pivotement sur eux-mêmes.

L'enseignante propose alors des petites figurines (santons, pour ne pas citer de marques !) pour représenter les observateurs de la cour. Celles-ci sont placées au centre des frises circulaires (dessin à l'intérieur) et cette position convainc très rapidement ceux qui avaient placé le profil de l'horizon à l'extérieur du cylindre.

Cette étape montre que, pour un élève, se décentrer de la réalité n'est ni spontané, ni évident. La médiation de la petite figurine, pour se représenter soi-même, semble donc tout à fait nécessaire.



Étape 5 : assemblage d'une vue photographique panoramique et modélisation de l'horizon et de l'observateur.

L'enseignante propose ensuite de remplacer les dessins par 4 photos (plus précises que les dessins des profils) qui, assemblées correctement, constituent une vue panoramique depuis un des points d'observation de la cour de récréation.

L'assemblage est réalisé sans problème particulier, les élèves repèrent correctement les raccords nécessaires. Les points cardinaux repérés précédemment sur l'horizon sont notés. Enfin, ils orientent la frise circulaire à l'aide de la boussole.



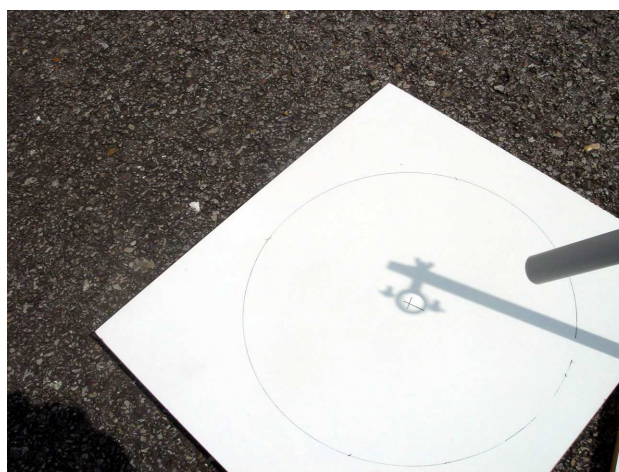
Orientation du panoramique

Étape 6 : matérialisation du Soleil et de sa direction

Quelle est la position du Soleil dans le ciel fictif de la figurine de la "maquette" ? La frise panoramique ne contient pas l'image du Soleil, elle ne représente donc pas le ciel dans son entier. Les élèves proposent d'aller dans la cour avec leur modèle (frise, figurine posée sur une planche figurant le sol) pour "expérimenter" et tenter de placer le Soleil dans la maquette.

Lors de séquences précédentes, les élèves ont appris à mettre en évidence la propagation rectiligne de la lumière en "piégeant des faisceaux de lumière" à l'aide de cartons percés alignés et à l'aide de tubes creux rectilignes. Ils reprennent donc les accessoires déjà utilisés : tubes creux, cartons percés et essaient de nouveau de "piéger le faisceau de lumière" de façon à "éblouir" la figurine. Avec des tubes pleins et des baguettes rectilignes d'autres essaient de faire une ombre sur

la figurine "pour qu'elle ne voie pas le Soleil". Ils constatent alors que les tubes sont tous parallèles et indiquent la direction du Soleil pour leur figurine (alignement figurine-creux du tube-Soleil, matérialisé par le tube). Ils constatent également que le Soleil ne peut pas être présent sur la photo panoramique étant trop haut dans le ciel à ce moment de l'observation. Certains proposent de placer une petite balle ou un disque à l'extrémité du tube pour représenter le Soleil dans la maquette.



Visée du Soleil (par la figurine) à l'aide d'un tube (l'ombre qui apparaît sur le socle est l'ombre du support vertical du tube)

D'autres élèves s'affranchissent de la frise circulaire (qui se déforme) et de la figurine pour les remplacer respectivement par un cercle et par une croix.



Matérialisation de la position du Soleil en cachant la figurine dans l'ombre d'une boule par rapport au Soleil

D'autres au contraire la conservent comme une nécessité pour donner du sens à ce qu'ils sont en train de réaliser.

Les élèves qui ont matérialisé le Soleil par une petite boule ou un disque constatent qu'en supprimant le tube, l'ombre du disque se forme sur la croix, preuve supplémentaire de l'alignement "croix-disque-Soleil".

D'autres proposent de matérialiser le Soleil par une boule et sa direction par une tige plantée dans de la pâte à modeler au niveau de la croix.



Matérialisation du Soleil (par la boule) et de sa direction (par une tige)

Le dispositif est séduisant et les élèves sont heureux d'avoir trouvé une solution. Mais très vite ils se rendent à l'évidence des fragilités de ce dispositif : le socle mou en pâte à modeler s'affaisse, et il sera impossible de planter en un même point toutes les tiges correspondant à chaque relevé.

Étape 7 : matérialisation de la voûte céleste

À ce stade de la modélisation, l'enseignante impose deux contraintes : le Soleil, reste à une distance constante à la Terre durant la journée et toutes les positions du Soleil représentées sur le modèle doivent figurer sur un même support rigide. Les élèves proposent alors deux solutions : un cylindre très haut (dans le prolongement de celui de la frise) "mais avec un toit" pour couvrir tout le champ du ciel visible depuis la Terre ou bien un parapluie transparent.

Le dôme transparent est alors proposé par

l'enseignante ("saladier") et la méthode de repérage est expérimentée par la classe.

Les élèves ont alors construit le modèle, ils seront en mesure de l'utiliser pour observer et enregistrer le mouvement apparent journalier du Soleil au fil des saisons. Cette démarche de modélisation leur a permis de saisir le sens du "dispositif saladier".

Elle leur a donné l'occasion de se décentrer de la réalité, dont ils sont partie prenante, de réfléchir sur cette réalité en se positionnant dans l'espace dans une vision virtuelle totalement impossible.

Il est à espérer qu'ils seront en mesure d'interpréter une représentation de type "vue en extérieur" du mouvement sur la voûte céleste, représentation la plus précise du mouvement apparent du Soleil.

Cette démarche a été mise en œuvre par Mme Yvonne Le Roy, Professeure d'école en classe de CM2, à l'école Jean Jaurès d'Oissel (Seine-Maritime) en 2006-2007 et en 2007-2008, avec l'appui de l'IUFM de Haute-Normandie.

Références bibliographiques

CAUSERET P. (2007). "Comment représenter le mouvement apparent du Soleil ?" Les Cahiers Clairaut 119, 9-15.

CAUSERET P., FOUQUET J.-L., SARRAZIN-VILAS L. (2005). "Le ciel à portée de main, 50 expériences d'astronomie". Belin, Paris.

LAINÉ M. & TRYOËN V. (1991). "La course du Soleil pendant une journée". Les Cahiers Clairaut Hors série n°1.

M.E.N (2007) : BO Hors série n° 5, 12 Avril 2007.

M.E.N. (2002): BO Hors série n° 1, 14 Février 2002.

M.E.N. (2002) : documents d'application des programmes, fiches connaissances.

M.E.N. (2002) : documents d'application des programmes, Sciences et technologie, cycle 3.

MERLE H., GIRAULT Y. (coord.), (2003) : "L'enseignement de l'astronomie", ASTER n° 36. INRP, Paris.

MERLE H. (2000) : "Comment aider les élèves à modéliser "le ciel et la Terre" Aster, 31, 37-70.

ROLANDO J.-M. (2003) : "L'astronomie à l'école, Construire des compétences et des savoirs au cycle 3". Delagrave, Paris. ■

Levers et couchers de Soleil : est-ce la Terre qui tourne sur elle-même ou le Soleil qui tourne autour de la Terre ? Un argument culinaire.

"Car il serait aussi ridicule de croire que ce grand corps lumineux [le Soleil] tournât autour d'un point dont il n'a que faire, que de s'imaginer quand nous voyons une alouette rôtie, qu'on a, pour la cuire, tourné la cheminée à l'entour." Cyrano de Bergerac. L'autre monde ou les États et Empires de la Lune.

RÉALISATIONS

Dispositifs pour "sentir" que la Terre peut tourner sur elle-même

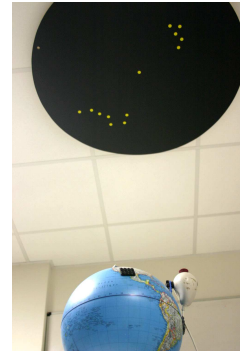
Pierre Causeret, Esbarres

Résumé : *Tout le monde a vu le Soleil se lever et se coucher. Tout le monde (ou presque) a appris que la Terre tourne sur elle-même. Mais il me semble qu'il n'y a pas beaucoup de jeunes ou d'adultes qui ont réellement fait le lien entre les deux. Pour s'en rendre compte, il suffit de demander dans quel sens en ce moment nous tournons. Peu de personnes répondent correctement. Pour essayer de mieux comprendre la rotation de la Terre, j'ai proposé deux dispositifs. Le premier existe depuis quelques années dans la salle d'animation du planétarium de Dijon, le deuxième devrait bientôt être réalisé.*

Dispositif n°1 : webcam et globe terrestre

Un globe terrestre est fixé sur un axe vertical. Juste au dessus, au plafond, se trouve un disque sur lequel est dessiné la Grande Ourse, Cassiopée et l'étoile Polaire, ce disque pouvant tourner autour de la Polaire. Sur la Terre est fixée une webcam à la latitude de la France et visant la Polaire. L'image filmée par la webcam est projetée par un vidéoprojecteur sur un écran. Les élèves ont vu auparavant dans le planétarium le ciel tourner autour de l'étoile Polaire.

Si on fait tourner le disque des étoiles (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre), on voit à l'écran la même chose que ce que l'on a observé dans le planétarium : la Grande Ourse et Cassiopée tournent autour de la Polaire. Mais si on laisse le ciel fixe et que l'on fait tourner la Terre sur elle-même (d'ouest en est), alors l'image projetée montre exactement la même chose. Il est donc possible que la Terre tourne.



Le montage dans la salle d'animation

Dans le deuxième dispositif, la personne qui observe tourne réellement.

Dispositif n°2 : la chaise tournante

Sur une chaise tournante est fixé un paysage avec un arbre et une maison. Au bout d'une tige sur pied se trouve un Soleil. Au départ, le Soleil et la chaise sont dans une position donnée. On doit voir alors le Soleil au-dessus de l'arbre. Dans la position finale, le soleil doit se retrouver au-dessus de la cheminée. On peut y parvenir de deux manières différentes : soit en déplaçant le Soleil vers la droite, soit en faisant tourner la chaise vers la gauche. Le but est de vérifier que ces deux mouvements donnent exactement le même résultat.

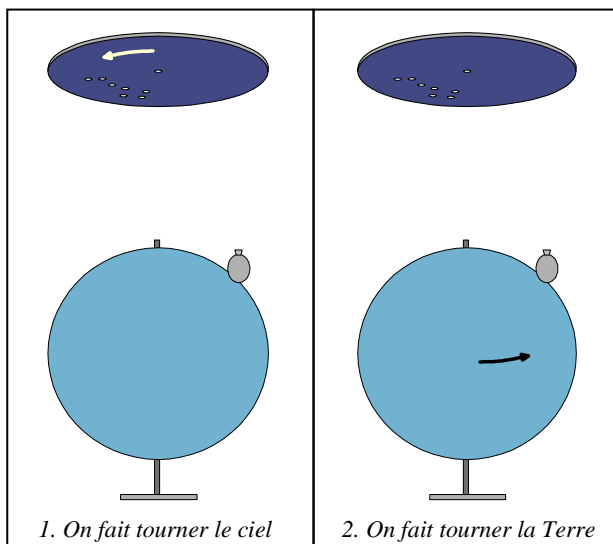


Schéma du dispositif

L'expérience serait encore plus parlante si, au lieu d'observer un écran, on se plaçait réellement sur le globe terrestre. Mais il faudrait alors un globe de bonne taille.

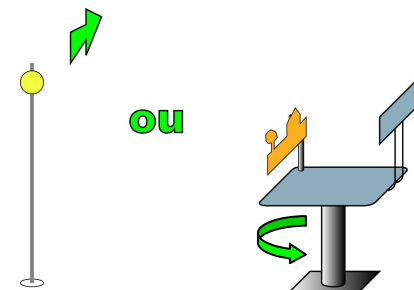


Schéma du deuxième dispositif en projet

Ce sont des expériences très simples mais qui peuvent aider les élèves à mieux comprendre et à se poser des questions sur ces mouvements qui ne sont pas si évidents. ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Le jour et la nuit

Jean Ripert, Pradines

Résumé : *Comment aborder la notion de jour et de nuit en cycle 3 de l'école ? Voici un atelier, des pistes pour susciter la curiosité, faire réfléchir, utiliser une méthode expérimentale (observation, hypothèses, expérimentation, conclusion) dans le domaine de l'astronomie.*

Avant d'aborder ce thème d'autres notions ont été vues en classe. Les ombres : ombre propre, ombre portée (notions simples (?) et qui réservent parfois des surprises) et les points cardinaux. Si le Sud a été repéré par la culmination du Soleil et le Nord par la Polaire c'est l'idéal. Il est préférable d'avoir fait également observer aux élèves que le Soleil se lève vers l'Est et se couche vers l'Ouest.

Par une belle matinée ensoleillée, nous voilà donc avec des élèves dans une classe. Pourquoi fait-il jour ? En était-il de même il y a 8 h ? Pourquoi cette succession de jour et de nuit ? Alors là on obtient plusieurs réponses que l'on peut regrouper en deux hypothèses : le Soleil se lève et se couche (la Terre est fixe), la Terre tourne.

Nous allons donc voir si ce que l'on observe peut être expliqué par ces hypothèses.

1. Le Soleil se lève et se couche.

Où se trouve le Soleil actuellement (les rais de lumière ou les ombres permettent de le situer) ? De quel côté s'est-il levé ? Se lève-t-il vers l'Est ou vers l'Ouest ? Sur un mur de la pièce, dans la direction indiquée, on peut coller un carton portant "EST". Où va-t-il se coucher ? On place de la même manière le carton "OUEST". (À ce niveau, nous laissons de côté le fait que le Soleil ne se lève que rarement à l'Est et se couche rarement à l'Ouest). Les leçons précédentes permettent de placer le "NORD" et le "SUD".

Mise en situation.

Maintenant que nous nous sommes orientés, (nous avons trouvé la direction approximative de l'orient), nous allons faire un exercice difficile : nous éloigner de la Terre (qui nous paraît plate) pour voir notre classe de l'extérieur, de très loin.

En s'éloignant on voit l'école, le village ou la ville, le pays, l'Europe, la Terre. L'enseignant présente alors un globe terrestre (sans pied). Où se trouve l'Europe ? La France ? Le pôle Nord ?

Un support ayant été préparé (tabouret et bol, de manière à maintenir le globe stable), l'enseignant demande à un élève de déposer le globe en respectant les points cardinaux définis dans la salle. (Il y a une infinité de solutions, l'important est que le nord du globe soit vers le "NORD" de la salle.

Il présente alors un petit personnage fixé sur une feuille de carton qui représente l'horizon (le sol de la classe) sur lequel sont portés : Est, Ouest, Nord, Sud. Ce personnage va représenter un élève de la classe. L'enseignant demande alors à un volontaire de coller (patafix) ce personnage, sur le globe, en France et de façon à ce que son "sol" soit horizontal (il n'y a plus qu'une possibilité).



Expérimentons.

L'enseignant présente le "soleil" : un lampadaire avec une lampe boule blanche. Il demande alors à un "tenant du lever et coucher du Soleil" de montrer à ses camarades que son hypothèse est bonne : qu'il peut à l'aide de la lampe simuler le jour (le personnage est éclairé) ou la nuit (il ne l'est plus). L'élève doit placer la lampe au-dessus ou au-dessous de l'horizon. Insister sur le fait que lorsque le "soleil" est sous l'horizon, le personnage n'est pas éclairé, il fait nuit et inversement. Puis de simuler une succession de jours et de nuits, il doit alors faire tourner la lampe autour du globe. Le plus simple est de placer l'élève du côté du pôle Nord.



Il faut alors faire constater ou mieux exprimer le fait que le "soleil" se lève, il fait jour, le "soleil" monte sur l'horizon (on peut reparler de la culmination), puis descend et se couche, il fait nuit.

Poser également la question : est-ce que le "soleil" tourne dans le bon sens, Est-ce que le personnage observe la même chose que nous ? Le Soleil se lève vers l'Est et se couche vers l'Ouest ? Même si l'élève le fait tourner dans le mauvais sens au début cela n'est pas grave, on peut alors corriger.

Conclusion

L'hypothèse selon laquelle la succession des jours et des nuits peut s'expliquer par un Soleil se déplaçant autour de la terre semble convaincante.

2. La Terre tourne.

Il faut maintenant donner la parole aux tenants de la rotation de la Terre.

Mise en situation.

Le matériel est le même : le globe terrestre sur lequel un personnage et son horizon sont fixés au lieu d'observation et le lampadaire.

Il faut trouver un volontaire. Parfois l'équipe de la rotation de la Terre se défile et oui, l'autre hypothèse "marche", ils doivent avoir tort et ils n'osent plus.

Leur demander si le Soleil est fixe. (il est préférable de le placer au Sud).

Expérimentons.

Un volontaire prend alors le globe en mains et essaie de vérifier son hypothèse : le personnage peut être éclairé (jour) ou non (nuit). Faire simuler ces deux situations. Cela permet de bien assimiler (certains sont plus lents et la répétition fixe la notion).

Puis simuler une succession de jours et de nuits.

Des élèves ont parlé de la Terre qui tourne. Comment tourne-t-elle ? C'est le moment de parler de la Polaire. Elle indique toujours le Nord,

elle se trouve dans le prolongement de l'axe passant par le pôle Nord. En général les élèves ont déjà vu un globe tourner autour de cet axe.

En faisant tourner la Terre autour de cet axe, l'élève va simuler pour le personnage une succession de jours et de nuits.



Il ne reste plus qu'à vérifier si le sens de rotation est bon : le "soleil" doit se lever vers l'Est.

Ceci permet d'avoir le sens de rotation de la Terre, sans l'imposer aux élèves.

Conclusion

Là encore, l'hypothèse selon laquelle la succession des jours et des nuits peut s'expliquer par la Terre tournant sur elle-même semble convaincante.

Commentaire

Mais alors qui a raison ? Les élèves sont troublés. Je crois qu'il est bon de revenir sur l'aspect historique, car ce que nous venons de voir ne permet pas de trancher. Leur dire que pendant deux mille ans les hommes ont pensé que le Soleil tournait autour de la Terre. Que pour expliquer ce qu'ils observaient, ils avaient dû inventer des systèmes bien compliqués. Dans le cas d'une Terre immobile, il faut que le Soleil, toutes les planètes et toutes les étoiles fassent un tour autour de la Terre en 24 h. Alors que l'on peut observer la même chose si la Terre tourne sur elle-même en 24 h, ce qui paraît plus simple (mais c'est équivalent, voir les deux dispositifs page 23). Il a fallu attendre le 19^e siècle pour avoir des expériences montrant la rotation de la Terre.

En général les élèves savent que le Soleil est beaucoup plus gros que la Terre. Il suffit à l'enseignant de valser avec l'élève le plus petit, en demandant à celui-ci de faire tourner son maître (ou maîtresse) autour de lui. Très rapidement c'est l'inverse qui se produit. Ce n'est pas une preuve, mais les élèves auront retenu que le petit tourne autour du gros.

ARTICLE DE FOND

La Terre tourne-t-elle encore rond ?

Forme, rotation et structure de la Terre

Christian Larcher, Le Perreux, larcher2@wanadoo.fr

Introduction

Les mouvements principaux de la Terre, sa rotation sur elle-même et sa révolution autour du Soleil présentent une grande importance pour tous les êtres vivants à sa surface. Ces mouvements sont en effet à l'origine des saisons et à l'origine du concept de temps avec les unités de base que sont le jour et l'année. Dans les dernières décennies, l'utilisation de méthodes extrêmement précises ont mis en évidence des irrégularités de mouvement, particulièrement pour la rotation de la Terre. L'étude fine de ces irrégularités est précieuse car elles véhiculent de nombreuses informations sur la structure interne de notre globe.

Nous allons ici rappeler l'histoire de la découverte progressive de la forme de notre planète, des irrégularités de sa rotation sur elle-même et les explications proposées pour en rendre compte. Nous détaillerons dans un prochain article les liens entre ces mouvements et la structure interne de la Terre.

La forme de la Terre

1. Une Terre sphérique ?

L'idée d'une Terre sphérique apparaît avec Parménide (515-450 av JC) sur des critères plus esthétiques que rationnels. La mesure de son rayon fut établie plus tard en utilisant la célèbre méthode inventée par Ératosthène (284-192 av JC).

Il faut attendre le XVII^e siècle pour obtenir des mesures plus précises. Elles sont dues surtout à l'abbé Picard (1620-1682) qui, en utilisant une méthode de triangulation géodésique, évalue la longueur d'un degré de méridien à 57 060 toises soit environ 111 km.

2 Tomate ou citron ?

A la fin du XVII^e siècle plusieurs physiciens se demandent si la Terre est vraiment sphérique. **Huygens** (1629-1695) découvre l'existence de la force centrifuge qui résulte de la rotation terrestre. Cette force est nulle aux pôles et maximale à l'équateur ; elle agit différemment suivant la latitude. Ne peut-elle pas avoir un effet sur la forme de la Terre ?

En 1687, Isaac Newton pense que si la Terre ne tournait pas sur elle-même, elle serait parfaitement sphérique à *cause de l'égalité de ses parties*. Mais du fait de sa rotation, elle a une forme ellipsoïdale. Newton ajoute que ceci impose que la Terre solide ait été fluide à un moment donné de son histoire.

Newton cherche à calculer l'aplatissement de la Terre en la supposant fluide et homogène et en utilisant sa théorie de l'attraction universelle en $1/r^2$. Pour effectuer ce calcul, il considère que deux colonnes fluides partant l'une du pôle et l'autre de l'équateur et se rejoignant au centre de la Terre doivent se faire équilibre. Il est amené pour cela à calculer l'attraction au pôle et à l'équateur d'un ellipsoïde de révolution, c'est la première fois que l'attraction d'un corps non-sphérique est calculée. Il trouve avec son modèle un aplatissement de $1/230$.

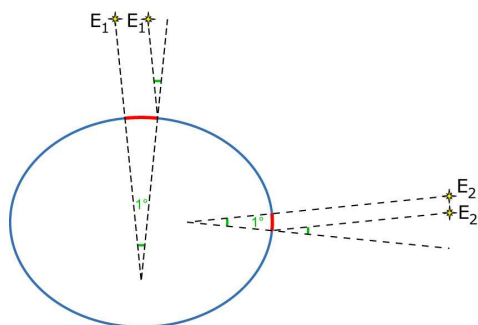
De son côté, en France, J.D.Cassini (Cassini II) poursuit les travaux de Picard. Les résultats de ses mesures le conduisent à estimer que pour une différence de 1° de latitude, mesuré à l'aide des étoiles sur le méridien, on obtient dans le Sud de la France une **portion de méridien plus grande que dans le nord**. Il en conclut que la Terre doit être allongée selon la ligne des pôles.

En d'autres termes pour J.D. Cassini la Terre doit ressembler à un citron. Tandis que, pour les théoriciens comme Huygens et surtout Newton, elle serait plutôt aplatie aux pôles c'est à dire qu'elle aurait plutôt la forme d'une tomate.

Pour trancher le débat entre les "newtoniens" et les "cassiniens", l'Académie des Sciences décide d'envoyer deux expéditions l'une vers le pôle nord et l'autre vers l'équateur. Celle qui part vers le nord effectue des mesures en Laponie en 1736 et 1737, elle comprend entre autres Maupertuis (1701-1774) et A. Clairaut (1713-1765). Elle revient rapidement avec des résultats non équivoques : un arc d'un degré de méridien **est plus long près du pôle nord** qu'en France.

Les verticales sont les normales (perpendiculaires) à l'ellipse et ne concourent pas au centre de la Terre. La longueur d'un arc d'ellipse de faible amplitude est sensiblement égale à celle de l'arc

de cercle dont le centre est le centre de courbure de l'arc.



"Si donc la surface de la Terre est inégalement courbe dans différentes régions, pour trouver la même différence de hauteur dans une étoile, il faudra, dans ces différentes régions, parcourir des arcs inégaux du méridien de la Terre; et ces arcs dont l'amplitude sera toujours d'un degré, seront plus longs là où la Terre sera plus plate. Si la Terre est aplatie vers les pôles, un degré du méridien terrestre sera plus long, vers les pôles que vers l'équateur ; et l'on pourra juger ainsi de la figure de la Terre, en comparant ses différents degrés les uns avec les autres." Maupertuis, 1738 ; le voyage en Laponie

L'autre expédition va vers l'équateur, au Pérou, de 1735 à 1744 elle comprend en particulier La Condamine (1701-1774). Cette équipe rencontre de multiples difficultés dans les Andes et ne reviendra que bien plus tard... (voir le roman "Le procès des étoiles" de Florence Trystam)

En définitive la thèse de Newton se trouve confirmée : la Terre est aplatie aux pôles. Voltaire commente cet événement en quelques vers : "Vous avez confirmé dans ces lieux plein d'ennui Ce que Newton connut sans sortir de chez lui" (4^e discours sur l'homme : de la Modération).

Ce fait étant établi, la différence de rayon entre équateur et pôle est de 22 km, il reste à l'expliquer. De plus, la Terre a-t-elle exactement la même figure que celle que prendrait une masse fluide ? La réponse est importante pour déterminer (le croit-on à l'époque) les conditions qui régnaient à l'origine de la Terre.

A. Clairaut (1713-1765) imagine avec d'autres physiciens que la Terre a probablement connu une période fluide et qu'il convient d'appliquer les lois de l'hydrostatique. Il écrit, dans *Théorie de la figure de la Terre, tirée des principes de l'hydrostatique*, 1743 ; 2^{de} éd. Paris, Courcier, 1808, p. vii. : "...que la figure de la Terre doit dépendre des lois de l'hydrostatique, et que les opérations faites pour la mesurer doivent donner à peu près les mêmes résultats que si on les faisait sur une

masse d'eau qui se serait durcie après avoir pris la figure que demande l'équilibre". Il indique que l'aplatissement de la Terre ne dépend pas seulement de sa vitesse de rotation mais également de la répartition interne des masses.

Par ailleurs, A. Clairaut est l'un des premiers à penser que les petites variations de période d'un pendule simple en différents points de la Terre peuvent donner des informations sur son aplatissement. Il donne ainsi naissance à la "géodésie dynamique".

3 De la forme réelle à sa modélisation

Au début du XIX^e siècle on distingue la surface réelle de la Terre ou surface topographique, (celle sur laquelle nous nous déplaçons) et la surface théorique définie de telle sorte qu'en tout point de cette surface le champ de pesanteur lui soit orthogonal tout en restant proche de la surface topographique. Cette surface est définie comme si la Terre était entièrement fluide. Dans le langage moderne on dirait qu'il s'agit d'une surface équipotentielle. Par la suite elle prendra le nom de géoïde. Une telle approche à partir du champ de pesanteur concerne principalement les physiciens. Les mathématiciens, avec Gauss (1777-1873), choisissent une surface mathématique simple, un ellipsoïde de révolution, qui permet d'effectuer facilement des calculs tout en restant proche du géoïde par la forme et par les dimensions.

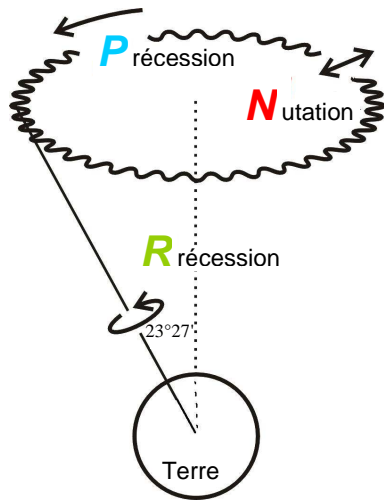
Les mouvements de notre planète

1. Les différents types de mouvement

Les mouvements de l'axe de rotation vus de l'extérieur de la Terre

Dès l'antiquité Hipparque de Nicée avait réussi à montrer que la Terre tourne comme une toupie. L'axe de rotation de la Terre décrit très lentement (par rapport aux étoiles) un cône de 23,5 ° en 25 770 ans autour d'un axe perpendiculaire à l'écliptique (voir figure). Cette faible variation représente environ 50 secondes d'arc par an ; elle explique le phénomène dit de *précession des équinoxes*. Actuellement l'axe de rotation de la Terre passe à moins de un degré de l'étoile polaire. Dans 13 000 ans, l'étoile Véga de la Lyre sera la nouvelle étoile Polaire. Ce mouvement de **précession** de l'axe de rotation a été expliqué par Newton : il résulte de la forme ellipsoïdale de la Terre. L'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil crée un couple de forces sur le bourrelet équatorial de la Terre. Ce couple tend à faire basculer son axe de rotation pour l'aligner perpendiculairement à l'écliptique.

À ce mouvement de précession s'ajoute un mouvement dit de **nutaton**, prédit par Newton dans *Principia Mathematica* et découvert par Bradley en 1748. Il s'agit d'un mouvement



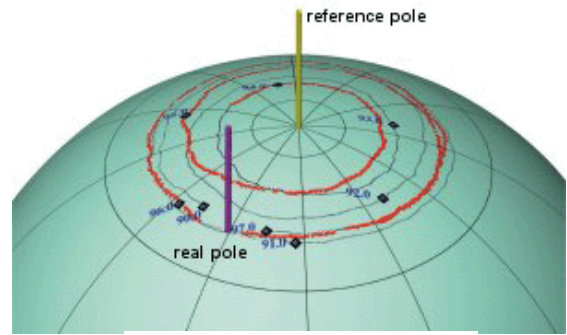
périodique de faible amplitude (9,21") et de période maximale 18,6 ans que subit l'axe de la Terre autour d'une position moyenne située sur le cône de précession. Elle est due à l'évolution de l'orbite de la Lune, perturbée par le Soleil, autour de la Terre ; l'action de la Lune vient légèrement perturber la précession en créant ces "vaguelettes".

D'autres mouvements de nutation, d'amplitude plus faible et de périodicité annuelle ou semi annuelle, ont été mis en évidence. Ils composent un mouvement global complexe, tant sur le plan de la trajectoire que de la vitesse, si on veut le suivre dans tous ses détails.

Le déplacement de l'axe de rotation par rapport à la Terre elle-même

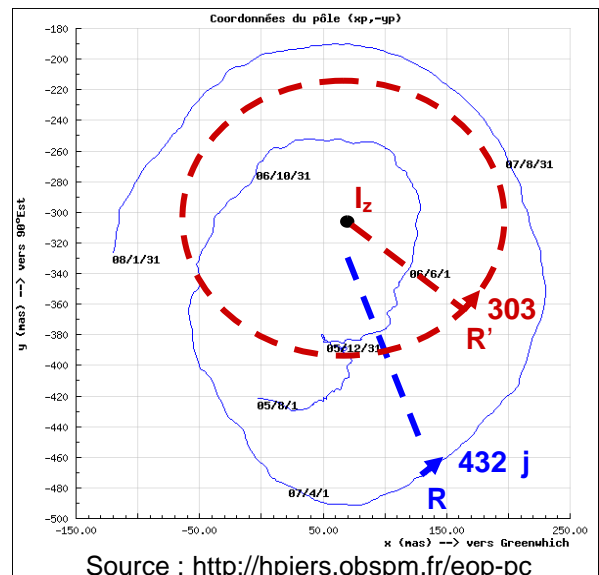
Avec un modèle d'ellipsoïde de révolution homogène solide, le grand mathématicien Euler (1707-1783) avait démontré que si l'axe de rotation de l'ellipsoïde n'est pas confondu avec son axe de symétrie, il est affecté d'un mouvement de précession autour de l'axe de symétrie. En appliquant son calcul à la Terre il évalue la période à 303 jours. La position du pôle devrait donc décrire un cercle autour d'une position fixe en dix mois environ.

L'astronome américain Seth Chandler (1846-1913) met en évidence un tel phénomène en 1891 : un mouvement du pôle ou **Polhodie** (littéralement en grec : chemin du pôle) à peu près circulaire et de période environ 432 jours, à comparer aux 303 jours prévus avec le modèle d'Euler.



Mouvement du pôle ; polhodie

Peu après un autre américain Simon Newcomb (1835-1909) montra que cet écart entre valeur prévue à partir du modèle ellipsoïdal rigide et la valeur mesurée résultait de la non rigidité de la Terre. A la même époque, en France, Henri Poincaré émettait lui aussi l'hypothèse que la Terre possédait un noyau fluide et que le noyau et le manteau terrestre ne tournaient pas exactement selon le même axe. Cette hypothèse n'a été



Source : <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>

— — Terre réelle - - - Terre rigide

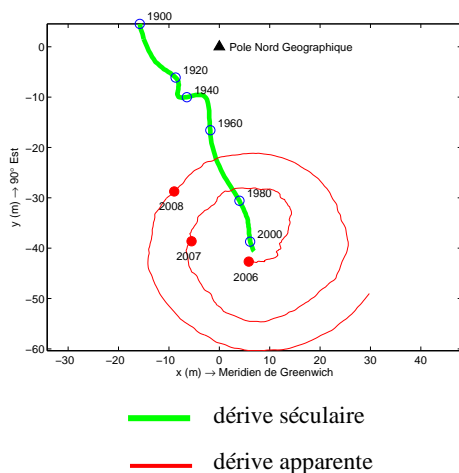
Mouvement du pôle : comparaison entre une Terre rigide et une terre "réelle"

validée que très récemment et a des effets sur la nutation de l'axe de rotation. Nous reviendrons ultérieurement sur les multiples effets de la structure interne de la Terre.

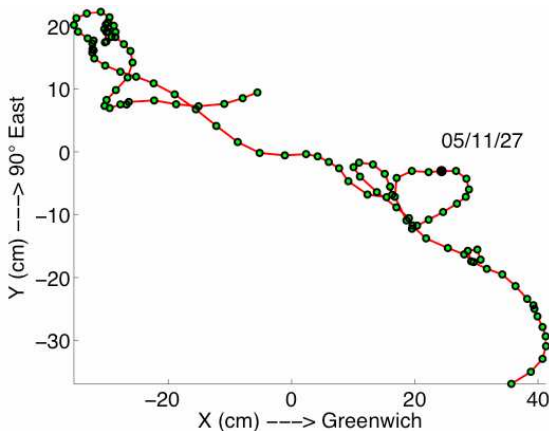
Actuellement, la trajectoire du pôle est connue à quelques millimètres près.

Elle se compose non seulement de l'oscillation découverte par Chandler (en rouge sur la figure) mais aussi d'une oscillation annuelle forcée et d'une dérive séculaire de la position moyenne du pôle (quelques centimètres par an en direction du Groenland avec une vitesse de 0,4 seconde d'arc par siècle), avec des mouvements irréguliers (en

vert sur la figure). Depuis l'année 1900, il s'est déplacé d'environ 50 m.



La trajectoire subit aussi des fluctuations à très court terme (ci-dessous en moins de 20 jours).



Variations rapides de la position du pôle pour de courtes durées (20 jours).

Actuellement la rotation de la Terre est définie comme "la rotation de la croûte terrestre ou lithosphère par rapport aux étoiles".

De nombreux paramètres liés à la structure de la Terre, tant en surface qu'à l'intérieur, interviennent pour perturber les mouvements calculables avec des modèles simples (ellipsoïde rigide ou fluide) : variation de la pression au fond des océans, fluctuation de la pression atmosphérique

et des vents, circulation atmosphérique saisonnière, mouvements de convection du manteau terrestre, fonte des calottes glaciaires, friction entre le manteau constitué d'un solide (non rigide) et le noyau terrestre (liquide), entre le noyau et la graine (solide)... que nous détaillerons dans un prochain article.

2. Implications sur la durée du jour

La dynamique de la rotation de la Terre implique des mouvements de son axe mais aussi des fluctuations de la vitesse de rotation autour de cet axe. Christian Bizouard, astronome à l'Observatoire de Paris, indique que ces fluctuations de vitesse ne furent décelées que vers 1930 et que jusque là la rotation diurne assurait *la fonction d'horloge sans défaut*. Jusqu'en 1972, l'échelle de temps reposa sur la **succession des jours solaires moyens**.

On sait depuis longtemps que la Terre ralentit et que la durée du jour augmente de 2 ms par siècle, phénomène dû à la friction entre les océans et la croûte terrestre, qui dissipe de l'énergie. Depuis peu, on a observé des irrégularités grâce aux horloges atomiques. Ces irrégularités ont des périodes variables suivant qu'elles sont dues à la fonte des glaciers ou aux mouvements saisonniers de l'atmosphère terrestre, ou encore au noyau terrestre.

Je remercie particulièrement Christian Bizouard, astronome à l'Observatoire de Paris au Service International de la Rotation de la Terre (IERS), pour ses explications et pour la documentation fournie qui sert à illustrer cet article.

Sources :

Etienne Ghys, CNRS/ENS Lyon : "La forme de la Terre : un problème mathématique"

<http://planet-terre.ens->

[lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-forme-terre-Ghys_conf.xml](http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-forme-terre-Ghys_conf.xml)

Greff-Lefftz, Marianne. (2004). *La Terre, une toupie au cœur liquide*, Pour la Science, 318, 58-63.

Rotation d'un œuf cru et d'un œuf dur

Pour percevoir la différence entre la rotation d'un corps solide et d'un corps qui contient une partie fluide, on peut faire une petite expérience : prendre un œuf cru et un œuf dur, chacun d'eux posé sur une assiette.

Puis les faire tourner comme une toupie et observer la différence !