

Le Soleil

Primaire et collège

Résumé

Nous pouvons manipuler les objets terrestres, fondre la glace ou brûler le bois, réfléchir la lumière ou souffler l'air ; pourtant, dans le ciel, d'autres objets semblent inaccessibles à toute expérimentation : la Lune, les étoiles filantes ou fixes, les planètes qui se meuvent parmi les constellations fixes. Malgré cela, est-il possible de connaître ces objets ? Que nous disent donc du Soleil l'observation attentive et l'expérience sensible, lesquelles interpellent notre désir de comprendre et notre réflexion ?

le Soleil

Pierre Léna

Un curieux objet

Nous pouvons manipuler les objets terrestres, fondre la glace ou brûler le bois, réfléchir la LUMIÈRE ou souffler l'air ; pourtant, dans le ciel, d'autres objets semblent inaccessibles à toute expérimentation : la Lune, les étoiles filantes ou fixes, les PLANÈTES qui se meuvent parmi les CONSTELLATIONS fixes. Malgré cela, est-il possible de connaître ces objets ?

De tous ces astres observés à l'œil nu, seuls le Soleil et la Lune (ainsi que les



La Création du Soleil (vitrail, 1525, Saint-Florentin, Yonne)
© J.-P. Dumontier

fugitives comètes) apparaissent comme des surfaces étendues, non comme des points lumineux. La Lune n'intrigue guère : les détails immuables de son sol ne sont pas sans rappeler ceux de la Terre, les ombres de ses montagnes, les longues traînées de ses cratères en font un sol lointain sans doute, mais familier. Rien de tel pour le Soleil, si différent de tout ce que nous connaissons ! Que nous disent donc du Soleil l'observation attentive et l'expérience sensible, lesquelles interpellent notre désir de comprendre et notre réflexion ?

Mouvement

Le Soleil se déplace par rapport à nous, du matin au soir. De même, au fil de l'année et du parcours de la Terre sur son orbite, le Soleil se projette sur la voûte étoilée dans des directions différentes, vers telle ou telle constellation, parcourant ainsi le zodiaque, cette zone du ciel « qui concerne les constellations d'animaux » (selon l'origine grecque du mot).

En plein jour, il n'est pas possible de voir les constellations dans la direction desquelles se trouve le Soleil, trop éblouissant : tout au plus peut-on observer peu après son coucher celles dont il est proche, et constater qu'elles changent lentement et régulièrement au cours de l'année. En revanche, lors d'une ÉCLIPSE totale de Soleil, on peut voir directement

les étoiles proches de la direction solaire et identifier la constellation dans laquelle se trouve alors celui-ci.

Il y a donc mouvement relatif entre la Terre et le Soleil, sans que l'on puisse *a priori* déterminer si l'une bouge et l'autre est immobile, ou l'inverse, ou encore si les deux se déplacent. Mais parce que notre expérience nous refuse l'idée de mouvement si nous n'en n'avons pas la sensation, nous « voulons » absolument que la Terre soit fixe et le Soleil mobile. Et que signifie « immobile » ? Ce Soleil semble « flotter » dans l'espace, apparemment à distance constante de la Terre, accroché à quelque « voûte céleste » (comme le pensaient les Anciens), lié à la Terre par quelque invisible force (comme nous l'exprimons aujourd'hui).

Forme

Comme la Lune et à la différence des étoiles ou des planètes vues à l'œil nu, le Soleil sous-tend un angle significatif, qu'on appelle son DIAMÈTRE APPARENT : un demi-degré ou 30 minutes d'angle, soit la largeur du pouce (environ 1 cm) tenu à bout de bras (environ 1 m).

Nous exprimerons volontiers les angles en RADIANS (abrégé en rd), unité plus commode que les degrés, minutes et secondes d'angle. $180^\circ = \pi \text{ rd} = 3,14 \text{ rd}$. Un angle, dans le cas où sa valeur est très inférieure à 90° et dans ce cas seulement, s'exprimera alors comme le rapport de deux longueurs, ici la largeur du pouce (environ 1 cm) et la longueur du bras (environ 1 m), soit : diamètre angulaire

du Soleil = $1/100 = 0,01 \text{ rd}$. Le Soleil (ou la Lune) pourraient avoir un diamètre de 10 km et être situés à 1 000 km, ou de 1 million de km et être situés à cent millions de km, etc. Cet angle ne nous renseigne en rien sur la distance de l'astre : celui-ci pourrait être énorme et très lointain, ou plus petit et bien plus proche. Enfin, est-ce une sphère ou bien un disque dont nous voyons ainsi la forme ?

Éclat

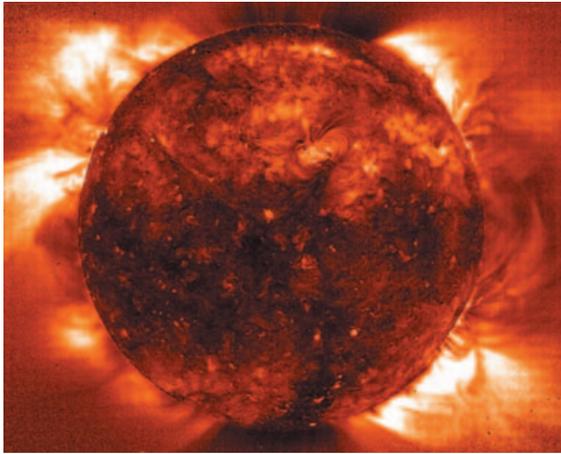
Le plus stupéfiant est cet éclat intense, plus intense que celui d'un brasier terrestre. Mille questions surgissent à ce propos : est-ce une boule de feu, et si oui, quel en serait le combustible, pourquoi un aussi stable éclat, apparemment inusable, au fil des siècles et des millénaires ? et quelle serait la TEMPÉRATURE de ce feu ? Sa lumière, si blanche pour l'œil, transporte à coup sûr l'ÉNERGIE qui inonde la Terre, nous chauffe et permet la vie végétale : d'où vient-elle ?

Matière

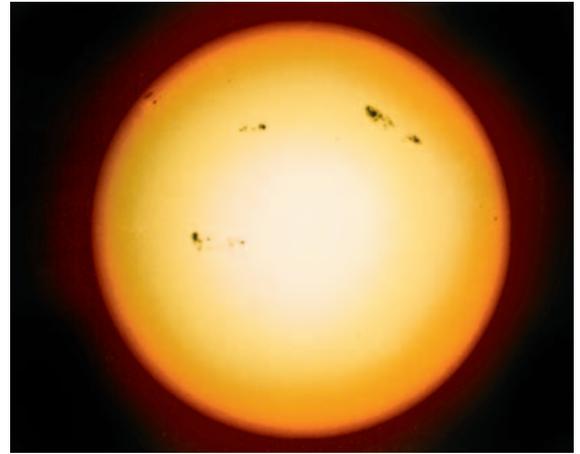
Quelle est la matière dont est faite cette boule ? Faute d'y accéder et de façon arbitraire, on la qualifia longtemps d'« éthérée », c'est-à-dire incomparable à la matière terrestre, comme le seraient les ailes des archanges ou la robe de Cendrillon ! Autant dire un aveu d'impuissance totale. Pourtant, à bien la regarder, on y discerne parfois des taches. Les anciens Chinois avaient su les distinguer à l'œil nu, lorsque l'éblouissement solaire était atténué par des brumes épaisses. Galilée, le premier en Occident à en consigner l'exis-



Une chambre noire est une boîte parallélépipédique étanche à la lumière, dont la face avant est percée d'un petit trou et la face arrière, distante de quelques dizaines de centimètres, remplacée par un papier calque. Une sorte d'« image » des objets lumineux (Soleil, paysage) illuminant le trou vient se former, à l'envers, sur le calque. La chambre noire permet une observation simple, sans danger et peu coûteuse, de la surface du Soleil et de ses taches éventuelles.



Le Soleil vu en rayons X ; ici seules les régions extrêmement chaudes de la couronne (million de degrés) émettent de la lumière. Satellite SOHO © J.P. Delaboudinière et Consortium EIT



Le Soleil tel qu'il nous apparaît à l'œil nu, avec son bord nu et ses taches. © NOAO/NSO

tence, les vit aussi dès qu'il pointa sa lunette sur le Soleil. La plus simple des « chambres noires » permet par projection de les visualiser sur un écran.

Le Soleil n'est donc pas aussi immuable qu'il y paraît.

Surface

Le bord du disque solaire est étonnamment net, aussi net que celui du disque lunaire : pourtant, si la température du Soleil est très élevée, comment la matière n'y serait-elle pas vaporisée et gazeuse ? Un gaz ne se définit-il pas comme occupant tout l'espace libre, ce qu'à l'évidence ne fait pas le Soleil. En outre, une boule de gaz ne doit-elle pas présenter un contour flou et dégradé, à l'opposé de celui d'un corps solide ? Encore une question à élucider, d'autant plus que lors d'une éclipse totale de Soleil, un voile ténu et dégradé (la couronne), telle une atmosphère changeante, enveloppe alors le Soleil.

Actions sur la Terre

Qu'il soit proche ou lointain, le Soleil agit sur la Terre. Sa lumière transporte l'énergie qui modèle les climats. Elle est source

de vie par son action sur les végétaux (la PHOTOSYNTHESE).

Depuis bien longtemps, les marées sont connues pour résulter de forces exercées par la Lune et le Soleil sur l'eau des océans, puisqu'on nota très vite que leur intensité dépend de la position relative de ces deux astres par rapport à la Terre (alignés ou bien situés dans deux directions perpendiculaires). Quelle est cette force qui chemine dans l'espace séparant le Soleil de la Terre et qui meut l'eau des océans ?

La distance du Soleil

Aristarque de Samos (v. 310-v. 230 avant J.-C.) fut un génial astronome grec dont on a conservé le traité *Sur les dimensions et distances du Soleil et de la Lune*. Son raisonnement est le suivant : lorsque la Lune est exactement à son premier quartier, c'est-à-dire que le terminateur (ligne séparant la partie éclairée de celle située dans l'ombre) coupe rigoureusement en deux parts égales le disque lunaire vu de la Terre, l'angle L est rigoureusement droit. Si le Soleil est à une distance TS non infinie, alors l'angle S

n'est pas nul, ni l'angle T droit : la mesure de T, et donc celle de S (les deux angles sont complémentaires) donnera le rapport entre les distances de la Terre au Soleil (TS) et à la Lune (TL), par simple construction géométrique du triangle rectangle TSL.

Cette observation ne mesure donc pas directement la distance de la Terre au Soleil (soit TS), mais seulement le rapport TS/TL. Historiquement, elle fut complétée ainsi : d'abord par la mesure, triviale, du diamètre apparent de la Lune, angle égal à $2R_L/TL$; puis par la mesure du rayon de la Terre R_T , que fera Ératosthène (v. 284-v. 192 avant J.-C.) un siècle après Aristarque. Enfin par la mesure du rapport (diamètre de la Lune $2R_L$ / diamètre de la Terre $2R_T$) obtenu à la même époque par l'observation d'une éclipse totale de Lune : à ce moment-là en effet, le disque lunaire traverse le cône d'ombre que projette la Terre. Le « nombre de diamètres apparents lunaires » contenus dans un diamètre de la section du cône permet d'estimer le rapport $2R_T/2R_L$.

À partir de ces mesures, celle d'Aristarque étant indiscutablement la plus difficile, on obtient donc finalement la distance du Soleil :

$$TS = (TS/TL)_{\text{mesuré}} \times (TL/2R_L)_{\text{mesuré}} \times (2R_L/2R_T)_{\text{mesuré}} \times (2R_T)_{\text{mesuré}}$$

Précisée depuis, la distance moyenne TS vaut 149 598 000 km (environ cent cin-

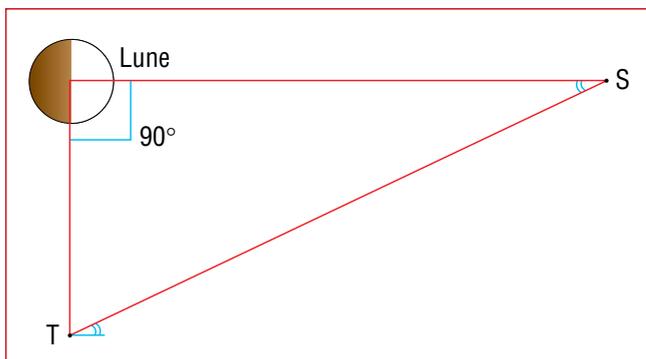
quante millions de km), elle est aussi appelée « unité astronomique », une unité de longueur commode aux distances « astronomiques » ! C'est une distance moyenne, car cette distance TS varie très légèrement au cours de l'année (à cause de la forme elliptique et non circulaire de l'orbite terrestre), tout comme la distance TL varie au cours du mois lunaire.

Nous aimons aussi qualifier cette distance par le temps que met la lumière à la parcourir, soit 500 secondes = 8,3 minutes à raison de 299 792 km/s (vitesse de la lumière, souvent arrondie à 300 000 km/s). Le « temps de lumière » est une autre unité commode pour évaluer les très grandes distances : un millionième de seconde pour l'orage proche, près d'une demi-seconde pour un échange téléphonique relayé par un satellite géostationnaire (durée aisément perceptible à l'oreille), un peu plus d'une seconde pour la Lune, et quelques dizaines d'années au minimum pour la lumière provenant des étoiles que nous voyons le soir dans le ciel.

La distance du Soleil à la Terre est le maillon capital de l'échelle qui permet, de proche en proche, d'asseoir les distances des autres planètes, puis celles des étoiles les plus proches par la mesure de leur parallaxe (la parallaxe est l'angle dont une étoile proche paraît se déplacer par rapport aux étoiles lointaines, lorsqu'à six mois d'intervalle la Terre occupe deux positions opposées de son orbite).

Étonnons-nous une fois encore de pouvoir, avec un modeste effort (une règle de trois) et la géométrie simple que maîtrise un élève de classe de quatrième, montrer que cet objet qui nous paraissait hors de toute atteinte, le

Géométrie du système Soleil – Terre – Lune
précisément au premier quartier.



Soleil, est à distance finie et rapporter celle-ci à la Lune ! Mais notons aussi que nous avons fait, sans le dire, une hypothèse assez rude : nous avons supposé que cette bonne géométrie (que l'on appelle « euclidienne », celle des triangles rectangles tracés sur une feuille de papier), à laquelle nous adhérons car elle fonctionne si bien pour construire des ponts ou des maisons, est toujours valable pour des triangles *construits par la pensée* dans ce grand espace lointain.

Il faudra attendre Henri Poincaré (1854-1912) et Albert Einstein (1879-1955) pour questionner cette évidence et la remettre en cause, heureusement sans que leurs conclusions n'affectent significativement les résultats de la mesure faite par Aristarque.

La lumière du Soleil

Cette belle lumière, blanche à l'œil, se compose d'une multitude de COULEURS allant



L'observation qui suit n'est pas facilement compréhensible par des enfants du primaire. Elle le sera sans difficulté entre collègues, avec des adolescents, lors d'un stage de formation ou d'un événement scientifique local. Elle est donnée ici à cause de sa beauté et de sa simplicité. Le récit qui en est fait, valeurs des mesures comprises, correspond à un authentique travail réalisé en quelques heures avec les professeurs des écoles qui ont participé à l'élaboration de cet ouvrage.

Nous nous sommes proposé de répéter la mesure d'Aristarque, si possible sans instruments modernes. Aristarque pouvait repérer avec une grande précision le mois lunaire et, comptant les heures tout au cours de ce mois, déterminer le moment exact du premier quartier (PQ) ou du dernier (DQ). Supposons pour le moment qu'il pouvait aussi apprécier à l'œil nu l'instant de l'exacte division du disque lunaire en deux parties, mais c'était sans doute plus difficile, même avec une très bonne vue et en répétant plusieurs fois la mesure au fil de l'année. Quant à nous, pour nous simplifier la tâche, nous avons choisi de nous fier à l'heure du PQ donnée par les éphémérides du calendrier ou du Bureau des Longitudes (<http://www.imcce.fr>), soit 11 h 46 TU (TU = temps universel ou temps du méridien zéro de Greenwich), 12 h 46 en heure locale d'hiver, sans appliquer la petite correction de longitude due à notre position dans le fuseau horaire.

Nous avons construit un instrument (baptisé du néologisme « apostashéliomètre », du grec *apostasis*, « distance », *helios*, « soleil », *metros*, « mesure », cette mesure étant une mesure d'angle et non de distance), formé d'une croix en bois soigneusement ajustée, aux bras A et B longs d'environ 2 m, chaque bras portant respectivement les lignes A_1A_2 et B_1B_2 tracées au crayon et perpendiculaires (la perpendicularité précise étant obtenue par la construction classique, au compas, d'une perpendiculaire à une droite). En A_1 , une carte porte un petit trou ; en A_2 , un écran E reçoit l'image (chambre noire) formée par le trou en A_1 , une ligne perpendiculaire à A_1A_2 , tracée finement sur cet écran, permet de matérialiser l'alignement A_1A_2 . En B_1 une seconde carte porte un trou et la position de B_2 est matérialisée par une aiguille I_0 plantée verticalement. La croix est orientable commodément en plantant dans le sol un piquet vertical époinché dont la pointe pénètre dans un logement évidé au centre de la croix, qui est ainsi en équilibre presque indifférent quelle que soit sa position.

Un premier observateur maintient A_1A_2 alignés avec le bord ouest du Soleil, dont il observe l'image sur l'écran E (attention au fait que l'image est renversée !). Un second observateur pointe alors l'autre bras de la croix sur la Lune, et va planter une aiguille I (à droite de I_0) donnant l'alignement du bord lunaire ouest avec le trou B_1 . Si la mesure a lieu à l'instant exact du PQ, il suffit alors de mesurer les longueurs I_0I et B_1B_2 (en cm) pour connaître l'angle cherché.

Les triangles LST et I_0B_1I sont rectangles semblables, donc : $TS/TL = B_1B_2/I_0I$ et nous avons établi le rapport recherché des distances de la Terre au Soleil et à la Lune.

Il n'est pas toujours possible de faire cette observation exactement à l'instant du PQ. Décrivons donc une circonstance plus réelle de mesure menée à son terme : au jour choisi pour celle-ci, l'instant du PQ

(11 h 46 TU le 28-10-1998) tombait presque au moment du lever de la Lune, rendant difficile le pointage de celle-ci, trop proche encore de l'horizon. La mesure eut donc lieu 2 h 47 plus tard et le bord lunaire ouest fut aligné sur une aiguille l', située maintenant à gauche de l₀. Puisque la distance angulaire entre Soleil et Lune ne cesse d'augmenter en allant du PQ vers la pleine Lune, une correction s'imposait. On sait (et Aristarque le savait aussi !) que le mois lunaire (dit « synodique », c'est-à-dire de nouvelle lune à nouvelle lune) dure 29,5 jours, soit 708 heures pour parcourir 360°. L'angle de correction à appliquer pour notre retard forcé s'en déduit par une simple règle de trois, soit $a = 360 \times (2,76/708) = 1,4$ degrés (84 minutes d'angle) = 0,0245 radians. La position qu'aurait occupé l est alors donnée par : $|l| = |l'| - l'_0 = a \times B_1 B_2 - l'_0$. Nous avons mesuré $l'_0 = 4,4$ cm et $B_1 B_2 = 200$ cm.

Donc $l_0 = 0,0245 \times 200 - 4,4 = 0,50$ cm

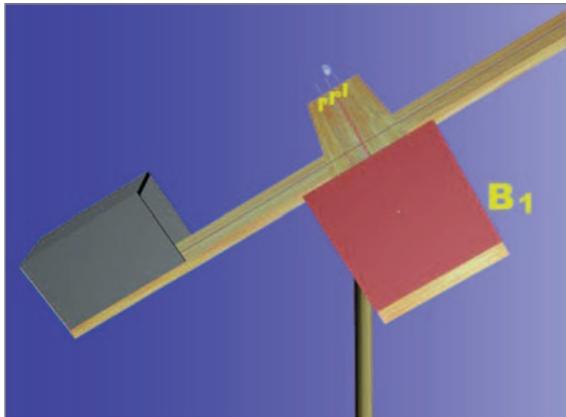
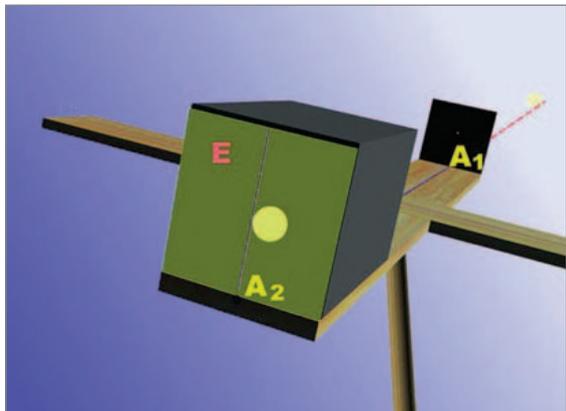
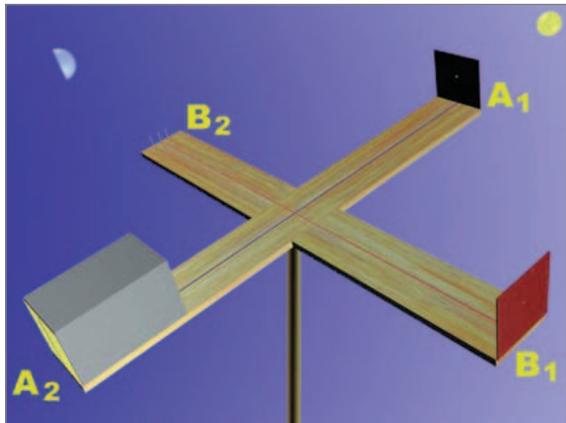
Le rapport recherché vaut donc :

$TS/TL = B_1 B_2 / l_0 = 200 / 0,50 = 400$

alors que la valeur exacte, adoptant $TL = 390\ 000$ km pour la distance moyenne de la Lune et $TS = 150$ millions de km, est de 385. Notre résultat est somme toute honorable ! Pour qu'il soit véritablement significatif (et non le fruit d'un coup de chance), il faudrait analyser en détail les causes d'erreur possibles, et nous conclurions sans doute à une précision relative de l'ordre de 20 %.

L'essentiel tient en trois points : a) nous avons montré que le Soleil, tout éloigné qu'il apparaisse, n'est pas à une distance infinie ; b) nous avons montré qu'avec un appareillage vraiment rudimentaire, sans télescope mais avec la puissance du raisonnement géométrique, la mesure de cette distance était à notre portée, en reproduisant simplement la formidable et simple audace d'Aristarque, confiant dans la raison humaine et dans le fait que le monde pouvait se plier à la géométrie ! c) tout ceci repose néanmoins sur une hypothèse que nous n'avons pas prouvée : cette GÉOMÉTRIE EUCLIDIENNE, construite sur la feuille de papier et vérifiée dans l'espace qui nous est accessible, demeure applicable et valide à des échelles auxquelles nous ne pouvons physiquement nous rendre.

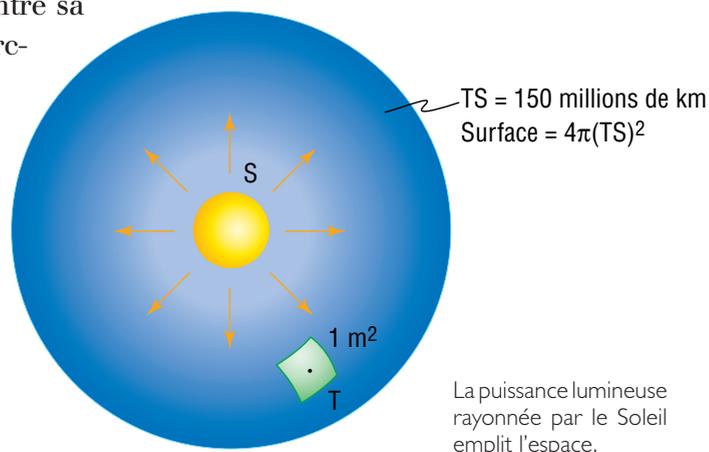
Nous devons maintenant revenir sur un point délicat. Sans télescope, sans éphémérides précis, Aristarque était-il vraiment capable de déterminer l'instant précis du premier quartier (PQ), décisif pour la mesure ? Hélas ! il nous faut répondre par la négative. La précision d'un œil, même très exercé, était et demeure insuffisante, et une erreur de quelques dizaines de minutes, indécélable, aurait conduit à un rapport TS/TL tout à fait erroné, voire absurde. Aristarque a eu de la chance, ce qui n'ôte rien au génie de sa méthode...



L'apostashéliomètre © Bernard-Yves Cochain

du violacé au rouge, comme le montre sa dispersion par les gouttes d'eau de l'arc-en-ciel, par l'arête prismatique d'un porte-couteau en verre ou par la surface finement rayée d'un disque compact (CD). William Herschel (1738-1822) eut la curiosité de déplacer un thermomètre dans le SPECTRE solaire (étalement de la lumière blanche que produit un prisme en verre). Il constata que l'élévation de température, manifeste lorsque, du bleu au rouge, le réservoir du thermomètre était éclairé, se poursuivait au-delà du rouge : il en déduisit qu'il existe dans la lumière solaire des radiations invisibles à notre œil, porteuses pourtant d'une énergie susceptible d'échauffer le thermomètre. Il baptisa celles-ci du nom d'« infrarouges ». Depuis, bien d'autres radiations semblables furent découvertes, toutes émises par le Soleil : rayons γ (gamma) et X, ultraviolets, ONDES radio, toutes ondes de lumière qui ne diffèrent que par l'énergie qu'elles transportent et ne sont pas perçues par l'œil.

Lorsque nous achetons une ampoule électrique chez le quincaillier, nous pouvons lire l'indication de sa PUISSANCE, 100 watts par exemple, gravée sur son culot. Quelle est donc la puissance lumineuse que le Soleil déverse dans l'espace, sous la forme de toutes ces lumières visibles ou invisibles ? Pour l'estimer, il suffit de mesurer la puissance reçue par une surface donnée, valant par exemple 1 m^2 : imaginons une serviette étendue sur une plage au tropique, où le Soleil est à la verticale et l'atmosphère transparente. Cette puissance vaut un peu plus d'un kilowatt (en gros donc, ce que rayonnent dans l'infrarouge la semelle d'un fer à repasser ou encore dans les micro-ondes un four à pleine puissance). Faisant alors très simplement le produit de cette puissance



par la surface de la sphère de rayon TS , nous déterminons la puissance totale que l'astre émet dans l'espace : elle est égale à 4×10^{26} watts, soit la production d'environ 40 millions de milliards de centrales nucléaires (puissance d'une centrale = environ 10 Gigawatts = 10^{10} watts). Voilà l'étiquette que devrait porter le Soleil pour caractériser sa puissance lumineuse !

La température de la surface du Soleil

Il est aisé de se convaincre qu'il est impossible d'aller placer un thermomètre à la surface du Soleil : il nous faut trouver un autre moyen d'estimer sa température. Le foyer « radiant » d'une cuisinière en vitrocéramique nous met sur la voie : la couleur de la résistance chauffante qu'il contient passe en effet du rouge sombre au blanc éclatant lorsque augmente le courant qui la traverse ; simultanément, la CHALEUR fournie (« rayonnée ») augmente. Si la présence de la surface de vitrocéramique, rouge par transparence, gêne un peu l'appréciation des couleurs, d'autres observations sont disponibles : à défaut d'un maréchal-ferrant dans sa forge (ils se font rares !) qui, en le chauffant, porte un fer au rouge, sombre d'abord puis cerise, vif, puis

blanc, la couleur de la résistance du grille-pain nous convainc aussi de cette relation entre couleur et température. La lumière est infrarouge d'abord, puis rouge, de plus en plus riche en vert, en bleu ensuite (ce qui, pour ce que perçoit l'œil, se traduit par la sensation de blanc résultant du mélange des couleurs).

Ainsi, deux faits d'expérience émergent-ils lorsque la température d'un corps augmente : d'une part ce corps émet une puissance lumineuse croissante ; d'autre part cette lumière émise, qui ne contient que de l'infrarouge à basse température, s'enrichit en rayonnements rouge, puis bleu, etc. (et même en ultraviolets, en rayons X lorsque la température atteint plusieurs millions de degrés) à proportion de la température croissante (en termes plus savants, la lumière émise par un corps contient des LONGUEURS D'ONDE de plus en plus courtes en proportion inverse de la température de ce corps).

Cette loi universelle du rayonnement lumineux émis par un corps fut énoncée par Max Planck en 1900 et elle offrit la clé de la mesure de la température du Soleil, des étoiles ou autres corps célestes. Par elle se trouvent reliées deux notions en apparence bien distinctes : la température d'un corps, qui mesure l'agitation microscopique et désordonnée de ses MOLÉCULES ou ATOMES, et la couleur de la lumière que ce corps

émet du fait même de cette agitation et des innombrables chocs ou échanges d'énergie qu'elle provoque entre ces particules.

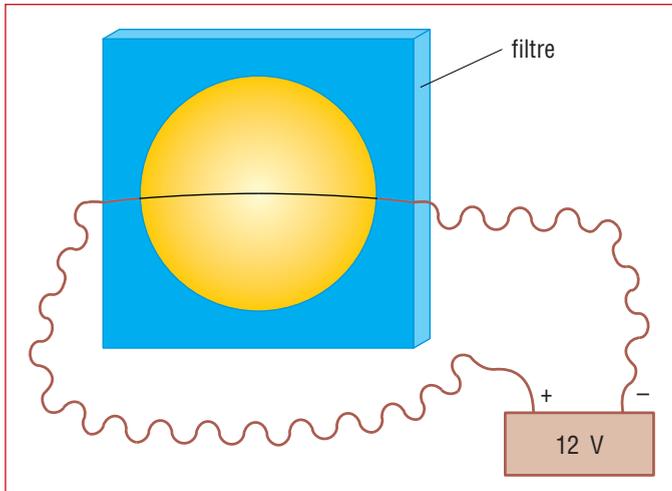
La lumière est émise par les atomes d'un corps (gaz, liquide ou solide) lorsqu'ils s'agitent ou entrent en collision les uns avec les autres, échangeant alors de l'énergie entre eux ou la cédant à la lumière qui l'emporte en s'enfuyant. Si le corps reste en place, la lumière, elle, chemine et va porter bien loin dans l'espace l'information sur la température de la source qui l'a émise.

Comment le Soleil se maintient-il ?

Un gaz, nous dit-on, est un état de la matière tel qu'elle emplit tout l'espace dont elle peut disposer. Si le Soleil est gazeux, pourquoi ne se répand-il pas à l'infini dans l'espace qui l'entoure, gardant au contraire cette forme de disque au bord si net ? À vrai dire, nous observons que notre atmosphère terrestre, bien que gazeuse elle aussi, ne s'épand pas non plus dans l'espace, et nous savons que c'est la force de GRAVITATION universelle qui, attirant vers notre Terre massive les molécules atmosphériques d'oxygène et d'azote aussi bien que le caillou lancé, maintient son atmosphère, cette mince pellicule protectrice et nourricière de la biosphère.



Chauffons un fin fil de cuivre (obtenu par exemple en dénudant et en détorsadant un fil électrique), en le portant au rouge vif avec une pile de poche, et regardons ce fil en contre-jour devant le Soleil (en prenant grand soin de faire cela avec un filtre atténuant assez la lumière du Soleil, sous peine de graves dommages ophtalmiques) : nous aurons la surprise de voir le fil, quoique lumineux, se détacher en noir sur le disque solaire (figure page suivante). Même si la température de notre fil atteignait le POINT DE FUSION du cuivre (1083 °C), l'effet subsisterait. Nous réalisons ainsi un appareil rudimentaire, appelé « pyromètre optique » (du grec *pyros*, « feu ») : c'est avec un tel appareil que le vulcanologue détermine à distance la température d'une lave en fusion ou le métallurgiste celle d'une coulée d'acier. La surface du Soleil est donc à une température plus élevée que celle atteinte par le fil. Une mesure plus fine la détermine égale à 6 000 °C environ. À cette température, aucun corps ne demeure solide ou liquide (sauf sous des pressions extrêmes) : il est donc vraisemblable que le Soleil soit une boule de matière très chaude à l'état gazeux.



La surface du Soleil a une température plus élevée que celle d'un fil porté au blanc.

dans l'air d'une pièce. Qu'un courant d'air surgisse ou que nous soufflions sur elle, nous la voyons se déformer, osciller périodiquement, prenant une forme tantôt oblongue, tantôt aplatie sous les effets contraires de la pression du gaz qu'elle contient (qui tendent à la faire éclater) et des forces de tension superficielle (ou capillarité) de la pellicule savonneuse qui la délimite (et tend à la ratatiner). Bien que les forces mises en jeu y soient différentes, cette comparaison avec

un phénomène plus familier nous permet de concevoir que le Soleil, lui aussi, peut osciller autour de son état d'équilibre sous l'effet des forces contraires de la pression du gaz et de la gravitation. Bien que minuscules, ces oscillations de tout le volume de la sphère solaire, excitées par les violents mouvements internes des gaz chauds, ont été détectées dès 1962 et fournissent aujourd'hui un puissant moyen d'étude de la constitution du Soleil (par exemple pour la détermination de la masse de son cœur, inaccessible à l'observation directe).

Le Soleil est en autogravitation : il « tient » par l'attraction gravitationnelle mutuelle qu'exercent entre elles les particules, atomes d'hydrogène et d'hélium, qui constituent l'essentiel de sa MASSE. On comprend alors que la pression de ce gaz – et donc sa densité – soit bien supérieure au centre du Soleil, sur lequel pèsent toutes les couches gazeuses externes, que dans les couches superficielles. Le Soleil est donc une « boule de gaz » en équilibre dans l'espace : la pression de ce gaz voudrait qu'il s'épande à l'infini comme tout gaz qui se respecte, mais son autogravitation contrarie cette pression et maintient l'équilibre. Si par la pensée nous décomposons le Soleil en couches successives, comme un oignon, chaque couche est poussée vers l'extérieur par la pression et attirée vers l'intérieur par la gravitation, et un équilibre s'établit entre ces deux effets contraires. La pression d'un gaz dépend, nous le savons, de sa température : si le cœur du Soleil, chauffé par les réactions nucléaires qui s'y déroulent, comme nous allons le voir à l'instant, se refroidissait, le Soleil se ratatinerait instantanément sous l'effet de son autogravitation.

Ajoutons que cette force de gravitation universelle qui lie entre eux les atomes ou particules du gaz solaire, de même qu'elle lie le Soleil et la Terre (ainsi que les autres planètes), garantit la stabilité de l'orbite de la Terre autour du Soleil, et donc la constance de la distance TS, cause les marées et de bien d'autres phénomènes encore dans l'Univers.

Au cœur du Soleil

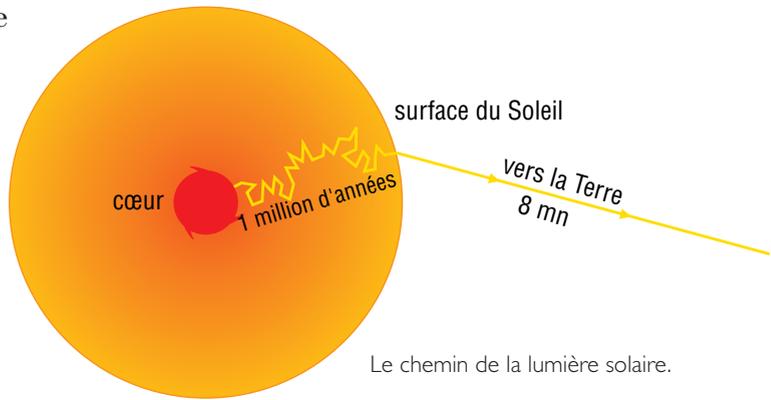
Cette puissance de quelque 10^{26} watts qui s'échappe de la surface solaire, d'où provient-elle ?

Nous avons tous observé une belle bulle sphérique de savon flottant sereinement

S'il n'y avait pas de source constante d'énergie au sein du Soleil, cette perte constante de rayonnement devrait s'accompagner d'un refroidissement que ni l'observation directe, ni l'étude de l'histoire de la Terre ne manifestent. Aucun raisonnement simple ne peut ici nous fournir la réponse à cette question, qui occupa les physiciens pendant une bonne partie des XIX^e et XX^e siècles, jusqu'à ce que Hans Bethe (né en 1906) et Carl von Weizsäcker (né en 1912) apportent en 1938, indépendamment l'un de l'autre, la réponse : cette puissance est fournie par la transformation en énergie lumineuse d'une infime partie de la masse du cœur du Soleil, selon l'équation célèbre d'Albert Einstein (dite « principe d'équivalence masse-énergie ») : Énergie = Masse × carré de la vitesse de la lumière.

Il suffit (!) de faire disparaître de ce cœur et de transformer chaque seconde en énergie lumineuse quelque 2 millions de tonnes d'hydrogène pour que brille un Soleil en équilibre tranquille : quantité bien faible puisque au cours de la période totale où dure ce que nous pouvons appeler un « équilibre de rayonnement », soit environ 10 milliards d'années, cette transformation n'aura consommé que moins de 1 % de sa masse.

Nous avons décrit l'équilibre du Soleil sous l'effet contraire de la pression et de la gravitation. Il résulte de cet équilibre qu'au cœur du Soleil la densité de particules (électrons et protons) est assez élevée, elle vaut 150 g/cm³, soit 150 fois celle de l'eau, tandis que la température atteint quinze millions de degrés sous l'effet de la puissance nucléaire libérée. À des pressions et températures pareilles, notre hypothèse précédente portant sur le caractère gazeux de la matière solaire est-elle encore



valable ? Là encore, il faut une physique élaborée pour répondre positivement.

La lumière produite – des rayons gamma, donc très énergétiques, en accord avec la température élevée – a bien du mal à se frayer un chemin vers l'extérieur, rencontrant sans cesse des noyaux d'hydrogène (protons) qui l'absorbent puis l'émettent à nouveau : de proche en proche, il faudra près d'un million d'années à ce rayonnement pour atteindre enfin les couches superficielles de l'oignon, couches dont la densité est enfin devenue assez faible pour qu'il puisse s'échapper désormais sans encombre vers l'espace... et, en huit minutes, nous atteindre, nous réchauffer ou inspirer les poètes. Ainsi toute la puissance produite au cœur va-t-elle, un million d'années plus tard, sortir par la surface et s'épandre dans l'espace.

La transition entre les couches trop denses pour que la lumière puisse s'en échapper et la couche peu dense qui la laisse sortir librement se fait bien loin du cœur (à 750 000 km de celui-ci, précisément ce que nous appelons le « rayon » du Soleil) sur quelques dizaines de kilomètres de variation d'altitude. Voilà pourquoi le bord du Soleil nous paraît si net, comme s'il s'agissait d'un corps solide et non pas gazeux : quelques dizaines de kilomètres vus à la distance TS (150 millions de km) forment pour l'œil et même pour un télescope

un angle si petit que la transition nous paraît parfaitement abrupte et nous donne cette impression de « surface ».

Pourquoi les radiations qui parviennent à notre œil sont-elles le bleu, le vert, le rouge (dont le mélange donne sur l'œil l'impression de couleur blanche), une lumière qui est des millions de fois moins énergétique que les rayons gamma issus du cœur ? Au cours de son chemin vers l'extérieur, l'énergie s'est diluée dans l'immense volume du Soleil et la température, intense dans le cœur, s'abaisse progressivement en allant des couches du cœur vers celles de la surface, descendant à 6 000 °C environ dans celle-ci. La longueur d'onde rayonnée dépend, nous l'avons vu, de la température : c'est ainsi que les photons gamma très énergétiques émis par le cœur du Soleil se transforment progressivement, lors de chacune de leurs interactions avec la matière (les protons) de plus en plus froide au fil de leur parcours vers la sortie, en photons moins énergétiques, ceux qui finiront par constituer la lumière blanche émise par la surface relativement froide.

Conclusion

Au terme de ce court voyage, nous n'avons pas répondu à toutes les questions que nous nous posions au début. Nous avons esquissé quelques réponses, élaborées au cours de plusieurs siècles d'observations, d'expériences et de réflexion : ces réponses n'ont donc rien d'évident. Elles manifestent qu'il est possible de connaître le Soleil sans aller y expérimenter, dès que nous pouvons supposer que la matière qu'il contient et les lois auxquelles elle obéit sont de même nature que ce que nous observons et mesurons dans nos laboratoires. Idée évidente pour un homme du XX^e siècle, mais qui n'alla pas toujours de soi.

Une autre étape, fondamentale pour notre compréhension de l'Univers et notre intelligence de la nuit étoilée, est d'affirmer que les étoiles sont d'autres Soleils, réduits simplement en taille et en éclat apparents par une distance bien plus grande, qui se compte en années de lumière et non plus en minutes de lumière. Mais ceci est une autre histoire !

Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

Le Soleil est-il vivant, va-t-il mourir, s'éteindre ?

C'est par abus de langage que l'on parle de la « vie » ou de la « mort » d'une étoile, laquelle n'est pas un être vivant. Pour former une étoile, un nuage de gaz, immense, se contracte sous l'effet de la gravitation, formant une sphère de densité et de température croissant avec le temps, jusqu'au moment où le cœur de cet objet, déjà brillant, est assez chaud pour que s'y déclenchent les réactions nucléaires responsables de l'éclat stable des étoiles et du Soleil. Longtemps après, plusieurs millions d'années pour les étoiles les plus massives, plusieurs milliards pour les étoiles telles que le Soleil, cet équilibre cesse parce que le cœur ne contient plus tout à fait assez de matière, et l'étoile connaît un destin plus ou moins tumultueux en évoluant selon sa masse vers un autre état (naine blanche, pulsar, trou noir).

Si le Soleil avait été plus gros ou plus petit, quelle aurait été son histoire ? La vie aurait-elle été possible dans son voisinage ?

L'évolution d'une étoile – Soleil ou autre – est fixée par sa masse (qui fixe la température en son cœur) et non par sa taille, sachant toutefois qu'à une masse plus importante correspond généralement

un diamètre plus grand. La gamme, assez restreinte, des masses possibles va d'environ un dixième de la masse du Soleil à quelques dizaines, avec deux conséquences essentielles : plus une étoile est massive, plus son temps d'équilibre de rayonnement (tel que décrit plus haut pour le Soleil) est bref – pouvant se réduire à quelques millions d'années –, et plus sa température de surface est élevée – pouvant atteindre 50 000 °C. On voit donc que la vie telle que nous la connaissons, avec son temps d'évolution se comptant sans doute en milliards d'années, requiert la proximité d'étoiles pas trop massives, pour lui donner le temps d'apparaître et d'évoluer. Aujourd'hui, nous ne pouvons guère formuler d'hypothèses sur une vie qui se développerait autour d'une étoile dont l'équilibre de rayonnement ne durerait que pendant quelques millions d'années.

La vie est-elle possible autour des étoiles doubles (système de deux étoiles, proches et liées entre elles par la gravitation) ?

Comme nous ne connaissons pour le moment qu'un exemple de vie dans l'Univers, celle présente sur Terre, il faut être prudent dans nos affirmations. Les scientifiques parlent aujourd'hui de « zone habitable » autour d'une étoile : il s'agit de la région de l'espace où la température, due au rayonnement de l'étoile, sera comprise entre 0 et 100 °C (éventuellement grâce à la présence d'une atmosphère autour de la planète). Cela, réalisé dans la position de la Terre par rapport au Soleil, autorise la présence d'eau liquide que, jusqu'à plus ample information, nous considérons comme indispensable à la vie. Pour une étoile très massive, donc de surface très chaude, la « zone habitable » est simplement située plus loin de l'étoile que la Terre ne l'est du Soleil. Dans le cas d'une étoile double, c'est plus délicat, car la mécanique céleste n'autorise pas une orbite circulaire autour d'un tel système double, sauf à très grande distance de celui-ci (auquel cas la température sera trop basse). Une planète pourra être en orbite autour de l'une des étoiles et être située dans sa « zone habitable », mais il faut alors que l'étoile compagnon soit assez éloignée pour ne pas provoquer lors de son mouvement trop de variations de température sur la planète, au-delà de l'étroite fourchette tolérée de 100 °C.

La composition du Soleil est-elle la même que celle des planètes ?

Planètes et Soleil sont issus du même nuage de gaz, homogène, formé principalement d'hydrogène et d'hélium, et comprenant en outre mais à l'état de traces le carbone, l'oxygène, l'azote, puis les autres éléments chimiques (silicium, fer, etc.). On retrouve, à peu de chose près, cette composition primordiale dans le Soleil et dans le matériau (glaces et roches) qui forme les comètes, « fossiles » du système solaire primitif. Les planètes ont subi, lors de leur formation et au cours des 4,5 milliards d'années qui ont suivi jusqu'à aujourd'hui, des différenciations importantes : par exemple, la Terre ou Mercure ont perdu la plus grande partie de leur hydrogène, car elles ne disposaient pas d'une masse assez importante pour le retenir par attraction gravitationnelle.

Bibliographie

Sous l'étoile Soleil, Jean-Claude PECKER, Fayard, 1984.

Le Soleil, Pierre LANTOS, « Que sais-je ? » PUF, 1994.

Les Sciences du ciel, sous la direction de Pierre LÉNA, Flammarion, 1996.

Les Poètes et l'Univers, Jean-Pierre LUMINET, Espace, Le Cherche-Midi éditeur, 1996.

L'astronomie est un jeu d'enfant, Mireille HARTMANN, Le Pommier, 1999.

Sur la Toile

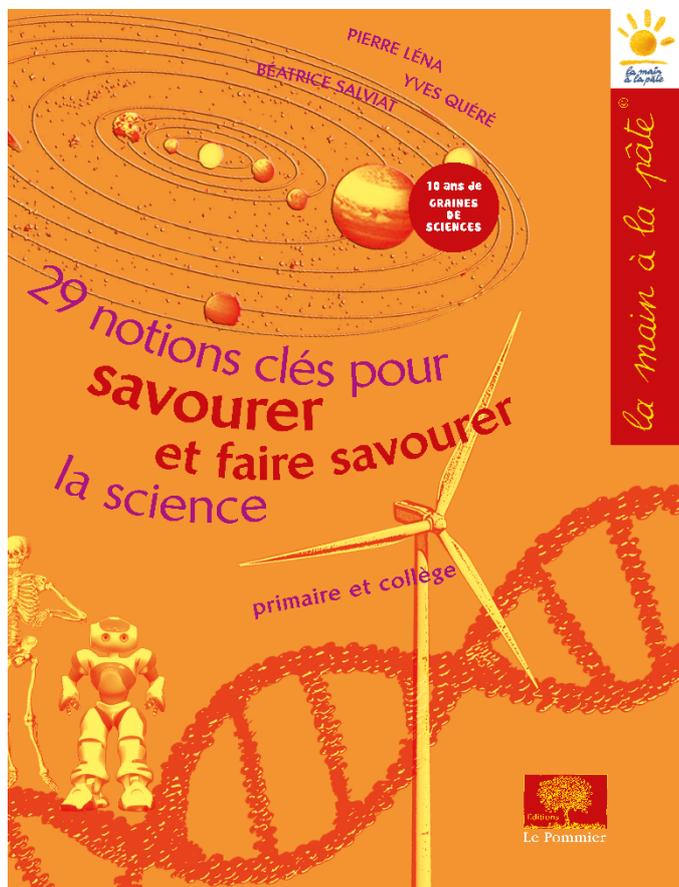
– Observatoire de Paris-Meudon : <http://www.obspm.fr>

– Institut d'astrophysique spatiale (Université Paris-XI) : <http://www.ias.fr>

– Agence spatiale européenne : <http://esrin.esa.it>

– NASA : <http://www.sti.nasa.nasa.gov>

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE