

Comité de liaison enseignants et astronomes

Le CLEA

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée (loi de 1901). Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire. En particulier, ils agissent dans le cadre de la

formation initiale et continue des enseignants.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (universités d'été) et régionaux dans le cadre des MAF-PEN. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école primaire, du collège et du lycée. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations,

travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc).

Aussi bien au cours de ces stages que dans ses diverses publications, le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes hors de toute contrainte hiérarchique.



Pour toute information s'adresser au siège du CLEA
Laboratoire d'Astronomie, bât. 470
Université Paris Sud 91405 Orsay cedex
Té / Fax : 01 69 15 63 80
Le CLEA est présent sur internet à l'adresse :
<http://www2.cc-nice.fr/clea>

Bureau du CLEA pour 2000

Présidents d'honneur

Jean-Claude PECKER
Evry SCHATZMAN

Présidente

Lucienne GOUGUENHEIM

Vice-Présidents

Agnès ACKER
Marie-France DUVAL
Jean RIPERT
Josée SERT
Gilbert WALUSINSKI

Rédactrice-Secrétaire

Martine BOBIN

Trésorière-Secrétaire

Catherine VIGNON

Daniel Bardin
Francis Berthomieu
Martine Bobin
Michel Bobin
Lucette Bottinelli
Pierre Causeret
Jacky Dupré
Michèle Gerbaldi
Lucienne Gouguenheim
Christian Larcher
Georges Paturel
Jean Ripert
Jean-Paul Rosenstiehl
Daniel Toussaint
Michel Toulmonde
Gilbert Walusinski

Comité de rédaction des Cahiers Clairaut

EDITORIAL

Quand vous recevrez ce numéro d'été, les vacances seront proches et vous aurez le temps de lire, de réfléchir et de nous donner vos impressions et suggestions. Certains d'entre vous auront, avec le recul, envie de nous faire partager leurs expériences, récentes ou non. Nous manquons d'articles pour la rubrique "avec nos élèves" et en particulier pour le primaire et le collège. Nous avons aussi besoin de votre participation pour faire vivre la rubrique "Vie associative".

Dans ces 90^e Cahiers, Philippe Amram et Yvon Georgelin nous offrent un riche exposé historique sur les découvertes de Fabry et Perot. Le fonctionnement du fameux interféromètre de ces derniers est rendu clair aux non physiciens grâce aux dessins de Georges Paturol.

Charles-Henri Eyraud et ses collègues de l'ISFM de Kairouan nous font comprendre le lien entre l'astronomie et la vie religieuse au travers du calendrier musulman et du cadran solaire de la mosquée de Kairouan.

Jean-Luc Fouquet nous montre comment le ciel peut développer l'imaginaire des enfants. Dans un ancien article, Liliane Sarrazin nous présente une interaction fort intéressante entre une institutrice et sa classe de CM1. Jean Ripert poursuit son feuilleton sur les distances.

Les potins, écrits par Lucienne Gouguenheim, sont consacrés aux planètes extrasolaires. Francis Berthomieu nous emmène rêver à l'île d'Hawaï. Vous pouvez enfin exercer votre sagacité avec le nouveau problème sur la Lune proposé par Pierre Causeret et avec les mots croisés de Michel Bobin.

Merci à tous les auteurs, bonnes vacances et bonnes lectures.

La rédaction



Les Cahiers Clairaut

Été 2000 n° 90



Article de fond

Le calendrier religieux musulman et le cadran solaire de la mosquée de Kairouan.

p. 2



Avec nos élèves

Des ciels imaginaires.
(niveau primaire)

p. 10

Les étoiles tournent-elles la nuit ?
(niveau primaire).

p. 13

Mesures de distances.
(niveau lycée)

p. 16



Article de fond

Le "Perot-Fabry" en images.

p. 20

Histoire

Un aperçu des découvertes de Fabry et Perot.

p. 24

Le voyage aux îles.

p. 32

Remue-méninges

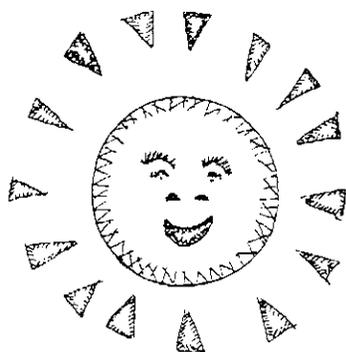
p. 34

Lectures pour la Marquise

p. 36

Les potins de la Voie lactée

p. 39



Le calendrier religieux musulman

Ben Mohammed Abdellati,
Khaled Saddem, I.S.F.M. de Kairouan,
Charles Henri Eyraud, I.U.F.M. de Lyon.

La mosquée de Kairouan possède un très beau cadran solaire qui nous est décrit ici. Ce cadran est destiné à baliser un certain nombre de fêtes et d'actes religieux, liés au calendrier musulman. Les auteurs nous présentent donc, en introduction, l'origine et le fonctionnement de ce calendrier qui est purement lunaire ainsi que les événements religieux qui le jalonnent.

La collaboration entre les professeurs et les stagiaires-français et tunisiens est un des aspects intéressants de ce travail original.

Historique.

Né vers 570 après J.C. dans l'aristocratie Mecquoise, Muhammed, orphelin de père puis de mère à 6 ans, est élevé par une nourrice au désert. Il a, lors d'une retraite pieuse au désert vers 610, la vision d'un être immense qui lui ordonne "Lis" (iqra'). Cette vision se renouvelle et Muhammed commence à rapporter ses révélations, le Coran, et à prêcher l'islâm, la "soumission à Allah". Jugé indésirable par les notables locaux il fuit La Mecque le vendredi 16 juillet 622 à la faveur de l'obscurité (Nouvelle Lune le 14 juillet 622 à 5h 00).

Le début de l'ère musulmane, 1^{er} moharam de l'an 1 de l'Hégire est fixé ce 16 juillet 622. Il arrive à l'oasis de Yathrib, distante de 400 km le 24 septembre 622 et cette ville prit le nom de Médine (Madinat al Nabî = la cité du prophète).

Après sa mort, le 8 juin 632, deux courants se créèrent : les sunnites (85%) et chiïtes (13% surtout en Irak, Iran, Liban, Pakistan). Le soufisme représente une branche mystique de l'islam.

Un calendrier purement lunaire.

Chacun des 12 mois débute le lendemain de la Nouvelle Lune, traditionnellement lorsque deux hommes "dignes de foi" avaient aperçu le fin croissant après le coucher du Soleil. Ils durent donc 29 ou 30 jours, alternativement.

L'année normale comprend 354 jours ($6 \times 29 + 6 \times 30$). Or la valeur moyenne de la lunaison est 29 jours, 12 heures et 44 minutes donc 12 "lunaisons moyennes" dépassent 354 jours :

$$12 \times 29,5306 - 354 = 0,3672 \text{ j}$$

L'année de 354 jours est donc trop courte. Mais $30 \times 0,3672 \sim 11$ jours.

Pour une meilleure concordance avec la valeur moyenne de la lunaison et éviter un décalage, le calendrier fonctionne sur un cycle de 30 ans sur lequel 11 années, réparties régulièrement sur le cycle, ont 355 jours.

On crée donc des années abondantes de 355 j : les années numérotées 3, 5, 7, 10, 13, 16, 18, 21, 24, 26, 29.

Origine de l'ère : 1^{er} Moharram de l'An 1 de l'Hégire : vendredi 16 juillet 622.

Sens spirituel : "Hidjira" signifie quitter c'est à dire que l'Hégire représente un départ de la cité de l'idolâtrie (comme Abraham quitte la terre de ses pères), une rupture avec les liens de parenté et d'association pour fonder une communauté humaine fondée sur une même foi.

Début du jour : au coucher du bord supérieur du soleil apparent.

Jour de repos et de prière communautaire à la mosquée : le vendredi, le 5ème jour.

Les principales fêtes religieuses.

Du fait de la durée de l'année, les dates de ce calendrier avancent chaque année de 11 jours environ dans le calendrier grégorien (basé sur l'année tropique, qui reproduit les saisons).

Le 1^{er} Moharram (1^{er} mois) est le Nouvel An. Le 1^{er} Nouvel An commémore l'arrivée de Muhammed à Médine. (le 1^{er} Moharam 1420 correspond au 17 avril 1999 ; 1421 au 6 avril 2000 ; 1422 : 26 mars 2001 ; 1423 : 15 mars 2002).

Le 12 Rabi'-al-Aoual (3^è mois) a lieu Maouled al Nabi (Mouloud) : c'est l'Anniversaire de la naissance du Prophète (en 1420 : 16 juin 2000 puis 5 juin 2001 ; 25 mai 2002 ; 16 mai 2003; 5 mai 2004).

La nuit du 14 au 15 Cha'ban (8^è mois) est la date de la révélation faite à Muhammed de prier tourné vers La Mecque et non vers Jérusalem.

Le mois de Ramadan (9^è mois).

Muhammed, agé d'environ 40 ans, reçoit ses premières révélations du Coran (qur'an = lecture).

Le 1^{er} Ramadan 1420 correspond au 8 décembre 1999 ; celui de 1421 au 27 nov. 2000 ; 1422 : 16 nov. 2001 ; 1423 : 5 nov. 2002 ; 1424 : 26 oct 2003 ...

Le 27 : Laylat al-Qadr (Nuit du Destin) commémore le 22 décembre 609 où l'archange Gabriel apparut à Muhammed et fit les premières révélations, révélations qui suivirent pendant 23 ans.

Le 1^{er} Chawwâl (10^è mois) a lieu Aïd El Fitr : fête de rupture du jeûne.

Dhu-all Hajja (12^è mois) est le mois du pèlerinage.

Le 10 : Aïd-El-Kebir (Fête du sacrifice) commémore Abraham épargnant Ismaël sur le Mont Marwah près de La Mecque (Sourate II, 124-136 et XXXVII, 100-112) et non sur le Mont Morijah près de Jérusalem (pour les Juifs et les Chrétiens). C'est la fête de la fin du pèlerinage.

Les 5 piliers de l'Islam.

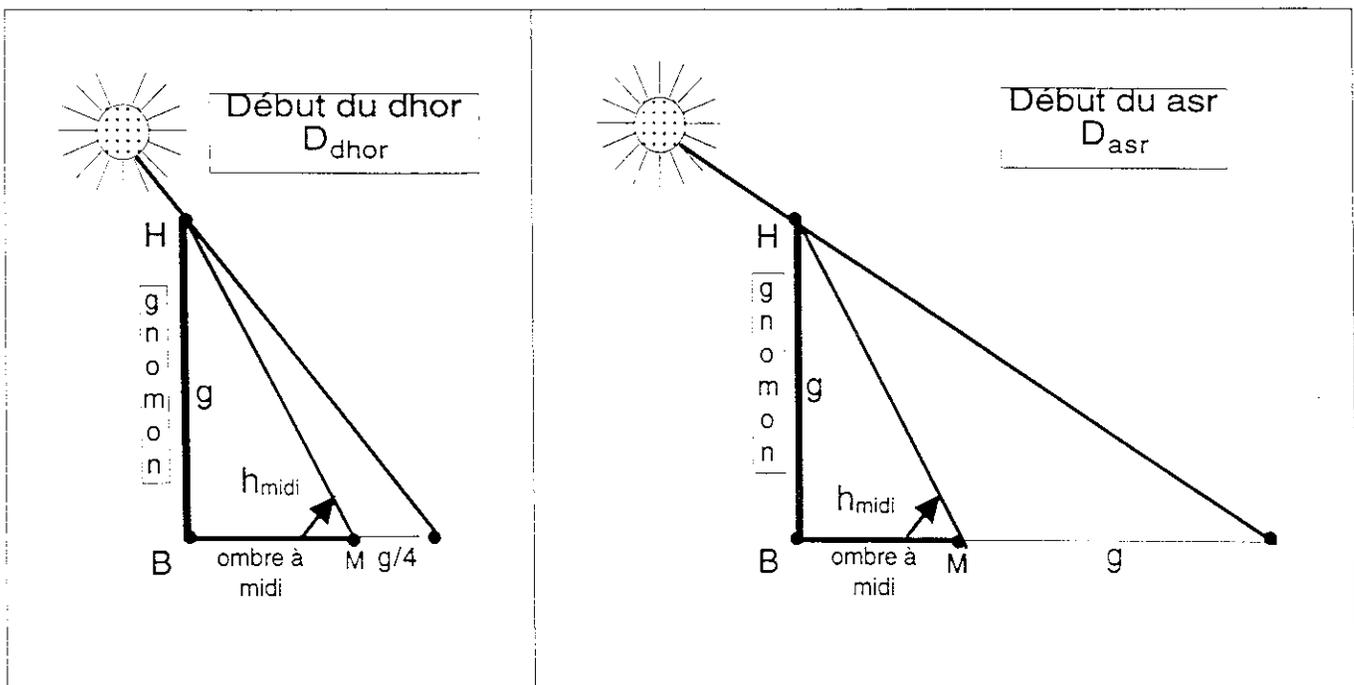
Dans l'ordre :

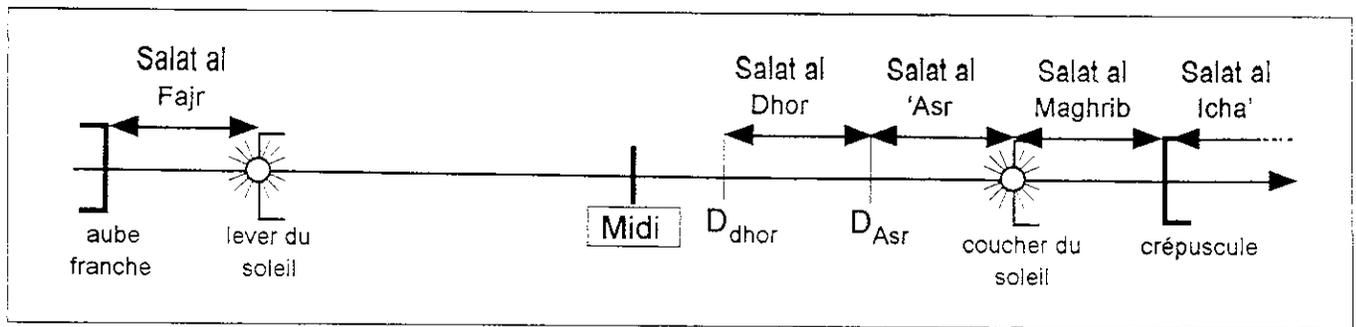
1 - La profession de Foi.

Chahâda vient d'un mot araméen signifiant "témoignage".

"La ilaha illa-Allah Muhammed Rasoul'Allah". "Il n'y a pas de dieu si ce n'est le Dieu, et Muhammed est son envoyé".

Sourate VII, verset 157 : "croyez en Dieu et en son envoyé, le prophète... Suivez-le et vous serez dans le droit chemin".





2 - Les 5 prières quotidiennes.

Salat signifie "observer un culte", "bénir".

Salat al Fajr : le matin entre l'aube franche (fajr : $h = -18^\circ$) et le lever du bord supérieur du Soleil.

Salat al Dhor : commençant soit à midi solaire (+ 2 min) soit lorsque l'ombre du gnomon est égale à la longueur de son ombre à midi solaire plus 0,25 fois sa hauteur et finissant lorsque l'ombre du gnomon est égale à la longueur de son ombre à midi solaire plus sa hauteur.

Salat al 'Asr : l'après midi, commençant à la fin du dhor et finissant soit au coucher du Soleil, soit lorsque l'ombre du gnomon est égale à la longueur de l'ombre à midi solaire plus deux fois sa hauteur.

Salat al Maghrib : le soir après le coucher du bord supérieur du Soleil apparent.

Salat al Icha' : prière du crépuscule, à la disparition des lueurs crépusculaires rouges ($h = -12^\circ$ sous l'horizon), ou blanches ($h = -18^\circ$ sous l'horizon).

Les cinq prières doivent donc se faire dans les cinq intervalles indiqués sur le schéma ci-dessus.

Sourate XXIII, versets 1, 2, 9 : "heureux sont les croyants qui font la prière avec humilité ... et qui observent strictement les heures de la prière".

3 - L'aumône purificatrice.

(Zakât) : impôt annuel ordonné par Dieu pour purifier les richesses et le cœur des riches (portion précise des revenus annuels) pour secourir les pauvres : l'homme n'est que le dépositaire des biens d'ici bas.

4 - Le jeûne.

(çaoum = "privation") : pendant le mois de ramadan, de l'aube franche au coucher du soleil.

Le fil noir et le fil blanc de l'aurore, annonçant le début du jeûne (pendant le mois de Ramadan) ne sont pas à prendre au sens littéral, mais plutôt à interpréter comme une métaphore coranique rendant compte d'une observation astronomique. En observant à l'Est le matin on voit d'abord une première lueur, "la fausse aube", suivie tout de suite d'un

retour vers l'obscurité (qui correspond au fil noir), et l'on voit après "la franche aube" (qui correspond au fil blanc) annonçant le début du jeûne.

5 - Pèlerinage.

(Hajj "se diriger vers", ou "effort pour dominer quelque chose") : devoir que tout musulman accomplit pour Allah.

La Mecque : lieu de naissance du prophète, séjour d'Adam après la chute, lieu des visites d'Abraham à Ismaël.

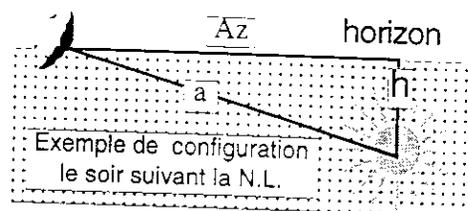
Médine : tombeau du prophète.

Jérusalem : cité du jugement dernier où Moïse, Jésus et Muhammed se retrouveront en compagnie des saints en particulier Abraham, le premier "soumis".

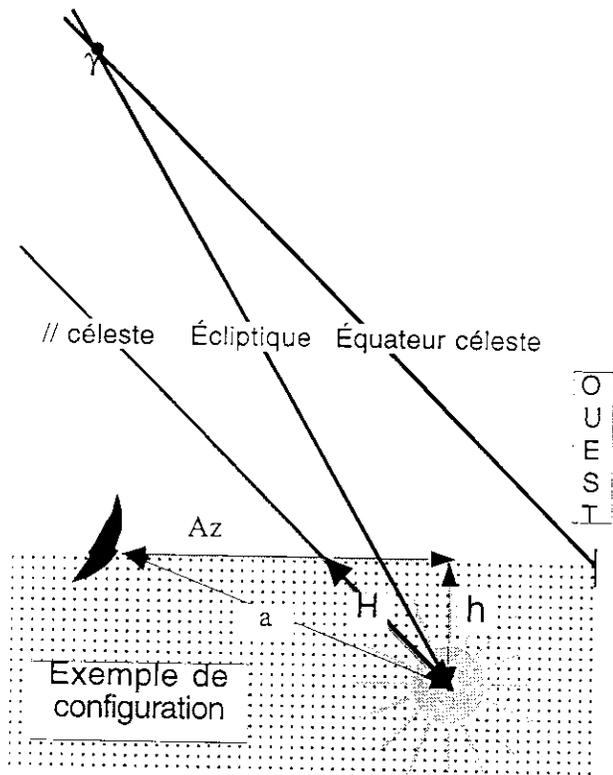
Le début et la fin du ramadan.

Le jeûne du Ramadan commence au matin suivant l'apparition du croissant de la Nouvelle Lune ayant été vu avec certitude par des témoins dignes de foi, ou de toute manière, dès que le mois précédent, c'est à dire Cha'ban, a compté 30 jours.

Le jeûne de Ramadan se termine lorsque le croissant de la Nouvelle Lune du mois suivant, c'est à dire Chaououal, a été vu avec certitude, ou de toute manière dès que le mois de Ramadan a compté 30 jours.



On comprend que la visibilité du croissant dépend de variables h ("angle de dépression du Soleil sous l'horizon"), a ("arc de visibilité"), Az (écart d'azimut Lune-Soleil et aussi de la distance Terre-Lune (changement du diamètre apparent de la Lune).



L'astronome Tariq (vers 770 après J.C.), s'inspirant des astronomes indiens, fixe simplement une règle sur le temps séparant deux couchers ($\Delta t > 48$ min) c'est à dire sur l'arc de parallèle céleste H ($H > 12^\circ$).

L'astronome Habash (vers 840 après J.C.) propose une condition sur l'angle de dépression du Soleil sous l'horizon h ($h > 10^\circ$).

L'astronome Thabit (vers 900 après J.C.) développe des critères géométriques plus complexes liant les 4 variables h, Az, a et distance Terre-Lune.

Vers 1900, l'astronome Fotheringham s'inspirant de ses prédécesseurs propose la règle :
 $h > 12^\circ - 0,008^\circ \times Az^2$

Les figures ci-contre permettent de comprendre que la visibilité du croissant (pour une même Nouvelle Lune) est aussi variable en fonction du lieu d'observation suivant :

1 - La longitude :

Le coucher du Soleil n'a pas lieu à la même heure et la Lune se décale de 13° par jour.

2 - La latitude :

L'inclinaison des plans de référence change par rapport à l'horizon.

Les calculs astronomiques peuvent prévoir aujourd'hui dans 95 % des cas si le croissant sera visible ou invisible;

mais cette visibilité reste encore incertaine dans 5 % des cas en fonction de la température de l'air au sol (réfractant plus ou moins la lumière) au moment du coucher du Soleil.

C'est donc toujours, aujourd'hui aussi, la visibilité réelle qui est prise en compte. En pratique, en raison des conditions météorologiques, chaque région musulmane décrète le début et la fin du jeûne de 1 à 3 jours après le jour de l'instant de la Nouvelle Lune (on adopte parfois le choix de la capitale). En France une décision de principe a été prise par les autorités religieuses musulmanes le 26 mars 1990, de fixer l'horaire sur l'horaire du premier pays musulman ayant vu le nouveau croissant.

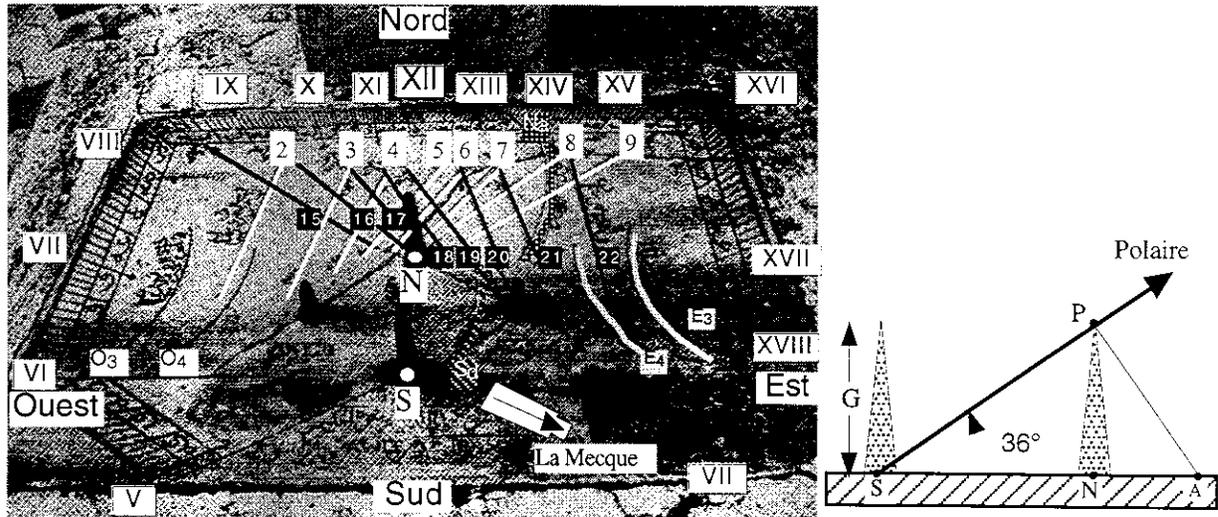
Taiwan, longitude=120° O
Coucher du soleil: h T.U.

Îles Canaries, longitude=20° E
Coucher du soleil: h + 9 heures T.U.
La lune s'est décalée de 5° / soleil

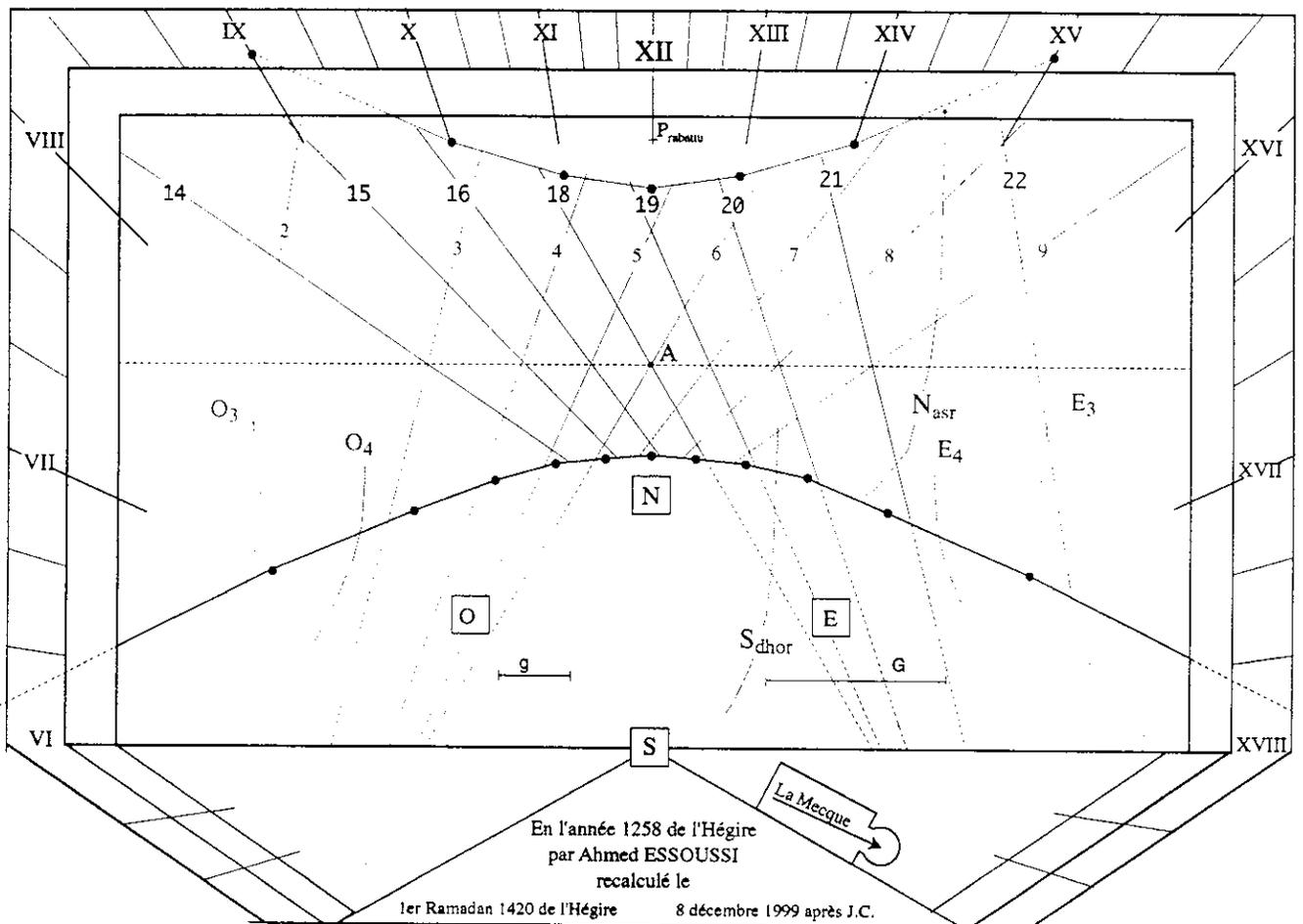
Îles Canaries, le 21 mars

Islande, le 21 mars

Le cadran solaire de la mosquée de Kairouan



Cadran horizontal de la mosquée Sidi Oqba à Kairouan.
 Photographie de Monsieur René Rohr "Les cadrans solaires"
 avec son aimable autorisation et celle des éditions OBERLIN, Srasbourg.



Description.

Ce cadran date de 1842 et est inspiré d'un cadran construit à Damas en 1372.

1 - Le cadran solaire horizontal est constitué des gnomons Nord et Sud de hauteur G.

Le pourtour est gradué en angle horaire du Soleil : un trait tous les degrés (un degré correspond à 4 min) sur le bandeau extérieur et un trait plus long tous les 5 degrés (20 min) sur le bandeau intérieur.

Les segments horaires (numérotés en chiffres romains sur la figure) convergent vers la base S du gnomon Sud et on lit l'heure en traçant la droite reliant l'extrémité de l'ombre (du gnomon Nord) à la base du gnomon Sud.

2 - Autour du gnomon Nord on trouve :

- les lignes babyloniennes correspondant au nombre d'heures écoulées

depuis le lever du Soleil : 2, 3, ..., 9.

- les lignes italiennes qui mesurent le nombre d'heures écoulées depuis le coucher du Soleil : 15, 16, ..., 22.

- la courbe N_a qui indique l'heure de la prière du asr (prière de l'après-midi : l'ombre est égale à l'ombre à midi plus G).

3 - Près du gnomon Sud (de hauteur G) on trouve la courbe S_d qui précise l'heure de la prière du dohr (prière de midi : l'ombre est égale à l'ombre à midi plus G/4).

4 - le gnomon Ouest a pour hauteur g et est utilisé pour prévoir la prière de fahr (aux premières lueurs de l'aube) à l'aide de l'astrolabe.

La courbe O_3 indique que l'aube a eu lieu 3 heures plus tôt et la courbe O_4 qu'elle a eu lieu 4 heures plus tôt.

5 - Le gnomon Est, de hauteur g, permet de prévoir la prière de icha (aux

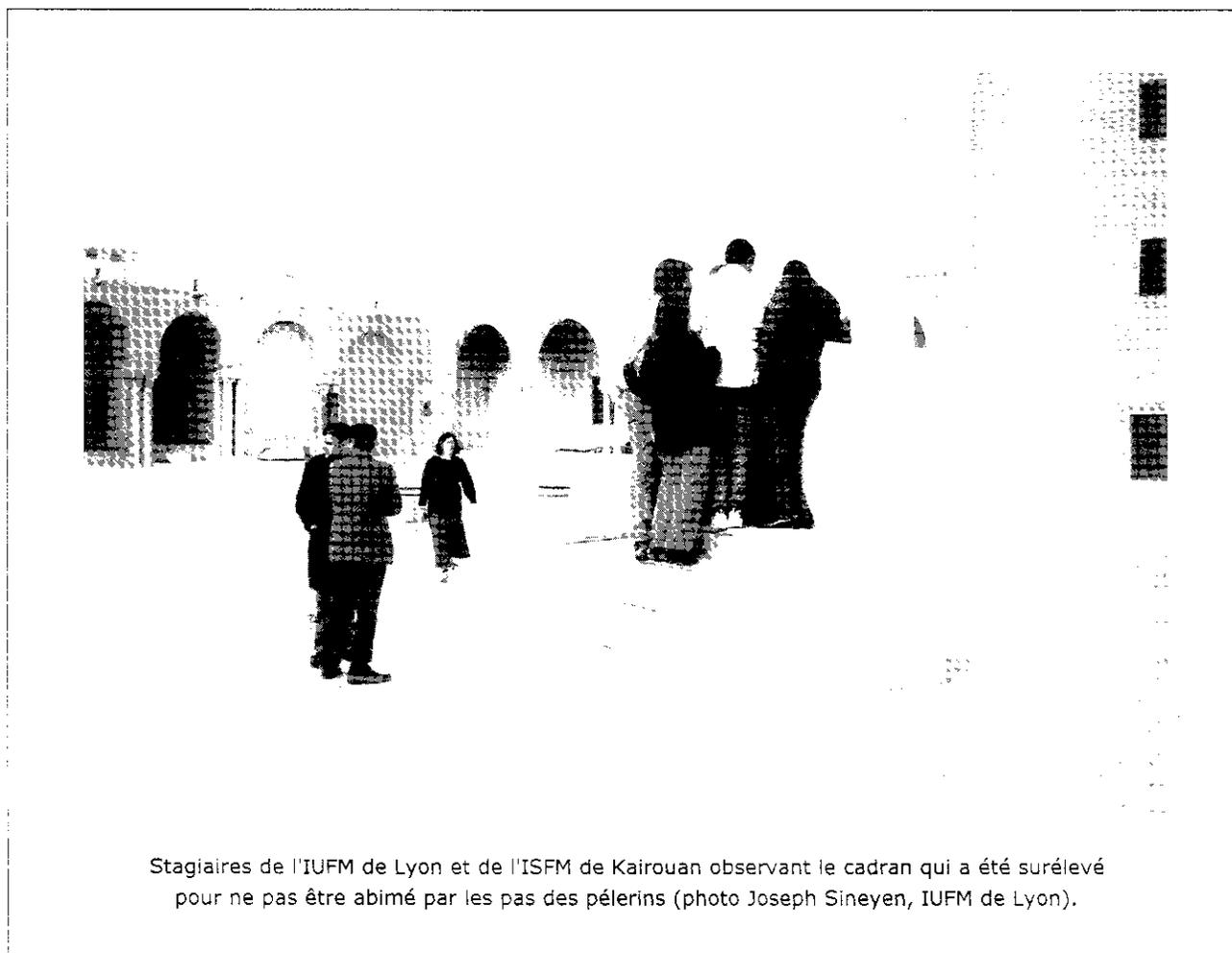
dernières lueurs du crépuscule) à l'aide de l'astrolabe.

La courbe E_3 indique que le crépuscule aura lieu dans 3 heures et la courbe E_4 qu'il aura lieu dans 4 heures.

Les heures babyloniennes et italiennes.

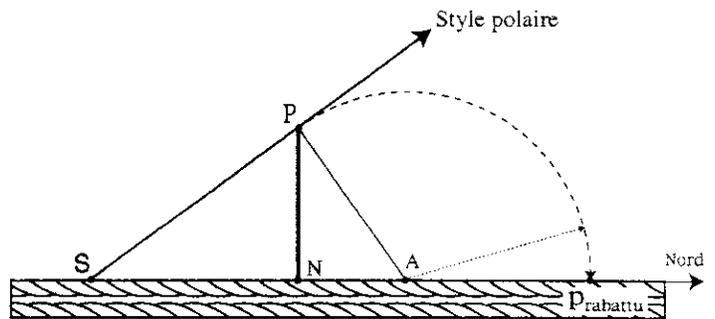
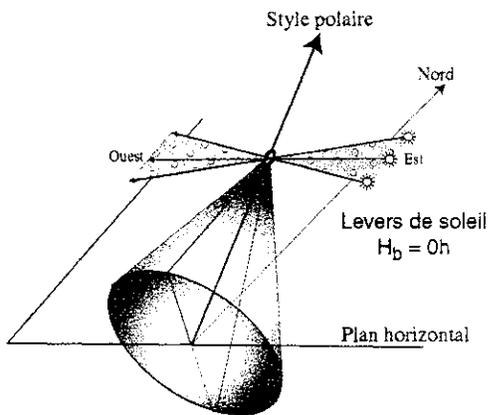
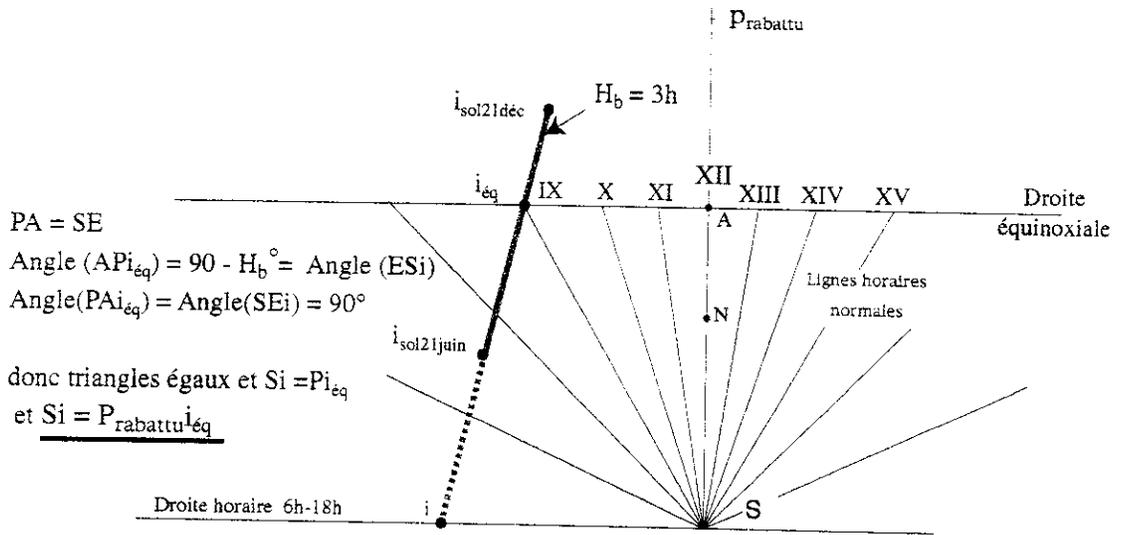
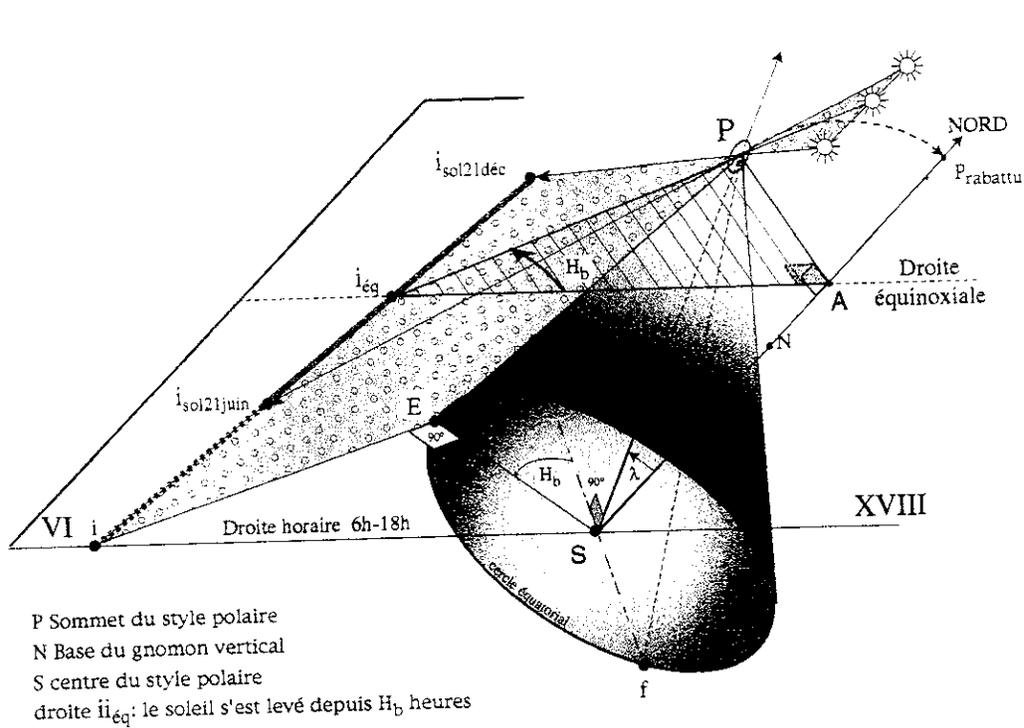
Les habitants de Babylone avaient coutume de compter les heures à partir du lever du Soleil et cette coutume s'est répandue chez les Hébreux (tous les événements de l'Évangile sont datés en heures babyloniennes : à la première heure signifie au lever du Soleil). Ce système s'est d'ailleurs conservé très longtemps en Grèce et aux Baléares.

Les Italiens du Moyen Âge comptaient les heures à partir du coucher du soleil et Goethe mentionne dans ses souvenirs d'Italie ce système de mesure encore en vigueur à l'époque. Le début de la journée musulmane est également fixé au coucher du Soleil.



Stagiaires de l'IUFM de Lyon et de l'ISFM de Kairouan observant le cadran qui a été surélevé pour ne pas être abimé par les pas des pèlerins (photo Joseph Sineyen, IUFM de Lyon).

Cadran horizontal : tracé des courbes babyloniennes.



Tracé des lignes babyloni-ques et italiques.

Tracé des lignes babyloni-ques 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h.

La ligne babylonique H_b (nombre d'heures écoulées depuis le lever du Soleil) s'obtient en faisant tourner le plan horizontal (plan de lever du Soleil) autour du style polaire de l'angle H_b : c'est donc l'intersection de deux plans donc une droite.

Cette droite va couper la droite équinoxiale sur la ligne horaire $6 + H_b$.

Le principe de tracé d'un deuxième point sur la droite $6h - 18h$ est donné sur le dessin de la page suivante.

2 - Tracé des lignes italiques 18h, 19h, 20h, 21h, 22h, 23h.

Par symétrie des lignes babyloni-ques $6h, 5h, 4h, 3h, 2h, 1h$ par rapport au méridien.

3 - Pour tracer les autres lignes.

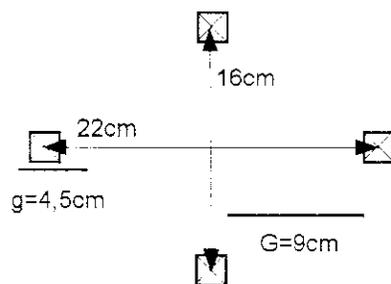
Remarque : Les lignes italiques et babyloni-ques se coupent suivant des droites horaires normales.

Par exemple pour tracer la ligne ita-lique 15h :

- si elle coupe la ligne babylonique 3h, la nuit dure $15h - 3h = 12h$, c'est l'équinoxe, le lever du soleil a lieu à 6h : il est $6h + 3h = 9h$.

- si elle coupe la ligne babylonique 2h, la nuit dure $15h - 2h = 13h$, le jour dure 11h, le lever du Soleil a lieu à 5h30 avant midi soit 6h30 : il est $6h30 + 2h = 8h30$.

La figure ci-dessous donne les dimen-sions réelles :



Sur le cadran de Kairouan les gno-mons en fer se sont émoussés après 160 ans d'exposition au vent et à l'hu-midité. Ils ne mesurent plus les lon-gueurs données par les références hori-zontales (le cadranier avait prévu une

restauration ...) mais seulement $g = 3,7 \text{ cm}$ et $G = 8,5 \text{ cm}$.

Quelques versets du Coran.

"La traduction est toujours une in-terprétation superficielle du texte saint qui suppose plusieurs niveaux d'inter-prétation. Les couches profondes ne sont ouvertes qu'à l'homme de grande ouverture de cœur".

Sourate I : Al Fâtihat ("L'ouvrante")
Au nom de Dieu clément et miséricor-dieux

1. Louange à Dieu, maître de l'univers,
 2. Le clément, le miséricordieux,
 3. Souverain au jour de la rétribution.
 4. C'est toi que nous adorons, c'est toi dont nous implorons le secours,
 5. Dirige-nous dans le sentier droit,
 6. Dans le sentier de ceux que tu as comblés de tes bienfaits,
 7. Non pas de ceux qui ont encouru ta colère ni de ceux qui s'égarent. Amen.
- En arabe, bismillehi'rrahmani'rrahim. Cette invocation se lit en tête de toutes les sourates du Coran, la sourate IX seule exceptée. Le mot rahman est ap-pliqué à Dieu comme embrassant dans sa miséricorde tous les êtres sans dis-tinction aucune ; rahim, veut dire mi-séricordieux, dans un sens restreint, envers les bons, les fidèles, ceux qui méritent sa grâce.

Sourate II : Verset 172 :

La vertu ne consiste point en ce que vous tourniez vos visages du côté du levant ou du couchant ; vertueux sont ceux qui croient en Dieu et au jour der-nier, aux anges et au livre, et aux pro-phètes ; qui donnent pour l'amour de Dieu des secours à leurs proches et aux orphelins, aux pauvres et aux voya-geurs, et à ceux qui demandent, qui rachètent les captifs, qui observent la prière, qui font l'aumône, remplissent les engagements qu'ils contractent, se montrent patients dans l'adversité, dans les temps durs et dans les temps de violences. Ceux-là sont sincères et craignent le Seigneur.

Verset 181: Le mois de Ramadan dans lequel le Coran est descendu d'en haut pour servir de direction aux hommes, pour leur en donner une explication

claire, et de distinction entre le bien et le mal, est le temps destiné à l'absti-nence. Quiconque aura aperçu cette lu-ne, se disposera aussitôt à jeuner. Ce-lui qui sera malade ou en voyage jeû-nera dans la suite un nombre de jours égal. Dieu cherche votre aise et non votre gêne. Il veut seulement que vous accomplissiez le nombre voulu, et que vous le glorifiiez de ce qu'il vous diri-ge dans la droite voie; il veut que vous soyez reconnaissants.

Sourate CXIII : L'aube du jour.

Au nom de Dieu clément et miséricor-dieux

1. Dis : Je cherche un abri auprès de Dieu dès l'aube du jour,
2. Contre la méchanceté des êtres qu'il a créés,
3. Contre le malheur de la nuit téné-breuse quand elle nous surprend,
4. Contre la méchanceté des sorcières qui soufflent sur les noeuds,
5. Contre le malheur de l'envieux qui nous porte envie.

Remerciements et bibliographie.

Les auteurs remercient vivement Mr Régis Morelon, Mr et Mme Rohr pour leur aide dans la réalisation de cet article et tous les stagiaires de l'ISFM de Kairouan et de l'IUFM de Lyon qui ont permis une communica-tion étroite entre les deux rives de la Méditerranée.

- 1 - Chapitre de Régis Morelon (p. 35 à 70) et David King (p. 200 à 202), His-toire des sciences arabes, tome I, sous la direction de Roshdi Rasched et la collaboration de Régis Morelon, Seuil.
- 2- Les cadrans solaires (Histoire, théo-rie et pratique), René Rohr, éd. Oberlin (épuisé)
- 3 - La Recherche, janvier 1999 : visi-bilité du croissant et ramadan, K. Me-diane et N. Guessoum.
- 4 - Polycopié de J.P.Parisot et F. Suagher : calendriers et chronologie.

NDLR : une page de calculs, non pu-bliée faute de place, sera communi-quée aux lecteurs intéressés.

Ecrire à Martine Bobin, 18, chemin des Bienfaits, 91530 Le Val Saint-Germain.



AVEC NOS ÉLÈVES

Des ciels imaginaires

Jean-Luc Fouquet

Jean-Luc Fouquet nous présente ici une expérience réalisée avec les élèves d'une classe de CM₁ et nous propose quelques réalisations de ceux-ci.

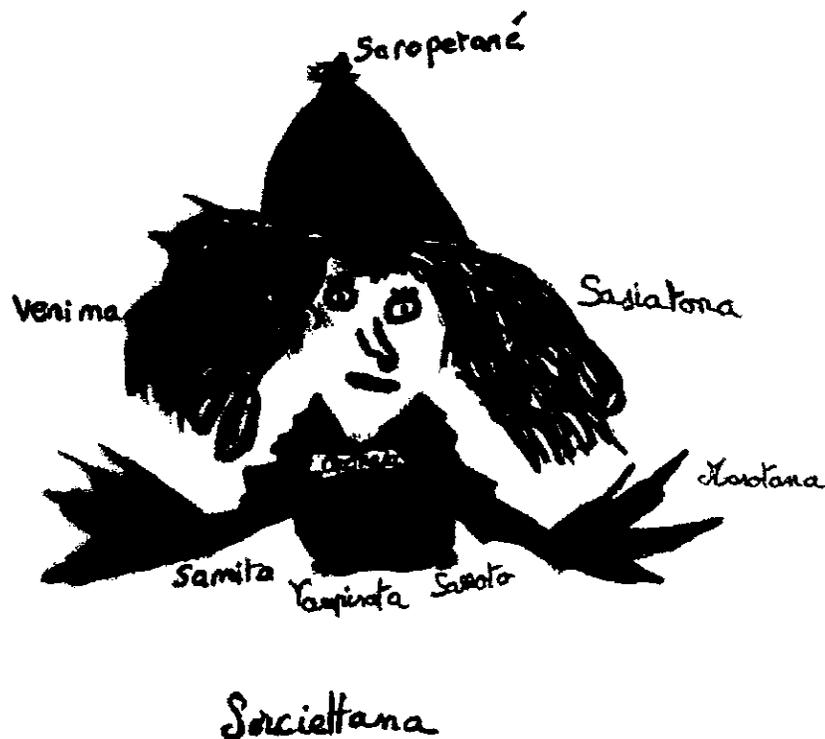
Au moment de bâtir un projet d'école ou d'élaborer la progression d'un Atelier de Pratique Scientifique en collège, un des arguments essentiels peut être de construire une passerelle entre d'une part observations et démarches scientifiques décrites pas à pas, et d'autre part travail d'écriture et illustration de textes. L'un des chemins possibles peut être l'étude des constellations, avec quelques étapes :

- Avec un aller et retour répété entre le vrai ciel nocturne et quelques outils comme la carte du ciel, le parapluie étoilé, le planétarium itinérant, ... éveiller la curiosité des élèves sur certaines interrogations

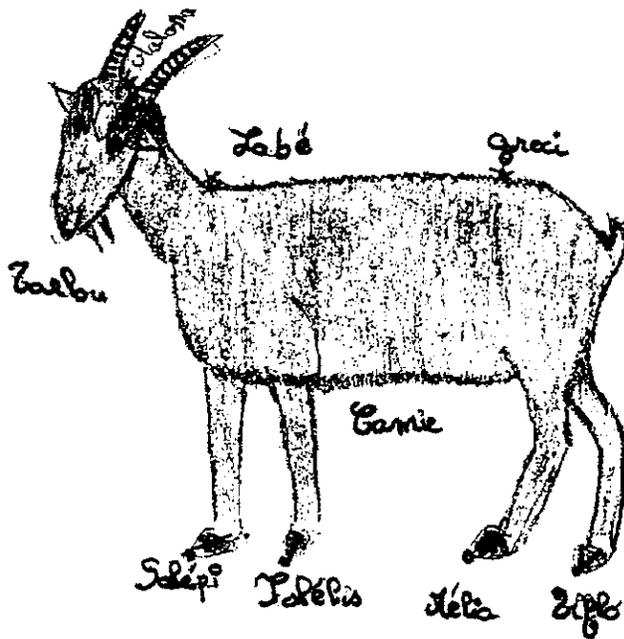
comme le repérage sur Terre comme dans le Ciel, le mouvement apparent des étoiles, leur couleur et leur luminosité, leurs distances comparées au Soleil...

- A l'école, raconter quelques histoires empruntées à la mythologie, et au collège, dans le cours de français, différencier mythes, contes et légendes à l'aide de textes de différentes civilisations.

- Avec l'aide d'un conteur si possible, et aussi avec le soutien attentif du professeur d'arts plastiques, inventer un nouveau conte, de nouvelles constellations avec un vrai travail d'écriture et d'illustration.



La chèvre.



La chèvre

C'était un jeune couple qui vivait heureux. Mais un jour, une vieille femme mal habillée tua le jeune garçon ; la fille était très malheureuse.

Plus tard la vieille femme mal habillée revint.

La jeune femme eut très peur, mais elle ne lui fit rien.

Elle lui dit : "il faut que tu tues une chèvre et que tu me la ramènes. Ainsi, je ferai revenir ton mari".

Elle courut vite dans la forêt chercher une chèvre.

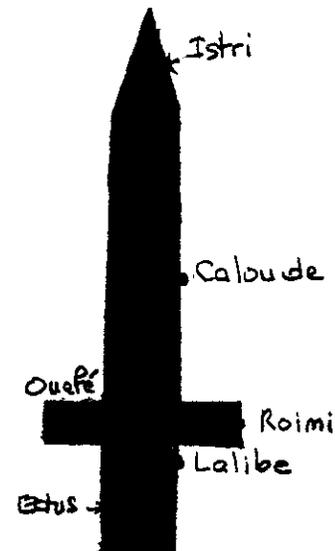
Elle courut, courut puis, de loin, elle vit une magnifique chèvre qu'elle ne voulut pas tuer. Alors elle pensa à son mari. Elle la tua. La jeune femme la prit et repartit chez elle. La vieille femme fit revenir le jeune garçon et au même moment la jeune femme lança la chèvre très haut dans le ciel. Et depuis, ils regardent toujours la magnifique chèvre dans le ciel, et continuèrent à être heureux.

Marisa De Moura

L'épée.

Un homme qui s'appelait Istri se promenait dans la forêt. Tout à coup, il entendit du bruit. Il prit peur et d'un coup d'épée, il tua la chose qui faisait du bruit. Istri regarda le visage, c'était sa soeur Ectus. Fou de douleur, il jeta l'épée de toutes ses forces dans le ciel. Celle-ci y reste.

Mathieu Olivier



Avis de recherche : quel est l'auteur et quelles sont les références de cet extrait ?

"On comprend difficilement que, de toutes les écoles normales, de tous les collèges, de tous les lycées, de tous les séminaires, de tous les couvents, aucun de ces établissements ne jouisse d'un petit observatoire où l'on s'intéresse aux choses du ciel. Il y a pourtant là des professeurs qui devraient aimer les sciences en général et adorer l'Astronomie en particulier. On comprend aussi difficilement que, parmi tant d'hommes fortunés qui vivent sous notre ciel et qui ont souvent trop de loisirs, on en compte si peu (pour ainsi dire pas du tout) qui se donnent le plaisir d'observer les merveilles célestes au lieu de faire tourner imperturbablement leur fortune dans le même cercle : accroître inutilement des rentes déjà superflues, faire courir des chevaux ou entretenir des actrices. Et pourtant, quel est l'être intelligent, quel est l'être accessible aux émotions inspirées par la contemplation du beau, qui pourrait regarder même dans une lunette de très faible puissance, les dentelures argentées du croissant lunaire tremblant dans l'azur, sans éprouver l'impression la plus vive et la plus agréable, sans se sentir transporté vers cette première étape des voyages célestes et détaché des choses vulgaires de la Terre..."



Les étoiles tournent-elles durant la nuit ?

Liliane Sarrazin et Madame Leclerc

Plusieurs adhérents du CLEA ont manifesté, lors de la dernière AG, le souhait de voir les Cahiers reprendre certains articles anciens susceptibles d'intéresser des lecteurs récents. Nous avons donc fouillé dans les anciens bulletins et choisi ce bel article, publié dans le n° 24 des CC (printemps 84).

Il s'agit d'un travail effectué par Liliane Sarrazin (à l'époque professeur d'école normale) et Madame Leclerc, conseillère pédagogique, avec 28 élèves de CM₁ de l'école de Roussillon.

Première séquence.

La maîtresse (M) a posé cette question aux élèves (E) durant l'observation des étoiles. Quelques jours après, elle vérifie si le sens de rotation apparent du Soleil et le sens de rotation de la Terre ont été bien assimilés par les élèves.

M : si nous restons longtemps à observer les étoiles, que va-t-il se passer ?

E : on va les voir tourner ;

M : dans quel sens ?

E : comme le Soleil, d'Est en Ouest ;

M : lorsqu'on vous photographie et que vous bougez, comment sera la photo ?

E : floue !

M : et si on photographiait une étoile ?

E : - elle sera floue...

- non car elle bouge lentement.

La maîtresse explique que la lumière des étoiles est trop faible pour impressionner la plaque photo et que l'on est obligé d'appuyer longtemps sur le déclic de l'appareil photo.

Avec une lampe électrique, elle mime le mouvement d'une étoile et les élèves arrivent rapidement à la conclusion qu'on verra un trait sur la photo prise en pose.

Les élèves connaissent bien Orion. La maîtresse distribue une photo d'Orion prise en pose pendant une heure :

Temps de réflexion et d'observation.

E : les trois traits de la ceinture ont l'air égaux (en effet : ils mesurent 1,5 cm).

E : c'est parce qu'on a déclenché l'appareil photo et on l'a arrêté en même temps pour toutes les étoiles.

Les élèves dessinent et localisent les débuts et fins de traits et retrouvent la constellation d'Orion.

Ensuite une photo du ciel étoilé est projetée : elle est très nette.

M : pourquoi la photo est-elle si nette ?

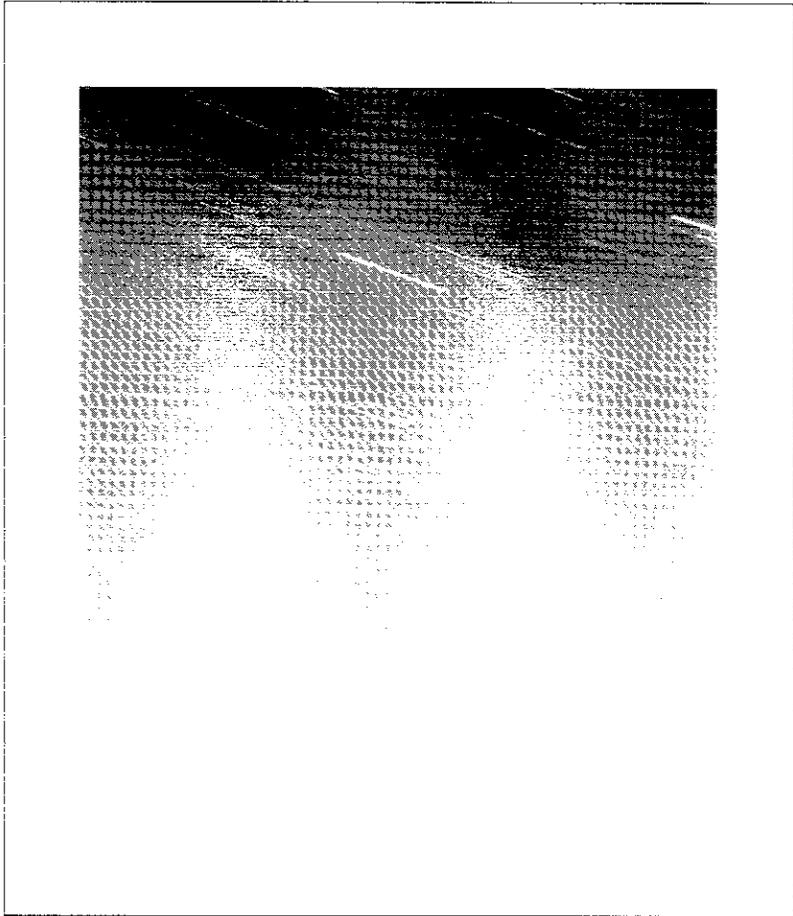
E : on ne peut pas arrêter la Terre de tourner !

E : il faut tourner l'appareil photo ?

M : et dans quel sens ? D'Est en Ouest ou d'Ouest en Est ?

Grande réflexion : la Terre tourne d'Ouest en Est, il faut donc tourner l'appareil photo d'Est en Ouest pour suivre les étoiles.

La maîtresse montre une planche équatoriale sur laquelle on fixe l'appareil photo ; les élèves sont intrigués car ils n'imaginaient pas un dispositif si simple !



**Deuxième séquence.
Les étoiles semblent tourner autour
de l'étoile polaire qui est dans le
prolongement de l'axe de la Terre.**

La maîtresse distribue une photo du ciel prise avec une pose de une heure. Les élèves sont déconcertés.

M : que représentent les traits ?

E : - les trajets des étoiles, mais elles tournent.

- les trajets ne sont pas égaux !

(Lors de la première séquence, les trajets paraissaient égaux car la photo représentait une faible partie de ciel, située, de plus, sur l'équateur).

- elles tournent autour d'un point.

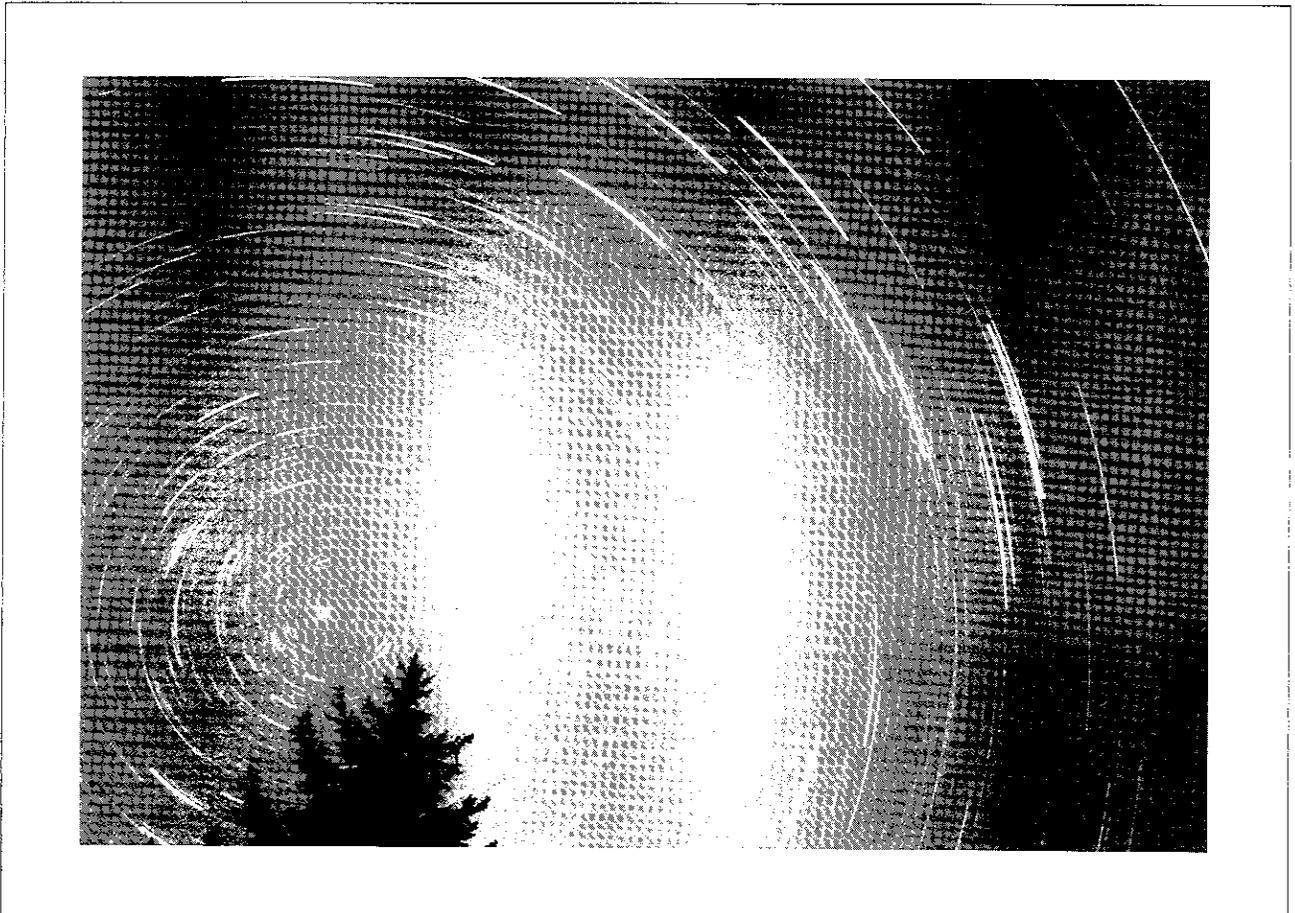
M : ce point est l'étoile polaire.

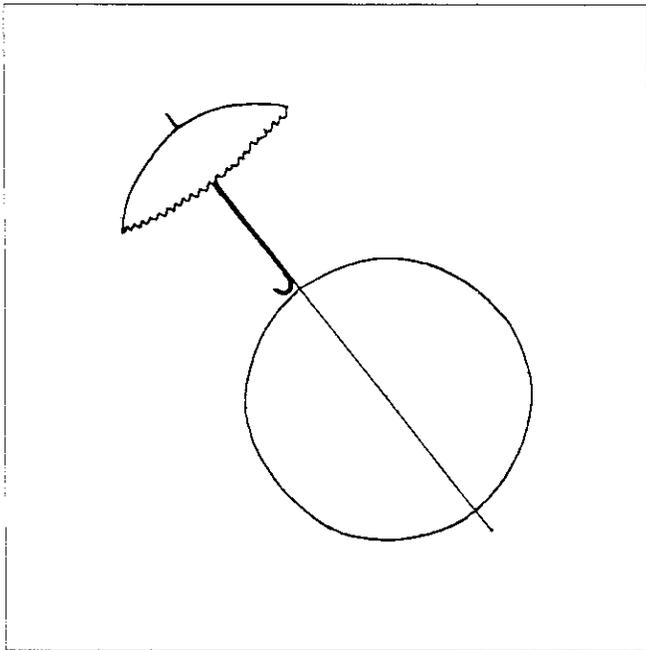
E (un petit malin) : c'est pour cela que le centre de la carte du ciel c'est l'étoile polaire.

M : imaginons que c'est la nuit ; (les rideaux sont tirés, les élèves assis au milieu de la classe) ; que vont faire les étoiles au cours de la nuit ?

E : elles vont tourner d'Est en Ouest.

M : mais il nous faudrait un plafond qui tourne comme au planétarium à Paris !





A la fin du cours, les élèves qui voulaient visiter Paris décident, à l'unanimité, d'aller voir le Palais de la Découverte ! M (accroupie au milieu des élèves) : mais j'ai un parapluie avec le dessin des constellations !

Quelle joie ! on tourne le parapluie, reconnaît les constellations ; on constate que l'étoile polaire est sur l'axe du parapluie.

La maîtresse tient le parapluie vertical.

E : mais la Polaire n'est pas au-dessus de notre tête, elle est là (il indique sa direction).

On incline donc le parapluie en direction de l'étoile polaire. La maîtresse apporte le globe terrestre.

M : comment doit-on placer le parapluie par rapport au globe ?

E : la polaire indique le nord, elle est au dessus du pôle. Essayons.

On place parapluie et globe, on tourne le globe et on comprend aussi pourquoi sur la photo, les étoiles semblent tourner autour de l'étoile polaire !

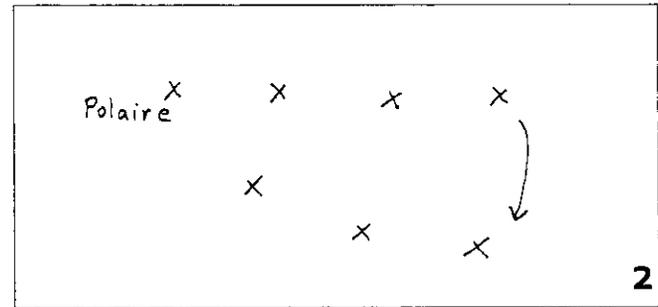
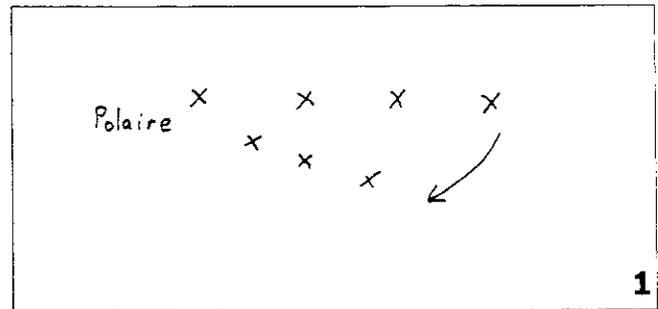
Les questions fusent au sujet du ciel austral. On dessine la position de la polaire par rapport à la Terre.

Remarque : il n'y a pas d'étoile correspondant au prolongement de l'axe des pôles du côté du pôle austral.

Troisième séquence. Notion d'angle de rotation.

Objectif : les étoiles tournent toutes autour de la polaire d'un même angle.

Lors d'un jeu en éducation physique, les élèves doivent, tout en restant en ligne, tourner autour de l'élève en bout de



rangée (A par exemple). On constate que l'élève G doit parcourir un long chemin tandis que l'élève B doit marcher à petits pas.

x x x x x x x
A B C D E F G

E : mais c'est pareil pour les étoiles !

On dessine au tableau la polaire et quelques étoiles alignées avec elle ;

M : où seront-elles au bout d'une heure ?

Les élèves les font toutes tourner dans le même sens

Deux élèves font le schéma 1 :

Cinq élèves font le schéma 2 :

Critique des schémas :

Schéma 1 :

Puisque les étoiles restent à la même distance de la Polaire, il est faux.

Schéma 2 :

plus difficile à trouver, mais un malin pense que :

Puisque les étoiles étaient alignées avec la Polaire au départ, elles le sont encore une heure après. Donc le schéma est faux.

Conclusion : puisque l'angle de rotation est le même pour toutes, les étoiles qui sont le plus loin de la polaire semblent se déplacer plus vite.

NDLR : Les photos de la page 14 sont récentes et ont été réalisées par Alain Jaquot (SAB).



Mesures de distances

Jean Ripert

Voici la suite de notre feuilleton sur les mesures de distances. Après avoir traité la mesure du rayon de la Terre (cf. CC 89), Jean Ripert nous relate la mesure du rayon de la Lune par Aristarque.

Il entreprend ensuite le calcul des distances de la Terre à la Lune, aux planètes et enfin au Soleil.

Le rayon de la Lune.

Aristarque de Samos détermina le diamètre de la Lune lors d'une éclipse de Lune. Il considérait que le Soleil était très loin de la Terre et donc que l'ombre de la Terre avait la forme d'un cylindre. Pour cela il détermina le temps t mis par la Lune pour passer de la position 1 (premier contact) à la position 2 (début de la totalité). Ce temps correspond au temps nécessaire à la Lune pour avancer de son diamètre. Il détermina ensuite le temps t' séparant le début de la totalité (2) de la fin de la totalité (4). Il constata que $t' = 2t$ et en déduisit que le diamètre de la Terre est égal à trois fois le diamètre de la Lune (schéma 1).

Remarque : il faut évidemment que l'éclipse soit centrale.

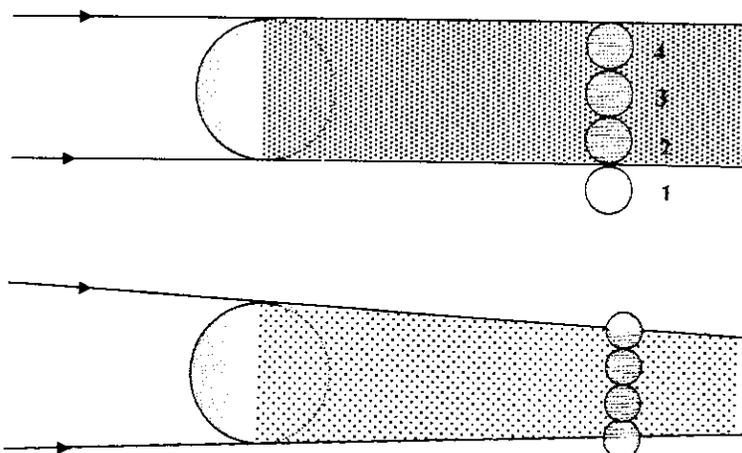
En fait l'ombre de la Terre est conique, car le Soleil est plus gros que la Terre et n'est pas situé à l'infini. L'angle au sommet de ce cône est d'environ un demi degré, ce qui correspond au diamètre apparent de la Lune. On a donc le schéma 2.

Donc, si la Lune passe un temps $t' = 2t$ dans l'ombre de la Terre, le rapport des diamètres n'est plus de trois, mais de quatre. Le diamètre de la Terre est donc égal à quatre fois celui de la Lune.

Remarque : En fait le rayon R_T de la Terre n'est pas égal à 4 rayons lunaires, mais à 3,66 rayons lunaires R_L .

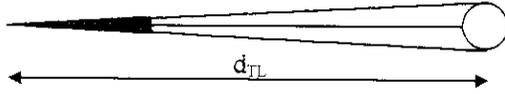
Note :

Aristarque de Samos (310-200 avant JC) mit en oeuvre des techniques de mesures des distances Terre-Lune et Terre-Soleil.



Distance Terre-Lune.

Connaissant le diamètre de la Lune, il suffit de mesurer l'angle α (diamètre apparent) sous lequel on voit la Lune depuis la Terre pour déduire la distance Terre-Lune d_{TL} .

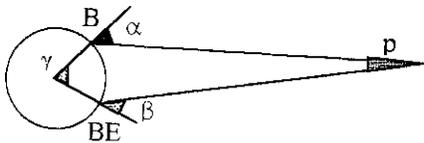


Aristarque a évalué le diamètre apparent de la Lune à 2° .
 En prenant $R_T = 3 R_L$, on trouve $d_{TL} = 19 R_T$
 Hipparque¹ a trouvé $0,5^\circ$. Avec $R_T = 3 R_L$, on trouve
 $d_{TL} = 76 R_T$ et avec $R_T = 4 R_L$, on trouve $d_{TL} = 57 R_T$.
 [19 = (3 tan 1°)⁻¹ et 76 = (3 tan $0,25^\circ$)⁻¹].

Remarque : du fait de l'orbite elliptique de la Lune, la distance Terre-Lune varie entre 56 et 64 R_T .

En 1751, Lalande² et La Caille³ mesurent la parallaxe de la Lune depuis Berlin (B) et le Cap de Bonne Espérance (BE).

On appelle parallaxe d'un astre, l'angle sous lequel depuis cet astre on voit une longueur de référence.
 $p = \alpha + \beta - \gamma$
 donc : $d_{TL} = d(B-BE) / \tan p$.



Cette mesure a été faite à partir de deux villes situées approximativement sur le même méridien et lors du passage de la Lune dans le plan méridien.

Des mesures utilisant d'autres méthodes que la trigonométrie, ont été utilisées :

- mesure du trajet aller-retour d'une émission radar, la première mesure a été réalisée en 1946.
- tir laser sur des réflecteurs déposés par les sondes soviétiques et les astronautes américains sur la surface lunaire, à partir de deux observatoires l'un aux USA et l'autre en France (le CERGA⁴, situé au dessus de Grasse). Cette technique est encore utilisée. Elle permet de mesurer la distance entre réflecteur et télescope au centimètre près.

Remarque : la distance de la Terre à la Lune varie de 363 300 km (périgée) à 405 500 km (apogée), la distance moyenne étant de 384 401 km : l'excentricité de l'orbite est de 0,0549.

Notes :

- 1 - Hipparque, 190-125 avant JC donne une interprétation de l'inégalité des saisons, découvre la précession des équinoxes et réalise un catalogue de 800 étoiles.
- 2 - Joseph Jérôme Lalande, 1732-1807, directeur de l'Observatoire de Paris en 1768.
- 3 - Abbé Nicolas Louis de La Caille, 1713-1762.
- 4 - Centre d'Études et de Recherches Géodésiques et Astronomiques.

Distance Terre-planète.

Certaines planètes sont connues depuis la plus haute antiquité (Mercure, Vénus, Mars Jupiter et Saturne), mais la mesure de leur distance n'était pas accessible.

1. A partir de la troisième loi de Kepler (1571-1630) il est possible de déterminer le rapport des distances des planètes au Soleil.

$$a^3 / T^2 = \text{cte} = GM_s / 4\pi^2$$

Donc pour Vénus (V) et la Terre (T) on aura :

$$(a_T / a_V)^3 = (T_T / T_V)^2$$

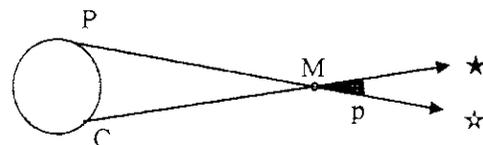
Les périodes de révolution de la Terre (T_T) et de Vénus (T_V) étant mesurables, il est possible de déterminer le rapport des distances au Soleil.

Remarque : si on mesure une des distances, on en déduit toutes les autres.

2. Autre méthode : comme dans le cas de la Lune, la méthode utilisée est celle de la parallaxe. La difficulté de cette méthode vient du fait que plus la distance de l'objet augmente, plus la parallaxe (angle p) diminue.

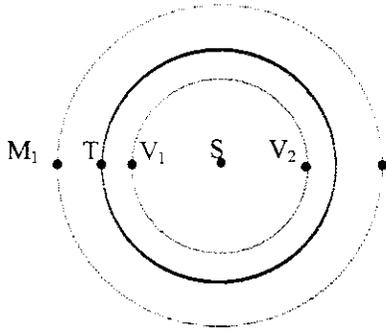
En 1672 Cassini¹ et Richer² ont mesuré la parallaxe de Mars.

Pour cela ils ont profité de conditions favorables : passage de Mars à l'opposition (Mars est alors au plus près de la Terre, cette distance est même minimale tous les 15-16 ans). Les observations effectuées de Paris (P) et de Cayenne (C) permettent de voir Mars (M) dans des positions différentes par rapport aux étoiles et de déterminer la parallaxe p de Mars, celle-ci étant de l'ordre de $15''$. La connaissance de la distance Paris-Cayenne permet d'en déduire la distance de la planète.



Dans ce cas la parallaxe p est déterminée à partir du champ d'étoiles. Cette mesure a été reprise en 1751 par La Caille.

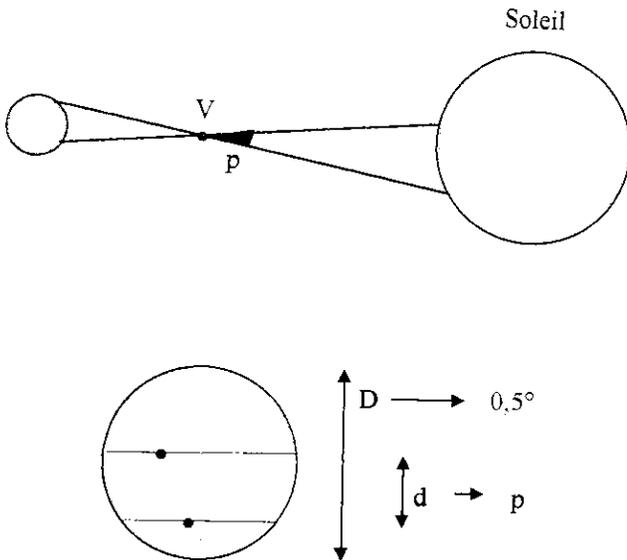
Remarque : conjonction, sous-entendu avec le Soleil, c'est à dire dans la direction du Soleil.



- En M_1 : opposition de Mars.
- En M_2 : conjonction de Mars.
- En V_1 : conjonction inférieure de Vénus.
- En V_2 : conjonction supérieure de Vénus.

3 - Une méthode analogue utilise un phénomène plus rare : le passage d'une planète intérieure (Mercure ou Vénus) devant le Soleil. Cette méthode a été utilisée en 1761 et 1769 lors des passages de Vénus devant le Soleil.

Dans ce cas la parallaxe p est déterminée à partir du champ du Soleil.



Or p est également l'angle sous lequel on voit la distance séparant les deux observateurs depuis la planète. Il est alors possible de déterminer la distance de la planète.

Remarques :

- au 18^e siècle, les mesures de durées étaient plus précises que les mesures d'angles. On chronomètre les durées des transits, on en déduit la longueur des cordes, on les positionne sur le Soleil et on en déduit leur distance angulaire qui représente p .

- Vénus passera devant le Soleil le 8 juin 2004, le 6 juin 2012 et Mercure y est passé le 15 novembre 1999.

Notes :

- 1 - Jean-Dominique Cassini (1625-1712), premier directeur de l'observatoire de Paris, découvre deux satellites de Saturne : Japet et Rhéa.
- 2 - Jean Richer (1630-1696) découvre le mouvement propre d'Arcturus.

Distance Terre-Soleil .

Aristarque a déterminé la distance de la Terre au Soleil en utilisant les phases de la Lune. Il suppose que la Lune a un mouvement circulaire et uniforme et que le Soleil n'est pas à l'infini (contradiction avec la méthode utilisée pour déterminer le diamètre de la Lune).

Si le Soleil n'est pas à l'infini, les positions des Premier et Dernier Quartiers de Lune ne sont pas diamétralement opposées sur l'orbite de la Lune, donc l'angle Soleil-Terre-Lune (β) est différent de 90° , et l'angle Soleil-Lune-Terre est égal à 90° .

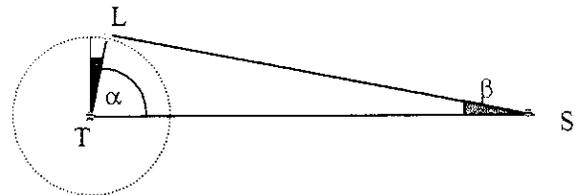
Il suffit donc de mesurer l'angle β pour déterminer la distance Terre-Soleil d_{TS} .

Aristarque mesure cet angle et trouve 3° .

Donc $d_{TS} = 19 d_{TL}$

Cette valeur qui est sous-estimée d'un facteur 20 sera cependant admise pendant 15 siècles.

En fait $\beta = 10'$.



Remarque : Archimède¹ a mesuré le diamètre apparent du Soleil (30') et à partir de la mesure d'Aristarque, en déduit le diamètre du Soleil : 5 à 6 fois celui de la Terre (au lieu de 109). Malgré cet écart important, la taille du Soleil devait laisser penser que l'astre le plus petit (la Terre) devait tourner autour du plus grand (le Soleil). Aristarque était de cet avis.

La mesure de la parallaxe d'une planète et la connaissance du rapport des distances au Soleil de cette planète et de la Terre permettent de calculer la distance Terre-Soleil.

Ainsi les résultats suivants ont été obtenus à partir des mesures de parallaxes :

- 1672 Cassini (opposition de Mars) $138,4 \times 10^6$ km
- 1751 La Caille (opposition de Mars) $129,2 \times 10^6$ km
- 1769 (passage de Vénus devant le Soleil)

$151,6 \times 10^6$ km.

Voici quelques valeurs adoptées au cours des siècles pour la distance Terre-Soleil en rayon terrestre R_T :

- Tycho Brahé² : 1146 R_T .
- Kepler³ : 3438 R_T .
- Laplace⁴ : 23 984 R_T .
- actuellement : 23455 R_T .

Comme nous l'avons vu, la mesure de cette distance Terre-Soleil appelée Unité Astronomique (UA) dépend de la précision de la mesure de la distance d'une planète. Il faut donc que celle-ci ne soit pas trop loin sinon sa parallaxe est trop faible.

Des progrès ont été effectués au 19^e siècle avec la découverte des astéroïdes (Cérès 1801, Pallas 1802,...) dont cer-

tains s'approchent de la Terre comme Eros dont la distance moyenne au Soleil est de 1,5 UA, mais qui peut se trouver à quelques dizaines de millions de kilomètres de la Terre. En 1931, alors qu'il était à 25 millions de km (la moitié de la distance minimale de Mars), sa distance fut mesurée et on en déduit avec une meilleure précision la valeur de l'unité astronomique : 149 600 000 km.

Remarque : bien que se rapprochant plus de la Terre que Mars (40 millions de km au lieu de 56 millions), Vénus n'est pas utilisée pour cette méthode de parallaxe car lors de sa conjonction inférieure, elle présente sa face sombre vers la Terre et elle se trouve dans la direction du Soleil.

L'utilisation d'échos radar sur Vénus et sur Mars permet de déterminer les distances dans le système solaire avec une précision de quelques kilomètres.

Remarque : la connaissance de la mesure de la distance Terre-Soleil a permis à Römer de montrer que la vitesse de propagation de la lumière était finie.

Notes :

- 1 - Archimède 287-212 av JC.
- 2 - Tycho Brahé, astronome danois 1546-1601, fut le premier à tenir compte de la réfraction atmosphérique. Ses observations de la planète Mars permettent à son élève Kepler d'énoncer les lois des mouvements des planètes.
- 3 - Johannès Kepler 1571-1630.
- 4 - Pierre Simon marquis de Laplace, astronome, mathématicien et astronome 1749-1827.



Le Cern, l'ESA et l'ESO lancent le programme "Physique en scène".

"Physique en scène" est une initiative de l'Agence spatiale européenne (ESA), du laboratoire européen de physique des particules (CERN) et de l'Organisation européenne pour des recherches astronomiques dans l'hémisphère austral (ESO), avec le soutien de l'Union Européenne (UE). La société européenne de physique (EPS) et l'Association européenne pour l'éducation en astronomie (EAAE) se sont associées à l'entreprise. Ce programme ambitieux, lancé en février 2000, organisé dans le cadre de la Semaine européenne pour la culture scientifique et technique, s'achèvera par un Festival des sciences qui se déroulera du 6 au 11 novembre 2000 au CERN, à Genève.

L'objectif à court terme consistera à privilégier les sujets susceptibles de passionner le public et à fournir de nouveaux outils pédagogiques. A plus long terme, "Physique en scène" entend favoriser de nouvelles avancées en permettant aux spécialistes européens de se rencontrer, d'échanger leurs idées et d'innover.

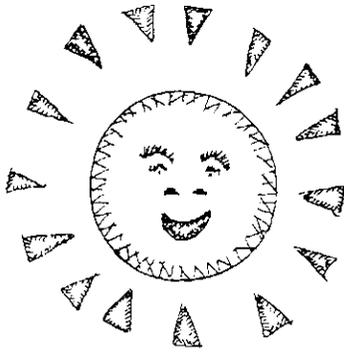
"Physique en scène" a déjà été lancé dans 22 pays européens. Chacun d'entre eux disposera de son propre Comité de direction national (NSC) chargé de mettre en oeuvre les activités qui le concernent, d'examiner la situation régnant dans son pays et d'étudier avec les médias de nouvelles méthodes pédagogiques pour rendre la physique plus passionnante.

Les responsables prévoient notamment d'organiser une série d'activités de haut niveau liées à la physique, qui permettront au public européen, et plus spécialement aux enseignants du secondaire et aux représentants des médias, d'aborder cette discipline d'une façon nouvelle, en soulignant l'influence étroite que cette science de la nature exerce sur notre vie quotidienne. Des concours organisés sur un plan national serviront à sélectionner les meilleures idées de présentations ou d'outils pédagogiques et le programme permettra de financer la mise en oeuvre des plus convaincantes d'entre elles.

Site web de "Physique en scène" : <http://www.estec.esa.nl/outreach/pos>

Comité directeur international (ISC) Mr. Clovis de Matos, ESA/ESTEC Postbus 299 NL-2000AG Noordwijk, Pays-Bas.

e-mail : cdematos@estec.esa.nl ; tel : +31 (071) 565 5518 ; fax : +31 (071) 565 5590.



Le "Perot-Fabry" en images

Georges Paturel,
Observatoire de Lyon

ARTICLE DE FOND

Afin que les lecteurs des Cahiers qui n'ont pas étudié le "Perot-Fabry" puissent encore mieux apprécier l'article sur l'histoire de l'interférométrie, Georges Paturel nous propose une illustration simple et claire du fonctionnement de cet interféromètre.

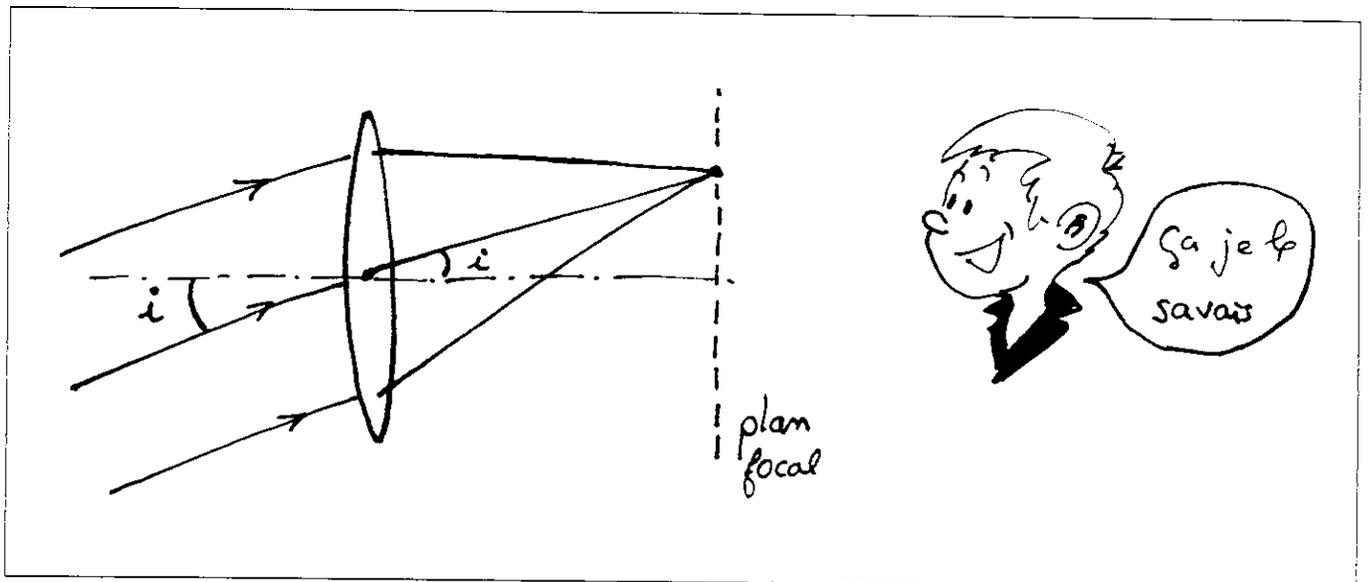
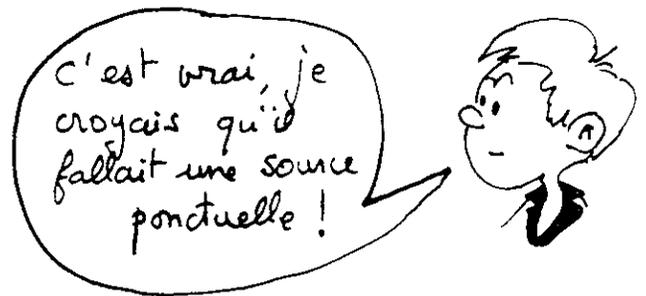
Nous allons essayer d'expliquer l'interféromètre de Perot et Fabry, le "Perot-Fabry", en images.

Cet interféromètre permet d'obtenir des interférences à partir d'une source lumineuse étendue comme une nébuleuse.

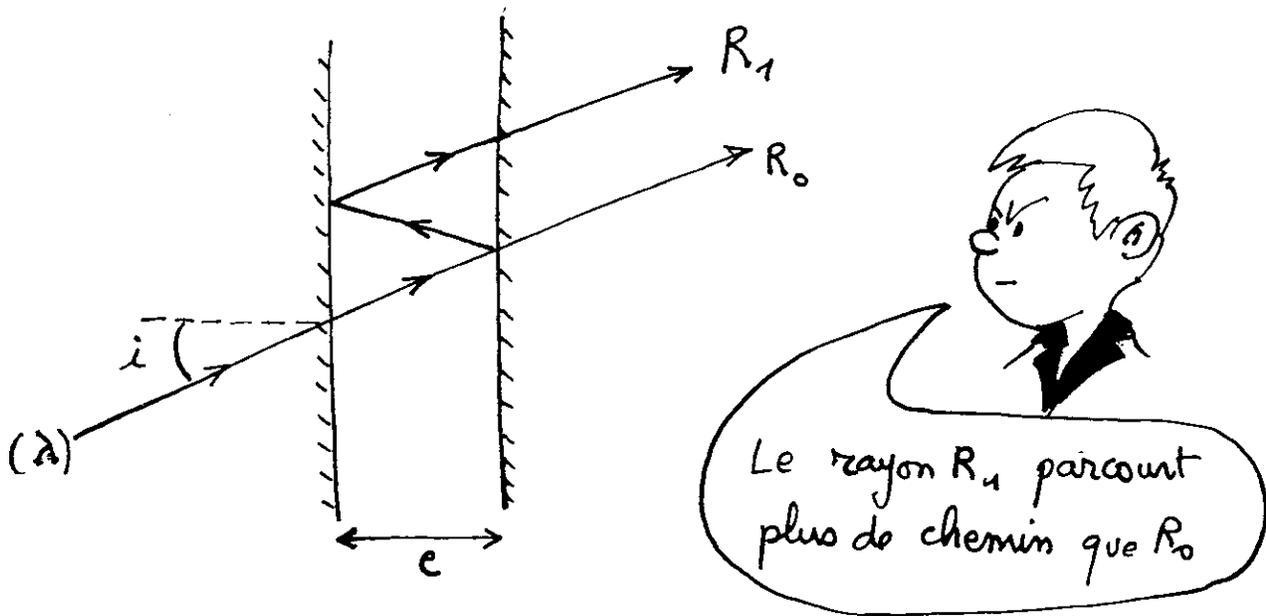
Comment cela est-il possible ?

Il y a deux choses à savoir et tout devient facile à comprendre.

1 - Une lentille convergente rassemble en un point les rayons lumineux arrivant selon une même direction.



2 - Un rayon qu'on partage en deux (par des miroirs semi-réfléchissants) peut interférer avec lui-même.

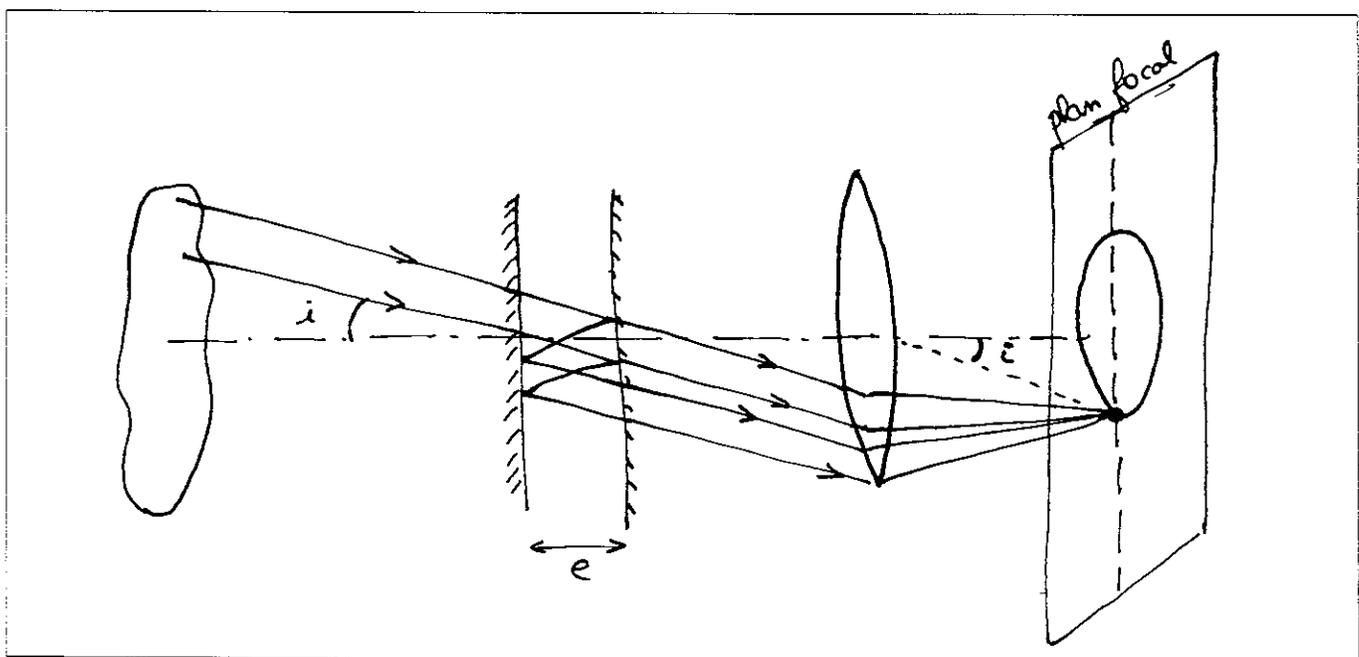


- Si, dans le chemin parcouru en plus par R_1 (LCPEPPR₁ pour abréger) il y a un nombre entier de longueurs d'onde, la composition des deux rayons donnera un maximum de lumière.

- S'il y a un nombre demi-entier de longueurs d'onde, la composition des rayons donnera un minimum de lumière.

En effet LCPEPPR₁ dépend de l'angle d'incidence des rayons et de l'intervalle e .

Illuminons nos deux miroirs réfléchissants par une source lumineuse rayonnant à la longueur d'onde λ .



Tous les rayons qui font un angle i par rapport à l'axe horizontal vont interférer.

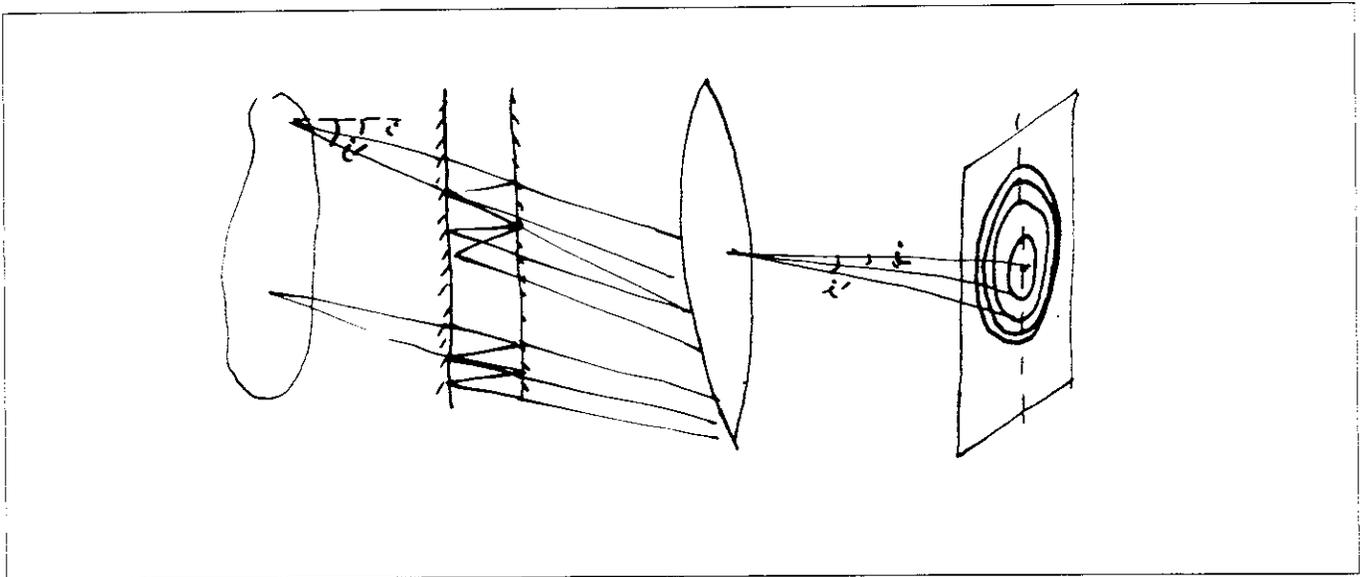
Si e a la bonne valeur (telle que $LCPEPPR_1 = k\lambda$) ces rayons donneront un bel anneau brillant.

Mais il y a d'autres angles qui seront tels que $LCPEPPR_1 = k\lambda$?



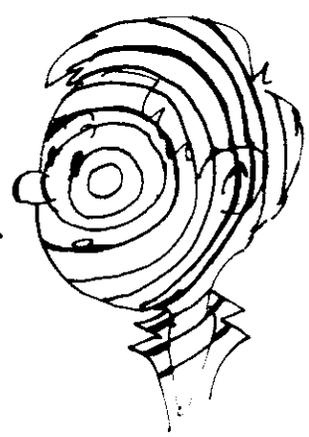
Oui !

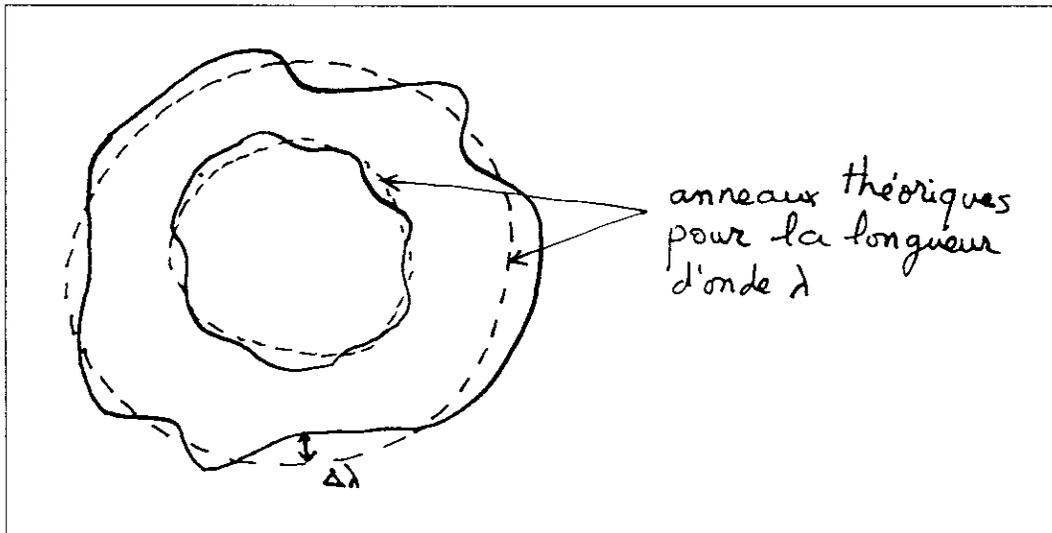
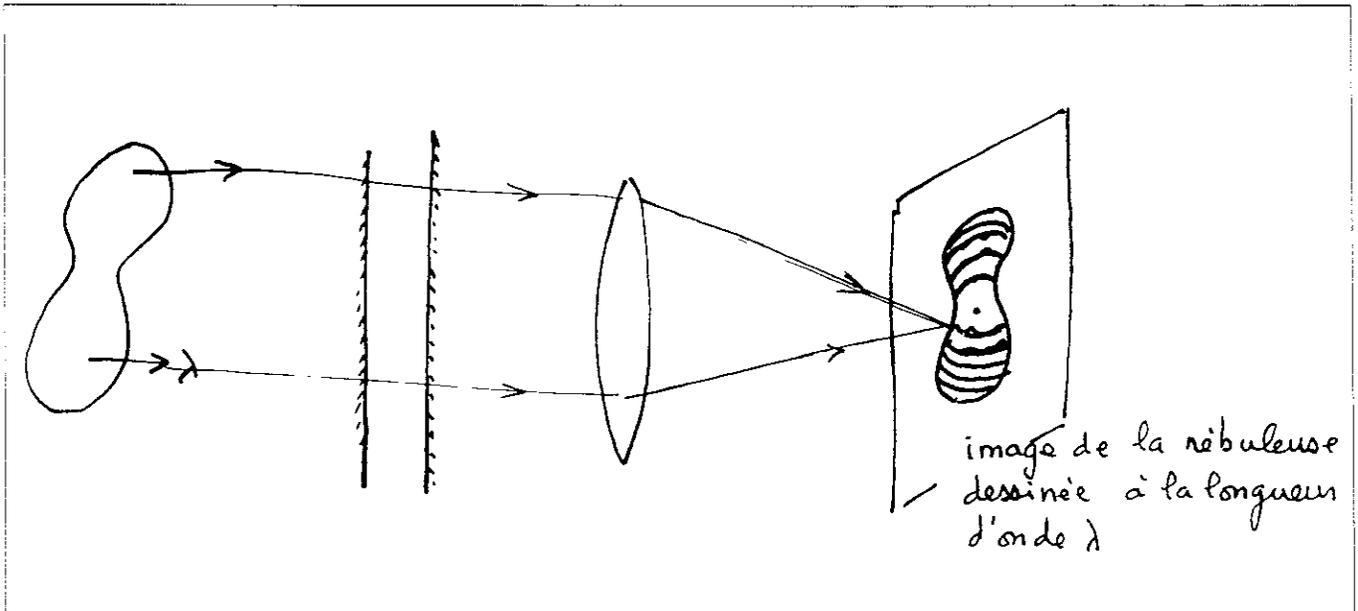
On observera donc une série d'anneaux



Imaginons que la source étendue est une nébuleuse qui rayonne à la longueur d'onde λ (par exemple à la longueur d'onde de la raie H_α de l'hydrogène, soit $\lambda = 656 \text{ nm}$), on verra dans le plan focal l'image de la nébuleuse **mais seulement là où passent les anneaux.**

Bof! ?
ça sert à quoi ?





● L'écart à la circularité d'un anneau permet de mesurer l'écart à la longueur d'onde au repos .

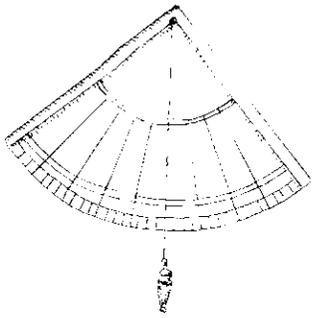
On peut donc mesurer la vitesse en de nombreux points de la nébuleuse (là où passent les anneaux) grâce à la relation de Doppler - Fizeau.

$$V = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

● De plus en faisant varier e, on peut changer l'emplacement des anneaux et balayer tous les points de la nébuleuse.

On peut faire ainsi la carte des vitesses d'une source étendue, nébuleuse gazeuse, galaxie...





Un aperçu des découvertes de Fabry et Perot

Philippe Amram et Yvon Georgelin
Observatoire de Marseille

Lors de l'assemblée générale 1999 à Marseille, Philippe Amram a fait une conférence sur l'histoire de l'interférométrie. Cet exposé avait déjà été présenté. Il nous a confié le compte-rendu en anglais de ce travail commun avec Yvon Georgelin. C'est Jacques Vialle qui a eu la gentillesse de traduire ce texte pour les lecteurs des Cahiers.

Résumé.

Il y a un siècle, Fabry et Perot inventèrent l'interféromètre qui porte leur nom. Avant cela, il avait fallu deux siècles pour en arriver à la naissance de l'instrument.

Actuellement, des centaines de scientifiques de par le monde l'utilisent journalièrement, probablement sans accorder une pensée à ses inventeurs de génie.

Fabry et Perot construisirent l'instrument, en firent la théorie, développèrent des méthodes d'analyse, et surtout l'utilisèrent pour faire des découvertes scientifiques majeures, liant ainsi définitivement cet interféromètre à leurs noms.

Ils s'occupèrent de physique, d'astronomie et de géophysique et contribuèrent fortement à réduire le fossé qui séparait l'astronomie de la physique, contribuant ainsi à donner un statut à une science qui commençait à émerger au début du siècle : l'astrophysique.

Leur oeuvre majeure reste la détermination de la température et de la cinématique des nébuleuses d'Orion, la mesure du décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle et une contribution à la métrologie.

D'autres découvertes qui leur sont dues sont moins connues, comme la détermination

de l'altitude et de l'épaisseur des couches d'ozone atmosphérique, la calibration du flux provenant de la Lune, du Soleil, des étoiles et de la Voie lactée; le perfectionnement de la photométrie stellaire hétérochromatique, le développement d'électromètres mesurant des potentiels faibles, l'élaboration d'un atlas des raies spectrales en émission; la vérification directe au laboratoire de l'effet Doppler-Fizeau...

1. Introduction.

En astronomie, on peut utiliser les interféromètres Fabry-Perot chaque fois qu'il faut détecter une émission faible et étalée.

Lorsque le signal est détecté, même s'il est faible, on obtient une information sur les longueurs d'onde qui le composent et on peut ainsi étudier son spectre. C'est un grand plaisir pour nous, utilisateurs quotidiens du Fabry-Perot, de rendre hommage à ses ingénieux inventeurs. Chaque jour, nous restons fascinés par la puissance de cet instrument qui se compose principalement de deux blocs de verre semi-réfléchissants. Nous entreprendrons cette étude selon un double point de vue, mi-scientifique et mi-historique, et avec les yeux de l'astronome.

Entre les premières observations et descriptions d'interférences à ondes multiples et la découverte finale de l'interféromètre, il s'écoula deux siècles. Manifestement, la compréhension du phénomène d'interférences à ondes multiples était intimement liée au progrès de l'électromagnétisme et des techniques de dépôt d'argent en couches minces. Au siècle dernier, des milliers d'articles traitant de la théorie, de la pratique et des applications du Fabry-Perot furent publiés dans le monde dans les domaines de la physique, de l'astronomie, de la métrologie, de la géophysique, de la chimie ou de la biologie. Hernandez (1986) et Vaughan (1989) ont publié deux excellents livres sur la théorie et la mise au point du Fabry-Perot. Cette étude se propose un double objectif : replacer la découverte de l'interféromètre dans son contexte historique et donner des exemples de l'immense travail scientifique accompli par Fabry, Perot et d'autres.

2. Eléments biographiques succincts.

A la mort de Perot et de Fabry, de chaleureux éloges funèbres furent prononcés par Fabry (1926) et par de Broglie (1946), respectivement.

Alfred Perot (1863-1925).

Perot était un peu plus âgé que Fabry. Il naquit à Metz (France) le 4 novembre 1863. Pour l'anecdote, le nom de Perot est transcrit sur son acte de naissance sans aucun accent sur le "e" mais on prononce [Pérot], exactement comme on écrit Clemenceau, prononcé [Clémenceau].

Il fut élève de l'Ecole polytechnique à Paris. Sa thèse de thermodynamique, soutenue à Nancy (France) en 1888 est une vérification expérimentale brillante et rigoureuse de l'équivalence entre la mécanique et la calorimétrie.

En 1888, âgé de 25 ans, un an après s'être marié, il obtint un poste de maître de conférences à l'Université de Marseille, où il enseigna et poursuivit ses recherches pendant 13 ans. En 1894, il fut nommé professeur titulaire. A la même époque, Charles Fabry était un de ses étudiants.

Perot travailla d'abord sur la théorie et les applications industrielles de l'électricité, une science en plein développement au début du XXe siècle. Il développa à des fins pédagogiques des expériences sur les moteurs électriques et les dynamos. Au cours de l'hiver 1900, 37 lignes électriques furent installées pour fournir le courant aux tramways de la ville. Elles perturbaient le réseau téléphonique et Perot résolut le problème en tant qu'ingénieur.

En 1892, Fabry fut le premier à comprendre le lien entre le facteur de réflexion et la visibilité des franges d'interférences. Toutefois, Fabry lui-même déclara que c'est grâce à Perot que l'instrument fut construit.

Dans l'éloge funèbre de Perot, Fabry déclara : " Nos esprits se complétaient, Perot était un expérimentateur génial qui lisait peu et détestait écrire mais son activité réelle (et presque fébrile) se déroulait au laboratoire. "

En 1901, Perot fut nommé à Paris. Premier directeur du Laboratoire d'essai qui venait d'être créé, il consacra une grande partie de son temps à des tâches administratives. Néanmoins, il poursuivit sa carrière scientifique et ses travaux, principalement sur l'électricité, mais aussi en continuant avec Fabry ses mesures interférométriques. A l'Observatoire de Meudon, il travailla principalement à la mesure des raies d'absorption du spectre solaire.

Pendant et après la Première Guerre mondiale, Perot se consacra à l'étude du problème des communications : application au tube à trois électrodes et appareil destiné à mesurer le champ magnétique terrestre.

Perot mourut en 1925, à l'âge de 62 ans.

Charles Fabry (1867-1945).

Charles Fabry naquit à Marseille en juin 1867, dans une famille de scientifiques. Charles Fabry était un cousin direct d'Edmond Rostand. L'année même où Fabry et Perot découvrirent l'interféromètre, Cyrano de Begerac connaissait un énorme succès à Paris. Fabry étudia pendant quelques années dans le laboratoire de Macé de Lépinay (1852-1904) à Marseille et fut professeur de lycée à Pau, Nevers, Bordeaux, Marseille et Paris.

Fabry fut aussi élève à l'Ecole polytechnique trois ans après Perot. En 1892, il soutint en Sorbonne un thèse sur la visibilité et l'orientation des franges d'interférence, alors que Michelson était à Paris.

En 1894, Fabry obtint un poste de maître de conférences, succédant à Perot qui obtenait une chaire de professeur titulaire, puis en 1904 il fut nommé professeur titulaire à l'Université de Marseille où il passa trente années de sa vie, y accomplissant la majeure partie de son travail scientifique.

Pendant la Grande Guerre, Fabry créa des stations radio mobiles.

En 1920, il devint le premier directeur de l'Institut d'Optique de Paris et en 1921, il fut nommé professeur de physique à la Sorbonne (jusqu'à sa retraite en 1937).

A la mort de Perot en 1925, Fabry reprit le poste de ce dernier à l'Ecole Polytechnique. Il consacra alors beaucoup de temps à enseigner et à écrire des livres pour les étudiants. Il était membre de l'Académie des sciences. Il mourut en 1945 à l'âge de 78 ans.

3. Le contexte scientifique à Marseille avant la découverte du Fabry-Perot.

L'Université de Marseille se trouvait rue Sénac de Meilhan (1880-1940), près de la Canebière. En 1886, Macé de Lépinay était le seul professeur de physique à l'Université de Marseille. Il dirigeait le groupe dans lequel Perot et plus tard Fabry et Henri Buisson (1873-1944) accomplirent leurs premiers travaux scientifiques. Macé de Lépinay avait fait la connaissance du docteur en médecine Nicati. Ensemble, ils étudièrent les problèmes liés au daltonisme et à la perception des couleurs.

Ils découvrirent de nouvelles formes de daltonisme affectant la perception du vert et du bleu. Ces travaux validèrent définitivement la théorie trichromique de Young. Macé et Nicati réexaminèrent le phénomène de Purkinje et montrèrent que dans l'obscurité l'oeil humain est plus sensible dans le bleu que dans les autres couleurs. Aussi proposèrent-ils de modifier le vieil adage : "la nuit, tous les chats sont bleus", et non gris !

Macé et Perot étudièrent aussi le phénomène des mirages (1892). Ils firent l'hypothèse que l'indice de l'air varie asymptotiquement avec l'altitude. De plus, Macé et Perot montrèrent qu'un rayon lumineux n'est pas totalement réfléchi par une couche atmosphérique spécifique mais suit une trajectoire parabolique : ainsi, le "point de mirage" n'est pas un point de réflexion.

Ils montrèrent aussi que le faisceau formé par les différents rayons lumineux ne reste pas parallèle au cours de sa propagation.

Macé améliora d'un facteur 10 la précision des mesures de longueurs d'onde, et d'un facteur 1000 celle de la valeur de la masse d'un décimètre cube d'eau en se servant de techniques fondées sur les franges d'interférence.

Ces travaux influencèrent ceux, ultérieurs, de Fabry et de Perot en métrologie. De 1892 à 1940, Macé, Perot, Fabry, Buisson et d'autres collaborateurs publièrent près de 400 articles scientifiques.

4. La découverte de l'interféromètre Fabry-Perot.

On peut admettre que l'invention de l'interféromètre à ondes multiples procède de la convergence de deux développements indépendants.

Premièrement, à partir du XVIII^e siècle, la production en nombre de plus en plus important de miroirs, aboutissant finalement à la réalisation de films d'argent semi-transparents (point qui ne sera pas développé ici, Foucault, 1858).

Deuxièmement, on observait depuis deux siècles des phénomènes d'interférence à ondes multiples (et même on les calculait), mais avant Fabry, on ne comprenait pas une caractéristique importante et qui leur est propre : le rétrécissement des franges (fringe sharpening).

Duffieux (1969) et P. Connes (1986) ont étudié de manière très rigoureuse et exhaustive l'histoire des interférences à ondes multiples jusqu'à la découverte de l'interféromètre. On observait depuis l'Antiquité des phénomènes colorés sur des bulles de savon. Lorsqu'on fait varier la taille des bulles, les couleurs réfléchies changent.

Bien avant Isaac Newton (1643-1727), Robert Hooke (1635-1703) avait entrepris des travaux préliminaires sur la gravité et sur les interférences à ondes multiples. Hooke et Newton observèrent des franges entre deux lentilles mais ils ne pouvaient pas les interpréter en terme d'optique ondulatoire. Il est curieux que la notion de périodicité, décrite plus tard par une théorie ondulatoire, fut en fait due à Newton avec sa théorie des accès (fits) alors que Huygens n'y prêta aucune attention. En termes modernes, on peut interpréter les accès de Newton comme une combinaison de la phase et de la période de l'onde. Newton découvrit l'achromatisation (qui a lieu lors de la production de franges de n'importe quelle couleur autres que noir ou blanc).

Thomas Young (1773-1829) observa des franges d'interférence avec sa fameuse expérience des deux trous.

Augustin Fresnel (1788-1827) élabora une théorie unique rendant compte à la fois des interférences, de la diffraction et de la polarisation.

Léon Foucault (1819-1868) et Armand Fizeau (1819-1896) observèrent des interférences produites par des couches minces.

William Herschel (1788-1822) observa les interférences produites dans une mince couche d'air entre deux lames de verre.

Les premiers calculs mathématiques d'interférences à ondes multiples sont attribués à Poisson et à Airy. Simeon-Denis Poisson (1781-1840) découvrit que dans une couche mince la lumière se divise en un nombre indéfini de réflexions et de réflexions et que les figures d'interférences sont produites par l'ensemble des rayons. Il détermina les intensités maximum de ces figures. George Airy (1801-1892) donna une expression complète de l'intensité de la lumière transmise. Malheureusement, il ne prit jamais en considération la forme particulière de la fonction (Airy se référait à la théorie de Fresnel). Il ne fit aucun rapprochement entre la forme et la sélectivité de la fonction.

A Bordeaux, Raymond Boulouch (1861-1937) enseignait dans le même lycée que Fabry, juste avant que ce dernier soutienne sa thèse. Il est difficile de savoir exactement dans quelle

mesure les travaux de Boulouch influencèrent ceux de Fabry et réciproquement.

Il semble difficile de penser qu'à Bordeaux ils n'eurent entre eux aucun échange de caractère scientifique. Le problème est de savoir quel fut le contenu exact de ces discussions. Boulouch publia ses observations en ondes multiples cinq mois après que Fabry eut quitté Bordeaux. A en juger par les excellentes relations qu'il eurent par la suite, il semble difficile de croire que quelque chose qui n'ait pas été conforme à l'éthique scientifique ait pu se passer entre les deux hommes (Boulouch dédia sa thèse à Fabry en 1923).

Boulouch fut le premier à observer des franges d'ondes multiples à travers un verre semi-argenté mais il ne décrivit pas la finesse des franges (courbe d'Airy). Ses observations restaient vagues, ressemblaient à des expériences virtuelles, sans mesures, et ne concernaient pas vraiment les interférences à ondes multiples.

Dans sa thèse, Fabry fut le premier à comprendre la relation entre la finesse des franges (le rapport de contraste) et le pouvoir réfléchissant élevé des lames argentées.

L'invention de l'interféromètre eut lieu lorsque Fabry et Perot essayèrent de résoudre le problème des décharges électriques entre deux surfaces séparées d'un micromètre ou moins. Fabry était convaincu que seule des méthodes interférométriques pourraient résoudre le problème. Fabry et Perot observèrent les positions des franges à l'infini et les spectres cannelés, comprirent la raison de la finesse des franges et la calculèrent (en se référant à la fonction d'Airy). Ils mesurèrent le pouvoir séparateur de l'instrument, découvrirent la superposition des franges et les techniques de mise en coïncidence; ils perfectionnèrent le réglage du parallélisme des interfaces et construisirent un bloc de verre étalon.

Ils inventèrent même le premier interféromètre Fabry-Perot à balayage (une poche en caoutchouc reliée à un entonnoir; en faisant varier la hauteur de l'entonnoir, de petites flexions agissant sur les pinces qui maintenaient l'ensemble déplaçaient légèrement une des deux plaques).

Un an après la découverte de Fabry et de Perot, le même phénomène fut découvert et expliqué pour les longueurs d'onde du domaine hertzien.

5. Aperçu des découvertes de Fabry et de Perot.

Il est évidemment impossible de passer en revue l'ensemble des réalisations dues à Fabry, à Perot et à leurs nombreux collaborateurs. Nous ne pouvons avoir qu'une vue d'ensemble de leurs travaux, les classer par domaines et en donner quelques exemples significatifs. On trouvera une bibliographie plus précise dans Georgelin et Amram (1995) et dans Georgelin et Tachoire (1999, en français), mais les publications de Fabry les plus importantes se trouvent dans la compilation qu'il fit de ses articles (Fabry, 1938).

Les quatre domaines principaux dans lesquels ils travaillèrent furent la métrologie, la spectroscopie de laboratoire, la photométrie et la spectrométrie astrophysiques et la géophysique.

En métrologie, ils développèrent des méthodes de mesures d'épaisseur et des méthodes de calibration du mètre étalon, mesurèrent la masse d'un décimètre cube d'eau, établirent des équivalences entre les unités de longueur et les grandeurs électriques; ils publièrent un atlas de raies d'émission, mesurèrent des structures spectrales fines, définirent des unités internationales de longueurs d'onde, étudièrent la théorie cinétique des gaz et le spectre d'étincelle.

En astrophysique, ils étudièrent la physique solaire : intensité bolométrique du rayonnement, intensité des raies d'émission, de la couronne solaire dans le visible et dans l'ultra-violet, la température et la pression, la rotation différentielle, la photométrie hétérochromatique et le décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle; ils mesurèrent la luminosité des étoiles; ils déterminèrent la brillance de la Voie lactée; ils déduisirent la rotation, la température des nébuleuses d'Orion et la présence de nébulium. Ils mesurèrent la dimension des météorites et celle des atmosphères planétaires lors d'occultations d'étoiles. Ils étudièrent la diffusion de la lumière par les gaz et appliquèrent

leurs travaux à des mesures de densité des queues cométaires, de la luminosité du ciel nocturne, de la lumière zodiacale et de la couronne solaire.

En Géophysique, ils étudièrent les propriétés de la couche d'ozone.

5.1. Métrologie

La découverte de l'interféromètre est liée à des mesures de longueur d'onde (couches d'air minces et épaisses). Ces mesures de haute précision furent en outre appliquées à une meilleure définition des unités du système métrique (mètre, kg, ohm) et à les relier entre elles. Des électromètres furent aussi conçus afin de mesurer des potentiels faibles. Ces électromètres donnaient une mesure absolue : une force électrique contrôlée par l'observation des franges était mise en relation avec une force mécanique. On trouvera une étude des travaux de Fabry en métrologie dans Bouchareine (1986).

5.1.1. Phénomènes d'interférences.

La théorie de la visibilité et de l'orientation des franges fut développée par Fabry dans sa thèse; le rétrécissement des franges et l'acuité de la résonance correspondante furent les découvertes qui permirent la naissance de l'interféromètre. La technique de la superposition des franges et la méthode des coïncidences furent mises au point : le décalage de longueur d'onde créé par l'effet de phase lors de la réflexion fut expliqué et le premier interféromètre à balayage fut inventé.

5.1.2. La "longueur" du mètre-étalon en invar.

Le système métrique décimal naquit sous la Révolution française, avec pour but la création d'un système universel. L'esprit de grands savants tels que Borda, Lagrange, Laplace, Condorcet et Monge était toujours vivace au début du 20^e siècle. Bien entendu, à cette époque, le laser n'existait pas encore, aussi la cohérence des sources lumineuses dans le domaine temporel restait le principal problème à résoudre lorsque la distance à mesurer était trop grande.

Pour mesurer la valeur exacte d'un mètre, il était hors de question de déplacer les lames de l'interféromètre de 0 à 1 mètre en comptant les 1 553 164, 13 franges. Cela est en fait impossible à cause du recouvrement des franges, même avec la raie très fine du cadmium à 643,8 nm. On eut recours à cinq étalons pour produire des franges superposées en lumière blanche (les épaisseurs des cinq étalons étaient de 62,5 mm, 125 mm, 250 mm, 500 mm et 1 mètre). On mesura l'épaisseur d'un étalon donné sans déplacer les lames en utilisant les méthodes de coïncidence et de superposition des franges. Ensuite, il fallut appliquer ces mesures aux quatre autres étalons. Ces mesures furent menées à Paris, au Laboratoire d'essai dont Perot était le directeur. Benoît, comme il l'avait déjà fait pour Michelson 20 ans auparavant, aidait Fabry et Perot. La vibration du sol parisien limitait la précision des mesures. L'erreur relative sur la mesure de la raie du cadmium était de 10^{-7} . Ils trouvèrent une valeur de la longueur d'onde de la raie du cadmium de 643, 846 960 nm au lieu de la valeur 643, 847 220 nm trouvée par Michelson. Leurs résultats confirmèrent ceux de Michelson mais ils étaient cinq fois plus précis.

Ceci conduisit Fabry, Perot et Benoît à proposer une nouvelle définition du mètre, 20 ans après l'expérience historique de Michelson : la longueur de l'étalon valait 1 553 164, 13 fois la longueur d'onde de la raie du cadmium à 644 nm.

5.1.3. Première valeur exacte de la masse d'un décimètre cube d'eau.

Le fondateur du système métrique avait choisi comme unité de masse la masse d'un décimètre cube d'eau à 4°C. La masse d'un dm³ d'eau était encore mal connue, avec une précision de un millième. Perot, Fabry et Macé de Lépinay mesurèrent cette masse en immergeant un cube de quartz dans de l'eau à 4°C. Le problème, néanmoins, était de mesurer avec précision les dimensions exactes d'un dm³ de quartz. Ils réussirent à le faire grâce à leur interféromètre et portèrent la précision de leur mesure à 1 millionième. Pour atteindre une telle précision, ils mesurèrent la dimension d'un cube de quartz

de 40 mm. Ils firent la cartographie de l'épaisseur du cube avec une précision meilleure que un micromètre; ils obtinrent ainsi une représentation en deux dimensions avec des courbes d'égales épaisseurs séparées par un intervalle de 0,1 micromètres. Ils trouvèrent que la masse d'un décimètre cube d'eau à 4°C était inférieure de 21,4 mg à la masse du kilogramme étalon. Des mesures plus récentes établissent cette différence à 27 mg au lieu de 21,4 en utilisant une sphère et non plus un cube, une sphère étant plus facile à réaliser qu'un cube!

Une fois la masse spécifique de l'eau mieux connue, ils déduisirent la masse spécifique du mercure et en outre déterminèrent l'unité électrique de résistance (en ohm) en faisant passer un courant électrique dans une colonne de mercure.

5.2. Spectroscopie de laboratoire

A cause de son contraste et de son pouvoir de résolution élevé, l'interféromètre Fabry-Perot est parfaitement adapté aux mesures spectroscopiques.

Les études au laboratoire et les études dans les domaines terrestres, solaires et astronomiques ont toujours été intimement liées. La compacité de l'instrument et sa facilité d'emploi, comparée à l'interféromètre de Michelson par exemple, autorisent différents champs d'application. Les auteurs eurent pour ambition de relier la physique du laboratoire à l'astrophysique et la géophysique.

5.2.1. Standards spectroscopiques.

Fraunhofer (1787-1826) découvrit les raies d'absorption du Soleil (1814) et Fizeau les raies d'émission du sodium (1864). Michelson (1852-1931) et Rowland (1841-1901) mesurèrent pour la première fois les longueurs d'onde dans les spectres d'arc métalliques. Les valeurs données par Michelson et par Rowland, présentaient une différence connue d'environ 1/30 000 à cause d'une erreur commise par Rowland dans la détermination, à l'aide d'un réseau, de la valeur absolue, fondamentale, de la longueur d'onde de la raie du sodium. Fabry et Perot tentè-

rent d'abord une comparaison directe entre le spectre solaire et des sources standard de laboratoire en utilisant un réseau concave mais le problème était inextricable! Plus tard, ils le résolurent en appliquant des méthodes interférentielles aux raies d'absorption solaires et aux sources de laboratoire. Ils trouvèrent une faible erreur systématique de 0,004 nm dans les tables de Rowland. La précision de leurs mesures est en moyenne de 5×10^{-8} . Pour les astronomes, cela équivaut à un décalage vers le rouge de 15 mètres par seconde.

De plus, ils donnèrent une explication aux différences aléatoires existant entre les raies solaires et les raies d'un spectre d'arc, différences dues aux particularités de ce type de spectre. Buisson et Fabry publièrent un atlas de spectres métalliques obtenus avec un réseau, un outil extrêmement précieux pour la spectroscopie. Au cours de ce travail, ils remarquèrent que cet arc est produit par un champ électrique de forte valeur plutôt que par une température élevée, comme on l'avait cru jusqu'alors.

5.2.2. Largeur des raies spectrales.

Fabry et Buisson (1912) mesurèrent la largeur des raies des gaz rares monoatomiques (He, Ne, Kr) en utilisant la visibilité des franges avec un interféromètre dont la résolution était de 10^7 .

Ils observèrent que la largeur des raies décroît avec la température. A la température de l'air liquide, la largeur de la raie atteint 6×10^{-4} nm. D'après la théorie cinétique des gaz, connaissant la masse atomique du gaz analysé et la largeur de la raie étudiée, ils montrèrent que la température à l'intérieur d'un tube de Geissler est semblable à la température externe.

5.2.3. Première vérification directe au laboratoire de l'effet Doppler-Fizeau.

Théoriquement prévu par Fizeau en 1848, l'effet Doppler appliqué aux champs électromagnétiques n'avait jamais été observé au laboratoire.

En 1914, Fabry et Buisson fixèrent un morceau de papier sur le bord d'une centrifugeuse tournant à 200 tours par seconde et éclairèrent ce papier avec une lampe à mercure. Le montage don-

nait une vitesse de rotation de ± 100 m/s, ce qui entraînait un effet Doppler-Fizeau mesurable de 1/5 de frange avec un interféromètre de 65 mm d'écartement. Les mesures sont en accord à mieux que 2% avec la valeur calculée. Perot (1924) monta douze prismes sur la centrifugeuse. Ainsi, la lumière traversait les prismes à des distances différentes de la base. On avait alors affaire à un milieu dont l'indice variait rapidement avec le temps. L'accord des mesures avec la théorie était meilleur que 10^{-8} .

5.3. Photométrie astrophysique et spectroscopie.

Courtés (1986) a fait une revue des applications de l'interféromètre à l'astrophysique.

5.3.1. Température du Soleil.

Abbot (1913) mesura pour la première fois la température de corps noir du Soleil; il trouva une température de 5740 K. Toutefois, cette mesure ne tenait pas compte de la lumière absorbée par la photosphère.

En 1922, Fabry refit les mesures avec un spectromètre à haute résolution pour évaluer cette absorption et trouva une valeur de 6000 K. Cette valeur fut confirmée par Plaskett l'année suivante, la mesure moderne donnant 5770 K.

5.3.2. "Plages de Fabry".

Depuis Bouguer (1698-1758), la photométrie avait fait peu de progrès. Fabry fit plusieurs découvertes, notamment en photométrie hétérochromatique.

Pour comparer les flux émis à différentes longueurs d'onde par des sources différentes, Fabry développa en 1910 une nouvelle méthode, connue aujourd'hui sous le nom de "plages de Fabry": au lieu de mesurer le flux d'une source dans le plan focal, Fabry mesurait ce flux dans un plan pupillaire. A cause de l'inversion champ-pupille, le plan du film photographique est une pupille uniformément illuminée et non plus un champ illuminé localement.

Cette méthode permet une mesure beaucoup plus précise du flux global. La luminosité des étoiles était rattachée à des standards photométriques.

5.3.3. Luminosité des étoiles.

Appliquant la technique des "plages de Fabry", Fabry compara

i) la luminosité de l'étoile Véga à celle d'une source de 1 candela située à une distance de 780 m. (1 candela = $1 / 683 \text{ W sr}^{-1}$ à 5401012 Hz);

ii) la luminosité de la Lune à celle d'une source de 41.016 candelas;

iii) la luminosité du Soleil à celle d'une source de 1027 candelas (ou 1 mm^2 de la surface solaire à une source de 1800 candelas);

iv) la luminosité de l'étoile brillante Sirius à 26 fois la luminosité du Soleil;

v) la luminosité de la couronne solaire à 75% de la luminosité de la Pleine Lune;

vi) la luminosité du plan galactique à 3 ~ 4 fois celle du pôle galactique. Il estima que l'oeil humain est assez sensible pour détecter une source de 1 candela située à 27 km. A l'oeil nu, Fabry observa une étoile de magnitude 8,2 à l'aide d'un tube muni d'un diaphragme afin de bloquer la luminosité du ciel nocturne qui limite la magnitude à 6, même lors de la Nouvelle Lune.

5.3.4. Décalage gravitationnel vers le rouge des raies solaires.

La théorie générale de la relativité d'Einstein (1915) avait prédit deux phénomènes résultant de l'action du Soleil sur la propagation d'un rayon lumineux à la distance 1 rayon solaire.

Premièrement, une déviation de sa trajectoire dans l'espace de l'ordre de 1,75 secondes d'arc pour un observateur terrestre. Eddington observa effectivement une déviation de 1,98 secondes d'arc lors de l'éclipse totale de Soleil du 29 mai 1919.

Deuxièmement, un décalage vers le rouge des raies solaires. La fréquence ν_0 d'un photon en dehors d'un champ gravitationnel est, au premier ordre, décalée vers une fréquence

$\nu \sim (1 - \alpha / r) \nu_0$ en présence d'un champ gravitationnel, où $\alpha = GM/c^2$ avec M la masse du Soleil, c la vitesse de la

lumière, G la constante de gravitation et r le rayon du Soleil.

La théorie d'Einstein prédit pour un photon observé à proximité de la surface solaire une déviation relative de $2,12 \times 10^{-6}$ à 550 nm par rapport à un photon observé depuis la Terre.

L'interféromètre utilisé à cette époque permettait de mesurer des décalages relatifs beaucoup plus faibles que $3,0 \times 10^{-8}$. Néanmoins, la mesure est compliquée par le fait que trois processus physiques sont en concurrence :

1) l'élargissement Doppler-Fizeau causé par la rotation de la Terre et par celle du Soleil;

2) un effet dû à la pression, et bien entendu :

3) les effets gravitationnels.

La difficulté consistait à faire la part de chaque effet. Perot résolut ce problème en trois étapes : premièrement, il observa (et c'était alors un effet jusque là inconnu) que la vitesse de la rotation du Soleil sur lui-même est fonction de la distance au centre. Cela implique des mouvements de convection radiaux qui compliquent encore l'effet d'élargissement Doppler.

Deuxièmement, en observant les raies Mg, Fe et CN, il remarqua que celles-ci sont plus fines dans le vide qu'à la pression atmosphérique. Il remarqua également que leurs longueurs d'onde sont plus rouges aux faibles pressions qu'à la pression atmosphérique, de même que leurs longueurs d'onde sont plus rouges dans l'atmosphère solaire que dans l'atmosphère terrestre. En outre, il conclut que la pression des couches externes du Soleil est nulle.

Troisièmement, prenant en considération ces différences de pression, il compara les longueurs d'onde dans le Soleil et sur Terre. Le décalage mesuré était compatible avec la valeur annoncée par Einstein.

Illustrons la méthode par un exemple pour montrer combien celle-ci était simple et astucieuse : Soit λ et Λ deux longueurs d'onde différentes et $\delta\lambda$ et $\delta\Lambda$ les variations respectives de ces deux longueurs d'onde.

Dans les effets Doppler et gravitationnels, le rapport entre deux lon-

gueurs d'onde différentes reste le même lorsqu'on augmente légèrement les longueurs d'onde. Il écrivit donc :

$$\frac{\lambda + \delta\lambda}{\Lambda + \delta\Lambda} = \frac{\lambda}{\Lambda} \times \frac{1 + \frac{\delta\lambda}{\lambda}}{1 + \frac{\delta\Lambda}{\Lambda}} = \frac{\lambda}{\Lambda} \Leftrightarrow \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{\delta\Lambda}{\Lambda}$$

Perot (1911) savait que ceci n'était plus vrai en présence d'effets de pression ; les différentes raies métalliques ne sont pas également décalées lorsque la pression augmente, aussi on devrait écrire que la variation de la longueur d'onde dépend de coefficients mesurables $a(\lambda)$ et $A(\lambda)$.

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = a(\lambda)\delta p \quad ; \quad \frac{\delta\Lambda}{\Lambda} = A(\lambda)\delta p$$

$$\frac{\lambda + \delta\lambda}{\Lambda + \delta\Lambda} \approx \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right) \frac{1 + a\delta p}{1 + A\delta p}$$

$$\frac{\delta\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)}{\frac{\lambda}{\Lambda}} \approx (a - A)\delta p$$

La variation de pression δp était égale à la différence entre la pression atmosphérique et cette dernière moins 60 cm de mercure. En utilisant les raies b_1 , b_2 et b_4 du magnésium, les coefficients a et A furent mesurés.

Pour Mg : $1 = (a - A) \times 108$

Appliquant les fameuses relations fondamentales

$$K\Lambda = 2\epsilon \cos I \text{ et } k\lambda = 2\epsilon \cos i,$$

il obtint :

$$\frac{\Lambda}{\lambda} \approx \frac{K \cos I}{k \cos i} \approx \frac{K}{k} \left(1 - \frac{I^2 - i^2}{2}\right)$$

considérant que

$$dP \approx 0 \Rightarrow K \approx k$$

La pression solaire est donc directement mesurable à partir de la position des anneaux sur les interférogrammes :

$$P_{\text{Soleil}} = P_{\text{Atm}} - \frac{1}{(a-A)} \left[\frac{I^2 - i'^2}{2} + \frac{I^2 - i^2}{2} \right]$$

De cette manière il est possible d'isoler les effets dus à la pression des effets qui produisent le même décalage pour l'ensemble des raies.

Pour la raie b_2 du magnésium, la théorie d'Einstein prédit un décalage de 0,011 nm; la longueur d'onde mesurée sur Terre à la pression de 1 atmosphère (517,2690 nm) est décalée de 0,0007 nm si la pression est réduite jusqu'au vide.

Donc, la longueur d'onde mesurée sur Terre dans le vide à la pression 0 atmosphère est 517,2683 nm, et la différence entre les longueurs d'onde mesurées sur le Soleil et sur la Terre, pour une pression nulle, et uniquement due à des effets gravitationnels débarrassés de tout effet de pression est de 0,013 nm.

La théorie d'Einstein prédisait un décalage relatif de $2,12 \times 10^{-6}$ que Perot confirma à mieux que 20% en mesurant une valeur de $2,5 \times 10^{-6}$. Ce résultat fut plus tard confirmé pour les raies du fer par Fabry et Buisson en 1921.

5.3.5. La nébuleuse d'Orion.

En 1911, Fabry et Buisson utilisèrent le réflecteur équatorial de 26 cm de l'observatoire de Marseille équipé de leur interféromètre et d'un filtre et ils observèrent visuellement les nébuleuses d'Orion. En 1914, Fabry, Buisson et Bourget installèrent leur instrument au foyer principal du télescope de Foucault. Ce télescope célèbre, installé à l'observatoire de Marseille en 1862 et dont le diamètre est de 80 cm, fut le premier à être équipé avec un miroir mince réglable. Leur instrument était composé de :

- i) leur interféromètre consistant en deux lames argentées de 4 cm séparées de 0,1 et 3 mm et placées entre un collimateur et une chambre photographique ;
- ii) un filtre d'absorption pour isoler la raie d'émission adéquate ;
- iii) une plaque photographique.

Ils firent 14 poses de 1 à 2 heures, observant les raies $H_\gamma + H_\beta$, et celles du nébulium [OIII] à 500,7 nm et du nébulium [OII] à 372,8 nm. Ces observations historiques les amenèrent à formuler plusieurs conclusions :

Cinématique de la nébuleuse :

Ils conclurent que les nébuleuses d'Orion présentent :

- i) une vitesse de fuite relativement au Soleil de 15,8 km s⁻¹;
- ii) une vitesse de dispersion de l'ordre de 10 km s⁻¹;
- iii) un grand axe orienté SE-NW autour duquel se fait la rotation de l'ensemble.

Température de la nébuleuse :

A partir de considérations théoriques. Arrhenius pensait que la température des régions HII se situait autour 50 K. En déterminant l'ordre pour lequel les anneaux d'interférences deviennent invisibles (aux environs de 10 000), ils mesurèrent la largeur des raies et conclurent à une température du gaz inférieure à 15 000 K. La valeur moderne est de 10 000 K.

Nature du nébulium :

Ils tentèrent d'identifier la nature du nébulium et la masse atomique de cet élément inconnu. A cet effet, ils mesurèrent avec une grande précision les longueurs d'onde des raies du nébulium et trouvèrent 372, 6100 ± 0,0001 nm pour la première et 372,8838 ± 0,02 nm pour la seconde, améliorant ainsi considérablement les mesures de Wright (372,62 ± 0,02 et 372,88 ± 0,02 nm).

La précision de leurs mesures les conduisit à un paradoxe : ces raies n'appartenaient à aucune des raies connues de l'oxygène donc elles ne pouvaient être la signature de l'oxygène !

En utilisant les raies violettes et vertes du nébulium, ils déduisirent une masse entre 1 et 3 fois la masse atomique de l'hydrogène. Bowen donna en 1927 une interprétation correcte des raies du nébulium : celles-ci n'étaient aucunement dues à un élément inconnu sur Terre mais étaient produites par l'oxygène et l'azote dans un milieu à

très faible pression permettant ainsi l'observation des raies interdites.

Fabry, Buisson et Bourget conclurent à "la simplicité de l'appareillage utilisé et la facilité avec laquelle il peut être monté sur le télescope ... le dispositif interférométrique n'entraîne pas une grande perte de lumière et autorise l'étude d'objets de très faible intensité lumineuse intrinsèque...".

Ils ne pouvaient pas savoir à quel point leurs prédictions étaient justes puisque 86 ans plus tard, cette technique est toujours utilisée partout dans le monde à commencer par les auteurs de cet article !

5.4. Géophysique : la découverte de la couche d'ozone.

Dans l'environnement des machines électrostatiques, on connaît bien l'odeur caractéristique qui s'en dégage : celle de l'ozone.

En 1840, Schoenben (1799-1868), un chimiste suisse, découvrit que ces machines émettaient un gaz. Il proposa de le nommer Ozone, de la racine grecque ozein, signifiant "qui produit une odeur" !

Cornu (1879) découvrit la coupure du rayonnement ultra-violet à 300 nm due à l'absorption par l'atmosphère.

Hartley (1881) découvrit O₃ au laboratoire et fit l'hypothèse que ce gaz était responsable de l'absorption UV et Fabry et Buisson (1913) observèrent cette coupure. Ils utilisèrent des plaques photographiques et mesurèrent le spectre UV solaire à des longueurs d'onde inférieures à 290 nm. L'ozone absorbait l'UV entre 232 et 293 nm. L'atmosphère absorbe le rayonnement UV à 99,999% et dans le domaine optique O₃ est plus opaque aux UV que les métaux.

En tenant compte de la diffusion Rayleigh, Fabry et Buisson (1921) mesurèrent la distribution de l'énergie dans le domaine UV du spectre solaire ($\lambda < 315$ nm), comparée à l'absorption produite par l'ozone sur le rayonnement émis par une lampe de laboratoire au mercure.

Fabry et Buisson conclurent que, ramenée à la pression atmosphérique,

l'absorption atmosphérique est équivalente à une couche d'ozone d'environ 3 mm d'épaisseur.

Ils mesurèrent le très fort pouvoir absorbant de l'UV par l'ozone dans les conditions du laboratoire : 50% pour une couche de 0,025 mm d'épaisseur. Pour une épaisseur de 3 mm, l'intensité d'un rayonnement serait réduite dans une proportion de 1036.

Comme ils connaissaient la dilution extrême ($2,5 \times 10^{-8}$) de l'ozone de l'air au niveau du sol, ils déduisirent la présence d'ozone en plus forte concentration dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Dans l'atmosphère, trois corps peuvent absorber l'UV : l'eau, l'air et l'ozone. La difficulté était de séparer la contribution de chaque composant.

Une fois déterminée l'épaisseur réduite de l'ozone, Fabry et Buisson trouvèrent l'altitude de la couche d'ozone par une méthode très astucieuse : à cause de la courbure de la Terre, la loi de Bouguer varie (de 30% pour $h = 5^\circ$) avec l'altitude de la couche atmosphérique considérée. Que la couche d'ozone se trouve à basse altitude (entre 0 et 5 km par exemple) ou à une altitude élevée (entre 40 et 50 km par exemple), la profondeur optique de cette couche reste la même si on observe au zénith. Au contraire, si on observe près de l'horizon, à cause de la courbure de la Terre, la profondeur optique de la couche d'ozone est 30% plus courte, ce qui implique une absorption différente. Ils déterminèrent une altitude de 40 km, confirmée de nos jours par des mesures satellitaires.

Fabry et Perot signalèrent une variation saisonnière, annuelle et selon l'azimut et soulignèrent le rôle joué par cette couche dans l'absorption quasi-totale de l'UV (1/70 000 seulement transmis).

Vers la fin de sa carrière, Fabry consacra son temps à l'étude de l'ozone atmosphérique. Il organisa même un colloque sur le sujet qui eut lieu à Paris en 1929. Fabry fut donc un physicien, un astronome, un métrologiste mais aussi un géophysicien.

6. Conclusions.

Hooke, Newton, Herschel, Young, Fresnel, Poisson, Airy, Fizeau, Foucault, Boulouch contribuèrent à la découverte des interférences à ondes multiples. Toutefois, sans Fabry et sans Perot, il aurait fallu beaucoup plus de temps encore pour aboutir à des conclusions aussi importantes.

Fabry et Perot inventèrent, construisirent, expérimentèrent et perfectionnèrent leurs interféromètres et ils les utilisèrent abondamment en métrologie, en photométrie et en spectroscopie. Il est impressionnant de constater à quel point ils furent des pionniers dans de nombreux domaines d'application. Ils firent d'importantes découvertes scientifiques dans divers domaines et/ou furent des pionniers en physique, en astrophysique et en géophysique.

Les carrières scientifiques de Fabry et de Perot contribuèrent fortement à réduire le fossé qui séparait la physique et l'astronomie, à fonder l'astrophysique au début du siècle, à développer et à appliquer à l'étude du ciel les méthodes de spectroscopie du laboratoire. Ces relations réciproques entre la physique et l'astronomie donnèrent naissance à l'astrophysique.

Sauf le développement du laser, il est difficile de trouver quoi que ce soit en rapport avec l'interféromètre qu'ils n'aient découvert ou au moins envisagé.

Références :

- [1] Bouchareine, P.-J. Optics, 1986, 17, 1, 35-42 - "Les travaux de métrologie de C. Fabry".
- [2] Connes, P.-J. Optics, 17, 1, 5-28 - "The history of multiple-beam interference".
- [3] Courtés, G. Optics, 17, 1, 29- "Applications à l'astrophysique d'observations des méthodes interférentielles à ondes multiples de Fabry-Perot par Fabry, ses collaborateurs et

leurs successeurs".

[4] de Broglie, L. -1946, ApJ 64, 209 - "La vie et l'œuvre de Charles Fabry (éloge funébre)".

[5] Duffieux, P.M. -1969, Applied Optics, 8 - "Origine des appareils interférentiels à ondes multiples".

[6] Fabry, C. 1926 - "La vie et l'œuvre d'Alfred Perot".

[7] Fabry, C. Œuvres choisies, à l'occasion de son Jubilé scientifique, 1938, Gauthier-Villars, Paris.

[8] Foucault, L. Annales de l'observatoire impérial de Paris, 1858, 5, p. 232

[9] Georgelin, Y.P., Tachoire, H. "La naissance de la spectroscopie interférentielle, Macé, Perot, Fabry, Buisson", in Marseille 2600 ans de découvertes scientifiques tome III, Publications de l'Université de Provence, 1999 sous presse.

[10] Georgelin, Y.P., Amram, P. IAU Symposium, 1995, p. 400 - A review of Fabry and Perot's discoveries.

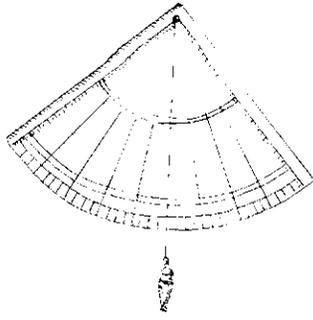
[11] Hernandez, G. - "Fabry-Perot interferometers" - Cambridge Studies in Modern Optics (1986).

[12] Vaughan, J.M. - "The Fabry-Perot Interferometer History, Theory, Practice and Applications". Ed. Adam Hilger, 1989.

Précision.

Nous avons oublié de préciser que Gerbert d'Orlhac était le nom catalan de Gerbert d'Aurillac. (CC n° 88 ; p. 22).

N'hésitez pas à nous signaler des erreurs ou imprécisions, à réagir aux articles ou mieux encore à faire partager vos expériences.



Le voyage aux Iles

Francis Berthomieu

C'est du haut du plus haut des volcans de l'île d'Hawaï que les astronomes contemporains scrutent le fin fond du cosmos. Ils ne font que poursuivre la tâche des anciens peuples de l'Océanie...

Si vous le voulez bien, nous remonterons le temps, pour atteindre une époque très reculée, bien avant l'arrivée des humains...

En ce temps là, il n'y avait rien d'autre que le vide primordial.

Enfin, presque rien !

Seulement une palourde, qui flottait dans l'infini... et quelques animaux divins.

L'araignée Acrop-Enap aurait bien voulu savoir ce que contenait ce beau coquillage.

Elle pria Crevette de l'ouvrir. Mais tous ses efforts restant vains, il fallut demander de l'aide à Chenille.

Et les voilà toutes deux à l'oeuvre, fermement agrippées au coquillage.

La pauvre Chenille, transpirant à grosse gouttes, déploya de tels efforts qu'elle parvint à ses fins.

Le coquillage s'ouvrit. Et lorsque Chenille mourut, épuisée par ses efforts, sa transpiration salée fut recueillie dans la coquille.

Le couvercle du coquillage se révéla être Rangî, le Ciel, où Chenille et Crevette, converties en Soleil et Lune, furent aussitôt disposées.

L'autre partie était Papa, la Terre : la Mer s'étendait nonchalamment au creux du coquillage. Si son eau est aujourd'hui salée, c'est à cause de la sueur de la pauvre Chenille...

Et si la palourde fut si difficile à ouvrir, c'est que Rangî et Papa, tendrement enlacés dans le vide du cosmos, ne voulaient en aucune façon desserrer leur étreinte.

Quand ils furent forcés de se séparer, leurs nombreux enfants en profitèrent pour s'égarer dans la nature.

Ils devinrent vite les dieux des populations locales...

Ne nous attardons point sur leurs identités ni sur leurs caractères, et faisons connaissance avec l'un d'eux, que l'on nomme Rongo un peu partout en Polynésie, mais que l'on connaît à Hawaï sous le nom de Lono.

C'est le dieu du Ciel, de la Paix et de l'Agriculture.

Tous les ans, à cette époque où, le soir, on voit se lever les Pléiades sur l'horizon Est, commence la saison des pluies. la "saison de Lono"...

C'est le début d'une grande fête qui durera quatre mois, au cours desquels on devra transporter l'effigie du dieu, d'île en île.

C'est une longue procession dont le sens est rituellement défini comme celui que suivent les astres dans le ciel, ou, comme nous dirions aujourd'hui, celui des aiguilles d'une montre...

A chaque étape, offrandes et prières alterneront pour satisfaire le dieu et que s'accomplissent ainsi les vœux de ses fidèles.

Une fois bouclée la boucle, l'image du dieu retournera à son temple, pour y subir le sacrifice rituel qui le renverra à sa demeure secrète, Kahiki.

Il laissera, pour un an, la place libre à son frère Ku, dieu de la Terre, de la Guerre, et de la Chasse...

Automne 1778 :

Un fier navire anglais fait voile vers Hawaï, puis contourne l'île dans le sens des aiguilles d'une montre. Pour les îliens, impressionnés, son Capitaine est de toute évidence une personnification de Lono. Lorsque le fringant capitaine descend du navire, il est accueilli par une foule en délire, qui le mène au temple, le vénère et l'adule comme son dieu, fêtant et célébrant son passage partout où il se rend. Au bout

de quelques mois, comme pour aller jusqu'au bout d'une heureuse série de coïncidences, ne va-t-il pas jusqu'à annoncer son départ ? C'est justement l'époque où le rituel veut que Lono retourne à Kahiki ? Voilà le navire reparti sur les flots, et son Capitaine encore éberlué par ce qui vient de lui arriver ! Las ! Tout eut été si simple si quelque avarie n'avait obligé l'anglais à revenir au port pour y réparer son navire. Grave erreur : comment les Ha-

waiens pouvaient ils accepter que Lono revint ainsi sur ses pas, à une époque où sa mort rituelle devait être inéluctablement consommée ? L'accueil fut inhospitalier, farouche, et pour tout dire radical : Un comité formé de cent chefs féroces et décidés se précipita à sa rencontre, armé jusqu'aux dents, et exécuta sans le moindre remords le Capitaine. C'est ainsi que s'acheva, fort déplorablement, la vie du Capitaine... Cook. ■

EISCAT : Que cachent les aurores boréales ?

En perçant la carapace magnétique terrestre, les particules du vent solaire déclenchent un cortège de phénomènes étranges dont le radar EISCAT s'est fait depuis 1981 une spécialité. En ligne de mire : l'étude du milieu naturel encore très mal connu dans lequel est plongé la Terre.

Dans la salle de contrôle d' EISCAT (European Incoherent SCATter Radar soit "radar européen à diffusion incohérente", les chercheurs étudient les oscillations de l'ionosphère aurorale. Depuis plus de dix ans, le radar, composé de trois antennes : l'émetteur-récepteur, une parabole de 32 m de diamètre travaillant en ultra hautes fréquences (931 MHz), installé à Tromsø, et deux antennes réceptrices de même dimension situées à Kiruna en Suède et Sodankylä en Finlande, étudie ainsi sur une bande de dix degrés cette couche de l'atmosphère comprise entre 70 et 1000 km d'altitude.

En effet, l'ionosphère est un promontoire imprenable pour appréhender les tumultueuses relations qui lient la Terre au Soleil. Elle constitue le haut lieu de rencontre entre les particules de notre environnement atmosphérique et celles, soufflées par le vent solaire, qui réussissent à percer la carapace magnétique de la Terre et qui, par un itinéraire tortueux donnent lieu à toute une foule de phénomènes étranges dont les aurores ne sont, au bout du compte que la signature visible.

Deux ou trois jours après avoir quitté le Soleil, le vent solaire s'approche de la Terre ; à environ 75 000 km de notre planète il se heurte au champ magnétique terrestre qui fait dévier sa trajectoire. Le vent solaire est entraîné au delà de la Terre ou à l'intérieur du champ magnétique terrestre qui se trouve étiré en une longue queue qui se prolonge sur une distance de plus de six millions de kilomètres.

Si le magnétisme solaire pointe en direction opposée à la queue du champ magnétique terrestre soit Nord-Sud, un changement de direction s'opérera aussitôt et d'énormes quantités d'énergie seront déversées dans les circuits auroraux ; dans ce cas des lignes de force issues du vent solaire et de la Terre fusionnent sur toute la surface de la queue de la magnétosphère. On donne à ces afflux d'électrons qui relient la dynamo de la magnétosphère à l'ionosphère le nom de courants de Birkeland (physicien norvégien, 1867-1917).

Ces courants descendent vers la Terre et donnent naissance aux aurores en formant des spirales à environ 10 000 km d'altitude, certains électrons pénètrent dans l'atmosphère terrestre.

La haute atmosphère renferme des particules gazeuses constituées d'atomes d'oxygène et de molécules d'azote ; lorsqu'un électron frappe à grande vitesse l'une de ces particules, par exemple un atome d'oxygène, ce dernier acquiert une partie de l'énergie de l'électron. l'oxygène est "excité" et accumule de l'énergie pendant un laps de temps très court avant de la perdre à nouveau en émettant un minuscule éclat de pâle lueur verdâtre. Lorsque des milliers d'atomes se désexcitent ainsi en même temps, le ciel s'anime d'aurores vertes visibles à des altitudes de 400 km à 1000 km ; à 100 km d'altitude, la lueur verte s'éteint.

Cependant, quelques particules de haute énergie poursuivent le voyage, se frayant un passage dans l'atmosphère de plus en plus dense jusqu'à 70 km d'altitude. Les électrons sont encore capables de provoquer une certaine réaction avec l'azote. Dans la partie inférieure de l'aurore, l'azote émet une couleur rosée.

Les atomes et les molécules qui émettent de la lumière sont essentiellement immobiles ; ce sont les bouffées d'électrons en provenance de la magnétosphère qui se déplacent, modulent et tournoient faisant ainsi bouger les franges des rideaux auroraux. Les anneaux auroraux se situent vers 70 ° de latitude.

Conférence de M. Franck Pettersen, professeur de physique à Tromsø (Norvège), le 26-10-99 au lycée Victor Grignard de Cherbourg, dans le cadre du projet Socrates Comenius "l'astronomie dans quelques lycées d'Europe".



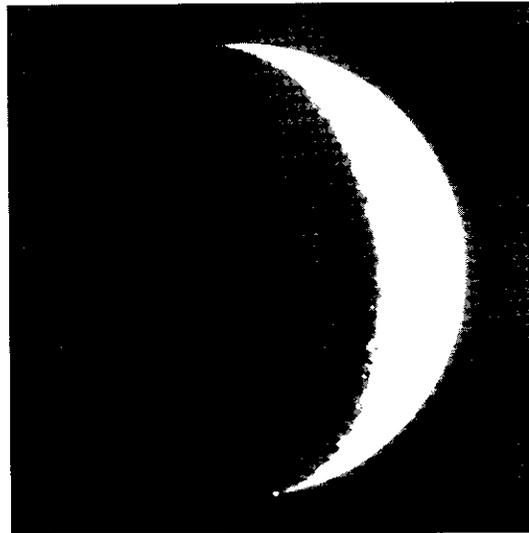
L'âge de la Lune

Pierre Causeret

Le problème :

A partir de cette photo de croissant, il s'agit de calculer l'âge de la Lune, c'est à dire le nombre de jours écoulés depuis la dernière Nouvelle Lune.

Question subsidiaire : quel pourcentage du disque lunaire est éclairé ici ?



Solution au problème du CC 89.

1) On détermine l'échelle de la photo avec Denebola et Regulus : on a 3,9 cm pour 25° soit $6,4^\circ/\text{cm}$.

Les mesures sont effectuées sur la photo parue dans le CC 89 (p.27). Le dessin de la page ci-contre est plus grand.

2) On mesure la longueur de la trace du météore principal : on obtient 5,5 mm soit $3,5^\circ$.

3) En prolongeant les étoiles filantes, on trouve l'emplacement approximatif du radiant. On mesure sa hauteur au-dessus de l'horizon. On trouve 6,4 cm soit 41° .

4) On mesure la hauteur de la lèonide brillante au début de son "allumage" : on obtient 3,6 cm soit 23° .

Pour simplifier le problème et comme on ne cherche qu'un ordre de grandeur du résultat, on peut considérer que la trace de

l'étoile filante est verticale, sous le radiant.

Si on voulait être plus précis, il faudrait se placer dans le plan défini par l'observateur et la trace de l'étoile filante, qui n'est pas un plan vertical, et modifier l'altitude de 100 km (c.f. schéma ci-contre).

La position du radiant indique la direction des trajectoires des particules par rapport au sol.

5) Calcul de la distance de la lénide :
 $OM = 100 \text{ km} / \sin 23^\circ$ soit 256 km environ.

6) L'objectif du problème est, rappelons-le, de déterminer une approximation de la longueur en km de la trace MM' de cette lénide. Pour conclure on va "résoudre" le triangle OMM' dans lequel on a :

$OM = 256 \text{ km}$ (c.f. § 5)

$\angle MOM' = 3,5^\circ$ (c.f. § 2)

$\angle M'MO = \angle MO\alpha$ (angles "alternes-internes")

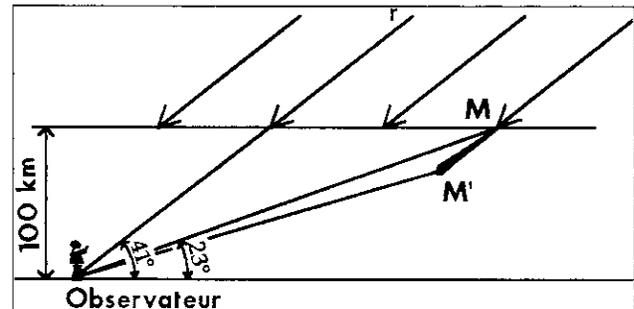
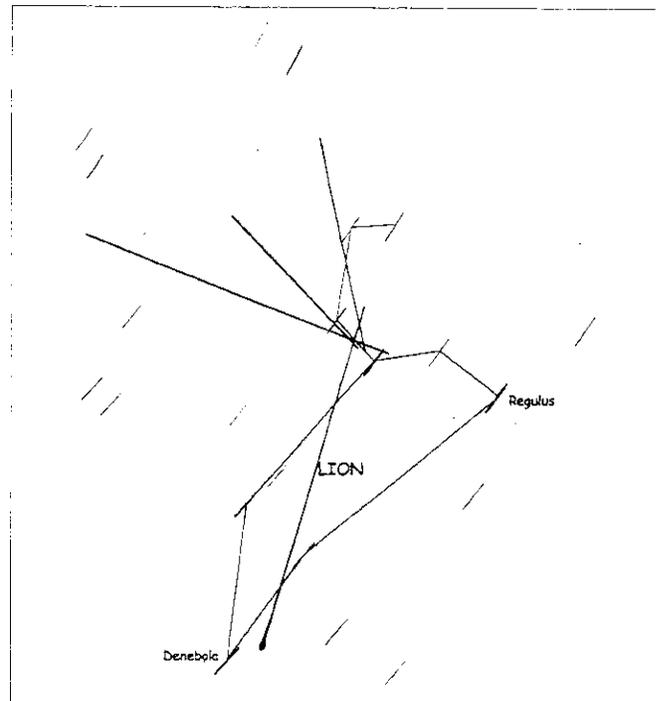
$= 41^\circ - 23^\circ = 18^\circ$ (c.f. § 3 et 4)

On a donc : $\angle MM'O = 180^\circ - (18^\circ + 3,5^\circ) = 158,5^\circ$.

On applique ensuite "la relation des sinus" dans le triangle OMM' :

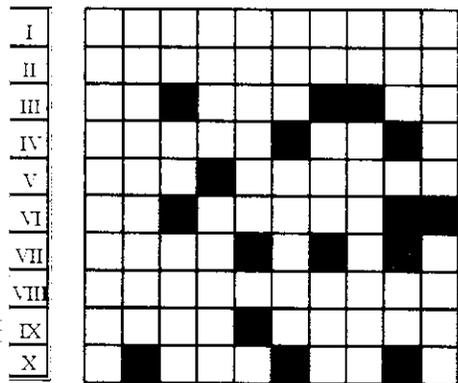
$$\frac{MM'}{\sin \angle MOM'} = \frac{OM}{\sin \angle MM'O} \quad \text{d'où } MM' = 43 \text{ km environ.}$$

Il ne faut évidemment pas attendre de ce calcul une grande précision. Par exemple le début de la trace de l'étoile filante n'est pas très net, mais il permet de trouver un ordre de grandeur correct.



Mots croisés astronomiques

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0



- I - Elle peut-être astrométrique ou musculaire.
- II - Sa constante est-elle nulle ?
- III - Naturel mais pas décimal ; parole de supplicé ; découvert par Lecoq.
- IV - Une coupole très peu équatoriale ; un accord pour l'observatoire de Kislovodsk.
- V - A un point commun avec un chien et une colombe ; australe aussi.
- VI - A dessin ; Mesura l'assombrissement centre-bord.
- VII - Voit plus d'étoiles doubles qu'il ne faudrait.
- VIII - Droit au Soleil.
- IX - Eau noire ; planète difficilement observable au télescope.
- X - Agence ; sur une licence.

- 1 - Un plan commun.
- 2 - Lunette.
- 3 - Extrait de rose ; établissement d'enseignement ; peste.
- 4 - Capitaine dérangé ; familiers de la lyre.
- 5 - Mathématicien américain : il donna des règles aux astronomes.
- 6 - Baba et lui évoquent un oiéagineux ; n'a pas prononcé de voeux.
- 7 - Tête du Toucan ; composition pour plus d'un ; cheville.
- 8 - Agent connu rue de Grenelle ; stars.
- 9 - Fin de mois ; avec ces géantes on peut prendre des distances.
- 0 - Un costaud la débarassa de sa bête, maintenant au ciel ; nos bouches devant l'éclipse.

Michel Bobin.
 Solution dans le prochain numéro.



INVITATION AUX PLANÈTES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS NOTIONS D'ASTROPHOTOGRAPHIE

Invitation aux planètes.

Sous la direction de Daniel Benest et Claude Froeschlé.
Ed. ESKA, 216 p. 180 F.

Voilà un ouvrage de vulgarisation intelligent dont la lecture nous éclaire. Il s'agit d'un ouvrage collectif qui est une synthèse pénétrante et concise des connaissances sur le mouvement des planètes, le chaos dans le système solaire, sur la détection des planètes extrasolaires et l'évolution du vivant.

Chacun des six chapitres est traité par un ou deux auteurs et comporte un résumé et des indications bibliographiques. La cohérence de l'ensemble est assurée par une grande rigueur. Les répétitions inutiles sont évitées et chaque exposé s'inscrit en continuité avec les autres. La qualité est la même tout au long de l'ouvrage.

Daniel Benest et Claude Froeschlé, chargé de recherche au CNRS et astronome à l'Observatoire de Nice ont coordonné cet ouvrage passionnant que je considère comme une référence pour "l'honnête humain" de la fin du XX^e siècle.

I - Le mouvement des planètes.

François Mignard, Observatoire de la Côte d'Azur.

Ce chapitre décrit les lois du mouvement des planètes tant d'un point de vue moderne qu'historique en montrant la continuité entre les représentations classiques, les recherches de Kepler et l'approche moderne.

La dernière partie permet de retrouver les lois de Kepler comme conséquence des principes généraux de la dynamique établis par Galilée et Newton. L'auteur explicite les équations du mouvement des deux corps et prouve que ce n'est pas parce qu'un article contient des formules mathématiques qu'il est ennuyeux et aride. Au contraire, le lien entre la formule mathématique et la loi physique est claire-

ment explicité. Ceci est très rare dans les ouvrages de vulgarisation où la formule renvoyée en note nous paraît "magique" et inaccessible.

L'auteur ne traite volontairement que le problème le plus simple de la mécanique céleste et renvoie le lecteur qui veut approfondir davantage à d'autres ouvrages.

II - Ordre et chaos dans le système solaire.

Alessandro Morbidelli, Chargé de recherche au CNRS, Observatoire de Nice et Daniel Benest.

Depuis Poincaré on sait que le chaos peut surgir de lois aussi régulières que celles de la mécanique céleste qui semblait parfaitement déterministe.

Dans la deuxième moitié du XX^e siècle des astronomes ont mis en évidence que le chaos existe aussi dans notre Système Solaire. Les auteurs s'attachent à en montrer deux aspects : le chaos des petits corps du système solaire (astéroïdes, météorites) et le chaos des planètes internes de Mercure à Mars.

Plusieurs astronomes ont établi l'existence de mouvements chaotiques en résonances de moyen mouvement avec Jupiter (i.e. quand le rapport entre les périodes de révolutions autour du Soleil de l'astéroïde et de Jupiter est égal au rapport de deux nombres entiers) : des trajectoires peuvent avoir des sursauts en excentricité tout à fait imprévisibles. Les auteurs présentent les résultats récents sur ce sujet.

En ce qui concerne les planètes, le chaos se manifeste par de petits changements de l'excentricité (sur une longue échelle de temps) et de l'inclinaison.

Nous apprenons heureusement que pour la Terre l'évolution de l'excentricité est contrainte dans une bande très étroite et que la Lune stabilise l'obliquité de l'axe.

Pour terminer les auteurs analysent l'influence du concept de chaos sur notre culture.

III - Le rayonnement infrarouge dans le système solaire : quelques exemples.

Jean Gay, astronome à l'Observatoire de Côte d'Azur.

Après avoir décrit rapidement le rayonnement électromagnétique, et plus particulièrement l'infrarouge, l'auteur s'attache à nous expliquer comment on peut enregistrer les ondes acoustiques à la surface de Jupiter.

IV - La formation du Système Solaire.

Hans Rickman, astronome à l'Obsv. d'Uppsala (Suède).

Ce chapitre présente l'état actuel des connaissances sur l'origine de notre système solaire sans oublier le point de vue historique. Deux aspects sont traités :

- la formation des planètes comme sous-produit de la naissance des étoiles. Une section est consacrée à l'observation de la naissances d'étoiles, en particulier le télescope spatial Hubble permet de distinguer des disques d'étoiles en formation. Le modèle de la nébuleuse légère avec formation de planétésimaux est détaillé.

- la description de la nébuleuse solaire : composition chimique, âge, poussières interplanétaires. L'importance des météorites (plus particulièrement les chondrites) pour déterminer l'âge du système solaire est explicitée ainsi que les processus de formation de ces objets. Enfin le rôle possible des comètes lors de la jeunesse de notre Terre est précisé.

V - Vers d'autres systèmes planétaires.

Jean Schneider, directeur de recherche au CNRS, Observatoire de Meudon.

Pourquoi et comment chercher d'autres systèmes planétaires ? Les premiers résultats sont prometteurs (on a détecté entre 1995 et 1998 une quinzaine de planètes autour d'étoiles semblables au Soleil) et offrent des perspectives intéressantes pour la recherche des planètes extra-solaires et d'une activité biologique en dehors du Système Solaire.

Dans ce tour d'horizon l'auteur détaille plus particulièrement les méthodes de recherche : image directe d'une planète, perturbation du mouvement de l'étoile, modification d'éclats stellaires apparents, émission directe.

VI - Le monde vivant : définition, origine et évolution.

Danielle Le Quoc, Maître de Conférences à l'Université de Franche-Comté, Besançon.

Ce chapitre est une synthèse des connaissances actuelles sur les systèmes vivants et sur l'origine de la vie.

Après avoir donné les propriétés générales des êtres vivants et caractérisé un système vivant comme un système autonome, autopoïétique et évolutif, l'auteur traite de la matière dont sont constituées les cellules.

L'origine de la vie est replacée dans le contexte géologique et l'auteur fait une mise au point sur les expériences de laboratoire essayant de modéliser l'apparition de la vie.

Un dernier paragraphe est consacré à la diversification et à l'évolution des êtres vivants.

Martine Bobin.

Sciences de la Terre et de l'Univers.

Sous la direction de Jean-Yves Daniel.

Editions Vuibert, 634 pages, 249 F.

Cet ouvrage de synthèse des connaissances actuelles de notre planète est un beau travail d'équipe. Il s'adresse aussi bien aux étudiants qu'aux enseignants ou à toute personne curieuse de la science, et assez courageuse pour accepter de faire l'effort d'entrer dans tout un monde, avec le vocabulaire, les concepts et les méthodes des multiples spécialités impliquées.

Il est illustré de nombreux schémas, graphiques, diagrammes, cartes, photos en deux couleurs auxquelles s'ajoute un cahier spécial de documents en couleur. Des exercices sont proposés à la fin de chaque chapitre ; les solutions ainsi qu'une bibliographie et un index sont donnés à la fin de l'ouvrage. Il est l'oeuvre commune de spécialistes bien connus : André Brahic, qu'il n'est pas nécessaire de présenter aux lecteurs des Cahiers, et trois géologues, Michel Hoffert, André Shaaf et Marc Tardy. Le tout coordonné par l'astronome Jean-Yves Daniel.

L'exposé s'organise en 5 grandes parties. J'ai retrouvé dans les quatre premières ce qui fit naguère l'objet d'échanges extrêmement riches au sein du Groupe Technique : "Sciences de la Terre et de l'Univers" (STU), que présidait Marc Tardy ; nous y avons beaucoup réfléchi à ce que pourrait être un enseignement intégré des STU.

Première partie : la Terre, planète du système solaire.

L'exposé se découpe en trois chapitres : le premier, classique, situe la place de la Terre dans l'Univers ; il s'agit de faire, pour le lecteur peu informé, une présentation de l'ensemble des objets qui peuplent l'univers, de l'évolution de nos connaissances historiques et des grandes questions actuellement en débat ; avec un accent mis sur les problèmes plus directement liés à la Terre : mouvements, place de la Terre parmi les planètes, relations Soleil-Terre. Le second chapitre traite de la formation du système solaire. Un scénario global est maintenant disponible : formation d'un disque de gaz, suivie de celle d'un disque de grains, puis de planétésimaux, et enfin d'embryons de planètes. Plusieurs difficultés subsistent : il est en particulier paradoxal que l'on ne sache pas encore expliquer la formation de notre toute proche voisine la Lune ! En tous cas on peut beaucoup attendre des découvertes actuelles de systèmes planétaires extra-solaires. Le troisième chapitre traite de l'évolution de la Terre et des planètes : moteurs de l'évolution, activité interne et flux de chaleur, volcanisme, cratérisation, formation et évolution des atmosphères.

Deuxième partie : les archives géologiques et la mémoire du temps.

La géologie s'est développée à partir de trois concepts majeurs : l'immensité des durées passées, les modifications du monde vivant au cours du temps, et la transformation des roches, associées à une reformation périodique du bâti

terrestre. Les roches sont des archives géologiques. La mesure du temps s'effectue d'abord en situant les événements inscrits dans les roches les uns par rapport aux autres : on construit une chronologie relative. La lithostratigraphie repose sur l'étude de la succession des strates des roches ; la paléontologie apporte une méthode complémentaire par la connaissance de la successions des espèces vivantes liées aux conditions de milieu de vie. On subdivise les temps géologiques en "ères", qui sont de grandes unités séparées par des crises biologiques majeures (extinctions). Une unité beaucoup plus fine est l'étage : c'est un terrain caractérisé par une faune donnée, correspondant à une époque donnée. Les systèmes, en regroupant des étages, jouent un rôle intermédiaire. La datation absolue repose sur des mesures de durée, qui recourent à des phénomènes connus et stables : cycles astronomiques ou taux de désintégration d'un élément radioactif.

La morphologie d'un lieu à la surface de la Terre résulte de l'action des forces d'origine interne (tectoniques), externes (astronomiques) et biologiques. Ces causes combinent leurs intensités, leurs périodicités. Et en définitive, toute l'analyse repose sur l'analyse de sédiments, dont l'élément est la strate.

Troisième partie : la Terre et ses climats : dynamique des enveloppes fluides.

Le climat n'est pas stable : il varie à différentes échelles de temps et d'espace. C'est la compilation des observations des botanistes, des géologues, des paléontologues, des géochimistes, des océanographes, des physiciens de l'atmosphère et des astronomes qui permet aujourd'hui de comprendre les mécanismes de la climatologie. La connaissance de la dynamique des climats actuels est une clé essentielle pour analyser celle des climats du passé et ouvrir une perspective pour l'avenir.

On étudie successivement la dynamique des climats actuels (système de circulation) et les systèmes climatiques. Plusieurs mécanismes sont responsables des variations climatiques : la variation des paramètres orbitaux de la Terre, les mécanismes géochimiques liés à la composition de l'atmosphère, les mécanismes liés à la dynamique terrestre - dérive des continents, géométrie des océans - . Il est maintenant possible de remonter aux climats anciens, à la lumière des archives géologiques continentales, glaciaires, marines et isotopiques. Enfin, l'étude des tendances actuelles du climat permet d'évoquer des scénarios pour demain. La modélisation extrêmement développée, reste encore difficile du fait d'un certain nombre d'incertitudes concernant les réponses des régions polaires, des océans, de la biosphère et ... des hommes !

Quatrième partie : la Terre solide et sa dynamique.

On commence par une étude de la forme, de la structure et de la dynamique globale de la Terre. L'auscultation par la propagation des ondes sismiques a permis de construire un modèle de la Terre solide, constitué d'une succession d'enveloppes sphériques, séparées par des discontinuités. Ce sont elles qui sont à l'origine des processus fondamentaux qui contrôlent la structure, la dynamique et l'évolution

terrestre. La lithosphère divisée en 7 grandes plaques (elles-mêmes subdivisées en un grand nombre de plaques plus petites) est mobile, à la fois horizontalement et verticalement sur l'asthénosphère. Ces mouvements impliquent la déformation des roches et les évolutions différentes de la lithosphère dans ses parties océanique ou à croûte continentale. La lithosphère océanique retourne rapidement au manteau, où elle est recyclée. Par contre, la lithosphère continentale qui demeure en surface, enregistre et conserve depuis quatre milliards d'années la mémoire dynamique de la planète. Les plaques lithosphériques sont animées d'un processus cyclique de mouvements : tous les 400 à 500 millions d'années, les continents se rassemblent en un supercontinent, dont le plus récent a été la Pangée, il y a 280 millions d'années, mais dont on sait aujourd'hui modéliser le précédent. Au rassemblement des continents en un supercontinent succède un éclatement.

La cinquième partie de l'ouvrage traite de la Terre, planète du vivant, depuis l'apparition de la biosphère jusqu'à l'apparition d'Homo sapiens. Sujet immense, peut-être traité trop rapidement pour donner à la lectrice incom pétente que je suis une vision un peu synthétique.

Lucienne Gouguenheim

Notions d'astrophotographie.

Cours de Saint-Luc, été 1999. Daniel Cevey.
Ed. Observatoire de Genève, 1999. 55 p. ; 110 F.

Sur l'astrophotographie en langue française, il ne reste plus qu'un classique qui a pris un sérieux coup de vieux face au développement des nouvelles techniques. Comblant donc un grand vide, voici le cours d'astrophotographie de notre collègue genevois dont l'expérience et les compétences en la matière sont bien connues.

Bien que l'auteur, dans son préambule trop modeste, prétende qu'il ne s'agit que des notes d'un cours et pas d'un manuel exhaustif, on trouve dans ce fascicule une immense somme de renseignements de qualité et des conseils compétents qui doivent permettre de guider un débutant ou d'accompagner un amateur averti sur les chemins difficiles et souvent ingrats de la photographie astronomique.

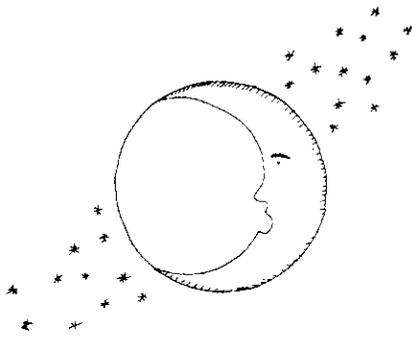
Une excellente présentation avec une mise en page claire et des exemples de photos en couleur en font un ouvrage d'une qualité que la modestie du prix ne laissait pas prévoir. L'approche est simple mais les notions théoriques de base sont abordées avec rigueur. Le lecteur trouvera de nombreuses informations techniques mises à jour et des indications pratiques comme les procédures ou des temps de pose.

Ouvrage indispensable.

Eric Lindeman

(recension parue dans le Bulletin d'information bibliographique pour les maîtres de l'enseignement secondaire (décembre 1999). Université de Lausanne).

■



Planètes extrasolaires : la moisson

Lucienne Gouguenheim

LES POTINS DE LA VOIE LACTÉE

La première planète extra-solaire a été découverte en 1995, par les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz, au voisinage de l'étoile 51 Pegasi, étoile très similaire au Soleil, de type spectral G3 et de rayon 1,3 rayon solaire ; elle est située à grande proximité de l'étoile, à 0,051 u.a..

On dénombre actuellement plus de 40 étoiles assez semblables au Soleil, au voisinage desquelles on a mis en évidence la présence d'une planète. Il s'agit généralement d'une grosse planète, comparable à Jupiter ou Saturne, et située à grande proximité de l'étoile.

Elle sont détectées par l'étude du spectre de l'étoile : l'attraction gravitationnelle de la planète compagnon entraîne un mouvement périodique de l'étoile qui se décele par la variation de la composante radiale de sa vitesse. Ce mouvement est de faible amplitude, quelques dizaines de mètres par seconde seulement dans le cas le plus favorable où le compagnon est une grosse planète, du type de Jupiter (voir "compléments" ci-dessous) ; le décalage des raies observées dans le spectre est donc faible, de l'ordre du cent millième de leur largeur. Ces mesures difficiles sont désormais accessibles grâce à des spectroscopes adaptés, tel "Elodie", réalisé à l'observatoire de Haute Provence par un groupe d'astronomes des observatoires de Marseille, de Haute-Provence et de Genève.

Occultation partielle de l'étoile HD209458.

Ces observations spectroscopiques fournissent la période du mouvement, l'excentricité de l'orbite et la valeur maximale de la composante radiale de la vitesse de l'étoile, qui est une projection sur la ligne de visée de la vitesse orbitale ; on en

déduit une limite inférieure de la masse de la planète. Pour reconstituer complètement les caractéristiques de l'orbite et en déduire la masse et le rayon de la planète, il faudrait connaître l'angle que fait la ligne de visée avec le plan orbital. Ce n'est en général pas possible, sauf dans le cas particulier où cet angle est pratiquement nul : en effet, dans ce cas, la planète est amenée à se projeter périodiquement devant le disque de l'étoile ; ce phénomène de transit affaiblit très légèrement l'éclat apparent de cette étoile - proportionnellement à la surface occultée par la planète.

Cette observation vient d'être effectuée, indépendamment par deux équipes, l'une à Boulder, au Colorado autour d'un jeune thésitif, David Charbonneau, et l'autre en Arizona, dans le cas de l'étoile HD209458, située à 170 a.l., qui est assez similaire au Soleil, ce qui permet d'évaluer sa masse à 1,1 masse solaire et son rayon à 1,1 rayon solaire ; les observations spectroscopiques avaient montré que son compagnon est une grosse planète, du type de Jupiter, dont l'orbite est très proche de l'étoile à seulement 0,05 unités astronomiques (pour comparaison, le rayon de l'orbite de Mercure, la planète la plus proche du Soleil, est 8 fois plus grand), et la période orbitale de 3,5 jours. Lors du transit, l'éclat apparent de l'étoile a diminué de 1,6 % (soit 0,017 magnitude) pendant deux heures et quart. L'interprétation des observations conduit à préciser les caractéristiques de la planète : sa masse est 0,63 fois celle de Jupiter et son rayon 1,27 fois celui de Jupiter, ce qui lui confère une densité moyenne de 0,38, encore plus faible que celle de Saturne, la seule planète du système solaire qui pourrait flotter dans l'eau.

Les planètes ne restent pas sur le lieu de leur formation.

Toutes les planètes découvertes jusqu'ici sont géantes, du type de Jupiter, ce qui provient d'une sélection observationnelle : on détecte les planètes qui ont des masses suffisantes pour induire un mouvement décelable de l'étoile.

Elles ont toutes des périodes orbitales faibles, ce qui résulte aussi d'une sélection observationnelle : ce sont les plus faciles à détecter sur une courte échelle de temps.

On a néanmoins été surpris de trouver des grosses planètes aussi proches de leur étoile : dans le système solaire, les planètes proches du Soleil sont la Terre et ses semblables, dites "telluriques" ; les grosses planètes "jupitériennes" sont plus éloignées, et cette situation s'explique très bien par le mode de formation des planètes géantes, qui repose sur l'agglomération de grains de glace pollués par des grains de poussière, que l'on ne trouve qu'à une suffisamment grande distance de l'étoile, de telle sorte que son rayonnement ne parvienne plus à les sublimer. Les travaux théoriques évaluent cette distance minimale à 4 ou 5 unités astronomiques, ce qui implique des périodes orbitales pour une étoile centrale de la masse du Soleil, de 10 à 30 ans. L'explication du paradoxe se trouve dans des travaux théoriques effectués dès les années 1980, qui avaient montré que les planètes ne restent pas sur les lieux de leur formation : du fait de leur interaction avec le disque de gaz et de poussière qui subsiste de la nébuleuse primitive pendant les premiers temps de la vie du système, elles migrent régulièrement vers l'étoile tant que persiste l'existence du disque. C'est le cas de Jupiter, dont on pense qu'elle s'est formée bien au-delà de sa distance actuelle au Soleil.

La recherche continue.

Des astronomes de Harvard ont découvert autour de l'étoile upsilon Andromedæ 3 planètes : leurs masses sont respectivement 0.75 ; 2 et 4 fois celle de Jupiter ; les rayons des orbites 0.06 ; 0.83 et 2.5 u.a. ; les périodes 4.6 j ; 242 j et 3.5 ans.

L'équipe suisse vient d'annoncer la découverte de 6 nouvelles "exopla-

nètes", qu'elle vient d'effectuer avec le télescope Leonhard Euler, de 1,2 m d'ouverture sur le site de l'Observatoire Européen Austral. La situation de l'étoile HD83443, dans la constellation de Vela est particulièrement intéressante : le rayon de l'orbite de la planète est le plus petit que l'on connaisse : 0,038 u.a. et la période est très courte : 2,986 jours. Cette situation en fait un bon candidat pour la recherche d'une occultation. De plus, la vitesse de l'étoile dérive régulièrement au cours du temps, ce qui pourrait être dû à la présence d'une seconde planète.

L'échantillon de planètes extra-solaires devient suffisant pour que l'on commence à mener des études statistiques. Pourquoi l'abondance des éléments lourds est-elle plus élevée que la normale dans les atmosphères des étoiles ayant des compagnons planétaires ? Cela a-t-il à voir avec le processus de formation ?

Des questions particulièrement intéressantes concernent la transition entre planète et naine brune, ces "étoiles ratées" dont la matière est dans un état de très grande densité de telle sorte que les effets d'agitation quantique du gaz d'électrons assurent leur équilibre. On connaît actuellement trois compagnons d'étoiles dont la limite inférieure de la

masse dépasse la limite généralement adoptée de 10 masses de Jupiter qui sépare les planètes des naines brunes.

Compléments :

Vitesse orbitale du Soleil induite par la présence de Jupiter. On donne :

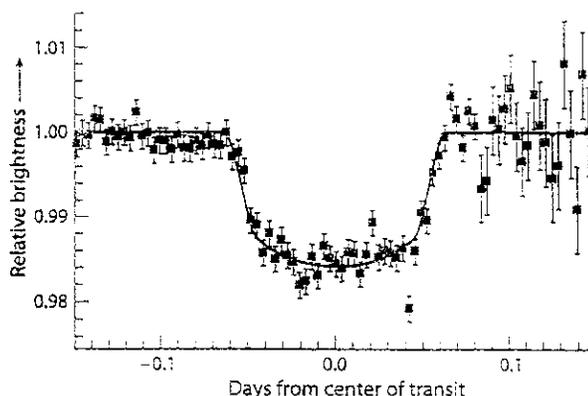
- la masse M_J de Jupiter en unité de masse du Soleil : $0,954 \times 10^{-3} M_S$.
- le rayon de l'orbite de Jupiter : $a_J = 778 \times 10^6 \text{ km}$;
- la période orbitale de Jupiter : $T = 11,9 \text{ ans}$, soit $3,74 \times 10^8 \text{ s}$.

Ceci entraîne une vitesse orbitale de Jupiter V_J telle que $2 \pi a_J = V_J T$; soit $V_J = 13,1 \text{ km/s}$.

On en déduit que :

- 1- le centre de masse C du système Soleil (S) - Jupiter (J) est tel que :
 $CS = 0,954 \times 10^{-3} CJ$; d'où
 $CS = 0,953 \times 10^{-3} \times 778 \times 10^6 \text{ km} = 741 \text{ 000 km}$; il est donc à peine au-dessus du bord solaire, ce qui rend le déplacement du Soleil difficilement perceptible.

- 2- la vitesse orbitale V_S du Soleil est telle que : $V_S T = 2 \pi CS$; de même $V_J T = 2 \pi CJ$; d'où :
 $V_S / V_J = CS / CJ = M_S / M_J = 0,954 \times 10^{-3}$. Soit
 $V_S = 12,5 \times 10^{-3} \text{ km/s} = 12,3 \text{ m/s}$.



Courbe de lumière de l'étoile HD 209458.

Elle résulte de la somme des observations effectuées lors de 2 occultations les 9 et 16 septembre 1999. Chaque point correspond à une moyenne sur 5 minutes. Les plus grandes barres d'erreur vers la fin des observations sont dues au fait que l'étoile était alors très basse sur l'horizon. La courbe en trait plein est celle prédite pour une planète de rayon 1,27 fois celui de Jupiter et une inclinaison de la ligne de visée par rapport au plan de l'orbite de $2,9^\circ$.

Documents pour les fiches CLEA BELIN

DCB

20 exemplaires
(70 F-65 F)

Transparents animés pour rétroprojecteur

(55 F-50 F)

T 1 Le TransSoLuTe
(phases de la lune et éclipses)
T 2 Les fuseaux horaires

Filtres colorés

FCR

Six feuilles de filtres colorés
et une feuille de réseaux
(75 F-65 F)

- D 1 Phénomènes lumineux
- D 2 Les phases de la Lune
- D 3 Les astres se lèvent aussi
- D 4 Initiation aux constellations
- D 5 Rétrogradation de Mars
- D 6 Une expérience pour illustrer les saisons
(série de 8 vues 35 F-30 F)
- D 7 Taches solaires et rotation du Soleil
- D 8 Comètes

DIAPPOSITIVES

Chaque série de 20 vues avec
son livret de commentaires
(65 F-55 F)

Publications du CLEA

Pour chaque publication le deuxième prix
est le tarif réduit pour les abonnés
Les prix indiqués le sont port compris



Chèques à l'ordre du CLEA

Les fiches d'activité pédagogiques du CLEA

- HS1 L'astronomie à l'école élémentaire
- HS2 La Lune niveau collège 1
- HS3 Le temps, les constellations, niveau lycée
- HS4 Astronomie en quatrième
(Chaque HS 68 F-48 F)
- HS5 Gravitation et lumière, niveau terminale
(83 F-73 F)
- HS6 L'âge de la Nébuleuse du Crabe
avec 4 diapositives et 12 jeux de deux photographies
niveau lycée
(110 F-100 F)
- HS7 Étude du spectre du Soleil
(58 F-50 F)
- HS8 Étoiles variables
(80 F-70 F)

Numéros hors série des CAHIERS CLAIRAUT
réalisés par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA

Cours polycopiés d'astrophysique

(Maîtrise de l'université
Paris XI-Orsay)

P1

Astrophysique générale
(63 F)

P2

Processus de rayonnement
(30 F)

P3

Structure interne
et évolution des étoiles
(35 F)

P4

Astrophysique solaire
(35 F)

CONDITIONS D'ADHÉSION ET D'ABONNEMENT POUR 2000

Cotisation simple au CLEA pour 2000 50 F
Abonnement simple aux **CAHIERS CLAIRAUT** n° 89 à 92 140 F

Abonnement aux **CAHIERS CLAIRAUT**
ET cotisation au CLEA pour 2000 190 F

Contribution de soutien au CLEA (par an) 50 F
Le numéro des Cahiers Clairaut 45 F

Possibilité de cotiser ou de s'abonner pour deux ans en doublant les tarifs précédents

COLLECTIONS DES CAHIERS CLAIRAUT des années antérieures :

90 F par an jusqu'en 1997

110 F par an à partir de 1998

Adresser adhésions,
abonnements ou commandes à

CLEA

Catherine Vignon

21 rue d'Anjou

92 600 Asnières

Chèque à l'ordre du CLEA

FASCICULES POUR LA FORMATION DES MAITRES EN ASTRONOMIE

- | | |
|--|-------|
| 1- L'observation des astres, le repérage dans l'espace et le temps | 43 F |
| 2- Le mouvement des astres | 53 F |
| 3- La lumière messagère des astres | 58 F |
| 4- Naissance, vie et mort des étoiles | 63 F |
| 6- Univers extragalactique et cosmologie | 58 F |
| 7- Une étape de la physique, la Relativité restreinte | 108 F |
| 8- Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie | 68 F |
| 9- Le système solaire | 88 F |
| 10- La Lune | 63 F |
| 11- La Terre et le Soleil | 78 F |
| 12- Simulation et astronomie sur ordinateur | 48 F |

Publication du planétarium de Strasbourg

LSO. Catalogue des étoiles les plus brillantes :

toutes les données disponibles du Centre des Données Stellaires de l'Observatoire
de Strasbourg concernant 2 000 étoiles visibles à l'oeil nu (75 F)

Commande à adresser au service librairie du Planétarium de Strasbourg

Directrice de la publication : Lucienne Gouguenheim
Imprimerie Hauguel, 92240 Malakoff

dépot légal : 1^{er} trimestre 1979
numéro d'inscription CPPAP : 61660
Prix au numéro : 45 F