

# Le système solaire aujourd'hui... en attendant le 22 juillet 1994

**André Brahic**

Université Denis Diderot (Paris VII), Observatoire de Paris-Meudon

La Présidente du CLEA se réjouit d'avoir une nouvelle fois à introduire André Brahic pour la conférence traditionnelle de l'assemblée générale. Notre Ami André est un fidèle de l'association, - rappelez-vous sa participation à la première école d'été CLEA de Lanslebourg - et il a toujours été un ferme soutien de notre action. Associé à la merveilleuse mission **Voyager**, il joue un rôle particulièrement important dans la future mission **Cassini** vers le système de Saturne. Il est donc bien placé pour nous parler des études actuelles et à venir sur le système solaire.

Il est vrai, c'est bien la troisième ou la quatrième fois que je viens au CLEA parler du système solaire et j'ai peur de me répéter. Pour éviter de lasser les auditeurs, je propose d'improviser en commentant une centaine de diapositives et en insistant sur trois idées

Première idée : importance de quelques connaissances de base récemment acquises sur le système solaire qui représentent ce que tout "honnête" citoyen du XXI<sup>ème</sup> siècle - par conséquent chacun de vos élèves - doit posséder. Alors que, nous le constatons tous, ces connaissances ne sont actuellement pas répandues comme elles devraient l'être.

Deuxième idée : les fantastiques progrès réalisés en à peine un quart de siècle proviennent du fait que nous pouvons maintenant recevoir et interpréter toute l'information envoyée par les astres, quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement reçu.

Une situation comparable à celle d'un enfant qui serait né avec des lunettes vertes ; il ne verrait que les feuilles des arbres mais pas les troncs et il s'interrogerait sur ces curieux feuillages sans racines ; jusqu'au jour où on lui enlèverait ses lunettes : il découvrirait alors un nouveau monde. C'est un peu ce qui nous est arrivé en astronomie. Nous ne connaissons que les informations transmises par la lumière visible à l'oeil et nous ne parlons couramment que de ce domaine restreint. Nous devons maintenant faire comprendre que notre connaissance de l'Univers provient de l'information portée par les rayonnements de toutes les longueurs d'onde.

Notons en passant que nos deux yeux sont bien adaptés pour le visible, bon écartement des deux récepteurs pour percevoir le relief, bonne sensibilité des bâtonnets et des cônes de la rétine pour être touchés par les photons de lumière visible (de 0,4 à 0,8 $\mu$  de longueur d'onde). Pour percevoir avec la même sensibilité des ondes radio, il faudrait des récepteurs de 300 mètres de diamètre placés à quelques kilomètres l'un de l'autre. Un individu aussi gigantesque est irréalisable, sa masse proportionnelle au cube de sa taille serait énorme et

devrait être portée par un squelette dont la résistance est proportionnelle à la section des os (donc au carré de la taille) ; toutes ces contraintes permettent de calculer la taille maximale des êtres vivants soit environ 50 mètres ; effectivement, les plus longs diplodocus avaient moins de 30 mètres de long...

Il était donc naturel que la découverte de l'Univers commençât par ce que tout le visible nous permet de percevoir. L'aide apportée par la lunette et le télescope marqua déjà l'élargissement de nos connaissances, au XVII<sup>ème</sup> siècle on eut un peu de mal à s'y habituer. Et aujourd'hui nous ne sommes plus aveugles ni en radio, ni en ultraviolet ni en X ni en gamma, c'est un progrès considérable.

Troisième idée : d'où ce progrès provient-il ? Essentiellement des progrès de la physique qui nous fournit tous les récepteurs désirables et surtout de l'immense apport de la recherche spatiale. Grâce à elle, on peut observer en se plaçant au-dessus de l'atmosphère terrestre qui fait écran à la plupart des rayonnements. On peut aussi aller sur place, au moins par robot interposé, pour observer les planètes et leurs satellites.

Grâce à quoi on peut étudier la Terre par comparaison avec les autres planètes. La Terre n'est plus un objet unique. La planétologie comparée nous apporte une vision plus objective de notre Terre.

### CONNAISSANCES ELEMENTAIRES

La première diapositive présente la vision classique de la galaxie d'Andromède, une galaxie comme il en existe des milliards d'autres, élément de base de l'astronomie, avec ses poussières, ses masses de gaz et de particules énergétiques et ses quelques cent milliards d'étoiles. Retenir que les galaxies se groupent en petites communautés, comme la nôtre avec sa trentaine de composants alors que d'autres groupes comme celui de la Vierge en compte des milliers.

Dans sa galaxie, la Galaxie, notre Soleil est une étoile un peu en marge. En passant, rappelons qu'il y a encore peu de temps, si on ne plaçait pas la Terre au centre du monde, on risquait le bûcher. En un sens, les temps sont moins durs, tout le monde accepte que la Terre ne soit qu'un petit objet à 150 millions de kilomètres du Soleil, que le Soleil ne soit pas au centre de la Galaxie qui n'est, elle, qu'une galaxie comme des milliards d'autres.

**Le diagramme des six cercles** doit nous donner le sens des distances en astronomie (fig.1). Le premier est celui du système Terre-Lune dont la distance moyenne est 380 000 km soit, pour la lumière, un temps de parcours d'à peine plus d'une seconde. On passe au deuxième cercle, celui du système solaire, en multipliant les distances par 10 000 : du Soleil, la lumière met 8 minutes pour atteindre la Terre, plus de 4 heures et demi pour atteindre les confins du système solaire. Encore une multiplication par 10 000 pour passer au monde des étoiles visibles ; la lumière met plus de quatre ans à nous parvenir de la plus proche étoile. Pour passer à l'échelle de la Galaxie toute entière, les dimensions sont encore multipliées par 10 000 ; diamètre de la Galaxie de l'ordre de 100 000 années de lumière.

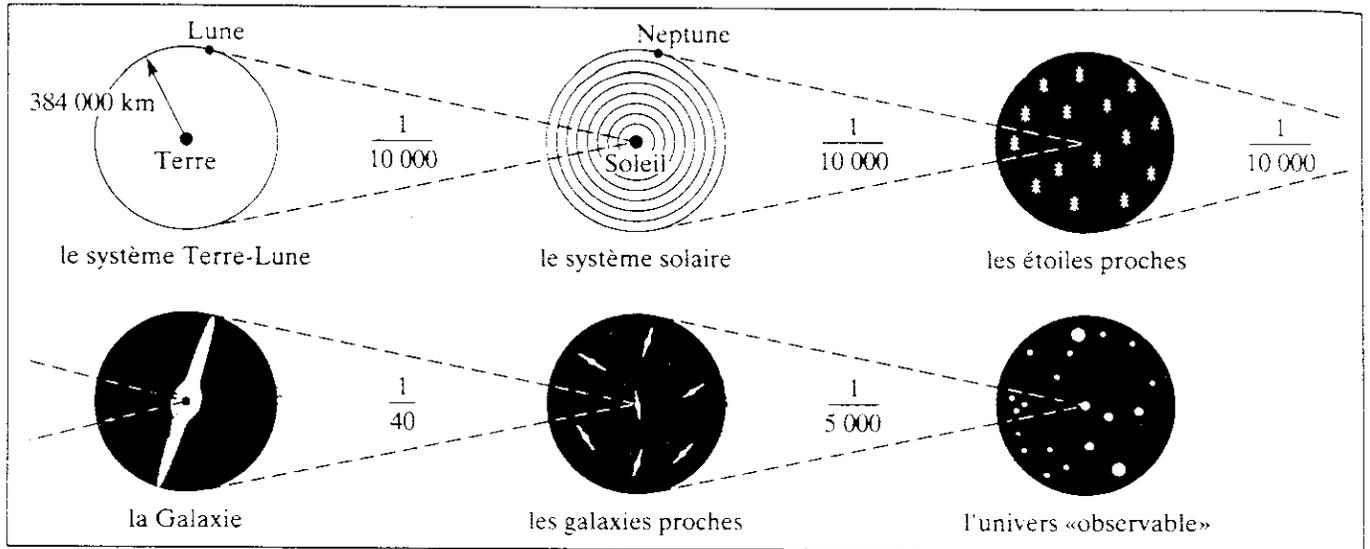


fig 1

De notre Galaxie au monde des galaxies, les distances sont à multiplier par 40 ; les distances des amas galactiques sont mesurés en millions et milliards d'années de lumière. Enfin, dernière étape, pour passer à l'ensemble de l'Univers observable, ultime multiplication des ordres de grandeur par 5000 ; il faut 9 milliards d'années pour que nous parviennent les signaux les plus lointains. En résumé, pour passer de l'échelle du monde Terre-Lune à l'Univers observable, il faut multiplier les distances par

$$10\ 000 \times 10\ 000 \times 10\ 000 \times 40 \times 5\ 000 = 2 \times 10^{13}$$

Ces six cercles présentent aussi l'intérêt de correspondre assez bien aux six domaines particuliers des sciences de l'Univers que sont la géophysique, la planétologie, l'astronomie stellaire, l'astronomie galactique, l'astronomie extragalactique et enfin la cosmologie.

Il faudrait aussi avoir une conscience claire de **l'échelle des durées**. Essayons d'y parvenir en imaginant de faire tenir toute l'histoire de l'Univers dans un calendrier annuel. Le grand boum (Big Bang en anglais) a donc lieu le 1er janvier. La Galaxie se forme au début de mars et moins de neuf mois plus tard - curieuse coïncidence de dates, le système solaire apparaît. Les événements, ensuite, se précipitent : 14 septembre, formation de la Terre ; 25 septembre, la vie y apparaît ; 2 octobre, formation des plus vieilles roches connues sur Terre ; 9 octobre, les algues apparaissent ; 1er novembre, invention du sexe par les micro-organismes ; 12 novembre, les plantes inventent la photosynthèse ; 1er décembre, l'oxygène apparaît dans l'atmosphère ; 24 décembre, premiers dinosaures ; le 25 décembre, rien à signaler ; 28 décembre extinction des dinosaures ; le 31 décembre à 22h30, l'homme apparaît et à 23h59 il invente l'astronomie... (fig 2)

L'humanité est un grain de poussière sur un grain de poussière un peu plus gros. Nous essayons de comprendre ce qu'est cet Univers mais nous arrivons tard et depuis si peu de temps que nous ne pouvons avoir tout compris. Il reste à la science un immense travail à accomplir. L'acquisition récente, au cours de ce siècle, des échelles de temps et de distances, nous montrent que nous sommes bien loin de l'idée folle de nous placer au centre de

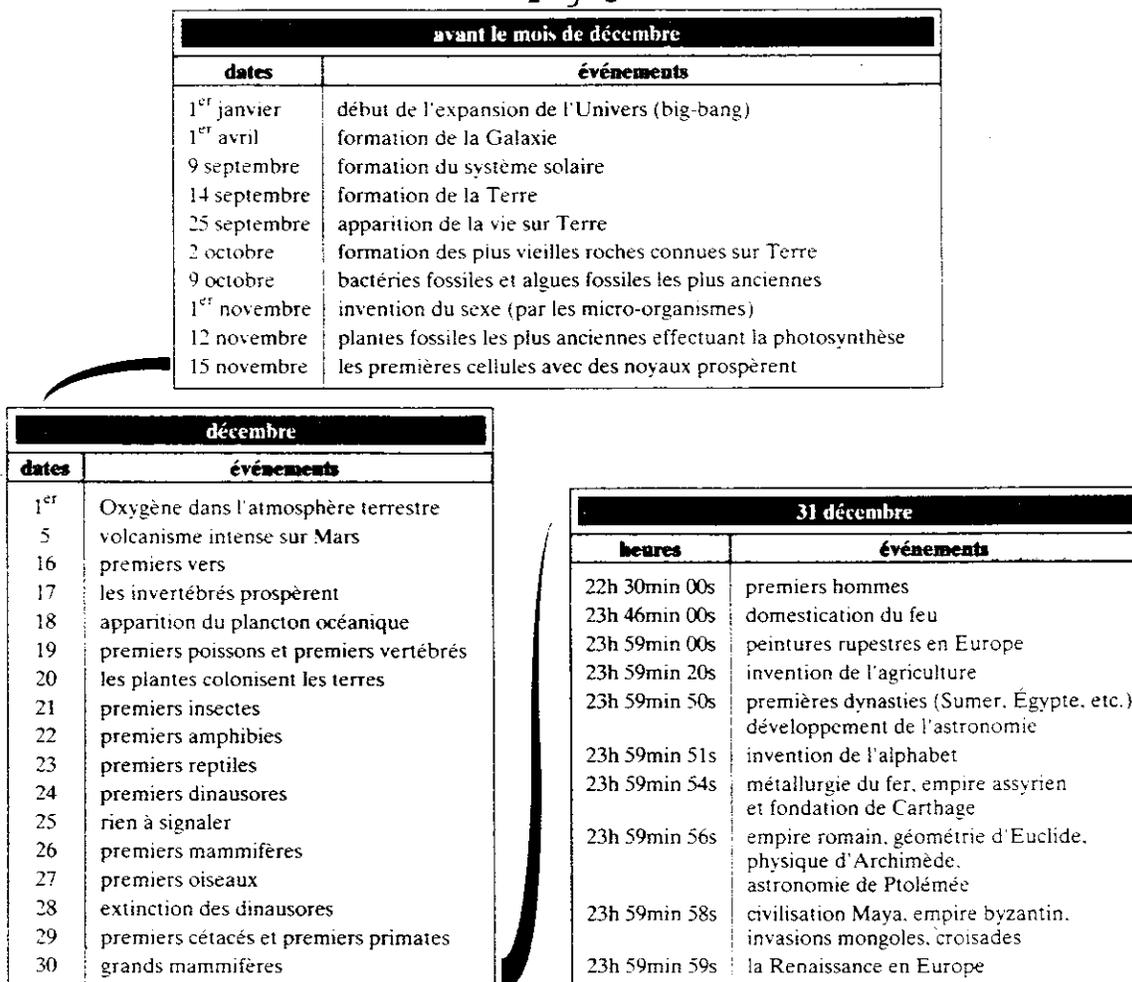


fig. 2

l'Univers et de ramener son histoire à celle de l'homme. Les données que nous venons de rappeler doivent nous conduire à beaucoup d'humilité ; nous venons tout juste de sortir du stade de la tendre enfance où le bébé se croit le centre du monde et, alors que nous ne sommes pas encore adolescents, il est peut-être prématuré de vouloir déjà tout expliquer.

Dernière idée sur laquelle il faut insister, **le propre de l'Univers est qu'il évolue**. Ainsi y a-t-il un cycle de la matière : les étoiles évoluent, rayonnent et rejettent de la matière ; à partir des matériaux interstellaires, de nouvelles étoiles se forment qui aussitôt évoluent... En leur sein, les étoiles savent changer les éléments légers (hydrogène, hélium, ...) en éléments lourds (oxygène, carbone, calcium, ...). Se rappeler que dans les matériaux des vivants tous les éléments autres que H et He ont été formés au sein d'une étoile qui n'était évidemment pas le Soleil.

### UN CIEL COMPLETEMENT EXPLORÉ

Grâce aux progrès de la physique et de la recherche spatiale, nous savons capter tous les rayonnements qui nous proviennent du ciel, des longueurs d'onde les plus courtes (rayons gamma) aux plus longues (radio). Aujourd'hui, nous savons capter des photons dont l'énergie va de  $10^{-12}$  à  $10^9$  eV. Il n'est pas étonnant que la vision de l'Univers change selon la longueur d'onde captée. Ce que vont nous montrer les représentations suivantes du ciel en coordonnées galactiques. (NDLR - En noir et blanc la reproduction de ces images n'aurait rien donné, contentons-nous ici de la description)

1. Le ciel visible à l'oeil nu, autrement dit celui des six mille étoiles visibles, soit 3000 à partir d'un endroit donné à un instant donné. On distingue la trainée brillante de la Voie Lactée à l'intérieur de laquelle nous sommes, on remarque le contraste des zones riches en poussières qui nous interdisent de voir la lumière visible des astres situés au-delà.

2. En ondes radio de 73 cm, la Voie Lactée apparaît bien mais très différemment, elle est moins homogène et son centre paraît particulièrement brillant ; tout autour, un halo d'astres proches. Cette émission radio diffuse qui domine dans le plan de la Galaxie est due à l'accélération par le champ magnétique de la Galaxie d'électrons qui parcourent toute la Galaxie. On aperçoit aussi les Nuages de Magellan et la galaxie d'Andromède. Avec des télescopes on peut voir des milliards d'étoiles, des milliers de nébuleuses, des centaines d'amas d'étoiles et des milliards de galaxies.

3. En ondes radio de 21 cm. Cette longueur d'onde n'est pas choisie au hasard. Elle correspond à l'émission produite par le rarissime changement de spin de l'électron de l'atome d'hydrogène : les grandes masses d'hydrogène contiennent un nombre si gigantesque d'atomes que ce rayonnement devient perceptible. Il nous donne alors l'image de la répartition des nuages d'hydrogène dans la Voie Lactée explorée ainsi de l'intérieur. Par effet Doppler-Fizeau, le mouvement de rotation différentielle de la Galaxie est même mis ainsi en évidence.

4. En ondes millimétriques de 12 mm. Le rayonnement est émis par des particules de faible énergie, ce qui est perçu est le rayonnement du "fond du ciel", ce rayonnement fossile provenant du grand boum initial et qui correspond à la température du corps noir à 2,7 K. On a d'abord considéré ce rayonnement comme parfaitement isotrope. Puis l'affinement des mesures à quelques millièmes de degré près a mis en évidence une dissymétrie, le signal est plus fort de 3 millièmes de degré d'une partie à l'autre.

Pouvait-on expliquer cette infime différence de longueur d'onde par effet Doppler ? Oui, elle est due au mouvement de la Terre par rapport au "fond du ciel". Le mouvement de la Terre sur elle-même et autour du Soleil ne rend compte que de 10% du décalage ; il faut ajouter le mouvement de notre Galaxie vers un point du ciel dans la constellation de l'Hydre à une vitesse de 600 km/s. Ce dernier mouvement se décompose en deux parties, la chute de notre groupe local de galaxies vers l'amas de la Vierge (qui est beaucoup plus massif) et la partie la plus importante est le mouvement de tout notre environnement (amas de la Vierge compris) vers une région appelée "le Grand Attracteur" qui devrait être observée dans le futur avec plus de détail. "Grand Attracteur", appellation dangereuse si on lui donne une connotation magique ou métaphysique, mieux vaut s'en tenir à l'idée de mouvement, d'évolution et d'étude à poursuivre pour comprendre mieux.

5. En ondes millimétriques de 5 mm relatives à une transition sur la molécule du monoxyde de Carbone qui est un excellent traceur des nuages moléculaires (nuages géants de gaz et de poussières contenant une grande variété de molécules des plus simples aux plus complexes en passant par le radical OH et l'alcool éthylique. Des télescopes installés l'un au Chili, l'autre en

plein Manahattan nous ont donné cette image du ciel en CO.

6. En infra rouge, entre 10 et 100 microns, tel que le ciel a été observé par le satellite IRAS : mise en évidence, d'une part des poussières, en biais on voit la trace du plan de l'écliptique et ailleurs des régions particulièrement riches en poussières où l'on peut voir de véritable nids d'étoiles en formation et, d'autre part de très grosses molécules en particulier des hydrocarbures polycycliques aromatiques qui ont plus d'énergie que leur environnement et émettent un rayonnement puissant autour de 12 microns.

7. En infra rouge toujours, se superposent au rayonnement continu qu'on vient de citer l'émission de sources ponctuelles ; le satellite IRAS a recensé 245 889 sources dont 25 000 galaxies pour la plupart de formes spirales comme la nôtre réparties uniformément dans le ciel, 100 000 enveloppes de matériau froid que les étoiles expulsent à l'état de géantes. On distingue aussi des étoiles froides concentrées dans le plan de la Galaxie et des nuages infra rouges de matériau froid relativement proches de nous.

8. En rayons X de longueur d'onde de 40 à 80 angström, on obtient une carte du ciel qui est en quelque sorte complémentaire de la carte n°3 en hydrogène. Le milieu interstellaire de notre Galaxie, composé d'hydrogène neutre et de poussières absorbe le rayonnement X. La montée de l'intensité X vers les pôles galactiques est probablement due à l'existence de gaz très dilués et très chauds dans un immense halo entourant notre Galaxie.

9. En rayons X encore mais en évitant de noyer les sources individuelles dans la somme du rayonnement X, on identifie des sources ponctuelles sur toute la sphère céleste. Certaines situées dans le plan galactique sont indentifiées comme provenant d'étoiles normales ou bien d'étoiles doubles avec échange de matière de l'une des composantes à l'autre ; ou encore des restes de supernovae. D'autres, réparties sur toute la sphère céleste sont des galaxies normales, des galaxies actives ou encore des amas de galaxies. Un grand nombre de sources sont de nature inconnue.

10. Les sources gamma de longueur d'onde de  $10^{-10}$  à  $10^{-13}$  cm. Quelques dizaines de sources ont été identifiées. L'aspect du ciel en gamma ressemble au ciel de la carte 5 relatif à la molécule CO parce que des rayons cosmiques très énergétiques frappent des nuages de gaz et provoquent ce rayonnement. Quant à la cinquantaine de sources, cinq sont des pulsars (Crabe, Vela, Geminga,...) et une vingtaine des quasars et des noyaux actifs de galaxies.

Au delà du rayonnement gamma, il y a des physiciens qui cherchent. Quand on sait quelle est la situation actuelle en physique des hautes énergies avec plusieurs centaines de particules différentes, on peut penser que cette profusion appelle une théorie simplificatrice. Et c'est là que physique et astrophysique se rejoignent. Devant le coût des grands accélérateurs de particules, des physiciens de plus en plus nombreux pensent que c'est par l'astrophysique qu'on trouvera ces idées simplificatrices. Des observatoires s'en préoccupent à Hawaï ou en France, dans la Cerdagne, sur le site de Themis, le centre solaire désaffecté où l'on observe le rayonnement de  $10^{12}$  à  $10^{15}$ eV provenant des pulsars.

## LA TERRE ET LA PLANETOLOGIE

Au vingtième siècle, la Terre est considérée comme une machine qui évacue sa chaleur interne par convection. Depuis 1955, la géophysique étudie le mouvement des plaques qui flottent sur le manteau visqueux ; aux limites des plaques, quand elles se rencontrent, ou se glissent l'une sous l'autre, des failles et des volcans apparaissent. Les progrès de la géophysique ne peuvent cependant provenir de l'expérimentation, il est exclu de provoquer des tremblements de Terre rien que pour les observer. Une autre voie existe pour la recherche, comparer la Terre à d'autres planètes ou aux satellites, les gros ou les plus petits, les plus denses ou moins denses, les plus chauds ou plus froids, ceux de composition chimique différente... Donnons deux exemples de cette méthode : la climatologie, la volcanologie

Etudier les mouvements de l'atmosphère terrestre, ses échanges avec les océans, se révèle une tâche très complexe, tant sont nombreux les paramètres dont il faut tenir compte. De plus, la Terre tourne très vite sur elle-même d'où l'existence d'effets Coriolis qui compliquent les équations du modèle qu'on voudrait construire. Au contraire, si vous observez Vénus : il n'y a pas d'eau à la surface et la planète tourne lentement sur elle-même. Le modèle de l'atmosphère vénusienne sera plus facile à construire. En revenant ensuite à l'atmosphère terrestre, c'est à dire en appliquant à celle-ci le modèle de Vénus modifié, on a l'espoir de progresser. Dans le même ordre d'idées, une thèse soutenue cette année consistait à appliquer un modèle de l'atmosphère de la Terre aux atmosphères de Titan et de Mars et de comparer les résultats du modèle avec les observations spatiales : l'accord devenait excellent en modifiant le modèle initial. C'est ainsi que l'observation d'autres atmosphères a permis de progresser dans la connaissance de la nôtre.

Cet exemple est une bonne réponse aux critiques qui s'étonnent qu'on aille s'intéresser aux atmosphères de Titan et de Mars. Il est pourtant clair que si on ne sait pas résoudre un problème, ce n'est pas en restant le nez dessus qu'on trouvera une solution. Mieux vaut prendre du recul.

Autre exemple significatif, le volcanisme. Sur la Terre, c'est un cas très particulier qui est la manifestation d'un phénomène très général dans le système solaire. Il y a des volcans en activité sur Io, des volcans éteints sur Mars, des volcans sur Vénus, des geysers sur Triton.

Bref, pour bien connaître la Terre, en comprendre toutes les particularités, il faut étudier les planètes et les comparer entre elles. Il est navrant de constater qu'en 1993, il y a encore des peuples qui se massacrent pour des questions de pointillés sur la surface de la Terre alors que, depuis moins d'un demi-siècle, les planètes qui, jusque-là, n'étaient que des points mobiles dans le ciel étoilé, sont devenues de vraies planètes ayant beaucoup à nous apprendre sur elles-mêmes et sur notre Terre. Un rêve ancien, aller sur d'autres mondes, est devenu réalité. Le système solaire a été bien inventorié dans sa diversité : ses neuf planètes dont quatre grosses qui ont beaucoup de satellites et des anneaux, des plus petits débris.

comme notre Terre, le troisième à partir du Soleil et beaucoup de très très petits objets.

Retenir que la diversité des objets est la conséquence naturelle de la diversité des masses. Les plus grandes masses dans l'Univers sont celles des amas de galaxies, fragmentés en galaxies, elles-mêmes fragmentées en amas d'étoiles. Viennent ensuite les étoiles elles-mêmes au sein desquelles la température suffisamment élevée permet le démarrage des réactions nucléaires et le rayonnement de l'étoile. En-dessous les naines brunes, soupçonnées mais non encore observées, boules de matière dégénérée, ont des masses comprises entre un dixième et un centième de masse solaire. En-dessous viennent les masses des grosses planètes, puis celles des petites comme la Terre, puis les corps encore plus petits comme les astéroïdes, les comètes ou les petits satellites. Enfin le milieu interplanétaire est loin d'être vide, il contient du plasma et des poussières.

Ce système solaire est-il unique en son genre ? Beaucoup d'astronomes pensent que non, que parmi les centaines de milliards d'étoiles de la Galaxie, le Soleil n'est pas la seule étoile à posséder un cortège de planètes. Mais on n'a encore jamais prouvé leur existence. Même si des signes, comme le disque de gaz observé autour de l'étoile  $\beta$  Pictoris montre qu'il existe bien de la matière autour des étoiles ; l'absence de poussière au plus près de l'étoile est-elle le signe de l'existence d'une planète de quelques masses terrestres qui aurait repoussé ces poussières vers l'extérieur ? On se pose la question.

### LA FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

L'observation nous a donc appris la diversité des objets dans le système solaire, ce qui nous fait comprendre le rôle de chaque paramètre. Nous avons aussi acquis l'idée d'évolution. Platon la refusait et la confondait avec l'idée de dégénérescence ; Aristote développa les mêmes idées. Mais l'évolution est le propre de l'Univers où rien n'est figé. Descartes, avec sa théorie des tourbillons, ouvrit la voie à l'idée d'évolution.

On se posa alors la question, comment le système des planètes s'est-il formé ? Le naturaliste Buffon, au XVIII<sup>ème</sup> siècle imagina qu'une comète avait arraché un morceau de Soleil pour former la Terre. L'idée, reprise par l'école anglaise, remplace la comète par une étoile, objet autrement massif, pour arracher au Soleil la matière des planètes. Cette théorie catastrophique est aujourd'hui abandonnée ; en particulier, une matière prise dans le Soleil ne contient pas de deutérium lequel existe dans les planètes. La théorie évolutive de la formation du Soleil et des planètes peut au contraire être fondée sur de solides arguments, les planètes et le Soleil se sont formés à partir d'un nuage de gaz et de poussières, la partie centrale la plus massive devenant une étoile, le Soleil, après s'être effondrée sur elle-même sous l'effet de la gravitation alors qu'à la périphérie, plus froide, des "grumeaux" ont constitué les planètes.

Des données observationnelles confirment ce scénario :

- Les orbites des planètes sont toutes dans le même plan révélant qu'à l'origine, il y avait un disque continu de matière.

- Il y a un problème quand on considère la répartition des masses et des moments cinétiques entre Soleil et planètes ; les données conduisent à un apparent paradoxe, 99% de la masse totale est dans le Soleil alors que 98% du moment cinétique est dans les planètes. Le paradoxe a été levé quand Evry Schatzman a montré que le champ magnétique du Soleil freinait la rotation propre du globe solaire.

- La composition matérielle des planètes : dans le Soleil, moins de trois atomes de deutérium pour dix millions d'atomes d'hydrogène alors que dans les planètes on trouve un atome de deutérium pour seulement cent mille atomes d'hydrogène. Cela confirme que les planètes ont été formées à partir d'un matériau froid (la périphérie de la nébuleuse) et non de matériau chaud (près du Soleil).

On peut donc conclure que les planètes ne proviennent pas du Soleil par arrachage mais à partir de fragmentations de la périphérie du disque solaire.

Avant de décrire plus avant ce scénario, distinguons bien, dans toutes les sciences, l'acquis, le très probable et le spéculatif. Exemples : "La Lune tourne autour de la Terre", c'est acquis. "Le scénario de la formation évolutive du système solaire", bon exemple du très probablement vrai. "L'Univers est en expansion", c'est certain mais pas à 100%. "Les quasars sont d'immenses trous noirs", c'est pour l'instant la meilleure explication du phénomène quasar mais c'est encore spéculatif

Revenons à la formation du système solaire. Dans un très grand nuage de gaz et de poussières, il y a d'abord fragmentation, phénomène encore mal compris, et formation d'un nuage plus petit qui tourne sur lui-même. Au sein de ce nuage, la gravitation rassemble au centre la plus grande masse et forme le Soleil tandis qu'à la périphérie, la rotation aplatit le nuage en un disque ; force centrifuge et frottements y concourent. Pendant un temps très court à l'échelle astronomique, 25 millions d'années, le Soleil s'effondre sur lui-même ce qui dégage beaucoup d'énergie - le Soleil est alors plusieurs dizaines de fois plus brillant qu'aujourd'hui.

Quand la température au centre du Soleil atteint le million de degrés, les réactions nucléaires s'engagent, la contraction s'arrête - la pression de radiation équilibrant la gravitation - le Soleil adopte son régime de croisière, celui d'une petite étoile économe de ses réserves. A la périphérie du disque, le gaz se refroidit ; au plus près du Soleil, des éléments réfractaires se constituent alors que plus loin, des glaces d'eau, de méthane, d'ammoniaque ou de monoxyde de carbone se forment.

Dans le disque, des défauts d'homogénéité entraînent la formation de planétoïdes, fragments de toutes dimensions qui s'entrechoquent et se brisent ou s'agglomèrent. Les calculs montrent que se formerait facilement une cinquantaine de petites planètes mais pas les 9 grosses que nous connaissons. On peut le comprendre ainsi : si les orbites sont circulaires, les vitesses relatives de deux objets qui se cognent sont faibles donc agglomération plutôt qu'éclatement. Si les orbites sont elliptiques, les vitesses relatives sont plus grandes, le risque de rupture en débris plus grand, mais les orbites elliptiques permettent de ratisser les

matériaux plus largement. Pour permettre plus efficacement l'agglomération de grosses planètes, des phénomènes de résonance associés aux collisions et à la gravitation ont dû jouer un rôle de "confinement gravitationnel" semblable à ce que l'on observe aujourd'hui dans les anneaux des planètes avec leurs satellites gardiens et leurs arcs et anneaux minces.

Quand la planète est formée, comme l'huile et le vinaigre initialement mélangés, les éléments les plus lourds tombent au fond, les matériaux se répartissent selon leurs densités respectives, un noyau de fer ou de nickel, les matériaux légers au-dessus sur lesquels viendront flotter les continents, encore plus légers. Au début, les collisions avec les planétoïdes, donc les bombardements, seront intenses, mais ils iront en diminuant de façon exponentielle.

Pour comprendre la formation du système solaire, il faut donc étudier les petits corps plutôt que les gros. Ces derniers nous renseignent sur leur évolution qui a effacé les conditions initiales. Les petits corps, au contraire, les comètes, les astéroïdes et même les météorites nous présentent ces objets dans leurs conditions de formation. Il y a deux mois, la sonde **Galileo**, en route vers Jupiter, a photographié l'astéroïde Ida qui a 15 km de diamètre. Un tel objet, de même dimension que le noyau de la comète de Halley ou que Phobos sont des descendants directs de morceaux de la nébuleuse primitive, la comète un planétoïde du froid des confins du système solaire, l'astéroïde un planétoïde des régions plus chaudes.

Le projet **Rosetta** consiste à lancer une sonde qui permettra de collecter certains morceaux de comètes et de les rapporter sur Terre après avoir visité quelques astéroïdes. Ce projet se développera jusqu'en 2010. Ces petits corps seront les "pierres de Rosette" (d'où le nom de la sonde) sur lesquelles est inscrite l'histoire du système solaire.

Envoyer des sondes coûte cher. A moindres frais, il y a des informations à glaner dans les météorites qui tombent sur la Terre. Là, il suffit de se baisser pour les ramasser ; la récolte a été particulièrement fructueuse sur les glaces de l'Antarctique. Donnons un exemple de résultats obtenus de cette façon : la mesure d'un excès de l'isotope 26 du magnésium par rapport à l'isotope 24 montre que la météorite a été bombardée, au moment de sa formation par l'isotope 26 de l'aluminium (parent par radioactivité de l'isotope 26 du magnésium) provenant d'une supernova voisine. Ce qui ne signifie pas que la supernova est la mère du système solaire mais qu'elle a été "dame visiteuse" lorsque notre système était encore en "maternité".

Deux remarques encore. Toutes les informations contenues dans ces petits objets ne sont pas comprises, 95% d'entre elles restent à déchiffrer. Quant au phénomène de la vie, il y a sur Terre tous les éléments nécessaires à son apparition et à son développement sans qu'il y ait besoin d'un apport extérieur. Par contre, les conditions dans lesquelles s'est trouvée la Terre ont joué un rôle considérable dans la naissance et l'évolution des vivants. La chute d'une très grosse météorite peut entraîner la formation d'un nuage de poussière à l'échelle de la planète et, par suite, perturber de façon plus ou moins durable le climat.

## VISITE RAPIDE AUX PLANETES ET A LEURS SATELLITES

**Mercury** avec son sol fortement cratérisé présente un aspect voisin de celui de la Lune et pourtant les compositions internes des deux astres sont bien différentes.

**Vénus**, pudiquement enveloppée de nuages, a été bien explorée par des missions toutes réussies: mesures radar et mesures altimétriques ont permis d'avoir une bonne connaissance du relief de la surface. Mesures du champ magnétique et mesures gravimétriques renseignent sur la structure interne de la planète. On a découvert de nombreux volcans

Vénus, dont la masse est voisine de celle de la Terre, a une atmosphère bien différente, une température de 400°C, une pression de 80 atmosphères. L'abondance du monoxyde de carbone a entraîné par effet de serre, cette température élevée. En comparant avec l'atmosphère terrestre, on comprend bien que celle-ci est un véritable prolongement de nous-mêmes. La disparition de l'atmosphère terrestre conduirait à notre mort immédiate, la disparition de toute forme de vie entraînerait une modification majeure de l'atmosphère qui aurait alors une composition proche de celle de l'atmosphère de Vénus.

**Mars** et son grand canyon ne pose plus les problèmes qui inquiétaient les astronomes il y a encore moins d'un siècle. Rappelons cette fameuse hypothèse controversée des canaux martiens ; n'a-t-on pas trop tendance à faire dire aux données d'observation plus que les informations qu'elles contiennent ? Curieusement, alors que toutes les missions vers Vénus ont été réussies, vers Mars, il y a eu beaucoup d'échecs. La mission russe **Phobos** a échoué. récemment la sonde américaine qui devait se poser sur Mars a été perdue...

Mars est un objet intermédiaire entre, d'une part Mercury et la Lune, d'autre part la Terre et Vénus. Parmi les nombreux problèmes posés, la présence de lits de rivières asséchées atteste de l'existence d'eau liquide dans le passé et par conséquent d'une atmosphère différente de l'actuelle, excellent exemple d'évolution. Mars sera probablement, au XXI ème siècle, la prochaine étape de l'exploration humaine.

La mission **Voyager** a accompli, en une douzaine d'années, une extraordinaire moisson d'informations sur Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, leurs satellites et leurs anneaux. La sonde elle-même a magnifiquement fonctionné, avec tous ses instruments d'observation, sa centrale nucléaire d'alimentation en énergie, sa modeste réserve de carburant pour alimenter ses petites fusées permettant de modifier son orientation propre. La sonde qui sort maintenant du système solaire emportait aussi des messages pour d'éventuels extraterrestres qui la récupéreraient et 120 photographies voulant représenter un tableau de la civilisation humaine actuelle (voici un bon exercice à proposer à vos élèves ; quels sujets choisir pour ces 120 photos afin qu'elles soient vraiment représentatives de l'humanité actuelle).

La trajectoire de la sonde Voyager est une grande prouesse de calcul en mécanique céleste. Dès son lancement, la sonde avait atteint la vitesse d'évasion du système solaire, elle mit ainsi 8 heures pour dépasser la Lune (alors que les missions Apollo mettaient trois jours pour atteindre notre satellite) ; elle se servit alors de l'attraction de Jupiter pour se

diriger vers Saturne et, de même, atteindre ensuite Uranus puis Neptune à la précision du kilomètre près par rapport aux prévisions. Rappelons-nous aussi qu'en passant près de Jupiter, on a calculé sa trajectoire pour offrir la possibilité de photographier les satellites. Et comme il y a eu deux sondes Voyager, on s'est efforcé qu'en photographiant ces satellites, l'une et l'autre puissent les voir de côtés différents.. Bref une magnifique mission, *"le plus grand succès scientifique et technologique de notre siècle"* dit Stephen Jay Gould (La foire aux Dinosaures, p.441)

Passons en revue quelques unes des merveilles qu'elle a glanées...

- La première photo de la Terre et de la Lune ensemble, à la même échelle. L'apparence est celle d'une planète double ; le seul exemple du même ordre dans le système solaire est le couple de Pluton et Charon ; pour les autres planètes, les satellites sont toujours petits ou très petits par rapport à la planète.

- La photo de Neptune et de Triton marque la fin de la mission alors que la photo précédente était son premier exploit.

- Entre ce bon début et cette belle fin, une moisson de vues intéressantes comme Neptune avec ses grandes taches, les aspects si divers des quatre satellites galiléens, le très fin anneau F de Saturne avec ses deux satellites gardiens, les satellites sur la même orbite (Poincaré et Birrkhoff avaient pressenti au début du siècle qu'une telle particularité pouvait se présenter au cours de leurs études du problème des trois corps). L'image des anneaux de Saturne avec leur ombre sur la planète et la lueur d'un "clair d'anneaux" est un vrai chef d'oeuvre. Dans leur diversité, les satellites de Saturne n'ont pas fini de nous intriguer : Japet et la dissymétrie de ses deux hémisphères ; Encelade où apparaissent des coulées et des failles, témoignage d'une activité géologique encore inexplicée sur un aussi petit corps ; Hypérioron à l'aspect très dissymétrique également et qui offre le premier exemple de mouvement chaotique (période de rotation variable autour d'un axe brusquement variable) ; surtout Titan dont l'atmosphère opaque d'azote pose de multiples problèmes. Titan sera l'objectif de la mission **Cassini** : construction de la sonde en 1995 qui sera alors testée avant d'être lancée en 1997 ; la rencontre avec Titan est prévue pour 2004, la fin de la mission pour 2007 après exploration de la planète, de ses anneaux et des satellites. Le dépouillement des données recueillies se prolongera ensuite durant plusieurs dizaines d'années.

Un regard sur Miranda, ce corps extraordinaire du système d'Uranus ou sur Triton, le satellite de Neptune. On y voit des volcans, des failles et même une trainée noire comme l'étalement d'une colonne de matière qui s'est élevée sur huit kilomètres avant d'être prise dans un courant de l'atmosphère, une sorte de geyser.

Un dernier regard sur les arcs d'anneaux de Neptune. Découverts par nous en 1984, confirmés en 1989 alors qu'on fêtait un bicentenaire, on les a dénommés Liberté, Egalité, Fraternité et quand un quatrième arc a été découvert par Cécile Ferrari et André Brahic, on l'a appelé Courage afin que les initiales des quatre arcs, C.L.E.F., nous rappellent que leur étude est peut-être la clef de la théorie du confinement de la matière.

Plus loin, on pense parvenir à la limite entre milieu interplanétaire et milieu interstellaire. Certains pensent l'avoir trouvée vers 40 unités astronomiques. Les sondes Voyager continueront à nous envoyer des messages jusqu'à 100 unités astronomiques, au-delà elles deviendront muettes. Pour aller plus loin, il faudra concevoir des sondes à moteur ionique. On peut rêver à des missions d'exploration vers d'autres planètes autour d'autres étoiles qui s'étaleront sur des durées de plusieurs siècles pour chaque mission.

Mais revenons, pour finir, sur le passé. Il a fallu près de 4000 ans à l'humanité pour qu'elle explore toute la surface de la Terre, 500 ans pour qu'elle comprenne la position de la Terre dans l'Univers, un petit demi-siècle pour qu'elle commence à explorer le système solaire par robots interposés. Tout cela n'est vraiment qu'un début. L'humanité est en enfance, il lui reste beaucoup à apprendre, il est temps de s'en occuper, priorité à la science.

### QUESTIONS EN FIN DE CONFERENCE

Les auditeurs ont pu voir quelques morceaux de films réalisés à partir des missions sur Vénus (un survol du sol d'après les relevés altimétriques) ou sur Triton (le développement d'un geyser, le film le plus court - trois images - réalisé à la plus grande distance de la Terre). André Brahic répond ensuite à quelques questions.

#### 1. Le volcanisme de Vénus est-il en relation avec une tectonique de plaques ?

- Le volcanisme sur Vénus est une découverte toute récente qui n'est pas encore complètement expliquée. En tout cas, il n'y a pas de mouvement de plaques ; on pense plutôt à des points chauds développés dans les courants de convection internes.

#### 2. Comment expliquer la grande vitesse de rotation de l'atmosphère de Vénus ?

- Brahic rappelle la belle découverte d'un astronome amateur, Boyer, magistrat à Brazzaville, qui observa une tache en forme d'Y dans l'atmosphère de Vénus et en déduisit une période de rotation de trois jours qui fut ensuite confirmée. On découvrit plus tard une rotation rétrograde de la planète en 250 jours. Comment expliquer ce phénomène de superrotation de l'atmosphère ? Certains pensent à un effet de marée thermique.

#### 3. Les vents de la tache rouge de Jupiter

- La tache rouge, grande comme la Terre, tourne sur elle-même en six jours. Mais sur Saturne, on trouve des vents encore plus violents, jusqu'à 1800 km/h et sur Neptune ils soufflent à près de 300 m/s.

#### 4. Verrons-nous la collision d'une comète avec Jupiter ?

- Une comète a frôlé Jupiter en 1992 et son noyau s'est brisé en 27 morceaux principaux. Ceux-ci reviendront dans les environs de Jupiter le 22 juillet prochain. Nous travaillons avec plusieurs observatoires pour surveiller la planète à cette date car la collision est probable, un événement à ne pas manquer, il ne se produit pas souvent au cours d'un millénaire. Il y a risque de ne rien voir si l'impact a lieu dans l'hémisphère de Jupiter non visible depuis la Terre. C'est pourquoi l'idée est venue - qui enthousiasme André Brahic - de ranimer la sonde **Voyager 1** et d'observer, grâce à elle, le phénomène "de l'extérieur". A la distance où se trouve la sonde, Jupiter n'est plus qu'un point mais en faisant dériver son image sur le détecteur on pourrait observer tout accroissement de luminosité dû à l'impact d'un projectile. Il n'est pas encore certain que ce projet soit mené à terme mais les collisions prévues pour juillet 1994 mobilisent déjà de nombreux astronomes.

Rédaction Gilbert Walusinski relue et corrigée par André Brahic

NDLR - Quelle que soit l'indulgence du conférencier pour le texte que lui a soumis le secrétaire, il est très évident que les mots imprimés n'ont pas la force de l'expression orale quand elle est portée par l'ardeur convaincante d'André et soutenue par la qualité exceptionnelle des images. Hélas, nous ne pouvions les reproduire en noir et blanc, c'eût été les trahir. Bref, ce texte ne peut être qu'un très pâle écho des trois heures de l'éblouissante conférence d'André Brahic.