

**Le planétarium Peiresc est une réalisation de
l'association des Amis du Planétarium
d'Aix en Provence,**

avec le soutien de :



Ville
d'Aix-en-Provence



Conseil Général
des Bouches du Rhône



Conseil Régional
P.A.C.A.

et la participation de :



D.R.A.C.



Académie
d'Aix-Marseille



Laboratoire
d'Astrophysique
de Marseille

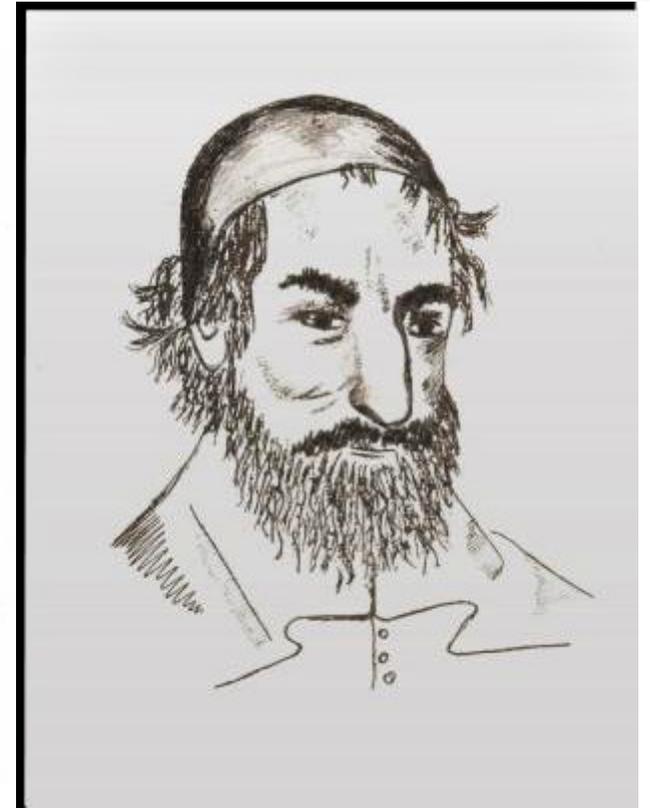
Printemps 2005



numéro 1

Peiresc

Les Cahiers



L'association des Amis du Planétarium d'Aix en Provence,
(A.P.A.P.),

a été fondée en novembre 1989 avec pour objectif :

*« la diffusion, en milieu scolaire et auprès du public en général,
des théories scientifiques qui constituent
l'Astronomie, l'Astrophysique et les sciences de la Terre,
en utilisant comme outil pédagogique privilégié
un planétarium fixe. »
(article 2 des statuts)*

—o—

L'A.P.A.P. est membre de

*L'Association des Planétariums de Langue Française,
(A.P.L.F.),*

dont le siège est :

Planétarium de Strasbourg
Rue de l'Observatoire
67 000 STRASBOURG

*Tant qu'un homme ne s'est pas expliqué le secret
de l'univers, il n'a pas le droit d'être satisfait.*

Jules Renard

AVANT-PROPOS

Voici le premier numéro des Cahiers Peiresc, brochure que l'association des Amis du Planétarium d'Aix en Provence a décidé d'éditer chaque trimestre. Si nos moyens le permettent, nous publierons également des éditions spéciales en cas d'événements marquants.

Notre objectif est de faire découvrir, au travers des sujets abordés, les composantes scientifiques, mais aussi historiques, ou sociologiques, qui contribuent à la compréhension et à l'évolution des connaissances de la Terre et de l'Univers.

Dans ce premier numéro, nous publions trois résumés des conférences présentées au public dans le cadre de la Fête de la Science 2003. Nous tenons à exprimer toute notre gratitude aux auteurs de ces articles pour le surcroît de travail qu'ils ont bien voulu nous consacrer.

L'un de ces articles est relatif à la tectonique des plaques. Les énergies mises en jeu et leurs effets catastrophiques ont été illustrés par le tsunami qui a dévasté fin décembre l'Asie du sud-est. Souhaitons que par la connaissance approfondie de ces phénomènes, la communauté scientifique puisse apporter partout dans le monde les solutions, en termes de détection et de prévention, pour la sauvegarde des populations des zones à risques.

*Pierre Fernandez
Février 2005*

POST SCRIPTUM

Diverses contraintes (essentiellement financières) nous ont obligés à retarder considérablement la parution de ces articles : nous prions leurs auteurs, et nos lecteurs, de bien vouloir nous en excuser.

Notre souhait initial avait été de publier l'ensemble des contributions dans une brochure imprimée qui aurait pu être proposée à la vente. Tout était prêt pour le début de l'année 2004, tout, mais pas le financement.

De manière à ce que les conférenciers qui ont eu la très lourde charge de rédiger un résumé de leur exposé n'aient pas travaillé en vain, nous avons décidé de publier leur travail dans cette petite brochure qui, espérons-nous, reprendra le flambeau de celles que nous avons publiées au tout début de l'aventure du Planétarium aixois.

Nous tenons également à remercier ici les adhérents qui nous ont permis de donner à cette brochure une note d'originalité avec les éléments dessinés (portrait de Peiresc et calligraphie du titre) figurant en couverture.

*Philippe Malburet
Mars 2005*

LES CAHIERS PEIRESC

Au prochain numéro :

LA QUÊTE DES ORIGINES ET DES MONDES NOUVEAUX

par **Pierre BARGE**,

Astronome au Laboratoire d' Astrophysique de Marseille (C.N.R.S.)

L'humanité se pose depuis longtemps la question de ses origines. Certains philosophes se sont aussi interrogés très tôt sur la possibilité d'existence d'autres mondes ou de vie ailleurs que sur la Terre. Par exemple dans la Lettre à Hérodote, en 300 avant Jésus-Christ, Épicure pense que : " Il y a une infinité de mondes semblables au nôtre ou différents ".

Idée que l'on voit réapparaître plus tard, par exemple exprimée par Bernard de Fontenelle dans les " Entretiens sur la pluralité des mondes " : " Il semble que rien ne devrait nous intéresser davantage que de savoir comment est fait ce monde que nous habitons, s'il y a d'autres mondes semblables, et qui soient habités aussi ... ".

CADRANS SOLAIRES

par **André VASCHALDE**,

Inspecteur honoraire de Sciences Physiques

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir ...

Sans jamais oser le demander.

(Enfin presque...)

SOMMAIRE

Bernard GAUDIN : La tectonique des plaques	6
Jean-Marie HOMET : Astronomie provençale aux XVIIe et XVIIIe siècle	10
Laurent JORDA : Les comètes	12
Cahier central des illustrations	13 - 20
Actualités astronomiques	26
Au sommaire du prochain numéro	28
Post Scriptum	29

LA TECTONIQUE DES PLAQUES

Bernard GAUDIN

Inspecteur honoraire de Sciences de la Vie et de la Terre

Pour bon nombre d'entre nous, l'activité du globe terrestre se résume aux quelques éruptions volcaniques spectaculaires et aux quelques tremblements de Terre que nous font connaître les médias en rapport avec les dégâts causés aux agglomérations associés au nombre souvent considérable de victimes. En réalité, ce sont des centaines de séismes et d'éruptions volcaniques que détectent quotidiennement les scientifiques. Parallèlement ont lieu des phénomènes dont la discrétion n'a d'égale que l'importance de leur ampleur : il s'agit du déplacement des continents, de l'ouverture et de la fermeture des océans ainsi que de l'érection et de l'érosion des chaînes de montagnes. Ces phénomènes qui échappent à notre observation à cause de leur infinie lenteur s'expliquent par ce que les géologues nomment tectonique des plaques.

Les continents se déplacent

Déjà dans les années 1920, un moine nommé WEGENER exprimait l'hypothèse selon laquelle les continents se déplaceraient en flottant sur une masse visqueuse grâce à la combinaison de l'attraction lunaire et de la rotation de la Terre ; cette géniale intuition était née du constat de la parfaite complémentarité de forme de certains continents comme l'Afrique et l'Amérique du sud (**Fig. A1**). Cette complémentarité ne pouvait effectivement s'expliquer que par la séparation de deux pièces comparables à celles d'un puzzle.

Actuellement, des arguments plus convaincants encore viennent confirmer cette hypothèse ; la présence de faunes et de flores spécifiques des zones qui se font face sur des continents aux formes complémentaires ne peuvent s'expliquer que par le partage des populations en question (**Fig. A2**).

Certaines roches, véritables boussoles fossiles, donnent, pour deux continents différents et pour une même période géologique, une seule et même position des pôles magnétiques ce qui est logique ; par contre, pour ces mêmes continents, mais à des périodes géologiques différentes, ces boussoles donnent des pôles magnétiques différents (**Fig. A3**). Il faut donc admettre que les continents en question ont migré indépendamment l'un de l'autre.

Autre argument déterminant : on sait actuellement que les planchers des océans sont constitués de « bandes » rigoureusement symétriques par rapport à une zone médiane vers les deux continents qui se font face (**Fig. A4**). Ces deux continents étant solidaires du plancher océanique auxquels ils sont associés, on doit admettre qu'ils se sont éloignés l'un de l'autre au cours des temps géologiques. Afrique et Amérique du sud fournissent une illustration de ce fait.

ACTUALITÉS ASTRONOMIQUES

(SUITE)

Autre phénomène intéressant de 2005 :

3 octobre : éclipse annulaire de Soleil (visible en France comme éclipse partielle). Cette éclipse sera vue comme annulaire en Espagne.

	TU	Longitude (°)	Latitude (°)
Début éclipse générale	7h 35m 34s	23.1 W	41.1 N
Début éclipse annulaire	8h 40m 58s	38.5 W	47.9 N
Début éclipse centrale	8h 43m 01s	38.9 W	48.2 N
Éclipse centrale à midi vrai	10h 10m 42s	24.6 E	18.2 N
Fin éclipse centrale	12h 20m 36s	82.8 E	9.6 S
Fin éclipse annulaire	12h 22m 35s	82.3 E	9.9 S
Fin éclipse générale	13h 27m 53s	66.5 E	16.7 S

[source : Éphémérides Astronomiques 2005; S.A.F.]



Trajet de la ligne de centralité (éclipse annulaire) de l'éclipse du 3 octobre 2005.

[source : IMCCE - P. Rocher]

ACTUALITÉS ASTRONOMIQUES

Éphémérides

Printemps : le 20 mars à 12h35 TU

27 mars à 3h00 : Passage à l'heure d'été

En mars, l'ensoleillement augmente en moyenne de 3min 27s par jour

8 avril : Éclipse annulaire-totale de Soleil (invisible en France)

24 avril : éclipse de Lune par la pénombre (invisible en Europe)

Sonde Cassini-Huygens

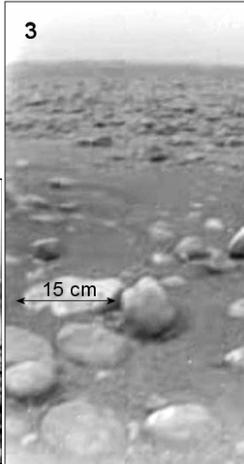
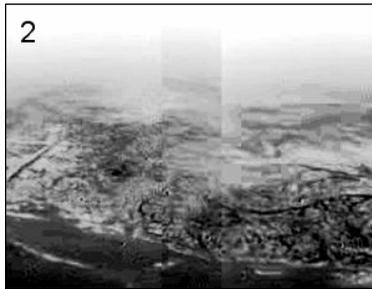
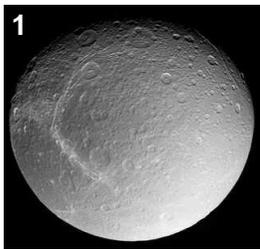
La mission Cassini-Huygens vers Saturne est une réussite fantastique.

Le 14 décembre 2004 la sonde a frôlé Dioné, un des satellites de la proche banlieue de la planète, dépourvu d'atmosphère. Diamètre : 1100 km (*Photo 1*).

Le 15 janvier 2005, la sonde Huygens commence sa descente et se pose sur Titan, la plus grosse lune de Saturne.

- *Photo radar de Titan prise à 8 km d'altitude (2).*

- *Photo du sol de Titan (3).*



Crédit photos: ESA/NASA/University of Arizona

Comètes

La comète C/2004 Q2 (Machholz) est la seule intéressante à observer (magnitude entre 4 et 7) en ce début d'année. Elle a franchi son périhélie le 24 janvier (m = 4.2). On peut la repérer aux jumelles, à la frontière de Céphée et de la Girafe, à une dizaine de degrés de l'étoile polaire, entre fin février et mi-mars (magnitude passant de 6,5 à 7). ☞

En enlevant successivement par découpage les parties de plus en plus anciennes d'un plancher océanique, on « remonte » le temps en faisant se rapprocher les continents jusqu'à ce qu'ils occupent leur position originelle. En reprenant l'ordre chronologique de la formation des « bandes » du plancher océanique on retrouve les étapes du déplacement des continents concernés.

Un volcanisme intense à l'origine du déplacement des continents

L'âge des planchers océaniques croissant à partir des zones médio océaniques, vers les continents, l'origine des planchers océaniques se situe nécessairement au niveau de ces zones.

Là se trouve, pour tous les océans, un relief que l'on nomme selon les cas dorsale où rift (*Fig. A5*). A cet endroit a lieu un volcanisme intense qui a pu être observé en direct grâce à des sous-marins : c'est une chambre magmatique profonde qui libère un magma fluide, lequel s'insère dans les failles du rift, se solidifie au contact de l'eau en formations spécifiques nommées pillow lavas (laves en traversins) (*Fig. A6*).

Ainsi du plancher basaltique est-il « secrété » à raison de quelques cm par an et repousse symétriquement les parties de plancher situées de part et d'autre du rift. L'Islande, partie exceptionnellement émergée du rift médio atlantique, permet une observation directe du phénomène : de fait, cette île s'agrandit par sa partie centrale où l'on peut voir des failles parallèles où s'est infiltré le magma (*Fig. 7A*).

Avec la connaissance des modalités de croissance des planchers océaniques, le terme de dérive des continents s'avère impropre : c'est par leur développement que les planchers océaniques repoussent symétriquement les continents dont ils sont solidaires. Il apparaît dès lors que la croûte terrestre est découpée en plaques qui « glissent » tout entières à la surface du globe (*Fig. A8*) ; certaines sont constituées de croûte continentale (c'est-à-dire d'un continent) associée à une portion de plancher océanique, d'autres sont exclusivement faites de croûte continentale ou de plancher océanique.

Le déplacement des continents a son origine dans la naissance d'un rift au sein d'un super continent qui se trouve ainsi « découpé » en deux « sous continents » selon un « pointillé » qui nous explique l'étonnante complémentarité de forme des continents en question ! L'Afrique de l'Est est en passe de se détacher du reste de l'Afrique sous l'action du rift Est africain, pour un moment encore terrestre ; la Mer Rouge correspond à un océan naissant séparant l'Arabie de l'Afrique ; la plaine d'Alsace peut s'interpréter comme un rift avorté.

Des courants de convection à l'origine du mouvement des plaques

L'intrusion du magma au sein des failles propres aux rifts ne saurait suffire pour repousser latéralement les deux parties d'un plancher océanique et avec elles les continents dont elles sont solidaires. L'hypothèse la plus réaliste est celle de l'existence, au sein du manteau terrestre sous-jacent, de courants de convection ; ces derniers créeraient des forces de distension qui sont la cause des failles au niveau des rifts, lesquelles offrent un passage au magma provenant des profondeurs. Ces mêmes courants entraîneraient les plaques, et donc leurs continents en même temps que croissent les planchers océaniques (*Fig. A9*).

Les subductions : un recyclage des planchers océaniques

Les planchers océaniques se développant suite au fonctionnement des rifts, le volume du globe terrestre devrait logiquement augmenter ce qui n'est pas le cas. Ce ne sont pas les continents qui disparaissent car ils sont « insubmersibles » du fait de leur faible densité par rapport aux constituants du manteau sous-jacent ; l'accroissement des planchers océaniques trouve nécessairement sa compensation dans leur retour au manteau, ce que confirment nombre d'observations.

Au voisinage des côtes de certains continents et précisément sous ces continents se multiplient des séismes dont les foyers sont de plus en plus profonds au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la côte : c'est le cas pour la côte ouest de l'Amérique du sud (*Fig. A10*). Or sous ce continent se trouve un milieu visqueux alors que précisément les foyers sismiques ne peuvent exister qu'en milieux solides, seuls susceptibles de brutales fractures : la position des foyers sismiques locaux matérialise non par hasard un plan incliné solide qui plonge sous le continent sud américain ; il ne peut s'agir que du plancher de l'océan pacifique qui s'enfonce sous le continent sud américain : ce phénomène constitue une subduction ; la disparition des foyers sismiques au-delà de 700 km de profondeur s'explique par la fusion du plancher sous l'action de la chaleur qui règne à ce niveau ; quant aux foyers sismiques ils s'expliquent par les contraintes subies par la plaque plongeante : courbure au contact du continent, résistance progressive à l'enfoncement de la plaque du fait de la poussée d'Archimède exercée par le manteau visqueux. La disparition du plancher océanique sous le continent est manifestement confirmée par les cartes géologiques du fond des océans où la symétrie des âges du plancher marque clairement un « manque » au contact d'un continent.

Les zones de subduction sont très généralement marquées par un volcanisme qui accompagne les séismes comme dans la chaîne des Andes, cette chaîne résultant d'ailleurs des contraintes exercées par la plaque plongeante sur le continent sud américain (*Fig. A11*) ; lorsqu'une subduction se localise au sein d'un océan, elle s'accompagne généralement de la formation d'îles volcaniques :

sol est prévue en parallèle, en particulier au moment de la formation du cratère.

3.3. La mission ROSETTA

La mission ROSETTA (*Fig. C5*) est l'une des pierres angulaires du programme « Horizon 2000 » de l'agence spatiale européenne (ESA). Cette mission extrêmement ambitieuse vise à mettre en orbite autour du noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko une sonde bardée d'instruments scientifiques. Après une phase de cartographie du noyau, la sonde larguera un module (Philae) qui se posera à sa surface et procèdera à une analyse détaillée de la matière cométaire. Peu après, et pendant une période de plus d'un an la sonde, restée en orbite, étudiera sous toutes les coutures le noyau de la comète. Elle suivra l'augmentation de l'activité de la comète au fur et à mesure que celle-ci s'approchera du Soleil.

Le lancement de ROSETTA est prévu le 26 février 2004 (*). Si tout se passe bien, la sonde atteindra le noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko en octobre 2014 après avoir survolé trois fois la Terre et une fois la planète Mars. Un ou deux survol(s) d'astéroïde(s) par la sonde sont également prévus en chemin. ☞☞

(*) Le lancement de Rosetta a eu lieu le 2 mars 2004 à 7h17 (GMT) à bord du vol 158 du lanceur européen Ariane-5. A cette date, la comète, localisée dans la constellation de la Balance, se trouvait à environ 600 millions de km de la Terre. En mars 2005, la sonde effectuera son premier survol de la Terre afin d'obtenir une orbite plus allongée qui la conduira vers Mars. (Note de l'éditeur)

assez mystérieuse. La densité des noyaux cométaires (et par là-même leur masse) est également mal connue, ainsi que leur structure interne.

En effet, les comètes sont des corps difficiles à observer. Près du Soleil, leur noyau est bien souvent noyé dans une coma brillante qui empêche de le distinguer. Ils sont par ailleurs trop petits pour être résolus par les télescopes les plus puissants, même ceux situés en orbite autour de la Terre. Loin du Soleil, le noyau devient très faible et sa détection implique l'utilisation de très grands télescopes. Toutefois, même si elles sont difficiles, les observations des comètes depuis le sol ou depuis des télescopes en orbite dans l'espace ont et continueront à fournir de nombreuses informations sur ces corps encore mystérieux, en particulier à l'occasion du passage de comètes exceptionnelles, telles que récemment les comètes Hale-Bopp et Hyakutake.

Plusieurs missions spatiales européennes et nord-américaines à destination de noyaux cométaires sont en cours ou sont prévues dans les années à venir. Ces missions nous fourniront une moisson d'informations inestimables qui permettront probablement de résoudre plusieurs grandes énigmes de la science cométaire, et par-là même de comprendre comment ces corps (et donc le système solaire) se sont formés.

3.1. La mission STARDUST

L'objectif de la mission STARDUST de la NASA est la collecte de grains cométaires et un retour des échantillons en vue d'une analyse ultérieure dans des laboratoires sur Terre. La collecte se fait au moyen d'un matériau étonnant baptisé *aérogel*, à la fois très léger et capable d'absorber l'énergie cinétique des grains de poussières collectés en les préservant au maximum.

La mission STARDUST a été lancée en février 1999. Elle a récemment (janvier 2004) survolé le noyau de la comète Wild 2. Lors de ce survol, elle a collecté avec succès environ un millier de grains de poussières et elle a pu prendre une image impressionnante du noyau de cette comète. Le noyau apparaît assez rond et parsemé de cratères. Une analyse plus fouillée de cette image est actuellement en cours. Le retour d'échantillon sur Terre est prévu en janvier 2006.

3.2. La mission DEEP IMPACT

C'est la deuxième mission cométaire de la NASA. Cette mission a pour but de créer un cratère d'impact artificiel à la surface du noyau de la comète Tempel 1 à l'aide d'un projectile embarqué à bord de la sonde. La sonde observera alors les débris de comète créés au moment de l'impact. L'avantage de créer un cratère est de pouvoir étudier la matière située à l'intérieur du noyau, et pas seulement sa surface.

Le lancement de cette mission est prévu en décembre 2004 pour un rendez-vous avec la comète en juillet 2005. Une grande campagne d'observation depuis le

le Japon et les Antilles en sont des illustrations (*Fig. A12*).

Des collisions entre continents à l'origine de chaînes de montagnes

Un plancher océanique qui disparaît progressivement par subduction entraîne nécessairement avec lui le continent dont il est solidaire ; progressivement, ainsi, ce dernier parvient au contact du continent sous lequel il y avait subduction : il y a alors disparition de l'océan qui séparait les deux continents avec pour conséquence une collision accompagnée de la formation d'une chaîne de montagne qui concrétise la suture entre les deux continents qui se sont rencontrés (*Fig. A13*).

Se produisent alors des plissements, des charriages des sédiments portés par ces continents ; des massifs granitiques profonds sont alors « expulsés » vers la surface et traversent les sédiments superficiels : tels sont les faits qui expliquent la structure souvent complexe des chaînes de montagnes dites de collision.

Des séismes, preuves de la poursuite des poussées à l'origine de la collision se manifestent de temps à autre, au sein de ces chaînes ; l'exemple le plus connu des chaînes de collision est celui de la chaîne himalayenne, fruit de la collision entre les continents indien et eurasiatique (*Fig. A14*). Plus proche de nous est la chaîne alpine laquelle s'explique par la collision entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique qui a fait suite à la disparition d'un océan alpin (*Fig. A15*) ; des vestiges du plancher de cet océan se retrouvent à plusieurs milliers de mètres d'altitude, dans le massif du Chenaillet, sous forme de pillow lavas (*Fig. A16*).

Quelle énergie anime la tectonique des plaques ?

Ouverture d'océans, déplacement des plaques avec leur continent, création de chaînes de montagnes, séismes, éruptions volcaniques sont autant de phénomènes qui mettent en jeu des quantités d'énergie colossales. Cette énergie pourrait être la chaleur résiduelle liée à l'infinité de collisions des poussières de la nébuleuse solaire primitive, à l'origine de la Terre. Il est cependant improbable qu'une réserve de chaleur soit demeurée suffisante pour animer la tectonique globale depuis plusieurs milliards d'années.

Plus vraisemblable est l'hypothèse de la présence, dans la partie centrale du globe d'une importante quantité d'éléments radioactifs dont la désintégration spontanée fournirait la chaleur nécessaire aux mouvements de convection qui constituent le moteur de la tectonique des plaques. Cette énergie, est certes suffisante pour expliquer l'activité de la Terre depuis plus de quatre milliards d'années ; nul ne sait, par contre, pour combien de temps encore, la tectonique des plaques, également nommée tectonique globale (c'est-à-dire concernant tout le globe) sera d'actualité. ☞☞

[Crédits figures A4, A5, A9, A11, A12, A13, A17 : Bernard Gaudin]

ASTRONOMIE PROVENÇALE AUX XVII^e ET XVIII^e SIÈCLES

Jean-Marie HOMET

Capitaine au long cours et historien

Dès l'Antiquité Marseille devient un pôle astronomique important, en particulier au IV^e siècle avant notre ère avec Pythéas. Ce dernier ouvre la voie à ce qui sera désormais l'une des caractéristiques de l'astronomie provençale : l'observation sur place et les expéditions lointaines. C'est ainsi qu'il calcule la latitude de la cité phocéenne, la valeur de l'obliquité de l'écliptique et que par ailleurs au cours de son grand voyage dans le nord, il étudie le problème des marées et le soleil de minuit.

Au Moyen-Âge ce sont des Marseillais, souvent d'origine étrangère, comme Guillaume l'Anglais ou Jacob ben Makir, en contact avec la science arabe par l'intermédiaire des croisades, qui introduisent les astrolabes (**Fig. B1**) qui tentent de dresser les premières tables donnant les coordonnées célestes des planètes.

À la Renaissance le nom de Michel de Notredame (Nostradamus) est connu des élites de France et d'Italie. Certes il n'est pas à proprement parler un astronome mais l'exercice de l'astrologie entraîne nécessairement un approfondissement de la connaissance du ciel, des planètes, des comètes, des astres fixes. Jusqu'à Galilée et même jusqu'à la deuxième partie du XVII^e siècle, astronomie et astrologie sont encore intimement liées. C'est au temps de Louis XIV, le roi-soleil, que l'astronomie devient une véritable science, et même la première des sciences, avant même la médecine ou l'agronomie par le nombre de ses savants et de ses académiciens.

Elle se débarrasse alors de toutes superstitions et de tout a priori théologique. On l'appelle même alors « l'astronomie mercantile », car elle se met au service des négociants, des marins, des armateurs. Elle a pour premier souci la navigation, la cartographie du monde, la connaissance de la terre. La plupart des observations ont donc pour objectifs le calcul de l'heure, celui des latitudes et des longitudes (**Fig. B2 et B3**). Pour l'heure la gnomonique fait des progrès considérables avec la détermination précise de l'équation du temps. La journée n'est plus de 24 heures, sauf pour les horloges mécaniques.

Le soleil et les pendules se corrigent mutuellement, le temps sidéral fait son apparition (**Fig. B4**). Pour la latitude, le problème est simple, résolu par les hauteurs méridiennes depuis des siècles. Mais pour connaître la latitude le plus souvent possible, en dehors du simple midi, on cherche à connaître le plus grand nombre possible de déclinaisons d'astres.

années 80, sur certaines images digitales (CCD) d'atmosphères cométaires. L'interprétation donnée à ces structures se base sur la rotation du noyau responsable de l'émission des poussières observées. Lorsqu'un bon suivi temporel est possible, comme cela a été le cas au Pic du Midi pour les comètes Swift-Tuttle (**Fig. C3**) et Hale-Bopp, il devient possible de mesurer la période de rotation du noyau.

2.3. Le noyau

Passons maintenant au noyau, qui est la partie la plus interne et la plus petite de la comète. Certains ont longtemps cru que le noyau n'avait pas de réalité solide. On sait depuis les travaux de l'Américain F. Whipple en 1950 et surtout depuis le survol du noyau de la comète de Halley par la sonde européenne GIOTTO en 1986 (**Fig. C4**) que le noyau est en fait un corps solide constitué de glaces mélangées à de la poussière. Lorsque le noyau s'approche du Soleil, les glaces qu'il contient se subliment, entraînant des grains de poussière avec elles. Ce gaz s'échappe alors du noyau du fait de sa faible gravité pour former la coma (voir section 2.2) avant de se perdre dans le milieu interplanétaire. Les poussières rejoignent la coma (voir section 2.2), puis la queue de la comète (voir section 2.1) et finissent par se perdre également dans l'espace interplanétaire.

De forme irrégulière, ces corps tournent sur eux-mêmes avec une période d'une dizaine d'heures à quelques jours (voir section 2.2). Les trois missions spatiales combinées à des observations avec les instruments terrestres et spatiaux les plus puissants nous ont permis de nous faire une idée assez précise de ce qu'est un noyau de comète. Ces corps ont des diamètres compris entre moins de 1 km pour certaines comètes périodiques et plusieurs dizaines de kilomètres pour les noyaux les plus massifs (70 km pour la comète Hale-Bopp). Les noyaux seraient assez fragiles et pourraient se briser facilement sous l'effet des *forces de marée* des planètes, comme cela a été le cas pour le noyau de la comète Shoemaker-Levy 9 qui s'est brisé au voisinage de Jupiter. Leur densité est très probablement inférieure à celle de la glace d'eau.

Les glaces qui composent les noyaux sont : l'eau, le monoxyde et le dioxyde de carbone, le méthane, le méthanol ainsi que de nombreuses autres molécules. Les poussières seraient à base de silicates, mais une population de petits grains carbonés a pu être mise en évidence par l'un des instruments à bord de la sonde GIOTTO.

3. Les perspectives de l'étude des comètes

De nombreuses questions restent cependant sans réponse. Les mécanismes exacts de l'activité cométaire restent mal connus. On ne sait pas exactement si la sublimation se produit seulement en surface ou également dans les profondeurs du noyau. La nature exacte des grains cométaires (densité, porosité, structure) reste

2.1. La queue de poussières

Plusieurs structures parfois spectaculaires sont visibles sur les images à grand champ de comètes. La queue de plasma a généralement une structure complexe bleutée quasi-rectiligne dirigée à l'opposé du Soleil. Les queues de poussières sont par contre incurvées et de couleur jaune-orangé. Elles s'étendent parfois sur des millions de kilomètres.

L'étude des queues de poussières a permis de mettre en évidence certaines propriétés des grains cométaires. La comparaison d'images digitales CCD de queues de poussières avec des images synthétiques basées sur des modèles physiques d'émission des grains par le noyau a permis de comprendre que les grains émis ont des tailles comprises entre quelques dixièmes de microns et plusieurs centimètres. Les particules les plus grosses correspondent aux *météores* qui s'enflamment dans l'atmosphère terrestre lorsque la Terre croise l'orbite d'une comète. Ces particules sont également en partie à l'origine de la *lumière zodiacale*. L'étude des queues de poussière permet également de mesurer la quantité de poussières produite par le noyau. Celle-ci est généralement comprise entre quelques dizaines de kilogrammes par seconde et plusieurs dizaines de tonnes par seconde pour les comètes les plus spectaculaires (comme par exemple la comète Hale-Bopp).

2.2. L'atmosphère (coma)

Plutôt que d'atmosphère, on devrait plutôt parler d'une *exosphère*, car la gravité du noyau (voir section 2.3) est insuffisante pour retenir les molécules et la plupart des grains de poussières émis. Quoi qu'il en soit, l'atmosphère est une boule de gaz et de poussières de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres au sein de laquelle la densité décroît rapidement lorsqu'on s'éloigne du noyau. Elle contient tous les constituants chimiques présents dans le noyau (voir section 2.3), plus des produits de la dissociation des molécules de gaz par le rayonnement ultra-violet du Soleil (on parle alors de *photo-dissociation*).

L'atmosphère (ou coma) contient deux composantes principales : une composante de gaz, principalement de la vapeur d'eau et les produits de sa photo-dissociation, et une composante contenant les grains de poussière agglomérés lors de la formation des planétoïdes. L'étude de ces deux composantes a permis des avancées spectaculaires de notre connaissance de ces objets au cours des vingt dernières années. L'étude de la coma de gaz a permis de caractériser précisément la composition chimique des comètes (voir section 2.3) à partir de mesures spectroscopiques principalement dans les domaines de longueurs d'onde radio et infra-rouge.

Les *jets de poussière* correspondent à des concentrations de matières souvent en forme de spirales que l'on observe aisément sur certains dessins et, depuis les

Pour la longitude en attendant les fameux « garde temps » ou chronomètres à échappement plusieurs solutions sont apparues. Avec Peiresc et Gassendi, on utilise les éclipses de lune, malheureusement elles sont rares et la méthode est peu précise.

Avec la découverte des satellites de Jupiter, Galilée apporte un instrument merveilleux pour le calcul des longitudes. Les émergences et les immersions de Io, Europe, Callisto, Ganymède se révèlent les meilleurs outils pour déterminer l'écart de temps entre deux lieux. La Provence se spécialise dans ces observations. Quatre observatoires sont édifiés à Marseille. Les Jésuites de tout le royaume viennent s'y former à ces techniques avant de partir en Chine ou en Amérique d'où ils enverront les résultats de leurs observations. C'est à partir de cela que les grands géographes parisiens : les Buache, les Sanson, les Duval, les Delisle, les Jaillot, confectionnent leurs fameux Atlas, que Louis XIV aime tant (**Fig. B6**).

Notre planète change de visage, désormais on connaît l'exacte forme des continents et des océans, la vraie « figure de la terre ». Marseille joue un rôle considérable dans cette nouvelle définition du monde. Alors tout naturellement c'est Marseille qui devient la référence pour le « zéro des cartes » et c'est du port phocéén que part en 1721 la grande expédition du père Feuillée (**Fig. B5**) qui doit amener le premier méridien de l'Île de Fer jusqu'à Paris.

Certes les autres observations ne sont pas négligées pour autant. En raison de la qualité de son ciel, du nombre et de l'excellence de ses astronomes, la Provence est un haut lieu de l'observation des taches du soleil, des anneaux de saturne, de la géographie de la lune, des éclipses.

Au début du XIXe siècle, Marseille devient le premier site de détection des nouvelles comètes. Petit à petit la ville devient capitale mondiale de ces petits astres qui avaient posé tant de problèmes, tant d'interrogations, au moins jusqu'à Halley qui était venu en Avignon (**Fig. B7**), ne l'oublions pas, pour chercher des éléments sur la trajectoire de la fameuse comète qui devait porter son nom.

Après deux siècles d'une extraordinaire fécondité puisque la Provence a donné à elle seule plus du quart de toutes les publications astronomiques en France, la région conserve un rôle leader en astronomie. C'est ainsi que c'est Marseille qui assure la couverture horaire de l'expédition de Bonaparte en Égypte. La Provence ne connaîtra jamais de véritable déclin ; après Le Verrier et Foucault, elle va prendre le grand tournant de l'astrophysique et de la recherche spatiale. C'est ainsi qu'aujourd'hui Saint-Michel l'Observatoire est un pôle important pour la recherche des planètes hors du système solaire et que le Laboratoire d'Astronomie Spatiale de Marseille construit ou teste plusieurs instruments destinés à l'espace. ☞☞

LES COMÈTES

Laurent Jorda

Astronome-adjoint – Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (CNRS)

1. L'origine des comètes

1.1. La formation du système solaire

Le système solaire s'est formé il y a 4,7 milliards d'années à partir de la condensation d'un *nuage interstellaire*. Plusieurs étapes sont nécessaires pour « construire » les corps actuellement présents dans le système solaire à partir des particules de gaz et de poussières qui constituent les nuages interstellaires. Le scénario de formation du système solaire est encore controversé, mais les astrophysiciens pensent que ces étapes pourraient être grosso-modo les suivantes :

- ?? Le nuage s'effondre sur lui-même sous l'effet de son propre poids suite à une *instabilité gravitationnelle* provoquée par un excès local de densité dans le nuage.
- ?? Lors de l'effondrement, une composante centrale massive, le *proto-Soleil*, se forme. Cette composante est entourée d'un disque de gaz et de poussières tournant sur lui-même : le *disque proto-planétaire*. L'effondrement du proto-Soleil sur lui-même provoque une hausse de sa température centrale qui, passé un certain seuil, est suffisante pour déclencher les réactions thermonucléaires qui vont le transformer en une étoile.
- ?? Dans le disque, les grains sédimentent peu à peu. Leur taille augmente graduellement lors de collisions à faible vitesse pour former progressivement par accréation des *planétésimaux*, corps de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres.
- ?? Les interactions gravitationnelles entre ces planétésimaux provoquent la formation des planètes telluriques et du cœur des planètes géantes. Ces derniers vont ensuite accréter le gaz résiduel du disque présent au-delà de l'orbite de Mars.

Plusieurs points de ce scénario demeurent mystérieux : les mécanismes physiques précis qui agissent au cours de ces différentes étapes, le rôle de la turbulence dans le disque, de possibles migrations des proto-planètes dans le disque, etc., font l'objet actuellement de débats animés au sein de la communauté scientifique.

[Suite page 21]

1.2. Rôle et destin des comètes dans ce processus

Beaucoup de scientifiques pensent que les comètes sont les résidus du processus de formation des planètes, c'est-à-dire qu'elles sont des agrégats de planétésimaux qu'on appelle parfois *planétoïdes*. En effet, si la majorité des planétésimaux et des planétoïdes ont été intégrés dans les planètes, certains auraient été éjectés du système solaire lors de rencontres avec les noyaux planétaires en formation. Une toute petite partie des corps éjectés seraient malgré tout resté piégée aux confins du système solaire pour former ce qu'on appelle désormais le *nuage de Oort* (**Fig. 1**), un nuage de comètes situé à plus de 10 000 unités astronomiques (une unité astronomique représente 150 millions de km). Sous l'effet des perturbations gravitationnelles d'étoiles proches et des forces de marée galactiques, les comètes de ce nuage peuvent quitter leur orbite, s'approcher du Soleil et devenir observables. C'est d'ailleurs en étudiant l'orbite de ces comètes « nouvelles » que l'existence du nuage de Oort a pu être démontrée indirectement.

Au-delà de l'orbite de Neptune, la densité de planétoïdes aurait été insuffisante pour permettre leur intégration au sein d'une planète et leur éjection ultérieure par celle-ci vers le nuage de Oort. Les planétoïdes au-delà de Neptune seraient donc restés piégés dans un disque peu dense appelé la *ceinture de Edgeworth-Kuiper* (**Fig. C1**), du nom des deux astronomes qui en ont postulé l'existence à la fin des années 40. Le premier objet de ce disque a été découvert en 1993 par D. Jewitt depuis l'observatoire d'Hawaii et plusieurs centaines d'objets de ce disque ont été répertoriés à ce jour (février 2004). Les plus gros commencent même à être étudiés en détail par les grands télescopes. Aucun objet du nuage de Oort n'a par contre pu être observé car les corps glacés qui s'y trouvent ne sont pas assez brillants pour être observés par les télescopes actuels.

L'intérêt des comètes réside donc dans leur origine. Formées au tout début de l'histoire du système solaire, ces corps constituent les restes des planétoïdes ayant servi à fabriquer les planètes. Elles sont restées pendant plusieurs milliards d'années aux confins du système solaire et ont très peu évolué.

2. Qu'est-ce qu'une comète ?

Ces corps sont restés très longtemps mystérieux et ont été souvent associés à des catastrophes jusque dans un passé pas si lointain. Ce n'est que dans la deuxième moitié du vingtième siècle que l'étude scientifique de ces objets a permis aux astronomes de mieux comprendre leur nature et de mieux appréhender les phénomènes physiques qui se déroulent en leur sein.

Dans ce paragraphe, nous commencerons par décrire les structures les plus grandes et les plus spectaculaires associées aux comètes pour nous rapprocher progressivement du cœur de ces objets : leur noyau (voir **Fig. C2**).

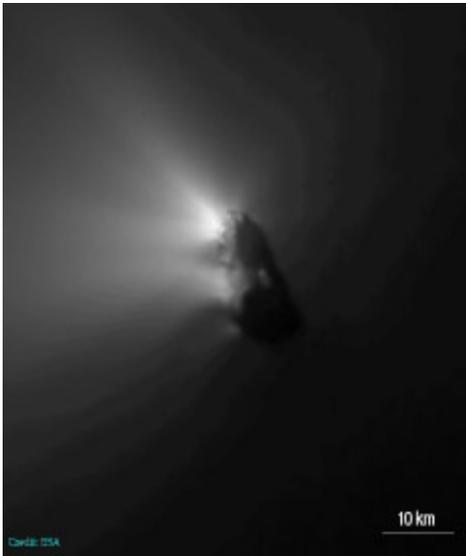


Fig. C4 Image du noyau de la comète de Halley prise par la caméra embarquée à bord de la sonde européenne GIOTTO en 1986. Cette image a été la première image d'un noyau cométaire obtenue une quinzaine de kilomètre de long. Crédit: H.-U. Keller (MPAE) et agence spatiale européenne (ESA).

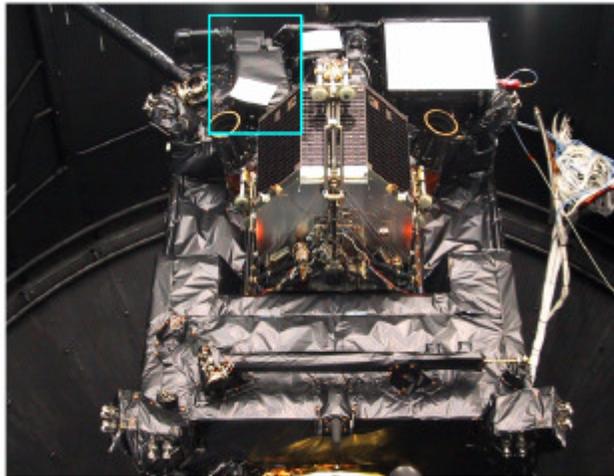


Fig. C5 Vue de la sonde européenne ROSETTA pendant des tests dans le centre de l'agence spatiale européenne à Noordwijk (Hollande). Si tout se passe bien, elle procèdera à des observations détaillées du noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko à partir d'octobre 2014 et pendant plus d'un an. On distingue nettement au premier plan le module Philae qui se posera à la surface du noyau de la comète. Le cadre bleu montre la position de la caméra à haute résolution dont une grande partie a été réalisée au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. Crédit : agence spatiale européenne (ESA).

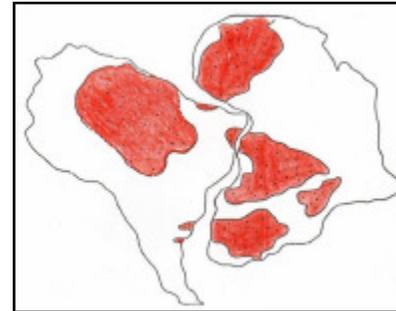


Fig. A1 La complémentarité de forme des continents tels que l'Afrique et l'Amérique du Sud est l'une des plus évidentes. Des massifs granitiques vieux de plusieurs millions d'années se correspondent d'un continent à l'autre.

Fig. A2 Le mesosaurus est un gros lézard qui n'existe qu'en Amérique du Sud et en Afrique et seulement dans des zones qui n'en forment qu'une lorsque l'on " emboîte " l'Amérique du Sud dans l'Afrique. Ces deux continents n'en formaient qu'un à l'origine.

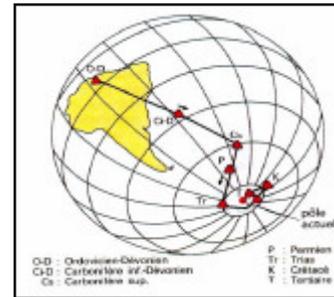
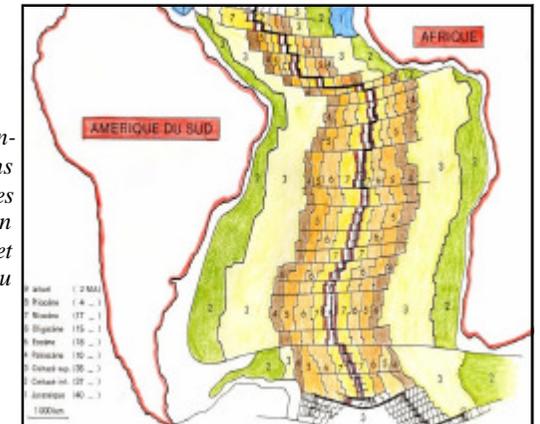


Fig. A3 Les roches qui jouent le rôle de boussoles fossiles pour l'Amérique du Sud donnent des positions différentes du pôle Sud selon les périodes géologiques. La position des pôles n'ayant pas sensiblement changé au cours des temps géologiques il faut en conclure que c'est l'Amérique du Sud qui s'est déplacée.

Fig. A4 Le plancher de l'océan atlantique, comme celui de tous les océans est constitué de bandes parallèles d'âge croissant depuis le rift médian jusqu'aux continents situés de part et d'autre : ici, Afrique et Amérique du Sud.



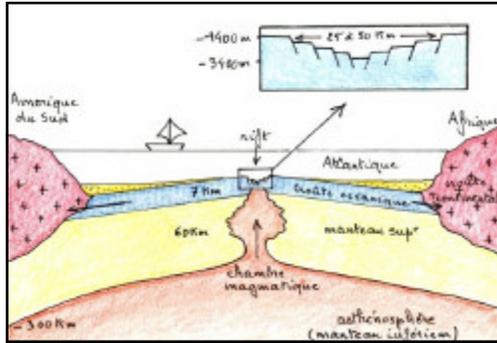


Fig. A5 L'alimentation du rift en magma, par la chambre magmatique permet l'accroissement du plancher océanique de part et d'autre du rift, ce qui va de paire avec le déplacement des continents qui lui sont associés.



Fig. A6 En se refroidissant au contact de l'eau, le magma basaltique se solidifie en formations caractéristiques des rifts : les pillow lavas (laves en traversins).



Fig. A7 Au niveau du rift médio atlantique qui traverse l'Islande en son milieu, on peut voir des failles parallèles dues à des forces de distension matérialisées par les flèches. Ces failles sont remplies de basalte qui a pour origine la chambre magmatique sous jacente.

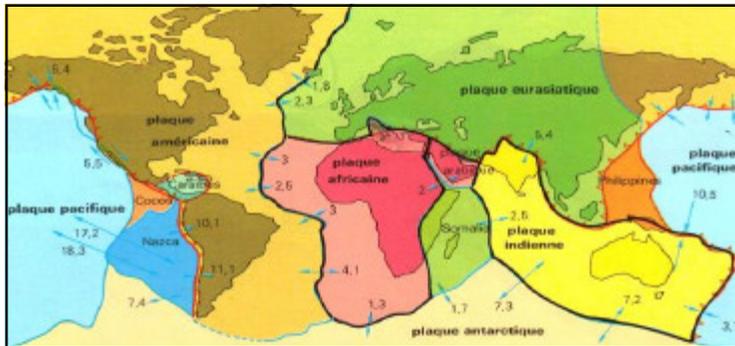


Fig. A8 La croûte terrestre est découpée en plaques limitées par des zones géologiquement actives (volcanisme, séismes).

Fig. C1 Vue d'artiste de ce que pourrait être le nuage de Oort et la ceinture de Edgeworth-Kuiper. Le nuage de Oort contiendrait quelques 1012 comètes et s'étendrait probablement jusqu'à plus de 40 000 unités astronomiques du Soleil, il deviendrait pratiquement sphérique. La ceinture de Edgeworth-Kuiper a la forme d'un disque aplati. Sa limite interne se situe au-delà de l'orbite de Neptune tandis que sa limite externe est encore mal connue. Pluton est très probablement un membre de cette ceinture. Crédit : D. Yeomans (NASA, JPL).

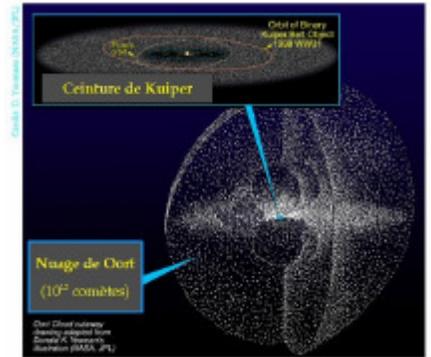


Fig. C2 Image de la comète Hyakutake prise par l'astronome amateur J. Lodriguss. Cette image étonnante montre la plupart des structures observables dans une comète. Autour de la condensation centrale (noyau), on observe l'atmosphère de la comète (coma), de couleur jaune près du noyau (poussières) et verte plus loin (radical C₂). Les deux queues (de poussières et ionique) apparaissent respectivement en jaune-orangé et en bleu (ion CO⁺) dans la direction opposée au Soleil. Crédit : J. Lodriguss



Fig. C3 Cette série d'images de la comète périodique Swift-Tuttle a été obtenue au télescope de 1m à l'observatoire du Pic du Midi fin novembre 1992. Les images ont été classées de telle sorte que cette séquence montre le jet de poussières pendant une période de rotation complète (soit 2,8 jours) du noyau de cette comète. Ces images ont été obtenues avec une caméra électronique (CCD). La comète Swift-Tuttle est à l'origine de l'essaim des Perséides observé tous les ans au mois d'août. Crédit : F. Colas, J. Lecacheux et L. Jorda (S2P, CNRS).

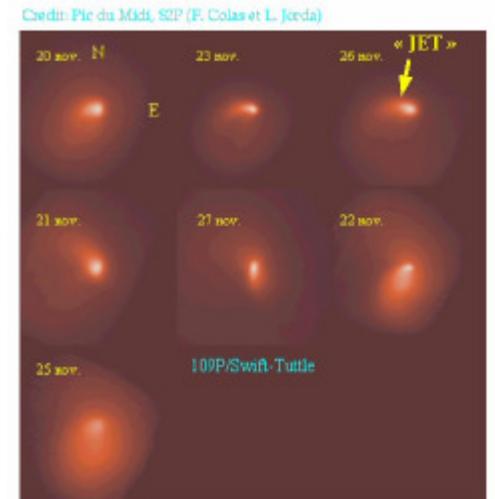




Fig. B1 Astrolabe. Musée de Grenoble



Fig. B3: Le port de Marseille

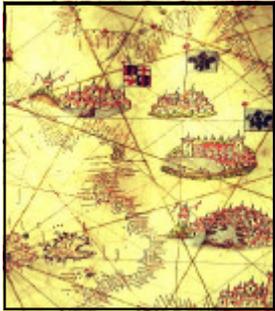


Fig. B2 Portulan du XIIIe siècle. Bibliothèque Municipale de Marseille (Fonds Anciens)



Fig. B4 La mesure du ciel devient indispensable à celle de la terre. Anonyme, début du XVIIIe s.



Fig. B5 Manuscrit du père Feuillée datant de 1699. Bibliothèque Municipale de Marseille



Fig. B6 Carte établie par Michelot et Brémond (1709) : baie de Cassis. Chambre de Commerce et d'Industrie de Marseille.



Fig. B7 Calade d'un hôtel particulier d'Avignon, après le passage de Halley.

Fig. A9 Comme l'eau d'une casserole que l'on chauffe, la masse visqueuse du manteau inférieur serait le siège de courants de convection en rapport avec la présence d'une source de chaleur située au centre du globe. Ainsi s'expliqueraient les failles des rifts, la montée du magma basaltique et le mouvement divergeant des plaques.

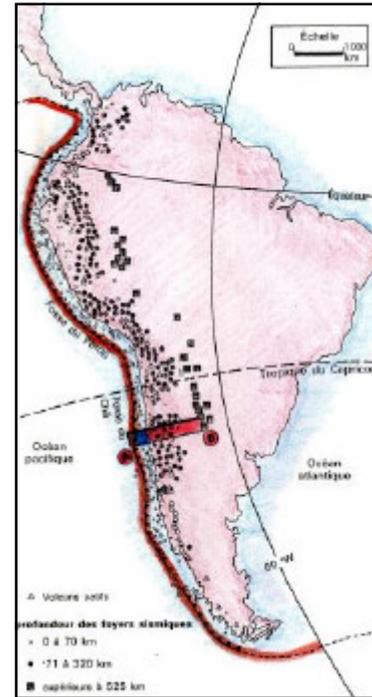
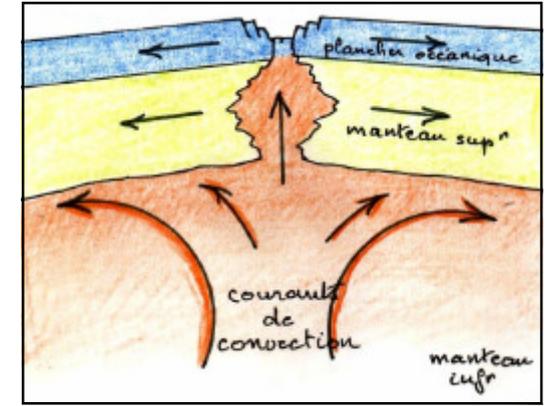
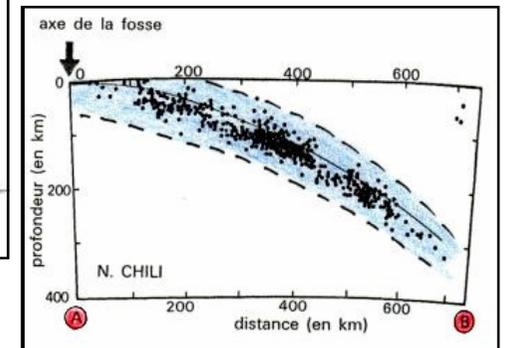


Fig. A10 Une multitude de foyers sismiques se localisent au voisinage de la côte ouest de l'Amérique du Sud. Ils sont de plus en plus profonds en allant de la fosse du Pérou vers l'Est. La position de ces foyers concrétise l'existence du plancher de l'océan pacifique qui plonge sous le continent.



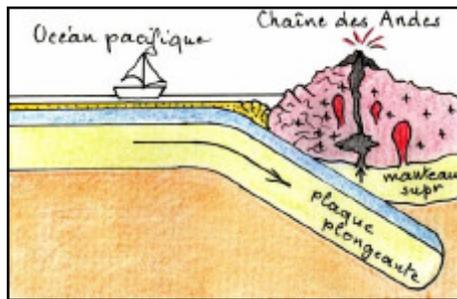


Fig. A11 A l'aplomb de la plaque plongeante s'érige une chaîne de montagnes dite chaîne de subduction, cependant que la fusion du manteau donne naissance à un volcanisme intense.

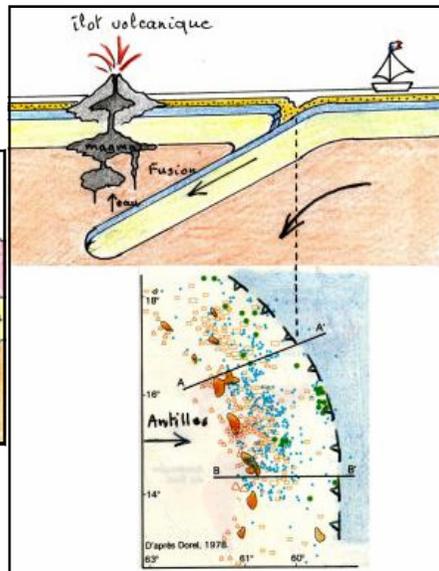


Fig. A12 Due à la chaleur, en présence d'eau échappée de la plaque plongeante, la fusion du manteau est à l'origine d'un magma qui se solidifie en un arc insulaire.

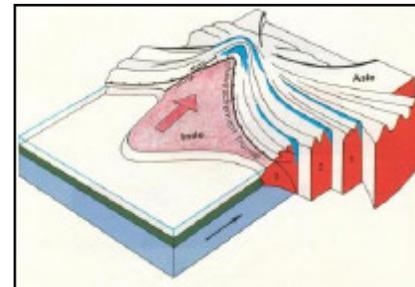


Fig. A14 La chaîne himalayenne résulte de la collision de l'Inde avec le continent eurasiatique. La poussée de l'Inde se poursuit actuellement comme en témoignent de nombreux séismes.

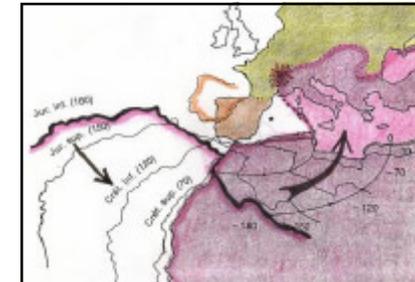


Fig. A15 Il y a de cela 40 millions d'années, soumise à un mouvement de rotation, la plaque africaine entrait en collision avec la plaque eurasiatique, provoquant ainsi la naissance de la chaîne des Alpes.

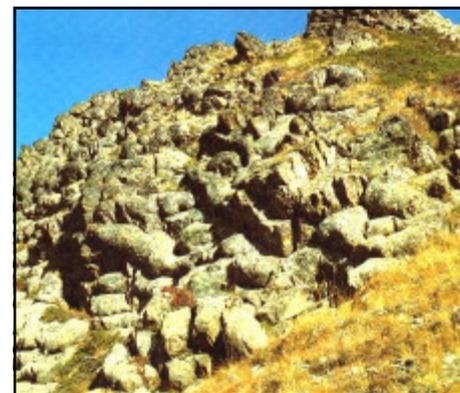


Fig. A16 Des pillow lavas situés au sommet d'un massif alpin constituent exceptionnellement les vestiges d'un océan disparu au moment de la collision : l'océan alpin.

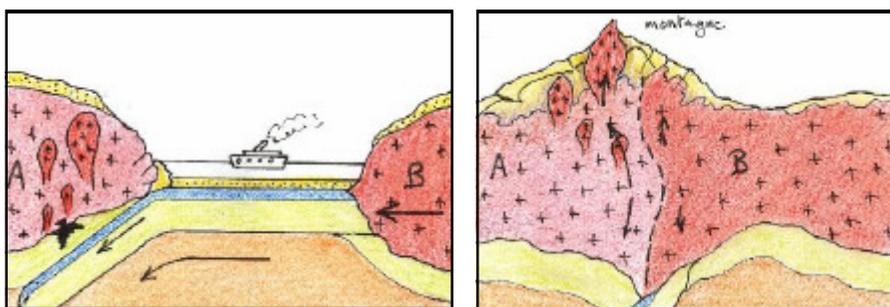


Fig. A13 Le plancher océanique en subduction entraîne avec lui un continent B qui va entrer en collision avec celui sous lequel se fait la subduction (A). La collision entre les continents A et B se solde par la formation d'une chaîne de montagnes.

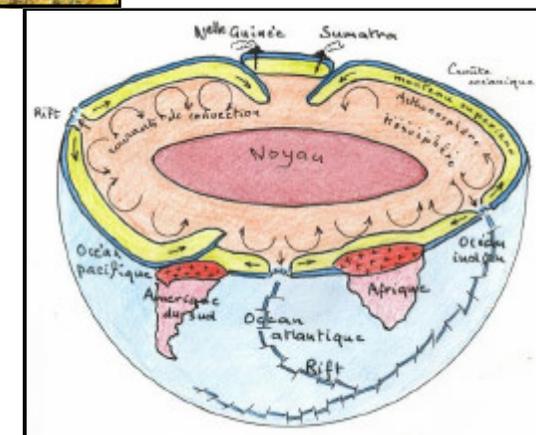


Fig. A17 Ce schéma regroupe de façon synthétique les principaux éléments qui illustrent la tectonique des plaques.