

BULLETIN N° 177
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



lundi 2 septembre à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence:

Eau et Sel: Premières molécules de la Vie

par J. Zaccai (Directeur de Recherche, CNRS)

CEA/CNRS/Université Joseph Fourier/UMR5075 Institut de biologie structurale (IBS)
et Institut Laue-Langevin (ILL) Grenoble

Prochaine séance :

lundi 7 octobre à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence :

Du système solaire aux systèmes planétaires

par Thérèse Encrenaz

Directrice de Recherche Émérite au CNRS

LESIA, Observatoire de Paris

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE PRESIDENT : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE
SECRETAIRE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Claude ELBAZ

MEMBRE S CONSULTATIFS DU CA :

Gilbert BELAUBRE
 François BEGON
 Bruno BLONDEL
 Patrice CROSSA-REYNAUD
 Michel GONDRAN

SECTION DE NICE :

PRESIDENT : Doyen René DARS

PRESIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LEVY (†)
PRESIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE
SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :

SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr Brigitte DEBUIRE

CONSEILLERS SPECIAUX:

EDITION: Pr Robert FRANCK
AFFAIRES EUROPEENNES : Pr Jean SCHMETS

SECTION DE NANCY :

PRESIDENT : Pr Pierre NABET

septembre 2013

N°177

TABLE DES MATIERES

p.03 Compte-rendu de la séance du lundi 2 septembre 2013
 p.10 Compte-rendu de la section Nice Côte d'Azur du 18 juillet 2013
 p. 13 Annonces
 P. 17 Documents

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du

Lundi 2 septembre 2013

Maison de l'AX 17h

La séance est ouverte à 17h sous la Présidence de Victor MASTRANGELO et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Jean SCHMETS, Alain STAHL, Jean VERDETTI..

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Alain CARDON, Daniel COURGEAU, Jean -Pierre FRANCOISE, Robert FRANCK, Walter GONZALEZ, Saadi LAHLOU, Gérard LEVY, Jacques LEVY, Pierre PESQUIES, Valérie LEFEVRE-SEGUIN ..

I. Préparation du colloque "Formation des systèmes stellaires et planétaires Conditions d'apparition de la vie".

A) Point sur la réunion du 15 /07/2013 relative au colloque

La réunion s'est déroulée en présence de Gilbert BELAUBRE Président d'honneur AEIS, Maryvonne GERIN Directrice de recherche au CNRS (ENS-Paris), Irène HERPE-LITWIN Secrétaire générale AEIS, Victor MASTRANGELO Président AEIS, Marie-Christine MAUREL Professeure Université PMC-Paris.. Marc OLLIVIER Astronome IAS-Orsay, retenu par une réunion a conversé avec nous par téléphone.

Le titre suivant a été retenu:

FORMATION DES SYSTÈMES STELLAIRES et PLANÉTAIRES
CONDITIONS D'APPARITION de la VIE

liste des membres du Comité scientifique (par ordre alphabétique):

Pierre ALBAREDE (ENS-Lyon), Gilbert BELAUBRE (AEIS) André BRACK (CNRS-Orléans), Sylvie DERENNE (CNRS/ENS Paris), Thérèse ENCRENAZ (IAP), Maryvonne GERIN (CNRS/ENS Paris), Louis LE SERGEANT d'HENDECOURT (IAS-Orsay), Marie-Christine MAUREL (Université PMC-Paris), Marc OLLIVIER (IAS-Orsay), François RAULIN (Université Paris-Est Créteil), François ROBERT (MNHN), Alain STAHL

Liste des membres du comité d'organisation

Gilbert BELAUBRE, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Alain CORDIER, Claude ELBAZ, Jean-Pierre FRANÇOISE, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Victor MASTRANGELO, Jean SCHMETS, Jean VERDETTI

Une esquisse de programme du colloque a été établie (voir tableau ci-dessous):

Session 1. Formation des systèmes stellaires et planétaires

Mercredi 5 février /matin

Allocution d'ouverture

Modératrice: GERIN Maryvonne (ENS-Paris)

1. PRANTZOS Nicolas (Meudon)
2. HENNEBELLE Patrick (Paris)
3. MORBIDELLI Alessandro (Nice)
4. TINETTI Giovanna (Londres)

Session 2. Les briques de la vie primitive et les environnements planétaires

Mercredi 5 février/ après-midi

Modérateur: ROBERT François (MNHN)

1. ALBARÈDE Francis (Lyon)
2. GUYOT François (Paris) remplaçable par Beate OBERGER (Orsay)
3. DERENNE Sylvie (Paris)
4. DI MAURO Ernesto (Rome)

Session 3. Transition vers la vie primitive et diversité

Jeudi 6 février/matin

Modératrice: Marie-Christine MAUREL (Université PMC)

1. JAVAUX Emmanuelle (Liège)
2. ZACCAI Guiseppe (Grenoble)
3. FRANZETTI Bruno (Grenoble)
4. MANRUBIA Susanna (Madrid)

Session 4. Signatures extraterrestres et modélisation

Jeudi 6 février/après-midi

Modérateur: Marc OLLIVIER (IAS-Orsay)

1. ENCRENAZ Thérèse (Meudon)
2. LE SERGEANT D'HENDECOURT Louis (Orsay)
3. WAKELAM Valentine (Bordeaux)
4. BEN AMAR Martine (Paris)

Table Ronde "*de l'inerte au vivant*"

Allocution de clôture

- Un hébergement par l'IHP pour les 5 et 6 février dans l'Amphithéâtre HERMITTE a été obtenu
- La Table Ronde finale sera animée (sous réserve) par Sylvestre HUET, journaliste à "*Libération*"
- Une demande d'allocution d'introduction par Cédric VILLANI, médaille Fields 2010, n'a pu aboutir ce dernier étant absent aux dates du colloque. Le directeur adjoint de l'IHP, Jean-Philippe UZAN sera probablement sollicité.
- Le Pr Pierre JOLIOT de l'Institut de Biologie Physico-chimique, membre du Collège de France et de l'Académie des Sciences prononcera l'allocution de clôture du colloque.

B) Financement du colloque

- Notre société savante a été mise sur le site SIMPA de la Ville de Paris grâce aux démarches de notre Collègue Michel GONDRAN. Ceci nous permettra de demander une aide au financement du colloque et également pour les éditions de l'AEIS

- Il serait probablement opportun de demander une aide auprès du **CEA**. Notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUDI pense que l'on pourrait s'adresser M. Gabriele Fioni, Directeur des Sciences de la Matière ainsi qu'à Gilles Bloch, Directeur des Sciences du Vivant du CEA. Notre Collègue Michel GONDRAN a également effectué des démarches auprès de la région **IDF**, mais celles-ci seraient quelques peu tardives.
- En ce qui concerne l'**UNION EUROPEENNE**, notre Collègue Jean SCHMETS déclare que dans chaque pays existent des points de contact nationaux qu'il faudrait rechercher. Notre collègue Jean VERDETTI est chargé de prendre ces contacts.
- D'autres organismes tels que le **CNES**, l'**INSERM** et le **CNRS** devraient être contactés avec l'aide de notre Collègue Jean-Pierre FRANÇOISE.

II) Accueil de notre nouveau collègue, le Pr Jean VERDETTI

III) Annonce du décès de notre Collègue Emmanuel NUNEZ

Après nous avoir fait part de la disparition de notre Collègue en août dernier, notre Président cède la parole à notre Président d'honneur, Gilbert BELAUBRE qui effectue une allocution en l'honneur de notre Collègue disparu, ancien Pr de Biochimie à la Faculté de Médecine Paris Bichat et Président de l'AFSCET. Une minute de silence a été observée

IV) Présentation du Conférencier

Notre Président nous présente le Conférencier qui allie des compétences de physicien à des compétences de biologiste:

Giuseppe ZACCAI est actuellement Directeur de Recherche Emérite au CNRS et "Senior Fellow" pour la Biologie à l'Institut Laue Langevin à Grenoble. A l'origine il est physicien titulaire d'un PhD de Physique des Solides obtenu en 1972 à l'Université d'Edimbourg en Ecosse. Après un "fellowship" au EMBO au département de Biologie au Brookhaven National Laboratory, N.Y., USA il s'intéresse à la Biologie en 1973. Puis à son arrivée en France en 1974 il est engagé en tant que physicien à l'Institut Laue Langevin de Grenoble.

En 1980 il commence une carrière au CNRS où en 1992, il est nommé Directeur de Recherche 1ère Classe. Il devient Directeur du **Laboratoire de Biophysique Moléculaire**, à l'Institut de Biologie Structurale à Grenoble. En 2013, il devient Directeur de Recherche Emérite au CNRS.

Il a enseigné la Biophysique dans l'UFR de Physique et de Biologie en 2ème et 3ème cycle à l'UFJ de Grenoble. Il a été responsable pendant 12 ans du DEA de Cristallographie. et RMN biologiques. Il est l'auteur de deux ouvrages (niveau : chercheurs et étudiants en thèse) sur la Biologie Structurale (Zaccai et Garrec, Nathan 128) et les Méthodes Biophysiques (Serdyuk, Zaccai et Zaccai, Cambridge, environ 1000 pages). Il a par ailleurs dirigé environ 20 thèses de doctorats depuis 1990.

Il est membre de la **Société Française de biophysique**, de la **Société Française de Neutronique**, et de l'**European Physical society**. Le 4 juillet 2013, il a reçu le prix **Walter Hålg**, une des récompenses les plus prestigieuses dans le domaine de la **neutronique**, pour « ses contributions novatrices à une série de problèmes biophysiques et biochimiques ainsi que pour son action de valorisation du rôle de la diffusion des neutrons dans la recherche biologique .

Ses recherches actuelles portent sur :

La relation dynamique moléculaire/fonction biologique

De la molécule à la cellule

Les limites du vivant : adaptation aux conditions extrêmes

L'interface Physique-Biologie ...

V) Conférence de Giuseppe ZACCAÏ Eau et Sel: Premières molécules de la Vie

Le but de cette conférence consiste à montrer le rôle essentiel de la présence de l'eau liquide, et du sel dans l'émergence des premières molécules vivantes.

Après avoir montré que la Terre de par sa distance au soleil, sa taille, sa masse, sa période orbitale et sa température moyenne était la seule planète du système solaire à détenir d'importantes masses d'eau liquide, il étudie ce qui dans la structure moléculaire de l'eau permet d'établir des liaisons hydrogènes entre les molécules et le rôle des molécules hydrophobes dans la synthèse de la morphologie des macromolécules impliquées dans la l'émergence de la vie.

Il rappelle également les caractéristiques physiques de l'eau en fonction de la température et de la pression :

- solide (structure cristalline figée)
- gazeuse (structure très aléatoire) .
- liquide (structure non totalement désordonnée due à des liaisons hydrogène aléatoires entre molécules d'eau mais permettant une évolution)

Il analyse les problèmes avec une vision de thermodynamique statistique (Entropie, désordre dynamique) et montre ainsi que l'eau liquide se prête au rôle structurant des molécules hydrophobes (figures 1et 2) qui ne pouvant suivre les mouvements aléatoires de l'eau se regrouperont pour l'éviter. Ceci est très important notamment pour la formation des membranes, micelles....

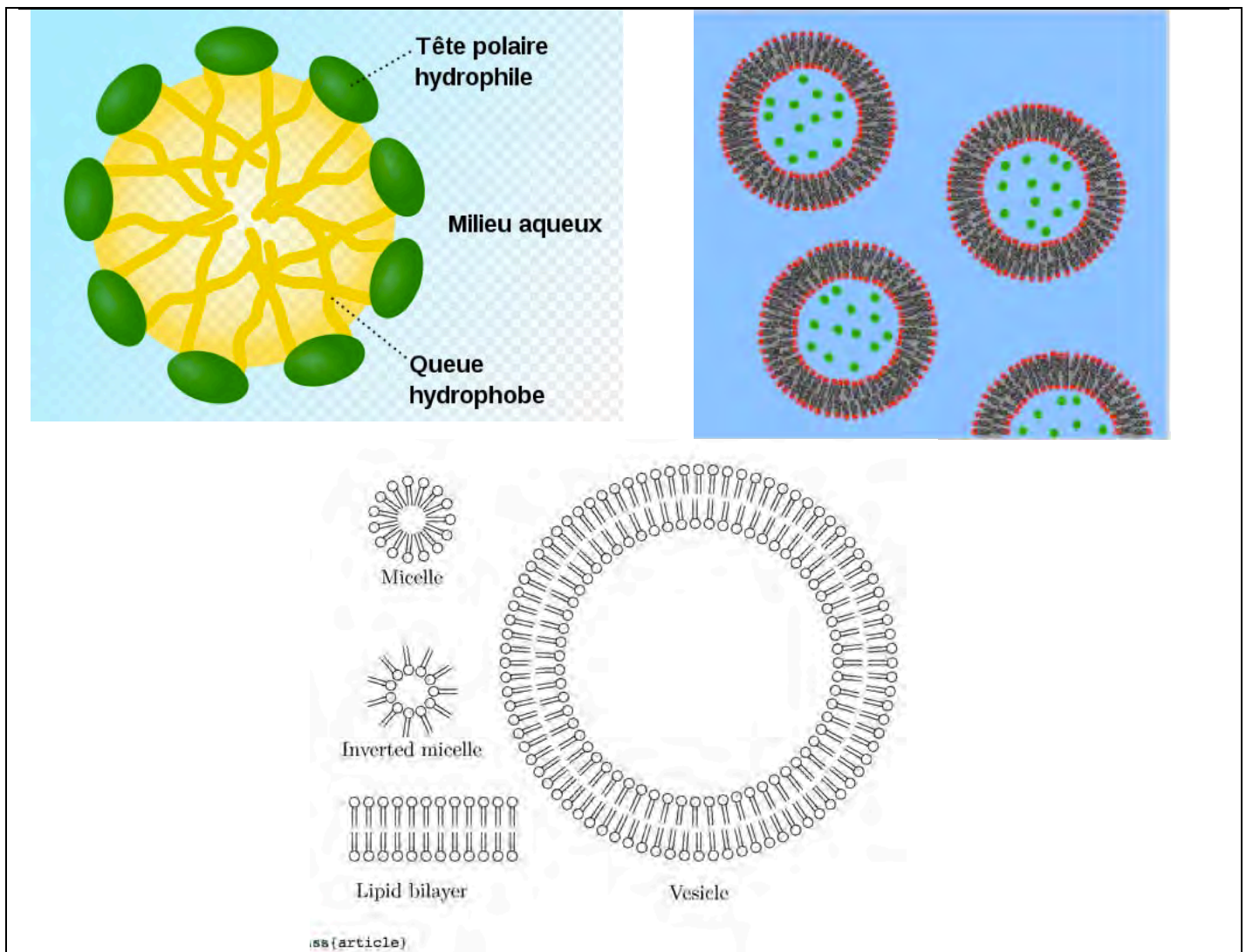


Figure 1 : Effet hydrophobe

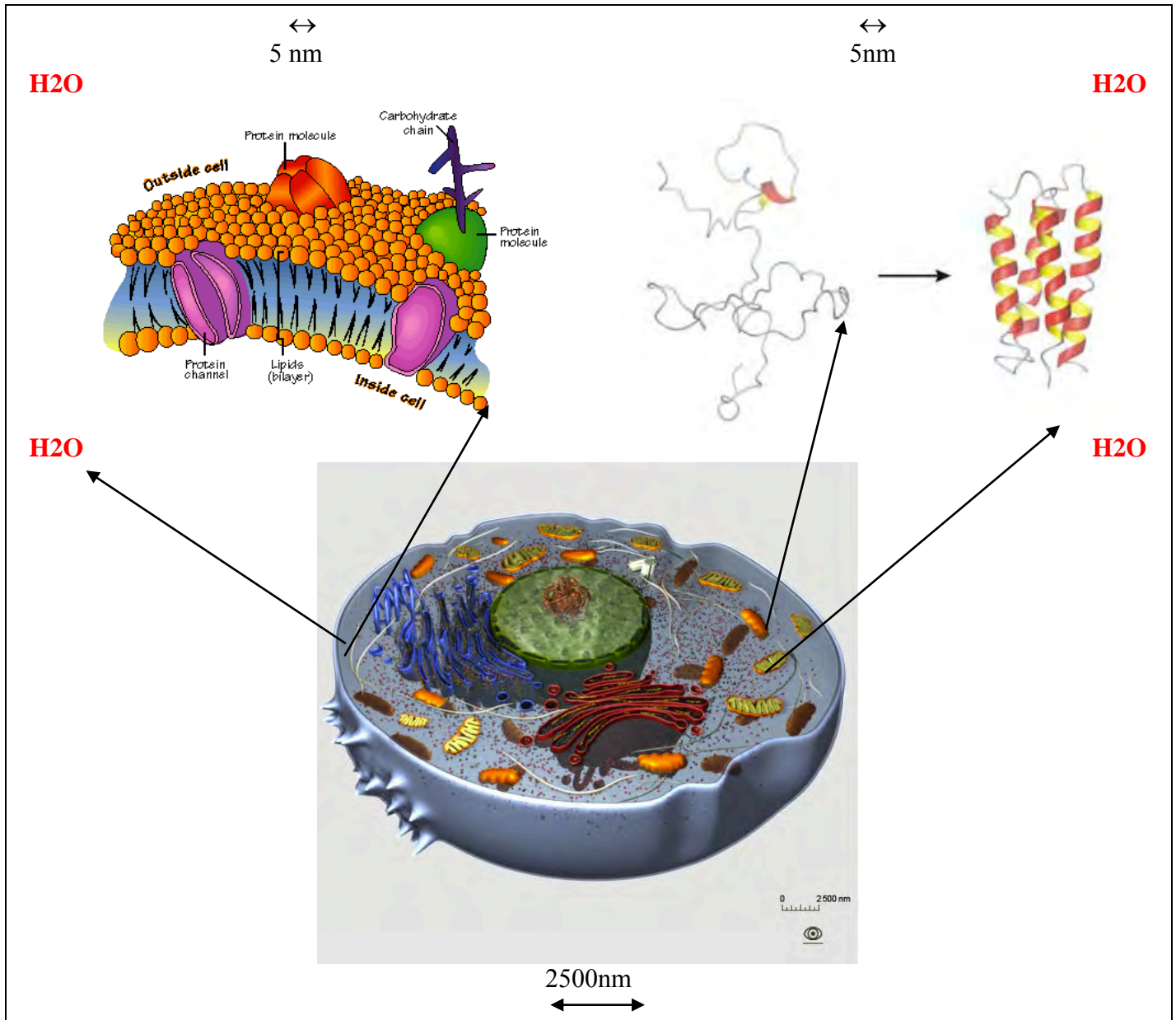


Figure 2 :Effet hydrophobe

Il examine également le rôle essentiel des effets ionisants des sels (NaCl, KCl) depuis le comportement des molécules hydrophobes jusqu'aux transmissions des influx nerveux.

L'Institut Laue Langevin de Grenoble dispose d'un réacteur nucléaire de recherche produisant par fission de puissants flux de neutrons. Une petite partie de ces neutrons peut être extraite pour former des neutrons de diverses énergies permettant l'étude des milieux aqueux par diffusion neutronique (Pour plus de détails nous vous conseillons la lecture du document page 18). En effet les molécules d'hydrogène sont invisibles aux Rayons X. et il est indispensable d'étudier la dynamique des liaisons hydrogène. Le neutron interagit avec le proton

Neutrons:
Un rayonnement bien adapté pour étudier la dynamique moléculaire

Longueur d'onde ~ amplitude de fluctuation des atomes
Énergie ~ énergie des mouvements

$\sim 1 \text{ \AA}$





diffusion par le noyau
sensible à l'atome H ($n \sim p$) dans l'eau et les macromolécules
(H avec un électron est peu visible aux RX)
 $\sigma(H) \gg \sigma(D)$ (marquage isotopique)

Figure 3: Neutrons

la diffusion incohérente de neutrons met en évidence des différences importantes de section efficaces σ pour différents éléments chimiques:

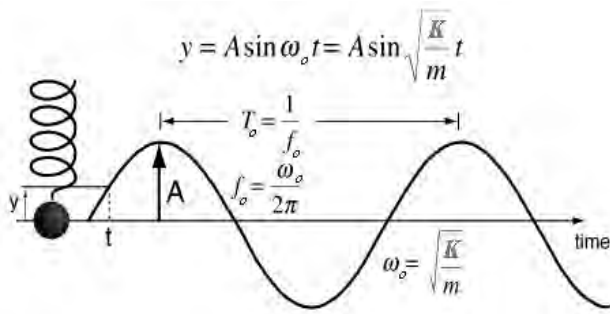
$$\sigma(H) \gg \sigma(D, C, N, P, \dots)$$

La neutronique permet d'étudier la dynamique moléculaire de l'eau. à l'échelle de la picoseconde. On utilise à cet effet un marquage isotopique au Deutérium de l'hydrogène des macromolécules pour le différencier de celui de l'eau. Des expériences ont été pratiquées pour la bactérie *E. Coli* montrant que l'eau intracellulaire se comporte comme de l'eau libre sauf dans la zone interfaciale où l'eau est associée aux protéines de la membrane. Des expériences similaires ont été réalisées avec des globules rouges.

Il aborde ainsi l'arbre de la biodiversité, la physico-chimie des environnements extrêmes (température, salinité, P_H , pression... Tous ces organismes fonctionnent avec les mêmes ancêtres et les mêmes enzymes. Tous ces organismes ont une forme déterminée par des forces à l'échelle microscopique.: il existe une écologie dynamique des protéines.

Adaptation par les Forces: Mouvements

Les forces qui maintiennent la structure sont comme des petits ressorts entre les brins : les atomes sont maintenus en place et peuvent vibrer autour de cette place



La musique des protéines !

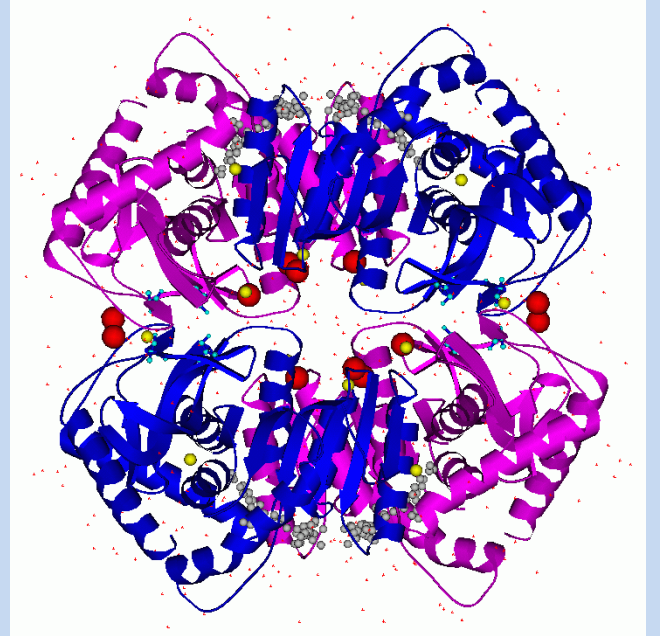


Figure 4

On a ainsi pu mesurer la dynamique intracellulaire de nombreuses espèces en fonction de la température et montrer la flexibilité et l'adaptabilité des protéines en fonction de la température (les constantes de forces sont d'autant plus basses que la cellule est molle).

Il semble ainsi qu'au cours de l'évolution certaines constantes de force aient été sélectionnées.

Ces forces stabilisent la structure d'une protéine. Elles permettent ses mouvements fonctionnels et une adaptation à des conditions physiques fluctuantes - y compris une à des températures "non-extrêmes".

Après cette conclusion, quelques demandes intervention sont présentées:

- Notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUJJI insiste sur le rôle catalyseur de l'eau dans les réactions de biologie moléculaire.
- Notre Collègue Alain STAHL demande si l'eau des planètes proviendrait de météorites.

Après cette très riche séance, nos travaux prennent fin.

Compte-rendu de la section

Nice-Côte d'Azur

Pourquoi me fais-tu tant de reproches ? Je ne t'ai jamais fait de bien !

Proverbe yiddish.

Compte rendu de la séance du 18 juillet 2013

(172^{ème} séance)

Présents :

Richard Beaud, Pierre Bourgeot, Patrice Crossa-Raynaud, René Dars, François Demard, Pierre Gouirand, Maurice Lethurgez, Claude Nigoul.

Excusés :

Jean Aubouin, René Blanchet, François Cuzin, Guy Darcourt, Yves Ignazi, Maurice Papo.

1- Approbation du compte rendu de la 171^{ème} séance.

Le compte rendu est approuvé à l'unanimité des présents.

2- Le mois écoulé.

Patrice Crossa-Raynaud : j'ai contacté à nouveau Madame Meneau, responsable à la Mairie de Nice de la mission sur la recherche et l'enseignement supérieur, pour lui demander de nous autoriser à contacter Madame Guillemot pour actualiser le site de l'AEIS Nice Côte d'Azur. Après son accord, notre secrétaire Geneviève Delfino a rendu visite à Madame Guillemot qui lui a expliqué comment préparer les textes des conférences que nous tenons mensuellement à la Bibliothèque Louis Nucéra pour qu'elle puisse les insérer facilement sur le site. Depuis, nous avons presque comblé le retard accumulé depuis deux ans et mieux isolé nos activités au sein du site de la Mairie. Pour consulter les textes, il suffit de cliquer sur le lien figurant en haut des affichettes : <http://etudiants.nice.fr/>, onglet « culture scientifique » AEIS.

Quelques remarques à propos de l'entrée de la Croatie dans l'Union européenne: (Claude Nigoul) : ce pays est devenu, le 1^{er} juillet 2013, le 28^{ème} membre de l'Union européenne. Il est

indépendant depuis décembre 1991, avec les autres pays des Balkans occidentaux, après l'implosion de la Yougoslavie.

Ce pays a appartenu pendant des siècles à l'Empire austro-hongrois. Il est uniformément catholique et compte quatre millions d'habitants.

Pour tous les pays anciennement communistes, leur première préoccupation fut de se mettre à l'abri d'un retour et pour cela, s'affilier à l'OTAN, pour avoir une protection militaire. La volonté d'adhérer à l'Union européenne est venue plus tard, c'est-à-dire lorsque la condition de la sécurité était considérée comme à peu près réglée.

A la suite de l'éclatement de la Yougoslavie les anciennes républiques devenues indépendantes ont tout de suite souhaité entrer dans l'Union européenne car celle-ci avait montré son aptitude à faire régner la paix entre ses membres ce que consacra, plus tard, le Prix Nobel de la Paix.

La Slovénie a été la première à adhérer parce qu'elle ne posait aucun problème et avait un soutien très actif de l'Allemagne.

Les six autres pays de l'ancienne Yougoslavie présentaient des difficultés diverses. Celui qui en présentait le moins était la Croatie. La Serbie, par exemple, est l'Etat le plus important mais il ne satisfait pas encore aux exigences des Droits de l'Homme puisqu'il n'a pas encore livré ceux qui sont considérés comme des criminels de guerre.

Un autre critère d'adhésion est que le pays candidat présente un niveau économique comparable à celui des Etats déjà membres. Enfin, il faut amener progressivement les pays candidats au niveau de la vie communautaire, ce qui implique beaucoup de moyens notamment pour réaliser les infrastructures nécessaires.

Ce point est parfois délicat, surtout quand certains, tels par exemple la Grèce, la Roumanie ou la Bulgarie, ne jouent pas le jeu.

Pour cela, on a mis en avant un critère nouveau qui est « la capacité d'intégration » qui permet de limiter actuellement les candidatures aux pays qui ne risquent pas de poser trop de problèmes.

L'élargissement doit aller de pair avec l'approfondissement, c'est-à-dire le cheminement de l'Union européenne vers un système toujours plus intégré : les Etats-Unis d'Europe. Malheureusement, cette perspective est en train de se dissiper doucement. On parle actuellement de fédération d'états-nations, ce qui ne veut rien dire.

On ne cesse d'élargir mais on n'approfondit pas. On va alors au devant d'un risque de au blocage institutionnel dans les domaines, comme la politique étrangère où demeure la règle de l'unanimité, qui devient de plus en plus aléatoire à 28.

D'autres adhésions sont à l'étude, dont la plus importante serait celle de la Serbie qui bute encore sur la question des droits de l'homme et de la démocratie, séquelle des guerres des années 90.

Pour d'autres pays des difficultés importantes demeurent.

Le premier est l'Ukraine qui voudrait entrer mais qui est peuplée à moitié de Russes. Moscou qui la considère comme une terre russe y est évidemment opposée.

Pour la Turquie, question de plus en plus problématique, on a commis à la fois une très grande faute et une très grande injustice. Ce pays a signé, en 1963, un accord d'association avec la communauté européenne à finalité d'adhésion en même temps que la Grèce. Celle-ci a adhéré mais pas la Turquie. Ses dirigeants ont considéré cela comme une très grande injustice. Les militaires étaient alors au pouvoir ce qui justifiait les réticences européennes mais, depuis, une forme de démocratie s'est instaurée. De toutes façons, pour que l'adhésion soit possible, il faut l'unanimité des Etats membres de l'Union qu'empêche le refus de la France.

Depuis, les islamistes sont arrivés au pouvoir à Ankara, ce qui accroît les réticences européennes.

Enfin, pendant les années 2000, la Turquie a eu une croissance à deux chiffres et ses dirigeants se sont posé la question de savoir si l'adhésion à un ensemble économique en pleine crise et

Annances

I)Annonces relatives au prochain Colloque:



Académie Européenne Interdisciplinaire des sciences

<http://www.science-inter.com>

FORMATION DES SYSTÈMES STELLAIRES ET PLANÉTAIRES

CONDITIONS D'APPARITION DE LA VIE

COLLOQUE DE L'ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

5 et 6 février 2014



**Institut
Henri
Poincaré**

À l'Institut Henri Poincaré

Amphithéâtre Hermite

11, rue Pierre et Marie Curie

75005 Paris

Comité scientifique

Pierre ALBAREDE (ENS-Lyon), Gilbert BELAUBRE (AEIS), André BRACK (CNRS-Orléans), Sylvie DERENNE (CNRS/ENS Paris), Thérèse ENCRENAZ (IAP), Maryvonne GERIN (CNRS/ENS Paris), Louis LE SERGEANT d'HENDECOURT (IAS-Orsay), Marie-Christine MAUREL (Université PMC-Paris), Marc OLLIVIER (IAS-Orsay), François RAULIN (Université Paris-Est Créteil), François ROBERT (MNHN), Alain STAHL (AEIS)

Comité d'organisation

Irène HERPE-LITWIN, Gilbert BELAUBRE, Gilles COHEN-TANNOUJJI, Alain CORDIER, Claude ELBAZ, Jean-Pierre FRANCOISE, Michel GONDRAN, Victor MASTRANGELO, Jean SCHMETS, Jean VERDETTI

Contact

Irène HERPE-LITWIN

Secrétaire générale AEIS

irene.herpe@science-inter.com

jhermelitwin@gmail.com

CONDITIONS D'APPARITION de la VIE

INSTITUT HENRI POINCARÉ

11, rue Pierre et Marie Curie Paris 5^{ème}

Mercredi 5 et jeudi 6 février 2014

L'étude de nos origines est reconnue comme l'un des grands défis scientifiques du XXI^e siècle, il mobilise plusieurs champs conceptuels et combine de nombreux aspects de la connaissance scientifique dans une variété de domaines. Quelle succession d'événements a conduit à la formation des planètes ? Quels processus ont permis l'apparition de la vie sur notre Terre ? Existe-t-il d'autres systèmes sur lesquels une forme de vie pourrait se développer ? Depuis la découverte en 1995 de la première planète extrasolaire, de nombreuses autres exoplanètes ont été trouvées, dans des configurations qui soulèvent de nouvelles questions sur la formation des systèmes planétaires. De plus, les missions spatiales de ces dernières années ont permis de mieux comprendre la formation du système solaire. Alors que la vie sur Terre se révèle d'une extraordinaire diversité, les progrès récents en astrobiologie permettent d'envisager la recherche d'indices de la présence de vie sur des exoplanètes comparables à la Terre d'ici une ou deux décennies. Ces nouveaux éléments font de la recherche sur nos origines l'un des thèmes majeurs de ce siècle.

Ce colloque a pour objet de présenter les derniers résultats sur les différents aspects de cette recherche interdisciplinaire qui est conduite au plan national, européen et international

La question des origines est si ancienne et profonde qu'elle est aussi développée dans une perspective historique, épistémologique et philosophique. Une table ronde est consacrée à ces aspects

Ce colloque comprend quatre sessions.

Mercredi 5 février 2014

Session 1 : Formation des systèmes stellaires et planétaires (matin)

Session 2 : Les briques de la vie primitive et les environnements planétaires (après-midi)

Jeudi 6 février 2014

Session 3 : Transition vers la vie primitive et diversité (matin)

Session 4 : Signatures extraterrestres et modélisation (après-midi)

Table ronde « de l'inerte au vivant », animée par un journaliste scientifique

1 XXI^e siècle, il
1 connaissance
à la formation
ste-t-il d'autres
e en 1995 de la
ées, dans des
itaires. De plus,
1 formation du
progrès récents
le vie sur des
ents font de la

aspects de cette
l.
ppée dans une
à ces aspects

i)

II) Site Cordis:

Notre Collègue Jean Schmets a collecté sur le site CORDIS les informations suivantes:

[Passion for Knowledge-Quantum 13; the red carpet for science](#)

Passion for Knowledge - Quantum 13 is a science festival, that aspires to gather together scientists and general public to talk about the importance of science in our daily life, and in particular to talk about the importance of quantum mechanics in many different fields, not only science, but culture and economy as well.

Organisation: N/A

Country: SPAIN

Category: Event

[Countdown on Horizon 2020 Space – International Information and brokerage event](#)

Within the framework of the European SME Week 2013, APRE on behalf of MIUR is organizing the “Countdown on Horizon 2020 Space International Information and brokerage event” .

Organisation: Agency for the Promotion of European Research (A.P.R.E.)

Country: ITALY

Category: Event,Partnership Event

III) Journée grand public sur les peurs alimentaires

Notre Collègue Antoine FRATINI nous invite à nous inscrire gratuitement à la **journée grand public** sur *les peurs alimentaires* qui se déroulera à la Faculté de Médecine 21 rue de l'Ecole de Médecine 75006 Paris le Samedi 16 Novembre 2013 à partir de 10,30 h, qui est organisée par le GROS, Groupe de Recherche sur l'Obésité et le Surpoids. Programme et inscriptions au link:

http://gros2013.affinitesante.com/_newsletters/newsletter-congres2013-02.html

Documents

Pour mieux comprendre la neutronique , technique d'analyse utilisée par G. ZACCAÏ, il est possible de visiter le site: <http://lpsc.in2p3.fr/collot/cours/Neutronique.pdf> ou de consulter :

p.18 : Un schéma récapitulatif sur " La diffusion neutronique- généralités" issu du site <http://www.sfn.asso.fr>

p. 19 Un article "La fluidité de l'eau dans nos cellules" écrit par Marion JASNIN du Max Planck Institute of Biochemistry paru dans la revue **BIOFUTUR 331 • AVRIL 2012**

Pour préparer la conférence de Mme ENCRENAZ nous vous proposons la lecture des textes suivants:

p. 25 le résumé , l'introduction et la conclusion d'un article très complet de Thérèse ENCRENAZ, "*Water in the solar system*" paru dans Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2008. 46:57–87 accessible sur le site <http://www.annualreviews.org/>

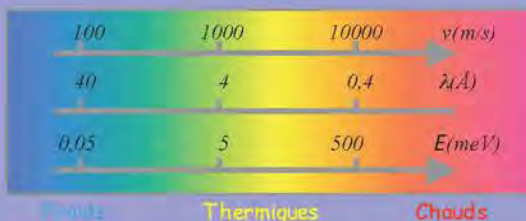
p. 29 *La Planète Mars, un autre Destin* par Thérèse ENCRENAZ de L'Observatoire de Paris Meudon, paru dans *Reflets de la Physique n° 30*,



La diffusion neutronique: généralités

Le neutron : une particule

- Masse : $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg
- Charge : nulle
- Spin : 1/2
- Moment magnétique : $-1,913 m_N$



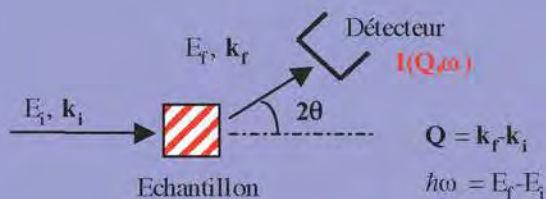
Le neutron : une onde

- Vecteur d'onde : $k=2\pi/\lambda$
- Moment : $p = \hbar k$
- Energie : $E = \hbar^2 k^2 / 2M_n$

Le neutron interagit avec la matière :

- Le neutron interagit (interaction forte) avec les noyaux des atomes
 - il peut voir aussi bien les atomes légers que les atomes lourds (cf table des sections efficaces).
 - il peut distinguer les isotopes d'un même élément, permettant la substitution isotopique et la variation de contraste; la substitution H/D est par exemple beaucoup utilisée, H et D présentant des sections efficaces de diffusion des neutrons très différentes.
- Le neutron a un spin $S=1/2$
 - le moment magnétique du neutron interagit (interaction dipolaire) avec le champ magnétique créé par les spins et les moments orbitaux des échantillons magnétiques.
 - on peut polariser les faisceaux de neutrons
- Les longueurs d'onde des neutrons sont du même ordre de grandeur que les distances interatomiques dans la matière condensée, ce qui permet de sonder les corrélations de position des particules.
- Les énergies des neutrons sont comparables aux excitations dans les solides et les liquides. La diffusion neutronique renseigne ainsi sur les modes dynamiques dans la matière condensée.
- Comme son nom l'indique, le neutron est neutre, ce qui lui confère un fort pouvoir de pénétration et permet l'utilisation d'environnements d'échantillon lourds.

Processus de diffusion d'un neutron



- Des neutrons peuvent être diffusés *élastiquement* par les atomes de l'échantillon: leur énergie est inchangée. La direction du vecteur d'onde est modifiée mais pas sa norme.
 $\hbar\omega = 0$ et $Q = 4\pi\sin\theta/\lambda$
 - Des neutrons peuvent créer ou annihiler des modes dynamiques dans l'échantillon. Ils sont alors diffusés *inélastiquement*: la direction et la norme du vecteur d'onde sont modifiées.
- On voit ainsi que les grandeurs pertinentes sont les variations de vecteur d'onde et d'énergie Q et $\hbar\omega$.
- $Q \sim$ inverse de la distance sondée par le neutron.
 - $\omega \sim$ inverse du temps caractéristique sondé par le neutron.

Les neutrons renseignent sur les comportements collectifs et individuels des atomes

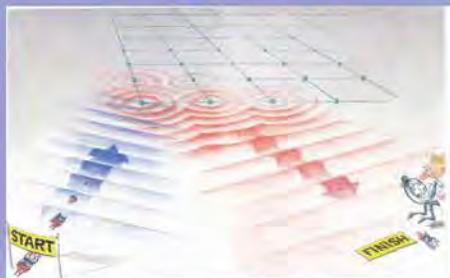
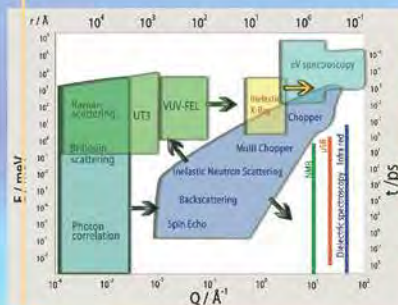


Illustration de la *diffusion cohérente* des neutrons: les ondes sphériques diffusées par les différents noyaux interfèrent. La diffusion cohérente renseigne sur les comportements collectifs des atomes. Dans le cas d'une *diffusion incohérente*, les neutrons interagissent indépendamment avec chaque noyau, les ondes diffusées n'interfèrent pas. La diffusion incohérente peut renseigner sur les mouvements individuels des atomes. Diffusions cohérente et incohérente peuvent être élastiques ou inélastiques.



Echelles spatiale et temporelle des corrélations sondées par les neutrons

Longueur de diffusion et section efficace

La longueur de diffusion b traduit l'intensité de l'interaction neutron-atome. Elle est reliée à la section efficace σ par la relation $\sigma=4\pi b^2$. A chaque élément sont associées une section efficace cohérente et une section efficace incohérente.

Numéro atomique

1	6	8	17	22	26	28	82
H	C	O	Cl	Ti	Fe	Ni	Pb
Hydrogène Carbone Oxygène Chlorure Titane Fer Nickel Plomb							

Eléments naturels

RX:

Interaction avec le nuage électronique

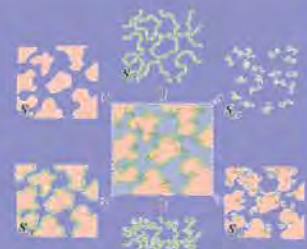
Isotopes

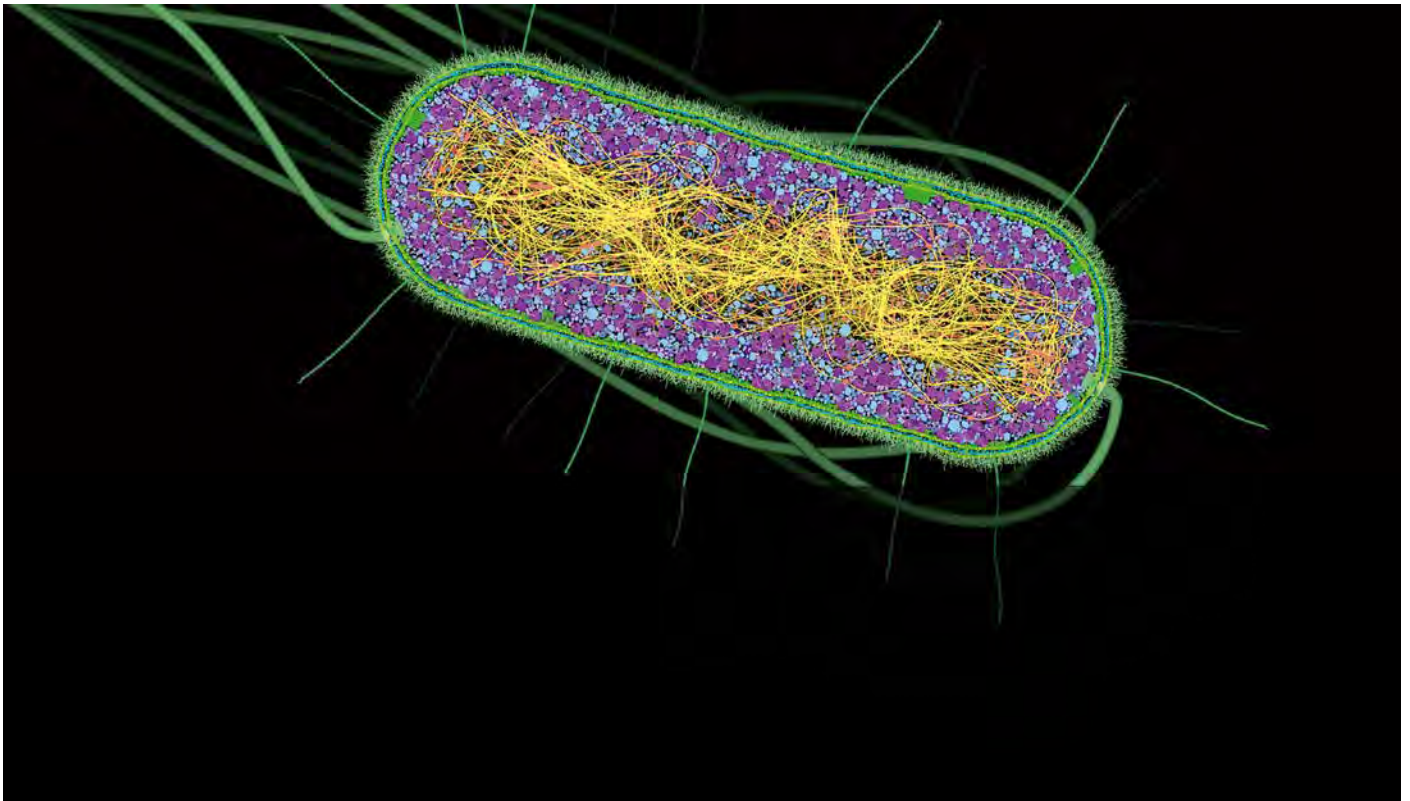
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Isotopes																																																																																																			

Neutrons: Interaction avec les noyaux

Substitution H/D - Variation de contraste

Diffusion des Neutrons aux Petits Angles: Calcul du contraste vu par les neutrons pour des échantillons différemment et idéalement deutérés, d'un même système (polymères + eau + huile + surfactant). Chaque échantillon renseigne sur l'une des composantes de la fonction de diffusion totale du système.





C'est dans la bactérie *Escherichia coli* qu'a été explorée la dynamique de l'eau intracellulaire.

La fluidité de l'eau dans nos cellules

par Marion Jasnin

Max Planck Institute of Biochemistry,
Département de Biologie
Moléculaire et Structurale
Martinsried, Allemagne

BIOFUTUR 331 • AVRIL 2012

Les propriétés spécifiques du neutron, combinées astucieusement au marquage isotopique, ont permis de lever le voile sur le comportement dynamique de l'eau dans la cellule, à l'échelle atomique. Contrairement aux idées reçues, l'eau intracellulaire est presque aussi fluide que l'eau liquide. Seule sa diffusion en surface des macromolécules est ralentie.

Que l'eau soit essentielle à la vie est bien connu et accepté de tous, y compris des scientifiques. Les propriétés extraordinaires de cette molécule ont fait l'objet de divers articles de vulgarisation, comme celui de Giuseppe Zaccai ¹. Elles jouent un rôle fondamental en biologie moléculaire, une discipline qui consiste à étudier les processus de la vie au niveau des atomes et des molécules, ainsi que leurs interactions. Ainsi, les molécules d'eau peuvent former des liaisons entre elles et avec d'autres molécules hydrophiles, mais pas avec des molécules hydrophobes. Cette simple propriété a des conséquences essentielles en biologie moléculaire. L'effet hydrophobe conduit, par exemple, à l'organisation spontanée des membranes lipidiques qui entourent nos cellules (**figure p. 35, en bas**). Il contribue également à l'organisation de la structure tridimensionnelle des protéines, de l'ADN et de l'ARN, en favorisant l'exposition des parties hydrophiles au contact de l'eau environnante, et en cachant les parties hydrophobes au coeur des macromolécules.

L'effet hydrophobe dépend fortement des propriétés dynamiques moléculaires de l'eau à l'état liquide. Son implication dans la formation des membranes et le repliement des macromolécules a été observée dans des expériences réalisées dans des tubes à essai ², donc en présence d'eau à l'état liquide, volumique. Or il a

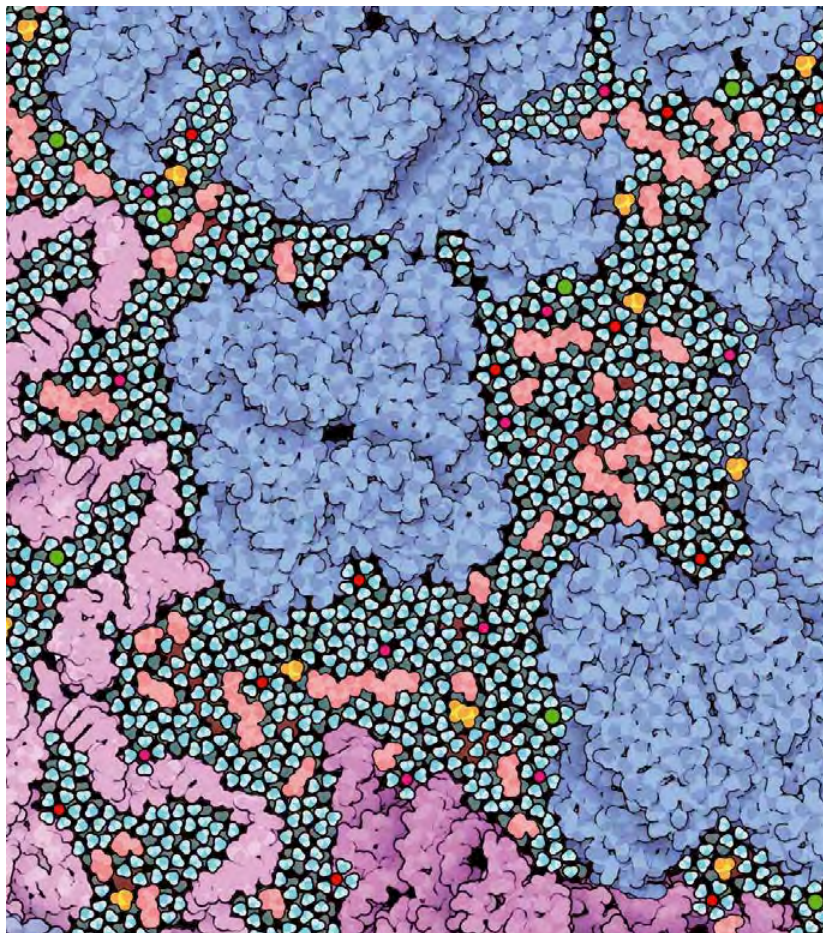
¹ Zaccai G (2009) *Science in School* 13, 19-23

² Tanford C (1978) *Science* 200, 1012-8

été suggéré que l'eau dans la cellule ne serait pas dans cet état volumique : elle ne serait pas libre de bouger comme l'eau liquide en raison de l'environnement fortement encombré et visqueux de la cellule³, qui consiste en une « soupe » de protéines et autres molécules (**figure p. 35, en haut**). D'où l'importance de mesurer l'état dynamique de l'eau directement dans des cellules vivantes. C'est grâce aux propriétés spécifiques du neutron que cette mesure a été rendue possible, réalisée par des scientifiques de l'Institut de biologie structurale (CEA-CNRS-UJF)***1** et de l'Institut Laue-Langevin (ILL)***2**, à Grenoble.

***1** www.ibs.fr/?lang=fr

***2** www.ill.eu



Portion d'une cellule montrant les nombreuses petites molécules localisées entre les protéines et les acides nucléiques. En rose, les acides aminés, sucres, ATP... En rouge, les ions métalliques. En jaune et orange, les ions phosphate. En vert, les ions chlorure. Les espaces restants sont remplis de molécules d'eau, en turquoise.

LE NEUTRON, UNE SONDE DE CHOIX

Dans un centre neutronique comme celui de l'ILL, les scientifiques utilisent les faisceaux de neutrons pour explorer une variété d'échantillons solides ou liquides. Dans une expérience de spectrométrie neutronique destinée à mesurer la dynamique des atomes dans un échantillon, les neutrons d'un faisceau entrent en collision avec les atomes de l'échantillon, à l'image de boules de billard qui rebondissent au contact les unes des autres. Mesurer les changements d'énergie et de trajectoire des neutrons suite à leur collision avec les atomes renseigne sur les changements d'énergie et de trajectoire des atomes au sein de l'échantillon, et par conséquent sur la façon dont les atomes bougent.

L'énergie et la trajectoire des neutrons sont déterminées avant et après interaction avec les atomes de l'échantillon, en mesurant les changements de longueur d'onde (de l'ordre de l'Angström, 10-10 m), via

³ Ball P (2008) *Chem Rev* 108, 74-108

deux méthodes principales⁴ : l'une dite par « temps de vol », où la vitesse du neutron est mesurée sur un chemin déterminé ; l'autre par diffraction de cristaux*³.

*³ Selon la loi de Bragg, seule une longueur d'onde est diffractée pour une périodicité de cristal et une configuration angulaire données

Chaque spectromètre neutronique est adapté pour mesurer des mouvements atomiques sur une certaine échelle de longueur et de temps. Les spectromètres peuvent être séparés en trois catégories. Ceux qui mesurent des mouvements de quelques Angströms sur des temps de quelques picosecondes (10-12 s) : il s'agit de la gamme associée aux mouvements de l'eau liquide à température ambiante. Ceux qui mesurent des amplitudes de quelques Angströms sur des temps de l'ordre de la nanoseconde (10^{-9} s), adaptés pour détecter des mouvements ralentis de deux ordres de grandeur par rapport à ceux de l'eau liquide à température ambiante. Et une catégorie intermédiaire, adaptée à des amplitudes de quelques Angströms sur des temps de quelques dizaines de picosecondes, qui permet de mesurer des ralentissements plus faibles.

LE MARQUAGE ISOTOPIQUE

Comment distinguer les mouvements des différents atomes d'un échantillon complexe, telle qu'une cellule, qui contient non seulement de l'eau mais aussi beaucoup d'autres molécules ? Les neutrons sont diffusés avec différents pouvoirs de diffusion selon les atomes qu'ils percutent. Pour étudier des échantillons complexes, on peut utiliser une astuce permettant de réduire le pouvoir de diffusion de tout ce que l'on ne veut pas mesurer. L'hydrogène diffuse les neutrons beaucoup plus que tout autre type d'atome (entre 10 et 100 fois plus, en fonction du type d'atome). En comparaison, le deutérium, un isotope de l'hydrogène dont le noyau contient un neutron en plus du proton, diffuse les neutrons 40 fois plus faiblement que l'hydrogène. Exploitant cette propriété, on peut remplacer l'hydrogène des parties d'un système complexe que l'on veut masquer par du deutérium, afin de les rendre pratiquement invisibles. Les contributions au signal de diffusion des molécules qui contiennent du deutérium sont négligeables. On « voit » seulement les mouvements des molécules qui contiennent de l'hydrogène.

L'EAU DANS LES CELLULES HALOPHILES

La première expérience sur des cellules vivantes a été réalisée sur des archées de la mer Morte vivantes dans des conditions extrêmes de salinité⁵. Le sel est normalement utilisé comme conservateur : à forte concentration, il permet de tuer les micro-organismes. Les organismes halophiles (« qui aiment le sel ») ont évolué de façon à s'accommoder à de fortes concentrations en sel, grâce à un nombre très élevé de surfaces hydrophiles au sein de leurs macromolécules. Ces surfaces affectent la dynamique de l'eau dans leurs cellules. Ainsi, en 2007, en utilisant un spectromètre adapté, notre laboratoire a détecté la présence d'une eau fortement ralentie (de deux ordres de grandeur) au sein de *Haloarcula marismortui*, une archée de la mer Morte⁵. La présence de cette eau fortement ralentie serait due à des interactions exceptionnelles entre l'eau, le sel et les protéines halophiles⁶ et révèle un des mécanismes permettant à ces organismes de survivre à de fortes concentrations en sel.

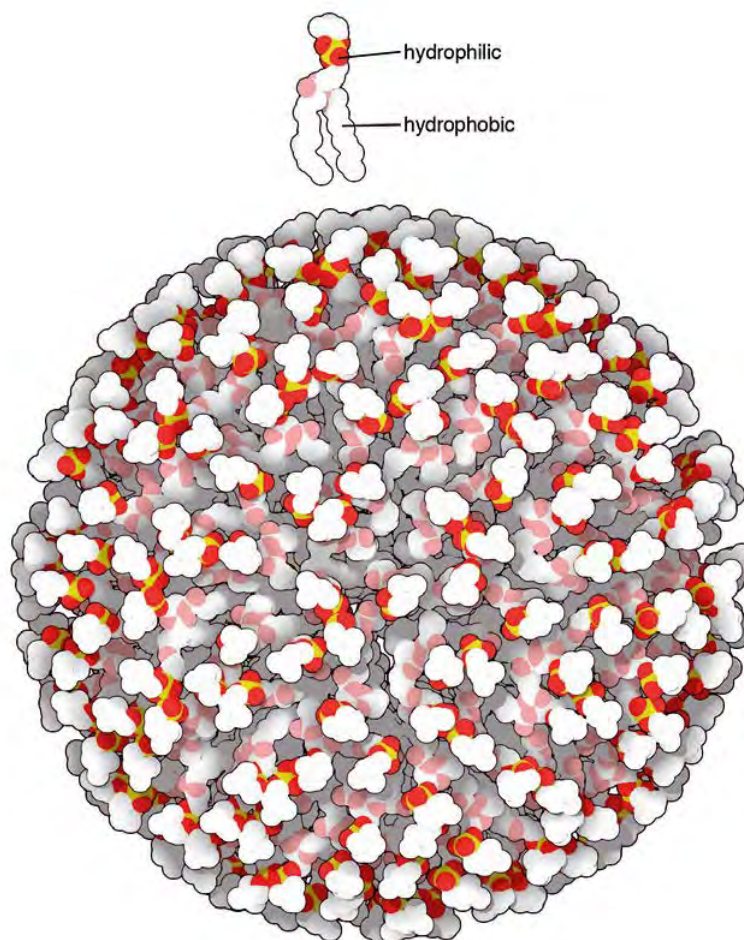
⁴ Diffusion inélastique de neutrons : <http://tinyurl.com/diffusion-neutrons>

Diffraction de neutrons sur des cristaux : <http://tinyurl.com/diffraction-neutrons>

Types de spectromètres neutroniques existants : <http://tinyurl.com/spectrometres1> <http://tinyurl.com/spectrometres2>

⁵ Tehei M *et al.* (2007) *Proc Natl Acad Sci Unit States Am* 104, 766-71

⁶ Madern D *et al.* (2000) *Extremophiles* 4, 91-98



Mélangés à l'eau, les lipides forment soit des gouttelettes lipidiques comme ici, soit des bicouches lipidiques comme dans le cas de nos membranes. Les phospholipides représentés sur cette figure sont composés d'un groupe phosphate hydrophile (en jaune et rouge), en interaction forte avec l'eau, et d'une partie hydrophobe faite de carbone et d'hydrogène (en blanc), dirigée vers l'intérieur de la gouttelette.

Si cette eau fortement ralentie était présente dans tous les organismes vivants, qu'ils soient ou non halophiles, cela conduirait à une réévaluation de l'effet hydrophobe dans la cellule, ainsi que du rôle de l'eau en biologie en général. La grande mobilité des molécules dans l'eau liquide conduit en effet à une forte entropie. Les molécules hydrophobes sont des molécules peu solubles et donc incapables de participer à la «danse» de l'eau. La formation des membranes et le repliement des macromolécules résultent de la tendance des parties hydrophobes à échapper au contact de l'eau pour réduire l'effet entropique défavorable (figure ci-dessus).

Si l'eau cellulaire n'avait plus cette liberté de bouger propre à l'eau liquide, alors les molécules hydrophobes perdraient leur propriété hydrophobe. Il est donc apparu essentiel de voir si la présence de cette eau fortement ralentie était propre aux organismes halophiles ou pouvait être généralisée à toutes les cellules.

L'EAU DANS ESCHERICHIA COLI

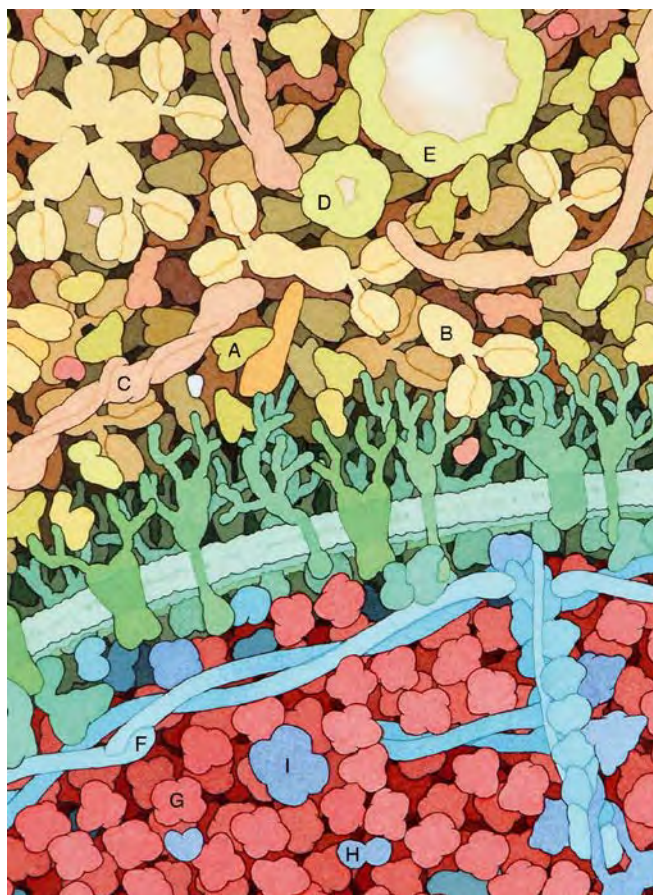
Les cellules humaines sont délicates et difficiles à utiliser pour les études neutroniques. Les bactéries *Escherichia coli* (*E. coli*) sont une bonne alternative : elles sont robustes et faciles à manipuler, vivent dans des conditions physiologiques de température et de salinité similaires à nos propres cellules. Le marquage isotopique a été utilisé afin de pouvoir explorer les mouvements de l'eau dans le cytoplasme d'*E. coli* sans la contribution des macromolécules. Pour remplacer les atomes d'hydrogène par du deutérium dans les protéines et autres macromolécules de la cellule, *E. coli* a été cultivée dans de l'eau deutériée (lourde) contenant des nutriments deutériés. Avant les mesures, les cellules ont été centrifugées délicatement et l'eau lourde intracellulaire a été remplacée par de l'eau légère (contenant des hydrogènes). Seules les

macromolécules sont restées deutériées. Dans un échantillon concentré de ces cellules, le signal diffusé par les neutrons provient donc majoritairement de l'eau intracellulaire.

Les atomes d'un même échantillon peuvent bouger à différentes vitesses pour une même température, en fonction des liaisons avec les atomes qui les entourent. On sait par exemple que les molécules d'eau sont ralenties au contact des macromolécules telles que les protéines et l'ADN. Il restait donc une question à élucider : les molécules d'eau qui ne sont pas en contact direct avec les macromolécules bougent-elles comme elles le feraient dans de l'eau liquide, ou sont-elles sensiblement ralenties ? En utilisant les spectromètres adaptés à l'ILL ainsi qu'à ISIS⁴, à Chilton en Angleterre, nous avons établi que la dynamique de l'eau dans la bactérie *E. coli* est quasiment similaire à celle de l'eau pure⁷. Les molécules d'eau intracellulaire tournent sur elles-mêmes sur des temps similaires à ceux de l'eau libre. Seul un faible ralentissement au niveau de la diffusion translationnelle moyenne a été mesuré – le temps de résidence d'un proton de l'eau intracellulaire, avant de diffuser vers un autre site de fixation, est, en moyenne, deux fois plus long que celui mesuré dans l'eau pure – révélant qu'une fraction de l'eau intracellulaire bouge plus doucement que le reste. Cette fraction d'eau faiblement ralentie correspond au pourcentage d'hydrogène en contact direct avec les macromolécules. Par conséquent, seule la couche d'eau d'hydratation des macromolécules est réellement ralentie, le reste de l'eau intracellulaire est libre de s'écouler aussi librement que l'eau pure.

Par ailleurs, contrairement à ce qui a été observé chez les halophiles, aucune eau fortement ralentie n'a été détectée chez *E. coli*⁵.

L'EAU DANS LES GLOBULES ROUGES



Plasma sanguin (en haut) et une coupe transversale de globule rouge (en bas). Le plasma inclut de nombreuses molécules de sérum-albumine (A), des anticorps (B), du fibrinogène (C), des lipoprotéines de haute densité (D), de basse densité (E) et beaucoup d'autres protéines impliquées dans le transport et la protection. Sont également figurés le réseau de spectrine (F), l'hémoglobine (G) et des protéines antioxydantes comme la superoxyde dismutase (H) et la catalase (I).

⁷ Jasnin M *et al.* (2008) *EMBO Rep* 9, 543-7

Suite aux expériences sur *E. coli*, notre laboratoire est également parvenu à mesurer la dynamique de l'eau dans les globules rouges humains en utilisant des sources neutroniques à l'Université technique de Munich en Allemagne*⁵ et au Paul Scherrer Institute en Suisse*⁶. L'eau dans les globules rouges se comporte de la même manière que celle dans *E. coli*, diffusant librement au delà de la première couche en contact avec l'hémoglobine, la principale protéine de ces cellules⁸ (**figure ci-dessus**).

UNE FLUIDITÉ RETROUVÉE

De façon imagée, ce qui se passe dans la cellule au niveau atomique est similaire à ce qui se passe dans les îles du lagon de Venise en Italie. L'eau en contact avec les macromolécules (équivalentes aux îles) est retenue en surface, alors qu'entre les macromolécules – entre les îles – l'eau retrouve sa fluidité.

Ce résultat, reposant sur des données expérimentales réalisées sur plusieurs types de cellules vivantes, a mis fin à la polémique selon laquelle l'eau intracellulaire serait fortement perturbée par l'environnement encombré de la cellule et ralentie dans son ensemble⁹.

Les scientifiques peuvent donc être soulagés et continuer à réaliser des expériences dans des tubes à essais, qui constituent bien un modèle valide de l'état dynamique de l'eau dans la cellule à l'échelle atomique.

Remerciements

L'auteur souhaite remercier chaleureusement Giuseppe Zaccai pour sa relecture et ses conseils, toujours porteurs d'inspiration, ainsi que David Goodsell pour ses illustrations_

⁸ Stadler AM *et al.* (2008) *J Am Chem Soc* 130, 16852-3

⁹ Jasnin M *et al.* (2011) in *Water: the Forgotten Biological Molecule*. Pan Stanford Publishing, 165-77

Water in the Solar System

Thérèse Encrenaz

LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, Université Paris Diderot, Paris, France;
email: therese.encrenaz@obspm.fr

Key Words

comets, infrared spectroscopy, planetary atmospheres, planetary surfaces, Solar System

Abstract

Water is ubiquitous in the Universe, and also in the Solar System. By setting the snow line at its condensation level in the protosolar disk, water was responsible for separating the planets into the terrestrial and the giant ones. Water ice is a major constituent of the comets and the small bodies of the outer Solar System, and water vapor is found in the giant planets, both in their interiors and in the stratospheres. Water is a trace element in the atmospheres of Venus and Mars today. It is very abundant on Earth, mostly in liquid form, but it was probably also abundant in the primitive atmospheres of Venus and Mars. Water is found in different states on the three planets, as vapor on Venus and ice (or permafrost) on Mars. Most likely, this difference has played a major role in the diverging destinies of the three planets.

1. INTRODUCTION

We are used to living with water in its three states: most often in liquid form, but also solid and vapor. This is because the temperature of the triple point ($T = 273.16$ K, $P = 0.006$ atm) is slightly above the mean terrestrial atmospheric temperature. In the form of liquid, water is a major constituent of many living bodies and was probably essential for the development of life. Is water present elsewhere in the Universe? Over the past decade, we have improved our knowledge about extraterrestrial water, with thanks in particular to Earth-orbiting IR satellites, first ISO (Infrared Space Observatory), and more recently with the *Spitzer Space Telescope* (*Spitzer*). Water is indeed ubiquitous in the Universe, from the nearest solar-system objects up to the most distant galaxies. There is a major difference with terrestrial water, however: In space, water is found only in two states, solid and vapor. So far we have found no firm evidence of liquid water elsewhere in the Universe, although we have some indication that liquid oceans might exist in some places or have existed in the past.

Why study extraterrestrial water? First, water is an abundant molecule in the Universe and has interesting chemical properties. Owing to its high dipole moment, liquid water is an excellent solvent that, by dissociating molecules into anions and cations, makes it a favorable medium for the development of complex chemical reactions. Water is in liquid form over a large temperature range, as compared to other molecules. For these reasons, liquid water has played an important role in the development of life on Earth, and possibly also in its appearance, although this is still an open question. The recent detection, over the past decade, of hundreds of extrasolar planets, naturally raises the question of possible life on these new objects. Searching for water, and in particular liquid water, is an attractive path to follow.

What do we know about water in the Universe? Solid or gaseous, water has been found in all sorts of celestial bodies: planets, satellites, and comets, but also cold dark clouds of the interstellar medium, young or evolved circumstellar disks, remote galaxies, and even solar dark spots, where its origin remains uncertain. The abundance of water in the Universe is not really a surprise, as it is a combination of two abundant atoms, H (by far the most abundant atom in the Universe) and O (less than a thousandth of H, but still the most abundant atom after H and He). Liquid water can be found in two types of astronomical bodies: (a) at the surface of Earth-like (i.e., solid) planets, provided the temperature is in the proper range, or (b) in the interior of planetary bodies, at high temperatures and pressures. In the Solar System, the first condition is filled today only by the Earth, but it seems to have been also fulfilled in the past history of Mars; and this might be the case also on some extra-solar Earth-type planets, if such objects are detected at the proper distance from their star. The second condition could be relevant to the interior of outer solar-system satellites, like Europa, and possibly others, like Saturn's moon Enceladus, or any extra-solar water-rich body of this kind, extra-solar planet, or satellite, if such exists.

In this review, I examine the various forms of water in the Solar System, and focus on its past and present role in the formation and evolution of planetary bodies. I first review the properties of the water molecule and analyze the methods used to detect and analyze extraterrestrial water, either solid or vapor (Section 2). Section 3 addresses the formation scenario of the Solar System, and the key role played by water in separating, through the snow line limit, the terrestrial planets from the giant ones. I then follow water from the outer Solar System (Section 4) to the comets (Section 5), the asteroids (Section 6), and finally the terrestrial planets (Section 7). In conclusion, I address the question of searching for water in extrasolar planets (Section 8). Conclusions and perspectives are summarized in Section 9.

9. CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

The study of water in the Solar System leads to two important conclusions. First, water played a major role in the formation of solar-system planets, by separating, at the level of the snow line, the giant planets from the terrestrial ones. The detection of water ice in outer satellites and comets, as well as the detection of water vapor in the tropospheres and stratospheres of the giant planets, illustrate that water is a major constituent of the outer solar system. Second, its influence was also crucial in the diverging evolution of the terrestrial planets by being in different states in different objects. Also, we have seen that water is a key diagnostic for probing the initial conditions of solar-system bodies through two parameters, the D/H ratio and the ortho-para ratio, which both bring constraints on the temperature formation of these bodies. The high D/H enrichment on Venus and Mars is an indicator of a massive water escape over their history. In a more recent past, the history of water on Mars, through the distribution of glacial remnants at its surface, is a diagnostic of the planet's paleoclimate.

We have seen that the unique role of water in the formation and evolution of the Solar System can be understood from the unique physical and chemical properties of the molecule: its high cosmic abundance, its high dipole moment, its condensation at a relatively high temperature, and the wide temperature range of its liquid state, etc. It is thus reasonable to consider that water, most likely, can play the same key role in extrasolar planetary systems.

What is the future of water observations in the Solar System and beyond? With its extended spectral coverage in the far-IR and submillimeter range and its high spectroscopic capabilities, the *Herschel* satellite will be a unique tool to detect water emissions and to study the D/H ratio and the ortho-para ratio in solar-system objects. A key *Herschel* program will be devoted, in particular, to activity in comets and distant asteroids, the D/H ratio and the ortho-para ratio in some comets, and the O source in the giant planets. In particular, measuring D/H in Kuiper-belt comets will allow us to compare this parameter with the value already measured in three Oort-cloud comets, and to derive constraints on their respective origins. Mapping the O source in the giant planets, studying its temporal variability, and determining the vertical water stratospheric distribution will allow us to better constrain the origin, local or interplanetary, of the O source. High-resolution submillimeter observations of Jupiter's water emission with the SWAS satellite (Bergin et al. 2000; Figure 11) illustrate the capabilities of this technique for retrieving the vertical stratospheric distribution.

The ongoing in-situ space exploration of solar-system objects will hopefully help us to solve pending problems. One problem is the possible existence of active volcanism on Venus. In a local outgassing, the D/H measured in this region should be very low, as compared to the high value measured globally in the atmosphere. In-situ measurements of Venus's atmosphere would also help us to understand how atmosphere of Venus escaped. On Mars, local measurements of D/H over the polar caps and at mid-latitudes would help us to better understand the sources and sinks of the Martian water cycle. The exploration of comet Churyumov-Gerasimenko by the Rosetta mission, to be performed in the next decade, will hopefully bring a mine of new results regarding the coma and nucleus properties. In particular, the onset of the cometary activity will be monitored, and the thermodynamics of the inner coma will be studied. The D/H ratio, as well as other elemental and isotopic ratios, will be accurately measured by in-situ mass spectroscopy. Another space mission, New Horizons, will bring the first in-situ observations of Pluto and other TNOs within a decade from now.

collec
D/H)
constr
return
horizo

Annu. Rev. Astro. Astrophys
by Observatoire

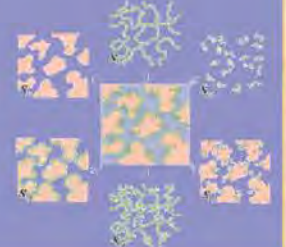
La longueur de diffusion b traduit l'intensité de l'interaction neutron-atome. Elle est reliée à la section efficace σ par la relation $\sigma = 4ab^2$.
A chaque élément sont associées une section efficace cohérente et une section efficace incohérente.

RX: Interaction avec le nuage électronique

Neutrons: Interaction avec les noyaux.

Substitution H/D - Variation de contraste

Diffusion des Neutrons aux Petits Angles: Calcul du contraste vu par les neutrons pour des échantillons différenciés et idéalement deutérés, d'un même système (polymères + eau // huile + surfactant). Chaque échantillon renseigne sur l'une des composantes de la fonction de diffusion totale du système.



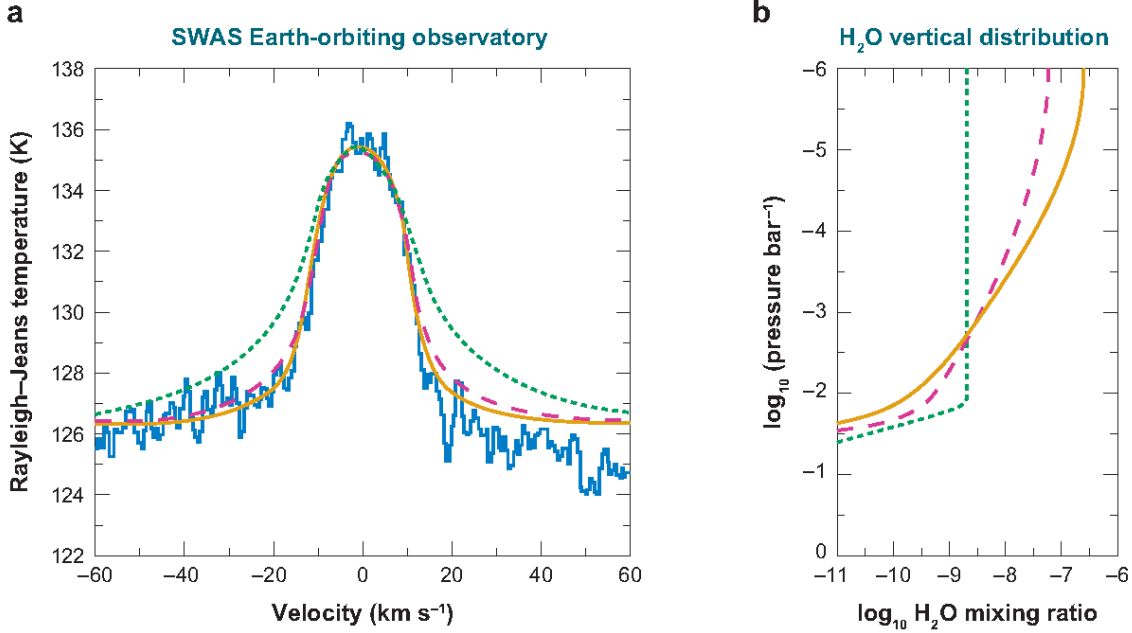


Figure 11

(a) The 557 GHz transition of water vapor observed in Jupiter's stratosphere with the SWAS Earth-orbiting observatory. The spectral resolution is sufficient to resolve the line, which allows a retrieval of the (b) H₂O vertical distribution. The figure is taken from Bergin et al. (2000).

La planète Mars : un autre destin

Thérèse Encrenaz (therese.encrenaz@obspm.fr)

LESIA, Observatoire de Paris, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon Cedex.

L'exploration de la planète Mars, entreprise par les astronomes dès l'apparition de la lunette de Galilée au début du XVII^e siècle, a vécu un nouvel essor avec l'avènement de l'exploration spatiale au cours des années 1960.

Plus petite et plus froide que la Terre, Mars a sans doute connu au début de son histoire une atmosphère plus dense, plus chaude et plus humide qu'aujourd'hui, susceptible d'abriter l'eau liquide. Puis la planète a vu son activité interne décroître avant la fin du premier milliard d'années, et son atmosphère s'est raréfiée.

Aujourd'hui, Mars est plus que jamais au cœur de l'exploration planétaire ; l'enjeu est de déterminer si la vie a pu apparaître au début de son histoire et si nous pouvons espérer y découvrir un jour des traces de vie fossile.

Mars et la Terre, deux mondes différents

La planète Mars, sœur de la Terre, a depuis toujours, suscité l'intérêt des observateurs. Associée au dieu de la guerre en raison de sa couleur rouge, elle a alimenté, jusqu'au siècle dernier, les rêves des philosophes et des scientifiques autour d'autres mondes habitables. C'est que notre voisine présente de remarquables analogies avec la Terre. Sa surface, couverte de déserts, de volcans, de canyons et de réseaux de vallées desséchées, évoque par endroits à s'y méprendre certains paysages terrestres ; sa période de rotation et son obliquité, proches de celles de la Terre, lui confèrent des effets saisonniers qui rappellent ceux que nous connaissons.

Cependant, les deux planètes présentent aussi deux différences notoires. Tout d'abord, Mars, située à 1,5 unités astronomiques du Soleil, est plus froide que la Terre ; sa température moyenne (fortement modulée par les effets saisonniers) est d'environ 230 K, soit - 43°C. De plus, avec un rayon d'environ la moitié du rayon terrestre, Mars est dix fois moins massive. En conséquence, son champ de gravité et son énergie interne sont bien moindres que sur Terre, limitant à la fois le dégazage interne et l'apport de gaz par les météorites. Ceci explique, mais seulement partiellement, le caractère très ténu de son atmosphère. Composée majoritairement de gaz carbonique, celle-ci affiche une pression moyenne de 6 hectopascals ($\sim 6 \cdot 10^{-3}$ atm) en surface. Du fait de la basse température, une fraction importante (environ 30%) se condense alternativement aux pôles en hiver, en fonction du cycle saisonnier, formant des calottes polaires de neige carbonique (fig. 1). Ces fortes variations de pression induisent à leur tour des vents violents, des tempêtes de poussière et une météorologie très active.

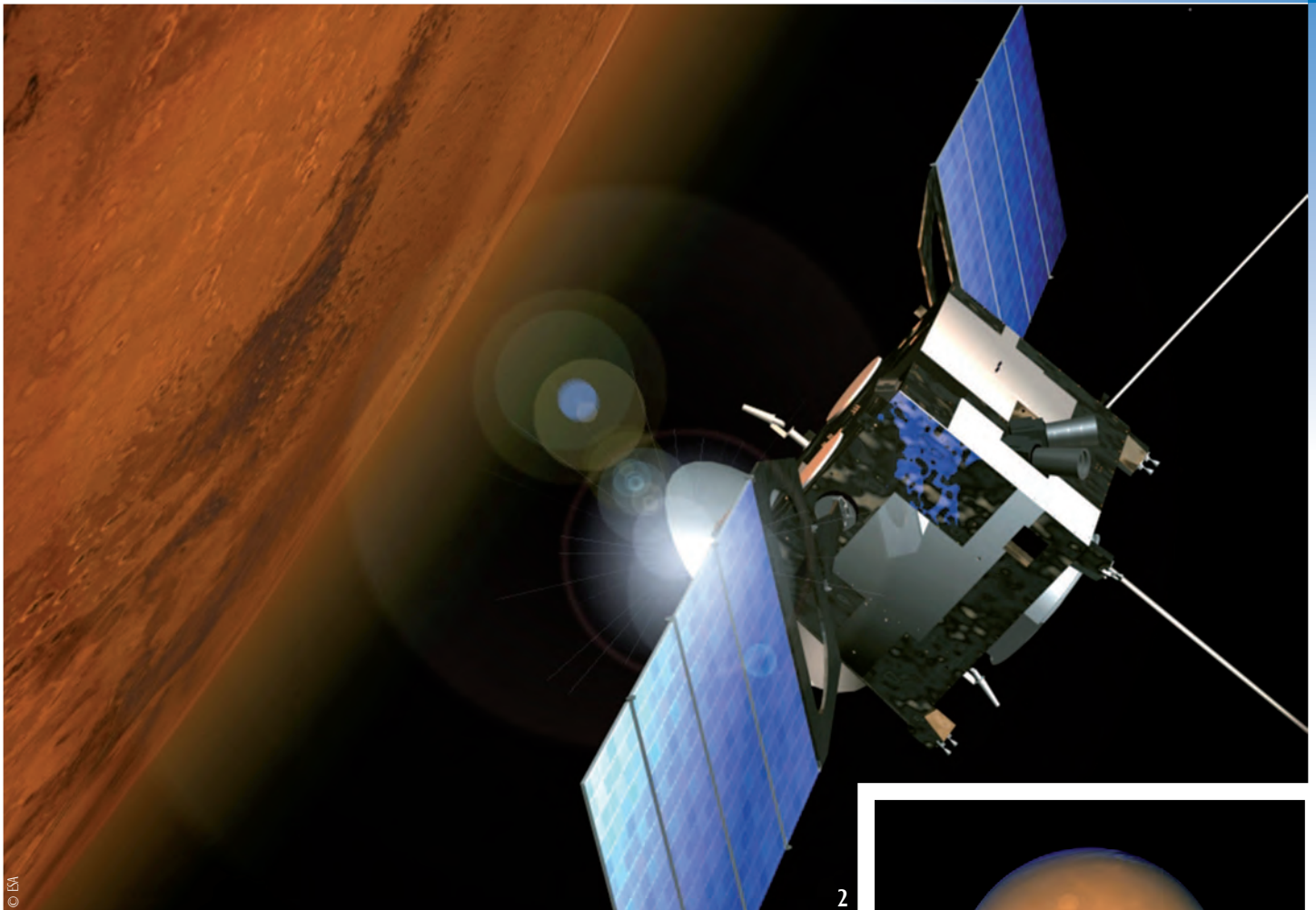
La planète Mars présente, par rapport à la Terre, un intérêt particulier. Sur Terre, la tectonique des plaques a effacé la plupart des indices témoignant des premiers âges de son histoire. Or Mars, du fait de sa plus

faible masse et de son énergie interne réduite, n'a pas connu de tectonique des plaques. Si les plaines du Nord, plus basses, ont été recouvertes de lave suite aux épisodes volcaniques qui ont ponctué son histoire, la planète a conservé, surtout dans l'hémisphère Sud, une surface très ancienne, que l'on peut dater par le comptage des cratères météoritiques qui la recouvrent. Les impacts de météorites ont été particulièrement nombreux, du fait du caractère très ténu de l'atmosphère. On peut ainsi espérer déchiffrer l'histoire de la planète à partir des observations d'aujourd'hui, ce qui s'avère très difficile pour la Terre, dont les fonds marins sont en permanence renouvelés par la tectonique des plaques⁽¹⁾.

L'exploration de Mars : des télescopes aux sondes spatiales

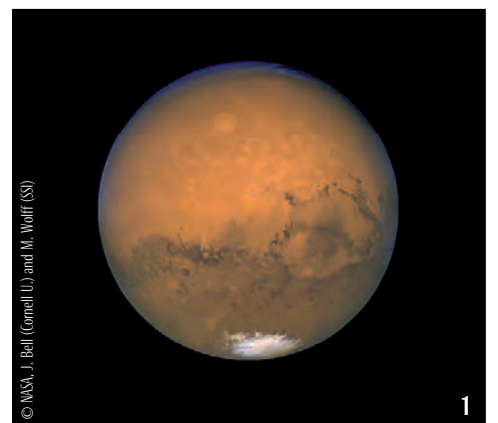
L'observation suivie de Mars date du XVII^e siècle, avec l'apparition de la lunette de Galilée. Huygens et Cassini dessinent les taches du disque martien, mesurent sa période de rotation et découvrent les calottes polaires. Les observations se précisent au siècle suivant, avec l'utilisation des télescopes d'Herschel. En 1877, l'astronome italien Schiaparelli réalise une cartographie des régions martiennes et croit découvrir des traces rectilignes (« canali »), interprétées à tort par certains comme des traces de vie intelligente. Malgré des observations contradictoires, le mythe perdurera jusqu'à l'arrivée des premières sondes spatiales.

L'exploration spatiale de Mars, menée simultanément par les États-Unis et l'Union Soviétique, débute dans les années 1960, en pleine guerre froide. Les échecs sont nombreux de part et d'autre, mais surtout pour l'Union Soviétique qui perd la plupart de ses sondes. La NASA enregistre un premier succès en 1965 avec les premières images du sol martien prises par Mariner 4 ; cette sonde nous apprend aussi que l'atmosphère de Mars, composée essentiellement de gaz carbonique, est



1. La planète Mars, photographiée par la caméra du Télescope Spatial Hubble. L'image a été prise le 27 août 2003, au moment où la planète était la plus proche de la Terre (à 55 757 930 km) en 60 000 ans. Son diamètre apparent était supérieur à 20 secondes d'arc, ce qui correspond à une géométrie particulièrement favorable. Sa surface est principalement recouverte de silicates et d'oxydes de fer. La calotte de neige carbonique est bien visible au pôle Sud.

2. La sonde Mars Express de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Lancée en juin 2003, elle a commencé ses observations en janvier 2004 et reste opérationnelle aujourd'hui. Sa charge instrumentale comporte notamment une caméra à haute résolution, un spectromètre imageur infrarouge (OMEGA) et un spectromètre ultraviolet (SPICAM). Les deux derniers instruments ont été réalisés sous responsabilité française.



extrêmement ténue. À la phase des survols succède celle des mises en orbite, avec les « orbiteurs », puis celle des sondes de descente, d'abord fixes (les "landers"), puis mobiles (les "rovers"). En 1972, nouvelle étape décisive : l'orbiteur Mariner 9 cartographie la planète, dévoile la présence de volcans très élevés et d'un immense canyon, Valles Marineris. En 1976, nouveau succès de la NASA : les deux sondes Viking se mettent en orbite autour de la planète et délivrent deux modules de descente qui analyseront la surface pendant plusieurs années. L'objectif affiché de la mission est la recherche de la vie sur Mars. La réponse est négative, ce qui aura pour effet, pour la NASA, de suspendre l'exploration de Mars pendant une vingtaine d'années... La

mission Viking n'en constitue pas moins un immense succès scientifique et technologique, et la base de données qui en résulte fait encore référence aujourd'hui.

L'exploration, toujours ponctuée d'échecs, prend une nouvelle dimension à la fin des années 1990, avec le succès du premier rover américain Pathfinder et de l'orbiteur Mars Global Surveyor. Celui-ci est suivi de Mars Odyssey puis des rovers Spirit et Opportunity, lancés, toujours par la NASA, en 2003. La même année, l'Europe envoie sa première mission martienne, l'orbiteur Mars Express (fig. 2), qui est toujours en opération autour de Mars. L'exploration se poursuit du côté américain avec Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) et la station Phoenix, déposée au voisinage du pôle.

Il faut mentionner enfin que les observations télescopiques de Mars n'ont pas perdu leur intérêt pour autant, bien au contraire. Grâce aux progrès de l'instrumentation qui équipe des télescopes de plus en plus grands, les observations réalisées, notamment en spectroscopie à haute résolution, apportent un complément précieux aux données spatiales. Bien sûr, il est impossible d'observer depuis le sol et l'orbite terrestre les détails de la surface martienne mis en évidence par les moyens spatiaux. Alors que les images prises par les caméras en orbite martienne atteignent une précision de l'ordre du mètre, celles du télescope Hubble (fig. 1) ou des grands télescopes au sol ont une précision de l'ordre de la vingtaine de kilomètres au mieux.





Volcans, canyons et plaines

Grâce aux sondes spatiales, nous avons aujourd'hui une très bonne connaissance de la topographie martienne, de sa géologie, et aussi, depuis Mars Express, de sa minéralogie. La première caractéristique de la surface martienne est ce que l'on appelle la dissymétrie Nord-Sud : l'altitude des plaines du Nord est, en moyenne, inférieure de 5 km à celle des plateaux de l'hémisphère Sud. L'origine de cette dissymétrie est mal comprise : elle pourrait résulter d'une asymétrie des mouvements convectifs du manteau ayant conduit à une différenciation de l'épaisseur de la croûte, dont les mesures indiquent une épaisseur plus grande au sud qu'au nord. Une autre cause possible pourrait être un bombardement météoritique plus violent dans l'hémisphère Nord. Mais dans les deux cas, on ne voit pas l'origine possible de ces différences.

Les volcans de Mars sont spectaculaires. Les plus grands d'entre eux sont situés sur le vaste plateau de Tharsis, de 5000 km de diamètre, à près de 5 km d'altitude à proximité de l'équateur. Le Mont Olympe (fig. 3), qui culmine à près de 27 km, est le plus grand volcan connu dans le système solaire. Cette altitude élevée, par rapport aux volcans terrestres, s'explique par le champ de gravité relativement faible de la planète (soit trois fois plus faible que sur Terre). Comme les autres volcans du plateau de Tharsis, Olympus Mons est un « volcan-bouclier », comparable aux volcans hawaïens. Leur grande superficie, ainsi que leurs pentes très faibles et régulières, témoignent de la nature très fluide de la lave qui les a construits.

Autre surprise du relief martien : l'immense canyon Valles Marineris, long de 3500 km, large de 300 km et profond de 7 km. Cette faille, résultant de l'extension de la croûte lors du bombement du plateau de Tharsis, présente certaines analogies, à bien plus grande échelle, avec le grand rift est-africain.

Enfin, autre découverte majeure des sondes Mariner 9 et Viking : les multiples traces de rivières aujourd'hui asséchées. Certaines, dans les terrains les plus anciens, présentent de véritables réseaux de vallées ramifiées. D'autres, appelées « vallées de débâcle », semblent avoir été formées à la suite d'écoulements violents. Nous verrons que ces reliefs sont des indices précieux qui témoignent, avec d'autres, de la présence d'eau liquide à la surface de Mars dans le passé de la planète.

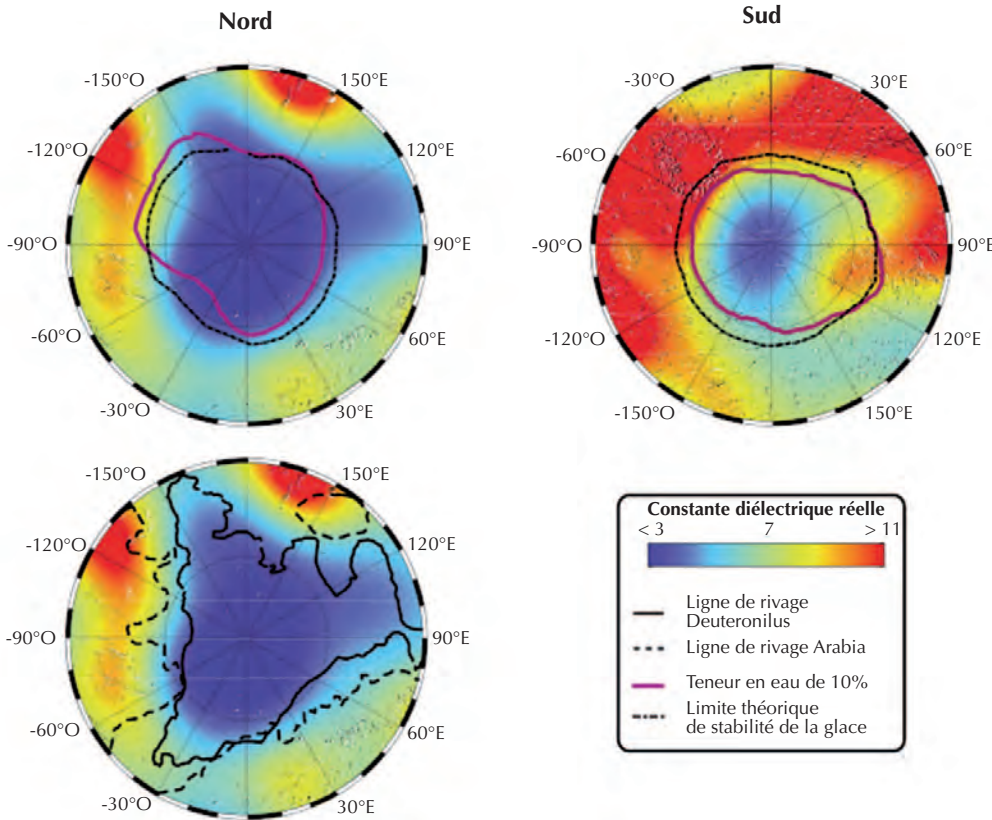


3. Le volcan Olympus Mons (d'un diamètre d'environ 600 km), photographié par la sonde Viking 1.

Grâce aux cartes minéralogiques apportées récemment par les sondes Mars Express puis MRO, nous avons pu préciser l'histoire de l'eau sur la planète Mars. Le spectromètre imageur infrarouge OMEGA embarqué sur Mars Express a en effet détecté par endroits des argiles, mais toujours dans des terrains très anciens ; il a aussi identifié des sulfates à proximité de régions chaotiques et de vallées de débâcle. Ces résultats ont été confirmés par les rovers Spirit et Opportunity. Or, la formation d'argiles nécessite que l'eau ait coulé sur Mars de manière continue et prolongée (sur plusieurs dizaines de milliers d'années, voire plus), tandis que la présence de sulfates pourrait être liée à des écoulements violents, mais plus espacés dans le temps. L'histoire de l'eau liquide sur Mars pourrait donc s'écrire en deux volets : une présence prolongée au tout début de l'histoire de la planète, et plus épisodique ensuite, peut-être liée à des phénomènes volcaniques intermittents.

Revenons à la dissymétrie Nord-Sud de Mars. Les plaines du Nord, aujourd'hui recouvertes de lave, pourraient-elles avoir été dans le passé recouvertes d'un vaste océan boréal ? L'idée a été émise par certains

scientifiques, mais fait encore aujourd'hui l'objet de débats. Un indice fort en faveur de cette hypothèse a été la mise en évidence, par le laser altimètre de l'orbiteur MGS, au niveau de la zone séparant les régions élevées des plaines plus basses, de plateaux d'altitude remarquablement constante sur des distances de l'ordre du millier de kilomètres, qui pourraient constituer les « lignes de rivage » d'un ancien océan. L'objection majeure à cette hypothèse est l'absence de détection de carbonates dans les plaines du Nord, alors que ceux-ci auraient dû se former par transformation du gaz carbonique, comme sur la Terre. Il est cependant possible que les carbonates soient enfouis sous la lave ou le régolite, fine poussière de silicates apportée par les vents, qui recouvre la surface martienne. Il est possible aussi que l'acidité probable de l'eau, dont semble témoigner la présence de sulfates, ait empêché la formation de carbonates ; le débat reste ouvert. Très récemment, le radar MARSIS de la sonde Mars Express a apporté un nouvel élément au débat, avec la découverte de sédiments riches en glace sous la surface des plaines du Nord. Ces sédiments pourraient être la signature de l'ancien océan boréal longtemps recherché (fig. 4).



4. Carte de la constante diélectrique du sous-sol martien, mesurée par le radar MARSIS de Mars Express dans les régions polaires. L'instrument sonde le sous-sol de Mars à une profondeur de 60 à 80 mètres. Le pôle Nord est au centre des deux figures de la partie gauche, et le pôle Sud est au centre de la figure de droite. Autour du pôle Nord, dans la région centrale en bleu, la constante diélectrique est faible, ce qui indique la présence de glace d'eau ou d'un matériau sédimentaire de faible densité. Cette région coïncide remarquablement avec les tracés des lignes de dichotomie séparant les plaines basses des régions plus élevées, en traits pleins et en pointillés sur la figure du bas. Sur les figures du haut, la ligne rouge correspond à une abondance de H₂O de 10% (mesurée par l'abondance des atomes d'hydrogène présents dans le sous-sol), et la courbe noire correspond à la limite théorique de stabilité de la glace en surface (estimée à partir de l'observation des polygones de surface). La bonne correspondance de ces données est un indice plausible de la signature d'un ancien océan boréal qui aurait recouvert ces plaines il y a trois milliards d'années. (La figure est extraite de J. Mouginot *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **39** (2012) L02202.)

Nous savons peu de choses de l'intérieur de la planète Mars ; en effet, nous ne disposons pas de réseau de sismomètres à sa surface. Une information nous est cependant fournie par l'analyse de certaines météorites, recueillies sur Terre, qui sont fort probablement d'origine martienne. Cette origine est attestée par la composition des gaz qu'elles contiennent, très similaires à celles mesurées par Viking dans l'atmosphère de Mars. L'analyse de ces météorites, qui proviennent de la croûte martienne, fournit des informations sur l'âge de la formation de la croûte (environ 100 millions d'années après la formation du système solaire), ainsi que sur la taille et la composition du noyau. D'après les spécialistes, ce noyau serait composé majoritairement de fer, avec une forte proportion de soufre et de nickel. La présence de soufre ayant pour effet de baisser la température de solidification de l'alliage Fe-Ni-S, cette mesure pourrait impliquer que le noyau de la planète est encore liquide.

Lancée en 1996, la sonde Mars Odyssey a fait une découverte spectaculaire, alors qu'elle survolait la surface à basse altitude. Alors que la planète est aujourd'hui dénuée de champ magnétique intrinsèque,

la sonde a mis en évidence un champ magnétique rémanent, présent uniquement dans les terrains les plus anciens. Ce champ « fossile » est la preuve que la planète a possédé un champ magnétique propre au tout début de son histoire. Le champ magnétique était alors généré par dynamo au sein d'un milieu fluide en rotation, suffisamment chaud pour être le siège de mouvements convectifs. Compte tenu de la faible masse de la planète, le noyau de Mars a dû se refroidir rapidement (tout en restant peut-être liquide comme nous l'avons vu), avant la fin du premier milliard d'années. Le champ magnétique propre de la planète a disparu, et il ne reste que les vestiges du champ rémanent. Il est intéressant de noter que les champs magnétiques mesurés sur Mars sont environ dix fois plus forts que celui associé à la plus grande anomalie terrestre. Ces valeurs élevées sont sans doute liées au fait que la croûte martienne est relativement proche de la frontière noyau-manteau à l'intérieur de Mars ; elles suggèrent que le champ magnétique propre de Mars, au début de son histoire, a pu être beaucoup plus intense que le champ terrestre.

L'atmosphère de Mars

Comme celle de Vénus, l'atmosphère de Mars est composée à 95% de gaz carbonique, avec quelques pourcents d'azote moléculaire et une petite fraction d'argon. Cette composition, à laquelle s'ajoutait l'eau au début de l'histoire des deux planètes, est sans doute aussi celle que possédait la Terre à son origine. Dans le cas de la Terre, l'eau étant sous forme liquide, le gaz carbonique s'est trouvé piégé au fond des océans sous forme de calcaire, par la réaction $\text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-) \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Cette réaction, présente dès le début de l'histoire de la Terre, s'est trouvée ensuite accélérée par la présence d'organismes vivants. Sur Mars et Vénus, l'eau n'est plus présente aujourd'hui qu'en infime quantité ; reconstruire son histoire, sur les deux planètes, est l'un des enjeux de la planétologie d'aujourd'hui. Sur Mars, l'eau condense alternativement en hiver au pôle Nord et au pôle Sud, avec un rapport de la pression partielle à la pression totale qui ne dépasse pas 0,1%. D'autres constituants atmosphériques mineurs sont présents sur Mars. Pour l'oxygène (~ 0,13%) et le monoxyde de carbone (~ 0,07%), tous deux non condensables, ce rapport varie avec les saisons.



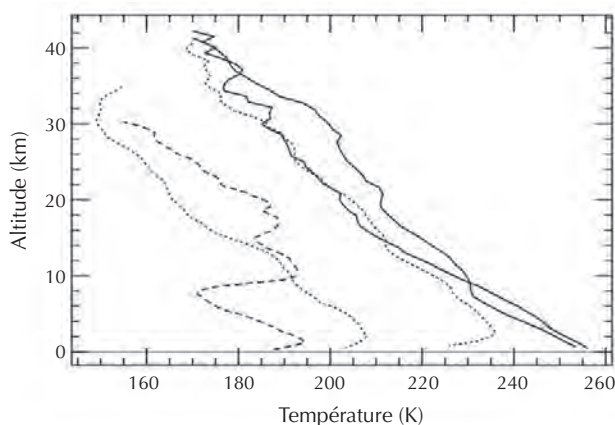


Il en est de même de O_3 et de H_2O_2 dont la présence résulte de la photodissociation de H_2O . La quantité d'ozone présente dans l'atmosphère de Mars (moins de 1 ppm en altitude) est bien moindre que sur la Terre, et pour cause : l'oxygène terrestre provient de l'apparition de la vie. Quant à H_2O_2 , cet oxydant puissant est sans doute à l'origine de l'absence de molécules organiques à la surface de Mars, absence constatée par les modules Viking. C'est aussi lui qui a donné à Mars sa couleur rouge en oxydant les minéraux de sa surface.

Le profil thermique de l'atmosphère martienne, comme ceux de la Terre et de Vénus, est caractérisé par une troposphère convective dans laquelle la température décroît à mesure que l'altitude augmente (fig. 5). Comme dans le cas de Vénus, elle est surmontée d'une mésosphère plus ou moins isotherme ; cette situation est différente de celle de la Terre, où la présence d'ozone induit un réchauffement au niveau de la stratosphère. L'analogie des structures thermiques se retrouve aussi dans la météorologie des trois planètes. La différence de température entre l'équateur et les pôles entraîne la présence de cellules convectives ; à l'équinoxe, l'atmosphère est animée de mouvements ascendants à l'équateur et descendants à haute latitude, tandis qu'une seule cellule apparaît au solstice, avec mouvement ascendant dans l'hémisphère d'été. Du fait de la faible masse de son atmosphère, la planète Mars réagit très rapidement aux variations de l'insolation. Les contrastes de température sont élevés et les vents peuvent atteindre 100 m/s. Ils sont

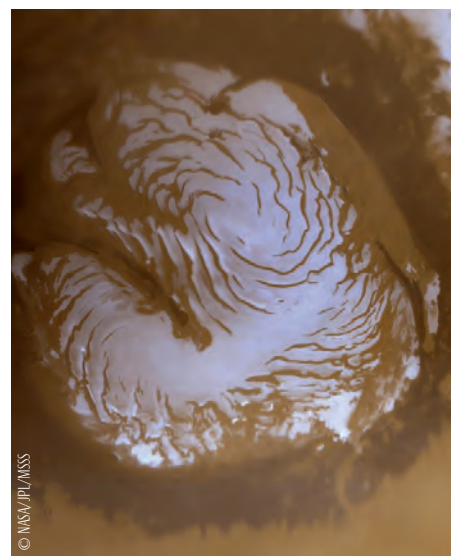
à l'origine des champs de dunes que l'on observe dans les régions de basse altitude, et aussi de spectaculaires tempêtes de poussières qui peuvent recouvrir la planète entière. Celles-ci se produisent principalement lors de l'été austral, lorsque la planète est au plus proche du Soleil ; c'est alors que les contrastes de température sont les plus élevés.

Bien que la vapeur d'eau martienne soit très peu abondante, son étude nous apporte un diagnostic décisif concernant l'histoire de l'eau sur Mars. Ce diagnostic nous est fourni par le rapport d'abondance entre l'eau « lourde » HDO et l'eau « ordinaire » H_2O , dont la valeur mesurée sur Mars est 5 fois supérieure à celle de la Terre. Comment interpréter ce résultat ? Très vraisemblablement, cet enrichissement en deutérium résulte d'un échappement différentiel entre HDO et H_2O (les deux molécules étant sous forme gazeuse), au cours de l'histoire de Mars, HDO (légèrement plus lourde) s'échappant moins facilement que H_2O . Cet enrichissement isotopique ne s'est pas produit dans le cas de la Terre, car l'eau y est toujours restée sous forme liquide⁽²⁾. Dans le cas de Mars, l'enrichissement en deutérium pourrait impliquer, selon les spécialistes, une pression de vapeur d'eau égale à plusieurs centaines d'hectopascals. Voilà encore un indice qui plaide en faveur d'une atmosphère primitive plus dense et plus humide. La présence de vapeur d'eau en abondance aurait favorisé l'effet de serre, augmentant la température, qui aurait alors été compatible avec la présence d'eau liquide à la surface de Mars au début de son histoire.



5. Exemples de profils thermiques de l'atmosphère de Mars dans la troposphère, mesurés par l'expérience de radio-occultation de la sonde Mars Global Surveyor. Traits pleins : deux profils mesurés à moyennes latitudes, été austral, fin d'après-midi. Pointillés : mêmes conditions, profils de nuit. Le profil à forte oscillation (ligne en tirets) a été obtenu au-dessus de Tharsis ; ces ondes de grande amplitude sont sans doute provoquées par la présence de nuages de glace d'eau. La limite entre la troposphère et la mésosphère se situe à une altitude d'environ 50 km ; au-dessus de ce niveau, le profil thermique est plus ou moins isotherme. (Figure extraite du chapitre "Thermal structure and Composition" par M. D. Smith et al., dans *Mars atmosphere*, R. Haberle et al., editors, Cambridge University Press (2012), sous presse.)

Les évolutions du climat martien



6. La calotte polaire Nord de Mars en été, photographiée en 1999 par la caméra à haute résolution MOC de la sonde Mars Global Surveyor. Les sédiments accumulés autour du pôle Nord sont creusés de sillons en spirales. Les structures alternées sont sans doute le résultat de variations climatiques globales liées aux fluctuations périodiques orbitales de la planète. L'étendue de la calotte polaire Nord est d'environ 1100 km.

Revenons au passé récent de Mars. Nous en possédons un nouveau diagnostic, avec la morphologie des sédiments polaires. Ceux-ci présentent en effet, au nord comme au sud, une série de stries, alternativement claires et sombres (fig. 6). Quelle peut en être l'origine ? Selon l'interprétation la plus plausible actuellement en vigueur, ces stries sont la signature de variations périodiques du climat associées à des variations de l'obliquité de la planète. Des simulations numériques récentes, menées en particulier au Bureau des Longitudes à Paris, ont mis en évidence une oscillation périodique de l'obliquité (c'est-à-dire l'angle que fait l'axe de rotation planétaire avec la normale à l'écliptique), celle-ci pouvant atteindre 60° . Dans ces conditions, les modèles climatiques montrent que la glace se déplace vers les basses latitudes pour former des glaciers ; des traces en ont été trouvées au pied des volcans de Tharsis, en particulier. Selon ce modèle, les stries des sédiments polaires traceraient les évolutions de l'obliquité depuis la dernière période d'obliquité maximale, il y a quelque 20 millions d'années. Elles contiendraient ainsi les archives des quelques derniers millions d'années...

L'histoire de Mars : une ébauche de scénario

À partir de ce que nous avons appris de la planète actuelle, essayons de retracer ce qu'a pu être son histoire. Au départ, un scénario de formation analogue à celui de la Terre et de Vénus : une formation à partir de particules relativement denses, au sein du disque protoplanétaire. Une différence notable : Mars est deux fois plus petite et dix fois moins massive que ses deux voisines. Selon une simulation dynamique récemment développée à l'Observatoire de Nice, la croissance de Mars aurait pu être stoppée par la proximité de Jupiter, qui aurait migré vers l'intérieur du système solaire avant de repartir sous l'influence de Saturne. À l'origine, les atmosphères des trois planètes ont dû avoir la même composition globale : du gaz carbonique, un peu d'azote et une certaine quantité d'eau. Cette eau est restée présente sur la Terre, car la température était compatible avec la formation d'océans.

De nombreux indices plaident en faveur d'une atmosphère primitive martienne plus dense et plus humide qu'aujourd'hui. Nous les avons cités plus haut : les reliefs des vallées desséchées, la présence d'argiles, l'enrichissement en deutérium... Comment et pourquoi l'atmosphère primitive a-t-elle disparu ? Une cause possible pourrait être un impact géant ou de multiples chutes météoritiques : on sait que la planète, comme tous les corps du système solaire, a connu un bombarde-

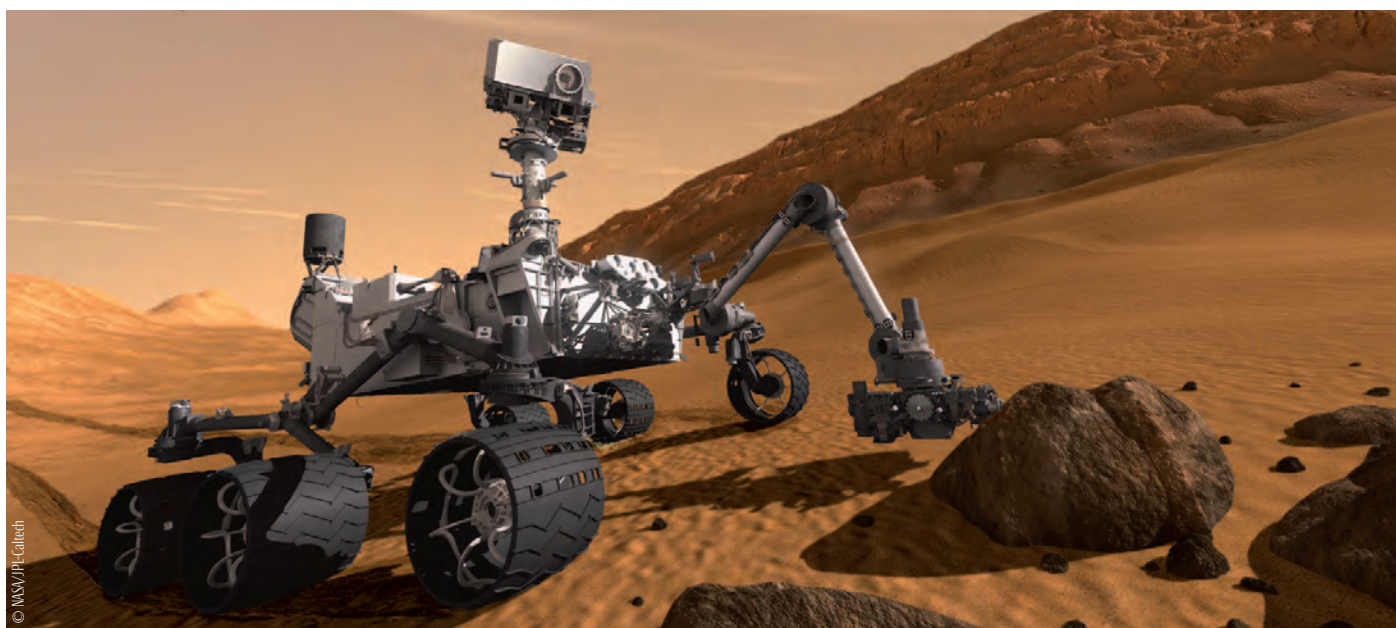
ment intense il y a 3,8 milliards d'années. Une autre cause possible est l'échappement atmosphérique, suite à l'extinction de la dynamo et à la disparition du champ magnétique ; la magnétosphère protège en effet l'atmosphère de l'effet du vent solaire et s'oppose à son échappement. Une troisième cause possible pourrait être le piégeage du gaz carbonique dans la surface au contact de l'eau liquide, selon un processus comparable à celui de la formation des calcaires terrestres. Dans ce cas, la surface devrait posséder une quantité importante de carbonates. De telles quantités, nous l'avons vu, n'ont cependant pas été détectées. Quant à l'eau, elle a pu s'échapper partiellement, mais une fraction est restée piégée dans le sous-sol martien ; on la retrouve sous la forme de pergélisol, particulièrement abondant à haute latitude. Il resterait cependant à évaluer la quantité globale d'eau présente aujourd'hui en sous-sol.

Après la période chaude et humide et le bombardement massif, la planète a connu une période de volcanisme et d'activité tectonique intenses et épisodiques, marquée en particulier par la formation du bouclier de Tharsis, du canyon Valles Marineris, des terrains chaotiques et des vallées de débâcle. Au cours de cette longue période, qui court de - 3,8 milliards d'années à il y a quelque cent millions d'années, l'eau liquide a pu couler épisodiquement à la surface de la planète, à l'occasion de phénomènes volcaniques ou tectoniques violents et intermittents. Dans un passé plus récent, le climat

martien a été modulé au gré de l'évolution périodique de l'obliquité de la planète, faisant migrer la glace d'eau alternativement de l'équateur aux pôles.

Le futur de l'exploration de Mars

Quels sont les grands enjeux de l'exploration future de Mars ? La question qui passionne la communauté scientifique et, bien au-delà, le grand public, est la recherche d'une vie, passée ou présente. C'était déjà l'objectif de la mission Viking dans les années 1970, mais la quête s'est révélée négative, la recherche s'étant limitée à la surface de Mars. Nous savons aujourd'hui que le rayonnement UV solaire, pénétrant jusqu'à la surface de Mars, aurait pour effet de détruire toute molécule organique. Le sol de Mars est, de plus, oxydé en profondeur, du fait de la présence d'oxydants actifs comme H_2O_2 . Nous savons aussi que l'eau a coulé en abondance dans les terrains les plus anciens, surtout situés dans l'hémisphère Sud. C'est donc à ces endroits qu'il faut rechercher des traces éventuelles de vie fossile ; ainsi, la mission Mars Science Laboratory, lancée par la NASA le 26 novembre 2011, ira se poser en août 2012 à proximité du cratère Gale, proche de l'équateur, dans lequel des argiles et des sulfates ont été découverts. Le véhicule, rebaptisé Curiosity (fig. 7), se déplacera à la surface de Mars avec une autonomie et une panoplie d'instruments bien supérieures à celles des véhicules précédents, Spirit et Opportunity.



7. Le robot mobile Curiosity de la mission Mars Science Laboratory (vue d'artiste).



La configuration relative des orbites de la Terre et de Mars rend possible le lancement d'une mission spatiale environ tous les deux ans. Le lancement de Mars Science Laboratory devrait être suivi, à la fin 2013, par celui de MAVEN, orbiteur de la NASA destiné à l'étude de l'échappement atmosphérique martien, dans la perspective d'une meilleure compréhension de l'histoire de l'atmosphère martienne. À plus long terme, le programme ExoMars est le fruit d'une collaboration, actuellement en discussion entre l'ESA et l'agence spatiale russe Roskosmos. Selon le schéma initial, la mission comporte deux volets : un orbiteur avec lancement prévu en 2016, dédié à l'étude des gaz traces de l'atmosphère martienne, et un *rover* lancé en 2018, à vocation exobiologique, destiné à l'exploration en profondeur du sol martien. Suite à des contraintes budgétaires, le programme est actuellement en phase de rediscussion. Enfin, le but ultime de l'exploration martienne est le retour d'échantillons martiens. On pourra alors effectuer en laboratoire des études chimiques et minéralogiques aussi fines que celles réalisées aujourd'hui sur les météorites et les échantillons lunaires.

Une autre priorité scientifique est la compréhension de la structure interne de la planète Mars. Pour atteindre cet objectif, il faut disposer à la surface de Mars d'un réseau de sismomètres capables de détecter, comme sur la Terre, les différents types d'ondes sismiques. Une mission de ce type est actuellement à l'étude en partenariat entre les États-Unis et la France. ■

(1) Quant à Vénus, c'est l'ensemble de sa surface qui a été renouvelée par volcanisme au cours du dernier milliard d'années.

(2) Un tel effet est aussi observé sur Vénus, dans des proportions bien plus importantes : le facteur d'enrichissement est supérieur à 100 ! Ce résultat implique pour Vénus une atmosphère primitive très riche en eau. Cette eau s'est progressivement échappée par photodissociation, selon un mécanisme encore mal compris aujourd'hui.

Bibliographie

- M. Shapley Matthews *et al.*, *Mars*, University of Arizona Press (1992).
- N. Barlow, *Mars: An introduction to its interior, surface and atmosphere*, Cambridge University Press (2008).
- F. Forget *et al.*, *La planète Mars : Histoire d'un autre monde*, Belin, Paris (2006).

Sites web

- Missions spatiales vers Mars (Mars Exploration Program) : <http://mars.jpl.nasa.gov>
- Images de la planète Mars prises par des sondes spatiales (NSSDC Photo Gallery – Mars) : http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery