

Bulletin de l'Association des anciens et des amis du CNRS n°58

Auteur(s) : CNRS

Les folios

En passant la souris sur une vignette, le titre de l'image apparaît.

100 Fichier(s)

Les relations du document

Ce document n'a pas de relation indiquée avec un autre document du projet.□

Citer cette page

CNRS, Bulletin de l'Association des anciens et des amis du CNRS n°58, 2012-printemps

Valérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Consulté le 24/02/2026 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/214>

Copier

Présentation

Date(s)2012-printemps

Mentions légalesFiche : Comité pour l'histoire du CNRS ; projet EMAN Thalim (CNRS-ENS-Sorbonne nouvelle). Licence Creative Commons Attribution - Partage à l'Identique 3.0 (CC BY-SA 3.0 FR).

Editeur de la ficheValérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Information générales

LangueFrançais
CollationA4

Informations éditoriales

N° ISSN1268-1709

Description & Analyse

Nombre de pages100

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 09/10/2024

RAYONNEMENT DU CNRS



Bulletin de l'Association des Anciens et Amis du CNRS



emmes en Sciences



N° 58 - printemps 2012

Rayonnement du CNRS

Association des Anciens et des Amis du CNRS

FONDATEURS : PIERRE JACQUOT (1), CLAUDE PREJACQUES (1), CHARLES GABRIEL (1)
PRÉSIDENTS D'HONNEUR : PIERRE BAUDET, JEAN-BAPTISTE DONNET, EDMOND LISLE

BUREAU : PRÉSIDENT : MICHEL PETIT,
Vice-président : EDOUARD BREZN,
Secrétaire général : MARC GOUJON,
Trésorière : ANNE-MARIE BEZAT,

CONSEIL D'ADMINISTRATION : ANNE-MARIE BEZAT, FABRICE BONARDI, EDOUARD BREZN, JEAN-PIERRE CALESSA, HÉLÈNE CHARNASSE, SERGE FENEUILLE, PAUL GILLE, MARC GOUJON, JEAN-CLAude LEHMANN, CLAUDIO MARTINAY, DANIELE OUVER, MICHEL PETIT, PHILIPPE PINGAUD, FRANÇOISE PLENAT, MARIE-LOUISE SANSEVAN, PATRICK SAUBOST, GISELLE VERGNE.

MEMBRE EXTRÉIOR : ZHAN WEILOONG, VICE-PRÉSIDENT DE L'ACADEMIE DES SCIENCES DE CHINE.

COMITÉ DE RÉDACTION DU BULLETIN DE L'ASSOCIATION ET SITE INTERNET :

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : MICHEL PETIT, RÉDACTEUR EN CHEF : FABRICE BONARDI, SITE INTERNET ET WEBMESTRE : PHILIPPE PINGAUD

MEMBRES : JACQUELINE CHAVET-PLAOL, PAUL GILLE, CHRISTIAN GRALLET, ROBERT KANDEL, MARIE-FRANÇOISE LAFON, EDMOND LISLE, CLAUDIO MARTINAY, KARINE PENALBA, PHILIPPE PINGAUD.

ACTIVITÉS ET ADMINISTRATION : VISITES ET CONFÉRENCES : HÉLÈNE CHARNASSE, CHRISTIANE COUDRAY, MARIE-LOUISE SANSEVAN, VOYAGES : GISELLE VERGNE, SOLANGE DUPONT, RECENSEMENT DES VISITEURS ÉTRANGERS : MARIE DE REUL, SECRÉTARIAT : FLORENCE RIVIÈRE, PASCALE ZINÉSON

CORRESPONDANTS RÉGIONAUX : ALPES-D'AUVERGNE : MARIE-ANGÈLE PEROT-MOREL, ALSACE : LOTHARIE ZILLIE, JEAN-PIERRE SCHWAB, AQUITAIN : ROLAND CANET, PHILIPPE PINGAUD, BRETAGNE ET PAYS-DE-LOIRE : PATRICK SAUBOST, CENTRE-ORLÉANS : PAUL GILLE ET JEAN-PIERRE REGNAULT, CENTRE-POTIERS : SERGE SAPIN, CÔTE-D'AZUR : N., LANGUEDOC-ROUSSILLON : FRANÇOISE PLENAT, LIMOUSIN-AUVERGNE : ANTOINE TRÉMOUROIS, LYON-SÉ-ETIENNE : N., MIDI-PYRÉNÉES : N., CONSULTANT : RENÉ ROUZEAU, CENTRE-EST : BERNARD MAUDINAS, GÉRARD PIQUARD, NORD-PAS-DE-CALAIS ET PICARDIE : JEAN-CLAUDE VANHOUTTE, PROVENCE : JEAN-PAUL CALESSA

Membres d'honneur de l'Association

GUY AUBERT - BARUJ BENACERRAF, PRIX NOBEL - CATHERINE BRÉCHIGNAC - EDOUARD BREZN - ROBERT CHABAL
CLAUDE COHEN-TANNoudj, MÉDAILLE D'OR CNRS, PRIX NOBEL - YVES COPPENS - ANDREW HAMILTON, VICE-CHANCELLIER DE L'UNIVERSITÉ D'OXFORD
HENRY DE LUMLEY - CHRISTIANE DESROCHES-NOBLECOURT, MÉDAILLE D'OR CNRS - JACQUES DUCUNG - CLEOPATRE EL. GUINDY - SERGE FENEUILLE
ALBERT FEIT, MÉDAILLE D'OR CNRS, PRIX NOBEL - JACQUES FRIEDEL, MÉDAILLE D'OR CNRS - FRANÇOIS JACOB, PRIX NOBEL - FRANÇOIS KOURILSKY
NICOL LE DOUARIN, MÉDAILLE D'OR CNRS - JEAN-MARIE LEHN, MÉDAILLE D'OR CNRS, PRIX NOBEL - BERNARD MEUNIER
RUDOLPH MÖSSBAUER, PRIX NOBEL - PIERRE PAPON - JEAN-JACQUES PAYAN - NORMAN RAMSEY, PRIX NOBEL - CHARLES TOWNES, PRIX NOBEL

Comment recevoir notre revue ?

- * La revue *Rayonnement du CNRS* est réservée aux adhérents de l'Association. Si vous souhaitez la recevoir nous vous proposons de nous rejoindre en qualité d'Amis du CNRS.

Pour vous inscrire, veuillez vous adresser au secrétariat ou sur le site :
www.rayonnementducnrs.com

L'inscription vous permet, en outre, de recevoir le *Journal du CNRS* (mensuel).

- * Les numéros récents de la revue peuvent être consultés sur le même site.

Photo montage de couverture : Fabrice Bonardi et Bernard Dupuis

Credits photos à l'intérieur

Sommaire Femmes en Sciences

<i>Editorial par Michel Petit</i>	2
<i>Le mot de la rédaction par Fabrice Bonardi</i>	4
Dossier : Femmes en Sciences (Coordonné par Claudine Hermann)	5
<i>Femmes en sciences : un atout pour la recherche au CNRS par Pascale Bukhari</i>	7
<i>La bioéthique : une notion à géométrie variable par Simone Bateman</i>	13
<i>Observation de la Terre depuis l'espace : quelques exemples par Anny Cazenave</i>	20
<i>Mathématiques et océanographie par Anne-Laure Dalibard</i>	27
<i>Le test de logiciel : pourquoi et comment par Marie-Claude Gaudel</i>	33
<i>Le nez électronique et ses applications par Martine Lumbreras et Maryam Siadat</i>	40
<i>Cancer et nanotechnologies : du diagnostic à la thérapeutique par May Morris</i>	47
<i>Les quasi-cristaux par Marianne Quiquandon-Gratias</i>	58
<i>Matière-antimatière par Catherine Thibault</i>	64
<i>Jeanne Villepreux-Power, biologiste marine pionnière du 19^e siècle par Josquin Debaz</i>	70
En marge du dossier	76
<i>Jeanne Villepreux-Power, la reconnaissance en Marche... (et en Limousin)</i>	76
<i>Trajectoire : Toshiko Yuasa, une scientifique au destin remarquable par Gaëlle Vergnes</i>	78
<i>(Lu, vu entendu et...) retenu pour vous : La rédaction a aimé</i>	81
<i>Hommage à Olympe de Gouges</i>	82
<i>Le kiosque - Les livres signalés</i>	84
La vie de l'Association	85
<i>Présentation du bulletin n° 57 «spécial Pologne»</i>	85
Régions	
• <i>Aquitaine</i>	86
• <i>Centre Est</i>	87
• <i>Centre (Orléans)</i>	87
• <i>Île-de-France</i>	90
• <i>Languedoc-Roussillon</i>	93
Programmes des voyages en 2012	93
Carnet	96

Rayonnement du CNRS n° 58 printemps 2012

Editorial

Après deux numéros du « Rayonnement du CNRS » visant au resserrement de nos liens avec les amis du CNRS au Brésil et en Pologne, notre premier numéro de 2012 est consacré au rôle actuel des femmes en science, avec une mise en ligne symbolique en mars, mois de la Journée internationale des femmes. Longtemps, les jeunes filles ont été dissuadées d'embrasser une carrière scientifique au prétexte fallacieux qu'il s'agissait d'un domaine réservé aux hommes. Aujourd'hui, un nombre certain de femmes sont des scientifiques reconnues par leurs pairs, mais la parité est encore loin d'être atteinte, au moins dans certaines disciplines comme le rappelle, dans son article, Pascale Bukhari, directrice de la Mission pour la place des femmes au CNRS. Pour lutter contre ce vieux préjugé totalement infondé, nous avons choisi de structurer ce numéro de notre bulletin autour d'articles écrits par des femmes scientifiques connues et reconnues qui font le point sur l'état des connaissances dans les disciplines variées où elles se sont illustrées. C'est tout naturellement que la coordination de ce numéro spécial a été confiée à Claudine Hermann, fondatrice et première présidente de l'Association « Femmes & Sciences », dont elle est actuellement présidente d'honneur. Je la remercie chaleureusement pour son apport déterminant au contenu du présent bulletin. Le sectarisme étant à l'opposé de nos convictions, c'est un homme, Josquin Debaz, qui a été chargé de rappeler la carrière exceptionnelle d'une pionnière de la biologie marine, Jeanne Villepreux-Power. Puissent ces exemples susciter de nombreuses vocations féminines vers des carrières consacrées à la science, qui permettront enfin d'atteindre une parité qui devrait prévaloir dans tous les domaines.

Je rappelle également à ceux qui ne consultent pas régulièrement le site électronique de l'association <http://www.rayonnementducnrs.com/>, qu'ils peuvent bénéficier des améliorations qui lui ont été récemment apportées. Ainsi, vous pouvez rechercher, dans la liste alphabétique de nos 2000 adhérents, la trace d'anciens collègues un peu perdus de vue. Pour cela, avec votre numéro d'adhérent (comme code) vous pouvez consulter l'annuaire accessible à partir de la page d'accueil. Vous pouvez également consulter votre propre fiche et y apporter les modifications que vous souhaitez. Si vous y indiquez une adresse électronique (qui ne sera accessible qu'à nos adhérents), cela nous permettra de vous contacter rapidement, d'éviter à nos bénévoles

The last two issues of our Journal «Rayonnement du CNRS» were dedicated to Brazil and Poland and aimed at strengthening our ties with our Alumni and friends of the CNRS in those countries. The current issue is dedicated to the role of women in science to-day. For a very long time, girls were dissuaded from entering a scientific career on the fallacious grounds that this was a field for men only. Nowadays, a great many women are scientists hailed by their peers, but parity is still far from achieved, in some subjects at least as Pascale Bukhari, who is Director of the task force on the place of women in the CNRS, stresses in her article. In order to campaign against this totally unjustified old prejudice, we have constructed this issue around articles written by women scientists recognised and acclaimed in their fields, providing a state of the arts in the disciplines in which they have made a name for themselves. The overall coordination of this special issue was quite naturally entrusted to Claudine Hermann, the founding President and now Honorary President of «Women and Sciences». I am extremely grateful to her for contributing so decisively to the contents of this issue. Since we are totally non-sectarian, we commissioned a male author to write up an account of the exceptional career of a pioneer of marine biology, Jeanne Villepreux-Power. May these examples of distinguished female careers in science encourage many more women to embrace a scientific profession and thus enable parity to be achieved in all fields of research.

I would like to remind our readers who do not regularly visit our website <http://www.rayonnementducnrs.com> that they can now benefit from the improvements recently introduced. Thus you may now consult the list of our 2,000

un fastidieux travail de mise sous enveloppe et de faire l'économie des frais d'affranchissement. Vous pouvez également vérifier que vous êtes bien à jour de vos cotisations... et éventuellement vous y mettre, commodément, en quelques clics. Le site fournit aussi, dans sa rubrique Régions (ouverte à toutes et tous), l'accès à la messagerie électronique de nos correspondants régionaux, qui se feront un plaisir de répondre aux questions et suggestions de ceux qui ont déjà adhéré ou envisageraient de le faire. Vous pourrez ainsi leur proposer facilement les activités qui vous tiennent à cœur, en particulier dans le domaine d'éveil à la science. Enfin, vous pouvez prendre connaissance, sur le site, des diverses activités en cours ou envisagées dans chacune des régions et auxquelles je vous invite à participer pour faire vivre notre belle association.

Michel Petit

+ members and chase up former friends and colleagues whom you have lost trace of. To do this you only need to consult our Year Book on the Home Page of our website, using your membership N° as access code. You can also consult your own Year Book entry and update it if you so wish. If you wish to enter an E-mail address accessible to our members only, this will enable us to contact you quickly, thus freeing our voluntary staff from the fastidious task of sending you postal updates of our activities and saving postal costs. You can check whether you are up to date with your subscriptions and, in a few clicks achieve this. In its regional pages open to all, our site also gives you the E-mail address of our regional representatives who will be delighted to answer any questions and are open to any suggestions from members or would-be members. You can suggest activities you are interested in, eg in the fields of «science for all», from teenagers to senior citizens. Last but not least, when you visit our site you will be able to discover the various activities offered in each of our regions which you are warmly invited to participate in, thereby contributing to the life of our Association.

Michel Petit

Le mot de la Rédaction

par Fabrice Bonardi

Un sacré coup de jeune

Quelques connaissances s'étonnent de me voir rédacteur en chef du bulletin Rayonnement du CNRS. Les uns soulignent que je ne suis pas « de la maison », les autres que je ne figure pas vraiment au rang de ses Anciens... Certains même se demandent « ce qu'il y a à gagner dans l'aventure. »

Je voudrais tout d'abord leur faire savoir qu'il n'est pas si étonnant de me compter parmi les anciens, vu qu'à l'âge de dix ans, j'étais déjà abonné au magazine... *Notre Temps* ! Mes capacités d'anticipation ne dépassaient pourtant pas la norme : il ne s'agissait-là que d'un cadeau maternel signé en toute méconnaissance du slogan de *Notre Temps*, « le journal de la retraite heureuse » !

Au-delà de cette précocité anecdotique, de nombreuses personnes gagneraient à visiter l'association : elles découvriraient ainsi, dans la vitalité des esprits et dans l'intelligence des regards, la source d'une jeunesse inaltérable où elles puissent utilement.

Quant à la question de savoir ce que « ça rapporte », je serais tenté de répondre « rien ». C'est le principe du bénévolat. « Mais ce ne serait pas tout à fait exact, tant il est vrai que l'on s'enrichit à côtoyer de brillants esprits. C'est ainsi qu'après avoir été mis durant deux années à disposition du CNRS, je ne pouvais qu'en rester un de ces Amis auxquels Rayonnement du CNRS s'adresse aussi. La bonne nouvelle, c'est que ces amis-là sont de plus en plus nombreux à adhérer à l'association. Ainsi, le récent numéro sur la Pologne nous a-t-il valu un important courant de sympathie, notamment au sein des cercles scientifiques polonais. »

L'envie de conserver nos anciens lecteurs et celle de continuer en même temps à accueillir de nouveaux amis encouragent la poursuite de la mutation en douceur du bulletin. Ainsi, les rubriques récemment créées sont elles rejoints par de nouvelles telles que (*lu, vu, entendu et*) retenu par la rédaction, ou encore le kiosque, à découvrir dans la présente livraison.

Enfin, et pour conclure ce billet, la rédaction lance un appel :

Vous connaissez des anciens du CNRS, personnalités marquantes ou moins connues mais animées d'une égale passion ? N'hésitez pas, sortez les carnets et les stylos, ouvrez vos micros ! La première contribution reçue inaugurerà la bibliothèque de mémoire dont le bulletin se fera volontiers l'écho ; en effet, avec ces trois numéros par an (en moyenne), il pourrait constituer un bon support à cette bibliothèque, pourquoi pas en lien avec le site internet de l'association ? Un site qui est d'ailleurs à visiter sans modération, car sa mise à jour très régulière le place au cœur de l'actualité de tous ceux qui contribuent à faire rayonner le CNRS.

Dossier : Femmes en Sciences

Introduction

par Claudine Hermann

L'équipe de rédaction du Bulletin des anciens et amis du CNRS m'a fait l'honneur de me demander de coordonner ce numéro paraissant au mois de mars 2012, à une date proche du 8 mars, journée internationale des femmes, sur les femmes scientifiques. Pour aborder le sujet « Femmes en sciences », nous avons privilégié dans ce bulletin la science faite par les femmes mais donnons aussi un aperçu de la situation des femmes scientifiques, qui relève de la science sur les femmes.

« Nous avons demandé à un panel de femmes scientifiques de disciplines variées, (biologie, chimie, électronique, informatique, mathématiques, physique, sciences sociales et sciences de l'univers) de vous présenter un sujet scientifique sur lequel elles travaillent ou ont travaillé, de manière accessible pour un public instruit et non spécialiste. »

Elles sont jeunes chercheuses ou chercheuses confirmées dont une académicienne, travaillent dans des laboratoires localisés dans plusieurs régions de France, sont presque toutes personnelles ou membres d'un laboratoire lié au CNRS. Ce numéro du Bulletin devrait vous donner une introduction à une sélection de thèmes scientifiques d'actualité et vous montrera le talent de quelques femmes scientifiques d'aujourd'hui.

« Un article historique, écrit par Josquin Debaz, vous fera connaître Jeanne Villepreux-Power (1794-1871), pionnière de la biologie marine redécouverte à la fin du 20e siècle par des historiens corréziens et dont le modèle inspire des jeunes filles d'aujourd'hui. »

« Mais nous avons aussi souhaité vous donner un aperçu de la situation des femmes scientifiques en 2012. Pour mémoire, au CNRS les femmes représentent un tiers des chercheurs. Le thème de la situation des femmes en sciences a été mis à l'ordre du jour par la Commission européenne dès 1998, la Mission pour la place des femmes au CNRS a été créée en 2001. Sa directrice, Pascale Buhari, vous la présentera et en indiquera les principales actions, en particulier les recherches sur le genre, « dimension sociale des rôles attribuée aux individus de sexes féminin et masculin ». En tant que fondatrice et présidente d'honneur de l'association Femmes & Sciences, je vous indiquerai comment agit cette association pour promouvoir et aider les femmes exerçant des métiers scientifiques et techniques. »

Bonne lecture !

Claudine Hermann

Claudine Hermann est andienne élève de l'Ecole normale supérieure (ENS) de jeunes filles (Promotion 1965), agrégée de physique, docteur es sciences. Après avoir enseigné dix ans à la préparation à l'agrégation de physique de l'ENS, elle a été maître de conférences, puis professeure de physique à l'École polytechnique et elle est à la retraite depuis début 2006. Elle a consacré ses travaux de recherche à l'optique des solides. Elle a été la première femme à être nommée professeure à l'École polytechnique (1992). Depuis lors, parallèlement à ses activités de physicienne, elle s'est intéressée à la situation des femmes scientifiques en Europe occidentale et s'est engagée dans la promotion des carrières scientifiques auprès des jeunes filles et plus généralement auprès des jeunes, par le biais de publications et de conférences, en France comme à l'étranger. Elle a collaboré régulièrement avec la regrettée Huguette Delavault, professeure d'université en mathématiques à Paris. Elle a été membre fondatrice et première présidente (2001-2004) de l'association Femmes & Sciences, dont elle est maintenant présidente d'honneur. Depuis 2005, elle



est membre du Conseil d'administration de la Fondation d'entreprise EADS et de 2006 à 2010 elle était membre du conseil scientifique de la Cité des sciences et de l'industrie de La Villette à Paris.

Elle a été, de 1999 à fin 2005, représentante française dans le groupe des fonctionnaires nationaux Femmes et Sciences (dit «groupe d'Helsinki») de la Direction générale recherche de l'Union européenne. Elle est vice-présidente de la Plateforme européenne des femmes scientifiques, association dont les membres sont des associations de femmes scientifiques, et qui regroupait en 2011 une centaine d'associations et 12 000 femmes scientifiques à travers l'Europe.

Elle est auteure de 85 publications en physique, de 40 publications dans le domaine de la promotion des sciences pour les jeunes et de l'analyse de la situation des femmes dans les carrières scientifiques et techniques.



©ARTHUS-SARL

L'association Femmes & Sciences a été fondée en 2000 par un groupe de femmes scientifiques de toutes disciplines et tous horizons dans le but de renforcer la position des femmes exerçant des professions scientifiques et techniques dans les secteurs public et privé; l'association qui promeut également l'image des sciences chez les femmes et l'image des femmes dans les sciences, entend aussi inciter les jeunes filles à s'engager dans les carrières scientifiques et techniques.

Femmes & Sciences intervient ainsi auprès des écolaires et des enseignants, conseille les institutions, organise des colloques et entretient des échanges avec des associations étrangères partageant ses objectifs.

Soutenue par des institutions telles que le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche, la Mission pour la place des femmes au CNRS, la Mairie de Paris, des établissements et grandes écoles ainsi que deux fondations d'entreprise, Femmes & Sciences propose des outils et documents à destination des jeunes et des enseignants: DVD, quiz, diaporamas, livrets d'information, actes des colloques annuels de l'association, posters...

Femmes & Sciences a fondé avec les associations Femmes et mathématiques et Femmes Ingénieresses -dont les objectifs sont similaires et avec lesquelles les actions sont souvent coordonnées-, le site <http://www.elles-en-sciences.net/>

Pour en savoir plus :

<http://www.elles-femmesetsciences.fr/>
<http://www.femmesetsciences.fr/>

Femmes en sciences : un atout pour la recherche au CNRS

par Pascale Bukhari, directrice de la Mission pour la place des femmes au CNRS

Pascale Bukhari, Ingénierie de recherche au CNRS, dirige la Mission pour la place des femmes au CNRS depuis la fin 2010. Entrée au CNRS en 1992, elle y a successivement occupé des fonctions au sein de la Mission de l'information scientifique et technique de 1992 à 1997, du Secrétariat général de 1997 à 2001, avant de rejoindre la Présidence du CNRS, en tant que chargée de mission auprès du Président de 2001 à 2005. Directrice de cabinet du directeur général du CNRS de 2006 à 2009, elle était déléguée régionale du CNRS pour les Alpes en 2010.



Conscient des évolutions de la société et souhaitant mobiliser toutes les énergies au service de la recherche, le CNRS s'est engagé dès 2001 dans une démarche innovante pour améliorer l'équilibre entre les femmes et les hommes et a créé la Mission pour la place des femmes au CNRS. Placée auprès de la Présidence, la Mission agit comme un observatoire chargé d'impulser, de conseiller et d'évaluer la prise en compte du Genre dans la politique globale de l'établissement. La Mission s'investit principalement sur trois terrains :

- les actions en faveur de l'égalité des chances entre femmes et hommes au sein du CNRS,
- le soutien à la promotion des recherches sur le genre et à la transversalité de l'approche du genre en Recherche,
- la sensibilisation des viviers, notamment féminins, et la promotion de nouveaux modèles.

La transversalité de sa thématique la conduit à travailler en étroite collaboration avec l'ensemble des instituts scientifiques et des directions du CNRS, à l'échelon national comme régional. Au-delà, la Mission est un partenaire reconnu des réseaux institutionnels nationaux, européens et internationaux.

Mieux connaître la situation des femmes au CNRS

Avec plus de 42% de femmes parmi ses personnels permanents et non permanents, les femmes constituent près de la moitié des forces vives du potentiel humain du CNRS en 2010. Plus de la moitié des ingénieurs/es et techniciens/nnes (50,7%) et près d'un tiers des chercheurs/ses (32,3%) sont des

femmes. Les femmes constituent les deux tiers des effectifs de catégorie B et C au CNRS (techniciennes et adjointes/ es techniques) et représentent près de 38% des personnels de catégorie A (chercheuses/ ses et ingénierues/ es).

S'agissant des chercheuses, des disparités existent selon les disciplines et les dix instituts du CNRS peuvent être classés en trois grands groupes :

- un premier groupe, réunissant les sciences biologiques et les sciences humaines et sociales, affiche plus de 40% de femmes,
- un deuxième groupe est composé des sciences de l'univers, de la chimie, et de l'écologie et l'environnement, dans lesquelles on dénombre aux environs d'un tiers de femmes,
- un troisième groupe est constitué des mathématiques, de la physique, des sciences de l'ingénierie et des systèmes, des sciences de l'information, et de la physique nucléaire et physique des particules. On compte moins d'un quart de femmes dans ces disciplines.

Ce constat vaut également pour les ingénierues et les techniciennes, selon les branches d'activités professionnelles (BAP) au CNRS :

- plus de 50% dans les métiers techniques et d'ingénierie des sciences humaines et sociales, des sciences du vivant, de la documentation et de la communication, et de la gestion et du pilotage,
- 44,5% en sciences chimiques et sciences des matériaux
- aux alentours de 20% en informatique, statistique et calcul scientifique, et dans les métiers

du patrimoine, de la logistique, de la prévention et de la restauration,
• 11 % en sciences de l'ingénieur et instrumentation scientifique.

A l'image de bon nombre d'établissements publics scientifiques nationaux comme internationaux, le CNRS doit continuer à agir pour réduire les causes et effets du plafond de verre. Une réelle marge de progression existe dans les fonctions à responsabilités. Ce constat est d'autant plus net que l'on se focalise sur le haut de la hiérarchie :

- les femmes représentent 37 % des chargées/ées de recherche et 25 % des directeurs/trices de recherche,
- 12,7 % des chercheurs hommes sont directeurs de recherche de première classe ou directeurs de recherche de classe exceptionnelle, tandis que 5,5 % de femmes atteignent ces grades,
- 17 % des directeurs/trices d'unité sont des femmes,
- dans les instituts scientifiques, les fonctions de directions administratives adjointes d'instituts sont occupées à 90 % par des femmes, tandis que les femmes représentent 20 % des directeurs/trices adjoints/es scientifiques d'instituts,
- 2 des 10 directeurs/trices d'instituts du CNRS sont des femmes.

En ce qui concerne les instances du Comité national (conseil scientifique, conseils scientifiques d'instituts, sections), les femmes représentent plus d'un tiers des membres.

En matière de conditions de travail :

- En 2010, la moitié des personnels permanents et non permanents formés au CNRS (dans le cadre de la formation permanente) sont des femmes. Les ingénieries et les techniciennes se forment davantage que leurs collègues masculins ou que l'ensemble des chercheurs et chercheuses. C'est le reflet caractéristique de cette population dont les métiers, notamment ceux à caractère administratif, sont ceux qui sont les plus féminisés et qui accèdent le plus aux formations,
- Les femmes représentent près de 90 % des personnels permanents travaillant à temps partiel

au CNRS en 2010. Près de 16 % des femmes au CNRS travaillent à temps partiel (dont près de 6 % de chercheuses), seuls 1,5 % des hommes au CNRS optent pour cette possibilité (dont près de 0,3 % de chercheurs),

- L'écart de rémunération est de 17 % en moyenne entre hommes et femmes au CNRS.

Objectif : veiller à la mixité, tendre vers la parité et favoriser l'égalité professionnelle

Le CNRS s'est engagé dans le contrat d'objectifs qu'il a signé en 2009 avec le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, à définir et mettre en œuvre un plan d'action pluriannuel pour promouvoir l'égalité professionnelle. S'appuyant sur les indicateurs sexués et les différentes analyses en sa possession, la Mission pour la place des femmes au CNRS est force de propositions. Elle construit, en interaction notamment avec la direction des ressources humaines, les instituts scientifiques et le Comité national, une plateforme de mesures destinées à promouvoir l'égalité professionnelle.

La première étape consiste à dresser l'état des lieux. Pour la troisième année consécutive, le CNRS vient de publier fin 2011 (fig.1) La parité dans les métiers du CNRS en 2010. Complémentaire du Bilan social de l'établissement, cette brochure, réalisée par la Mission pour la place des femmes et la direction des ressources humaines, compare les situations professionnelles des femmes et des hommes au CNRS, au travers de données quantitatives. L'objectif est de produire et de diffuser des indicateurs sexués permettant à chacune et chacun de s'approprier cette réalité que constituent les différences de situations entre les femmes et les hommes afin d'agir, individuellement tout autant qu'institutionnellement, pour les résorber.

La deuxième étape vise à sensibiliser les personnels et à les former à la prise en compte de ces différences de situations et à leurs causes, pour s'employer à les réduire. En 2011, à l'initiative de la Mission pour la place des femmes au CNRS et avec le soutien de la Direction des ressources humaines, une action nationale de formation Agir pour l'égalité professionnelle entre les femmes et les hommes au CNRS a été lancée. La première ses-



La parité dans
les métiers du CNRS 2010

Fig.1 : la Parité dans les métiers du CNRS, couverture de la brochure

© Graines d'Octobre - © D. Pardi - CNRS Photothèque/CERC

sion était réservée aux professionnel-le-s des filières métiers Ressources humaines et Communication. La seconde session s'adressait aux cadres supérieurs/ es de l'établissement : directeurs/trices adjoints/es scientifiques et administratifs/tives des instituts, responsables des directions fonctionnelles et délégués/ées régionaux/ales. Au programme de ces sessions : l'état des lieux au CNRS, la présentation des résultats d'une étude sur la prise en compte du genre dans les carrières au CNRS et la restitution d'études scientifiques menées sur les stéréotypes de genre.

En 2011, l'établissement a créé un comité de pilotage pour l'égalité professionnelle entre femmes et hommes au CNRS. L'objectif est, en réunissant l'ensemble des acteurs parties prenantes des processus de ressources humaines, de mettre en perspective les actions déjà existantes et d'identifier les actions prioritaires susceptibles d'être menées dans les processus de recrutement, de carrière, d'articulation entre vie professionnelle et vie personnelle, etc.

Dans le cadre des partenariats européens et internationaux que la Mission pour la place des femmes a développés, le CNRS est partie prenante, depuis 2011, du projet européen INTEGER (*Institutional Transformation for Effecting Gender Equality in Research*) (Fig. 2). Il s'agit d'un projet déposé en réponse à l'axe Géne et recherche de l'édition 2010 du programme Science dans la société du 7^e Programme cadre de recherche et développement (PCRD). Il compte cinq participants européens : l'United Kingdom

Resource Centre for Women in Science, Engineering and Technology (SET) en Grande-Bretagne qui assure la coordination du projet, le GESIS-Leibniz Centre of Excellence Women and Science (Allemagne) qui en assure l'évaluation, et les partenaires-clés que sont le Trinity College de Dublin (Irlande), la Sauliai University (Lituanie) et le CNRS pour la France.



INTEGER

Institutional Transformation for
Effecting Gender Equality in Research

Fig. 2 : logo du projet européen INTEGER

Le projet a pour objectif de créer un changement structurel durable au sein de ces universités et du CNRS, au bénéfice de la progression des carrières des chercheuses en Science, Technology, Engineering and Mathematics (STEM). Il repose sur la mise en œuvre de plans d'action en faveur de l'égalité entre hommes et femmes, en s'appuyant sur une analyse de terrain, un partage d'expériences entre partenaires et l'utilisation d'instruments déjà mis en œuvre dans certains pays. Son action est organisée selon deux niveaux : un volet institutionnel et un volet dit local. L'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (INSMI) et l'Institut de physique (INP) ont été retenus pour le déploiement du volet local du projet. INTEGER a démarré en 2011, pour une durée de quatre ans. La Mission pour la place des femmes assure la coordination de la participation du CNRS.

Les recherches genre, un défilé au-delà de la parité

S'appuyant sur la Recherche qui constitue l'essence même du CNRS, la Mission pour la place des femmes au CNRS souhaite tirer profit des enseignements qu'apportent les recherches sur le genre et les traduire en mesures concrètes dans les politiques que mène le CNRS. L'objectif est de stimuler et dynamiser les interfaces entre Recherche, Formation et Action.

A l'initiative de la Mission pour la place des femmes au CNRS, l'établissement a lancé, en 2010, le Recensement national des recherches sur le

genre et/ou les femmes (fig. 3). Apporter une meilleure visibilité aux recherches sur le genre en France et renforcer les collaborations scientifiques et/ou institutionnelles étaient les objectifs initiaux. Premier résultat : la naissance du Réseau thématique pluridisciplinaire (RTP) *Etudes Genre* en 2010, directement issu des débats qui se tenaient, dans le cadre du comité scientifique du Recensement, entre chercheurs et chercheuses des sciences biologiques et chercheurs et chercheuses des sciences humaines et sociales. Second résultat : le vif succès rencontré par le Recensement avec plus de 2 000 fiches collectées dont la moitié est d'ores et déjà accessible à la communauté scientifique et au grand public dans un annuaire en ligne. A l'issue de la restitution des premières analyses des résultats de ce recensement en 2012, les analyses se poursuivront dans le cadre de l'Institut du genre, groupement d'intérêt scientifique (GIS) créé à l'initiative de l'Institut des sciences humaines et sociales du CNRS en 2012. Les thématiques innovantes de la jeune recherche dans le domaine du genre et des femmes, l'émergence du genre dans les sciences naturelles et expérimentales, les formes institutionnelles à donner aux recherches genre, constituent autant de perspectives à approfondir.



Fig. 3 : affiche rappelant le Recensement national des recherches sur le genre et/ou les femmes. © B. Rouet. - CNRS/visuel © P. Roetich - CNRS

Le Réseau thématique pluridisciplinaire (RTP)

Etudes Genre est un des lieux de débat pour conforter la place du genre dans les approches de recherche (fig. 4). Il a été mis en place pour trois ans (2010-2012) par le CNRS à l'initiative de l'Institut des sciences humaines et sociales, avec le soutien de l'Institut des sciences biologiques, de l'Institut Ecologie et environnement, et le concours de la Mission pour la place des femmes au CNRS. Il poursuit plusieurs objectifs :

- dresser un état des lieux des recherches françaises sur le genre au-delà du seul domaine des sciences humaines et sociales, en s'appuyant notamment sur le recensement national des recherches sur le genre et/ou les femmes conduit par le CNRS depuis 2010 ;
- recueillir des éléments de comparaison entre différents pays sur le potentiel de recherche sur le genre dans les principaux champs disciplinaires, ou à l'interface de plusieurs de ces champs ;
- à partir de ces analyses comparatives, faire émerger des indicateurs pour l'évaluation des points forts et des faiblesses des recherches françaises sur le genre dans tous les champs disciplinaires et selon les thématiques,
- formuler des recommandations pour développer la pluridisciplinarité des recherches sur le genre en France, en lien avec les sciences humaines et sociales, mais également au-delà, notamment en matière de financement et d'institutionnalisation.

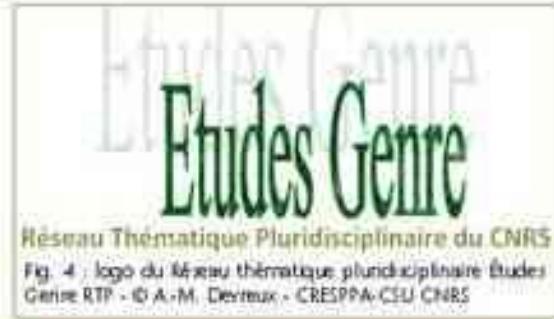
Pour atteindre ces objectifs, le réseau thématique pluridisciplinaire organise des journées d'études. Elles réunissent des spécialistes des différents champs disciplinaires et leur permettent de débattre de leurs expériences dans leurs domaines scientifiques et pays respectifs.

Trois journées d'études se sont tenues en 2011 :

- en février, les premières journées ont permis de confronter les définitions du genre et du sexe en sciences humaines et sociales et en biologie, puis de se focaliser sur l'impact de la prise en compte du genre dans les questions de santé
- en juin, les secondes journées étaient consacrées au thème Stress, douleur, souffrance - Des

sciences sociales à la clinique

- en décembre, les troisièmes journées étaient dédiées au genre en écologie, environnement et développement.



Les perspectives en termes d'actions disciplinaires, pluridisciplinaires et interdisciplinaires de recherche susceptibles d'être lancées sont riches de promesses. A cet égard, à l'initiative de l'Institut des sciences humaines et sociales, qui a hissé le genre au rang de ses principaux axes interdisciplinaires, le CNRS a ouvert, au concours de recrutement en 2012, quatre postes de chercheurs sur les thématiques suivantes :

- histoire du genre dans les mondes anciens ou médiévaux,
- théories du genre et des sexualités en philosophie, littérature et arts,
- discriminations économiques d'origine géographique et de genre, et évaluation des politiques publiques,
- anthropologie du genre.

Sensibiliser les viviers, notamment féminins, et promouvoir de nouveaux modèles

Au-delà de la place des femmes au CNRS, des recherches sur le genre ou les femmes qu'il soutient et de l'approche du genre en recherche qu'il développe, l'établissement souhaite apporter sa contribution au renforcement de l'attractivité des carrières scientifiques vis-à-vis des femmes en les aidant à dépasser les stéréotypes, les préjugés et les pratiques d'autocensure.

Depuis 2010, la Mission pour la place des femmes au CNRS soutient, aux côtés de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions

(INSMI) et l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INSI), le *Forum des jeunes mathématiciennes*, organisé à l'initiative de l'association Femmes et mathématiques. En 2011, le 11^e Forum des jeunes mathématiciennes s'est tenu du 21 au 23 novembre 2011 à l'Institut de mathématiques de Toulouse. Dédié au thème des Probabilités et statistiques, il a permis à 17 jeunes doctorantes et doctorants sélectionnés de présenter leurs travaux de thèse à des mathématicien/nnes confirmés/ées. En complément, trois tables rondes sur les débouchés dans l'enseignement supérieur et la recherche publiques, les métiers des mathématiques dans l'industrie, le genre et les résistances des femmes et des hommes aux changements étaient organisées et deux ateliers de mentorat étaient proposés aux participants/ées sur les thèmes suivants : Des clés pour une communication affirmée ; résoudre une équation de besoins et Des clés pour construire sa trajectoire professionnelle : décrypter les inégalités entre les hommes et les femmes. Le prochain forum se déroulera du 12 au 14 novembre 2012 à l'Institut Henri Poincaré à Paris.

La Mission pour la place des femmes au CNRS soutient également l'Association Femmes & Sciences qui a pour but de renforcer la position des femmes dans les métiers scientifiques et techniques et d'inciter les jeunes, et plus particulièrement les jeunes filles, (fig. 5) à s'orienter vers ces carrières. L'association organise chaque année, avec le soutien du CNRS, un colloque qui traite, alternativement d'une année sur l'autre, soit de questions liées à l'éducation scientifique des jeunes, et des filles en particulier, soit de problématiques que rencontrent les femmes dans les métiers scientifiques et techniques, et plus généralement les femmes cadres. En 2011, le thème du colloque, qui se tenait à la Bibliothèque François Mitterrand à Paris, était dédié à La science par et pour les femmes dans la société, hier et aujourd'hui. Le prochain colloque annuel de l'Association se tiendra à Nice le 6 octobre 2012, avec le soutien de la Mission.

En plus de ces actions menées en partenariat, la Mission mène directement des actions de sensibilisation à destination du vivier, notamment féminin, aux niveaux national et international. Dans ce but, divers supports pédagogiques à destination des jeunes, et notamment des jeunes filles sont produits. Par exemple, l'exposition Physique de femmes (fig. 5), créée en 2005, présente quinze femmes chercheuses

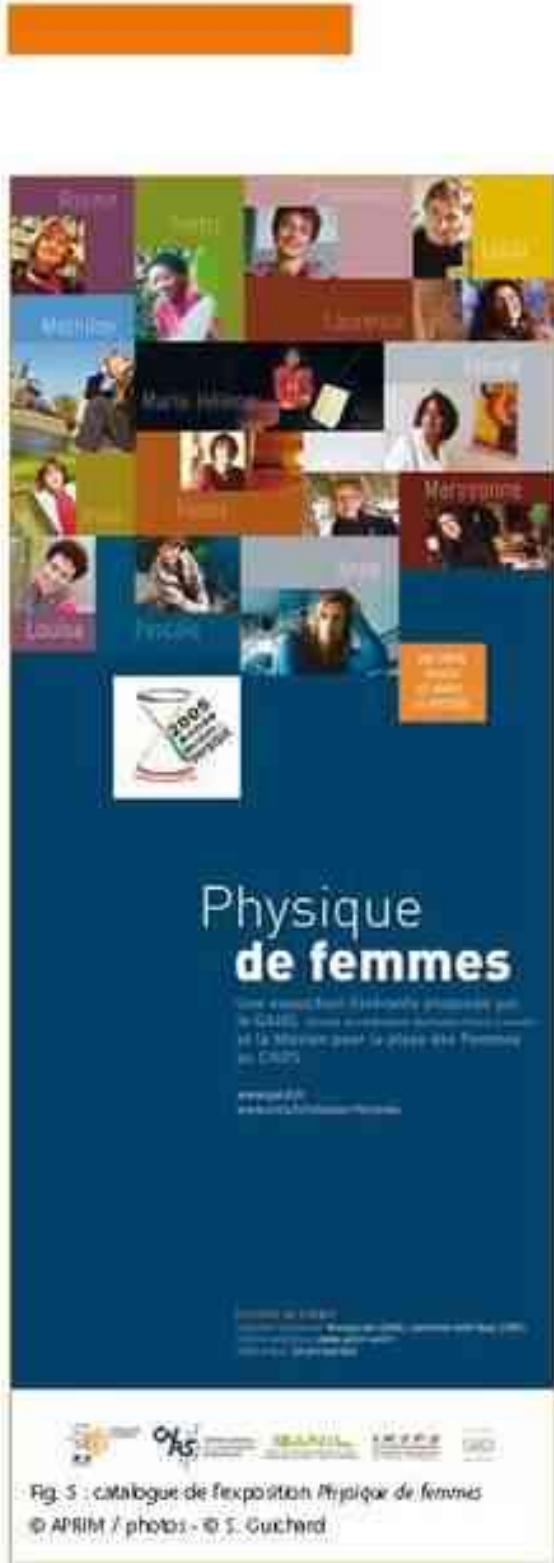


Fig. 5 : catalogue de l'exposition Physique de femmes
© APRIM / photos - © S. Guchard

en physique et itinérante, depuis cette date, en France et à l'étranger. Après une tournée de deux ans au Québec, c'est le centre de culture scientifique et technique, l'Espace Mendès-France qui a accueilli l'exposition et en a assuré l'itinérance en Poitou-

Charentes en 2011. L'exposition a également tourné en 2011 dans le bassin nancéen.

La participation à des colloques ainsi que les incitations à candidater à divers prix nationaux et internationaux destinés à promouvoir des modèles féminins constitue également l'un des champs d'actions de la Mission pour la place des femmes au CNRS.

Cette implication de l'organisme dans une politique de renforcement de l'égalité des chances entre les hommes et les femmes, et ce soutien apporté à l'approche du genre en recherche, accompagnent la part active que prennent, en son sein, bon nombre de femmes à la construction des champs de la connaissance dans toutes les disciplines scientifiques. C'est là un des atouts du CNRS dont notre organisme doit se prévaloir toujours davantage, dès lors que les femmes participent pleinement de l'innovation scientifique, technologique et sociale de nos Sociétés.

Pour en savoir plus :

- Mission pour la place des femmes au CNRS : www.cnrs.fr/mission-femmes
- Livret *La parté dans les métiers du CNRS en 2010* ; <http://bilansocial.dil.cnrs.fr/pdf/partie-2010.pdf>
- Recensement national des recherches sur le genre et/ou les femmes : <https://recherche.genre.cnrs.fr>

La bioéthique : une notion à géométrie variable

par Simone Bateman, directrice de recherche au CNRS

Simone Bateman est sociologue, directrice de recherche au CNRS, au Centre de recherche sens, éthique, société (Cerses), UMR du CNRS et de l'Université Paris Descartes. Ses recherches portent depuis une trentaine d'années sur des pratiques médicales et scientifiques, notamment dans le domaine de la reproduction, qui suscitent des questions éthiques et un débat public concernant leur légitimité et leur régulation. Elle a de ce fait participé à des groupes de travail, constitués par des organismes nationaux et européens, sur des questions relatives à l'éthique, la recherche et la santé, et a été entre autres, membre du Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé de 1992 à 1996.



La bioéthique : une notion à géométrie variable

Partant du constat que la France s'est dotée d'une loi «relative à la bioéthique», cet article donne un bref aperçu de l'histoire du mot bioéthique, depuis son émergence aux Etats-Unis dans les années 70 à l'importation du terme et l'évolution de son usage dans le débat public en France. Il fait apparaître les sens multiples que recouvre ce mot, tout en soulignant l'association fréquente de ce terme en France, par le biais de cette loi, avec les innovations techniques en matière de procréation assistée et de diagnostic génétique de l'embryon et du foetus. Le terme bioéthique s'avère peu précis en tant que concept ; toutefois, l'examen de son usage permet de mieux cerner les problèmes et les enjeux que chaque société fait porter à ce terme et la manière dont chacune s'en saisit pour les traiter.

Bioethics : a malleable notion

In view of the fact that France has a law on bioethics, this article proposes a brief sketch of the history of the term bioethics, from its first appearance in the United States during the 70's to the importation of the term and the progressive transformation of its usage in French public debate. It reveals the multiple meanings of the term, while emphasizing its frequent association in France, with the "bioethics law", with reproduction technology and genetic diagnosis of the embryo and the fetus. The term bioethics is not a precise concept; however, by examining its usage, one better understands the issues and stakes that each society associates with this term and the manner in which each society chooses to deal with them.

En France aujourd'hui, le mot bioéthique évoque le plus souvent une loi, à savoir, la loi n° 2011-814 du 7 juillet 2011 relative à la bioéthique. Celle-ci n'est cependant pas une loi nouvelle : elle est l'actualisation d'une des trois lois votées en juillet 1994, toutes trois désignées à l'époque comme «lois dites de bioéthique».

La première loi, votée le 1er juillet 1994, modifie la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, afin d'organiser un traitement spécifique «des données nominatives utilisées à des fins de recherche en santé» (Loi n°94-548 du 1^{er} juillet 1994). Alors que

la protection de données d'ordre privé constituait un sujet hautement sensible, cette loi a fait l'objet de peu de discussions. En revanche, les deux autres lois – la loi n° 94-653 du 29 juillet 1994 relative au respect du corps humain et la loi n° 94-654 du 29 juillet 1994 relative au don et à l'utilisation des éléments et produits du corps humain, à l'assistance médicale à la procréation et au diagnostic prénatal – votées le même jour, ont suscité plus de débats. La seconde réglementait les pratiques médicales dans les domaines du prélèvement et de la greffe, de la procréation assistée et des tests génétiques, alors que la première concernait les droits fondamentaux de la personne dans ces situations. Toutefois, la

loi n° 94-654 du 29 juillet 1994 se distinguait des deux autres lois dites de bioéthique par son article 21, qui exigeait une « évaluation de son application par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques » et « un nouvel examen par le Parlement dans un délai maximum de cinq ans après son entrée en vigueur ». Cette évaluation et cet examen de la loi furent effectués tardivement : ce n'est que dix ans plus tard qu'a été votée la loi n° 2004-800 du 6 août 2004, désormais intitulée « relative à la bioéthique ». C'est cette loi qui a été réexaminée, débattue et votée sous le même intitulé en 2011.

Cette disposition exceptionnelle, exigeant le réexamen périodique d'une loi par le Parlement, n'a été utilisée qu'une seule fois auparavant, dans le cas de la loi n° 75-17 du 17 janvier 1975 relative à l'interruption volontaire de grossesse. L'exigence d'un nouvel examen n'a pas été maintenue et la loi sur l'interruption de grossesse a été votée de manière définitive en 1980.

Ce bref résumé appelle plusieurs remarques. En premier lieu, le législateur a eu le souci d'assurer la protection des personnes, de leur corps et de leurs données personnelles, non seulement dans des situations thérapeutiques inédites, mais aussi dans des situations de recherche médicale. Il a souhaité également prévoir les moyens par lesquelles le droit français puisse s'adapter à l'évolution des connaissances scientifiques et des pratiques médicales. On peut cependant s'étonner du fait que le législateur ait choisi, probablement par commodité, de qualifier cette loi « relative au don et à l'utilisation des éléments et produits du corps humain, à l'assistance médicale à la procréation et au diagnostic prénatal » de « loi relative à la bioéthique ».

Ce raccourci est étonnant à plusieurs titres. Tout d'abord, comment se fait-il qu'une loi puisse porter sur l'éthique, fut-elle la bioéthique ? Si l'ensemble des règles juridiques reflète des partis pris moraux d'une société (ce qui est clair en ce qui concerne les dispositions sur l'homicide, le vol, mais aussi en ce qui concerne des sujets plus controversés comme l'avortement, la recherche sur l'embryon, le clonage, le suicide, etc.), la fonction du droit n'est pas de dire le bien et le mal, de dire que ces actions sont bonnes ou mauvaises, mais d'énoncer les règles

à partir desquelles ces actions seront jugées et le cas échéant sanctionnées, si une plainte est déposée. Quel type de rapport entre éthique et droit suppose alors une loi relative à la bioéthique ? Pourquoi ce terme est-il appliqué à une loi qui réglemente des pratiques médicales uniquement dans trois domaines : l'assistance médicale à la procréation, les tests génétiques et le don et l'utilisation des éléments et des produits du corps humain – alors que le mot bioéthique est fréquemment associé dans les débats publics à d'autres pratiques et dans d'autres circonstances (par exemple, la recherche en milieu médical, les droits des patients, la fin de vie) ? Remarquons que ces autres pratiques sont réglementées chacune par une loi spécifique, connue sous le nom du ou des parlementaires l'ayant présentée (loi dite Huriet-Sérusclat n° 88-1138 du 20 décembre 1988 relative à la protection des personnes se prêtant à la recherche biomédicale ; loi dite Kouchner n° 2002-303 du 4 mars 2002 relative aux droits des malades et à la qualité du système de santé ; loi dite Leonetti n° 2005-370 du 22 avril 2005 relative aux droits des malades et à la fin de vie). En quoi le qualificatif bioéthique aurait-il partie liée plus spécifiquement avec les trois domaines couverts par l'une des deux lois du 29 juillet 1994 ? Que signifie au juste le mot bioéthique ?

Je vais esquisser un début de réponse à ces questions dans un bref aperçu de l'histoire du terme bioéthique - son émergence aux Etats-Unis dans les années 1970, son importation en France et l'évolution de son usage dans le débat public. Nous verrons que le terme est loin d'être un concept précis ; cependant l'examen de son usage dans une société particulière permet de mieux cerner les problèmes et les enjeux que chaque société fait porter à ce terme et la manière dont chacune s'en saisit pour les traiter.

L'émergence du terme

Le mot bioéthique apparaît pour la première fois dans un ouvrage de Van Rensselaer Potter - *Bioethics: Bridge to the Future* (1971). Cet ouvrage est celui d'un biochimiste - oncologue de l'université du Wisconsin qui, après 30 ans de recherche dans le domaine de la biologie du cancer, s'affirme insatisfait des progrès faits dans le combat contre cette maladie. Il plaide pour la création d'un pont

entre deux cultures – celle des sciences expérimentales et celle des sciences humaines, en vue d'étendre le champ de l'éthique au rapport que les humains entretiennent avec leur environnement, entendu non seulement comme biosphère (animaux, les plantes, la terre) mais comme écosystème au sens large comprenant l'organisation de la vie humaine en société. La bioéthique est pour lui une science de la survie, voire une forme de futurologie, fondée sur une approche nouvelle du concept de progrès humain. Si la conception que Potter a de la bioéthique se retrouve aujourd'hui dans ce que l'on appelle l'éthique environnementale, voire même dans la notion d'éthique globale (global ethics), elle est encore loin du champ de pratiques auquel le mot bioéthique est couramment associé maintenant, aux Etats-Unis, en France et ailleurs.

La même année, André Hellegers, médecin catholique gynécologue et obstétricien aux vues progressistes, fonde à l'université de Georgetown (Washington D.C.) le *Joseph and Rose Kennedy Institute for the Study of Human Reproduction and Bioethics*, devenu depuis le *Kennedy Institute of Ethics*. Hellegers introduit le terme bioéthique dans le nom initial de l'institut, pour désigner un nouveau champ de recherche pluridisciplinaire en éthique de la médecine et des sciences biologiques qu'il souhaite voir se développer dans son université. L'institut crée une bibliothèque de recherche et reçoit une subvention de la US National Library of Medicine pour la compilation d'une *Bibliography of Bioethics*, sous la direction éditoriale de Leroy Walters ; un volume de références est ainsi publié, chaque année, de 1975 à 2009. Un autre membre de cet Institut, Warren Reich, sera d'ailleurs à l'origine de la première édition de l'*Encyclopedia of Bioethics* (1978), donnant ainsi à cette nouvelle spécialité et au champ de questions auquel elle renvoie son premier ouvrage de référence. En 1991, l'institut se dotera d'une revue scientifique à comité de lecture, *the Kennedy Institute of Ethics Journal*.

Un autre institut pionnier dédié à la recherche dans ce domaine, le *Hastings Center*, connu à l'origine sous le nom d'*Institute of Society, Ethics, and the Life Sciences*, a été fondé par le philosophe Daniel Callahan et le psychiatre William Gaylin en 1969, avant même l'invention du terme bioéthique. Sa mission était d'examiner les implications éthiques, juridiques et sociales des avancées dans les sciences

de la vie (« examine the ethical, legal, and social implications of advances in the life sciences »). Bien que le Hastings Center ne soit pas adossé à une université, ses fondateurs estiment qu'il est nécessaire de le doter d'une publication permettant de diffuser auprès des professionnels mais aussi du public et des pouvoirs publics les données, la réflexion et le débat contradictoire qu'appelle une meilleure compréhension des problèmes sociaux et éthiques suscités par ces avancées¹. Selon le premier directeur de l'institut, Daniel Callahan, ces problèmes ne peuvent être saisies sous l'angle « d'une seule discipline, d'un seul point de vue ou d'une seule méthodologie » ; la mission de l'institut et de sa publication se définit donc d'emblée comme multidisciplinaire. *The Hastings Center Report* est aujourd'hui une revue scientifique à comité de lecture de réputation internationale.

La bioéthique est donc à ses origines, pour les uns une éthique du monde vivant, et pour les autres, un domaine interdisciplinaire de recherche relative aux progrès des connaissances et des applications médicales et technologiques que celles-ci génèrent. L'usage courant du terme a cependant glissé progressivement vers un usage plus restreint, visant les problèmes éthiques qui surgissent dans la pratique médicale, usage implicitement présent dans la définition très large de ce domaine de recherche donnée par les deux instituts.

La bioéthique, un fait de société

Dans un ouvrage récent intitulé *Observing Bioethics* (2008)², la sociologue Renée Fox et l'historienne de la médecine Judith Swazey abordent la bioéthique plutôt comme un fait complexe de société. Dans le premier chapitre de l'ouvrage, elles identifient, à travers des entretiens avec les principaux protagonistes de l'histoire de la bioéthique aux Etats-Unis, plusieurs explications sur ses origines.

¹ Pour certains, la bioéthique émerge du fait de nouveaux problèmes émanant de pratiques médicales techniquement innovantes, telles que la dialyse, la transplantation d'organes ou la réanimation. Comment choisir les patients qui auront accès à une ressource thérapeutique rare ? Quels critères permettent de constater qu'une personne est morte lorsqu'elle est sous assistance cardio-respiratoire prolongée ?

• Pour d'autres, la bioéthique est associée à l'émergence de thématiques particulières, concernant notamment le début et la fin de la vie. Les débats sur le contrôle de la fertilité (contraception, avortement) intéressent tout spécialement deux des fondateurs d'instituts, Helleger et Callahan, et sont présents dans l'intitulé d'origine du *Kennedy Institute of Ethics*, alors que plusieurs procès concernant le maintien en vie par des moyens artificiels de personnes estimées être en coma dépassé attirent l'attention de médias et du public aux nouvelles conditions de fin de vie. Cependant, la présentation du premier numéro du *Hastings Center Studies*¹⁶ désigne un champ plus large de pratiques, dont le point commun est le progrès des connaissances en sciences de la vie :

L'institut a été fondé en 1969 pour répondre au besoin d'une recherche professionnelle soutenue portant sur l'impact social de la révolution biologique. On a assisté à des avancées remarquables dans la transplantation d'organes, l'expérimentation humaine, le diagnostic anténatal de maladies génétiques, la prolongation de la vie et le contrôle du comportement humain - et chaque avancée a généré des problèmes spécifiques nécessitant un éclairage éthique à la hauteur des connaissances scientifiques.

Depuis les années 1970, le champ des thématiques auquel se réfère le terme bioéthique évolue, comme en témoigne, par exemple, l'actuelle formulation de la mission du *Hastings Center* : traiter les questions éthiques fondamentales dans les domaines de la santé, la médecine et l'environnement, en ce qu'elles affectent les individus, les communautés et les sociétés (= *address fundamental ethical issues in the areas of health, medicine, and the environment as they affect individuals, communities, and societies* >). On retrouve dans cette formulation le souci initial qu'avait Potter de l'environnement, mais aussi un élargissement des objectifs de la bioéthique à des enjeux plus collectifs comme ceux de la santé publique. En effet, il faut rappeler le contexte sociopolitique qui a présidé à la naissance de la bioéthique aux Etats-Unis, notamment l'existence de mouvements de revendication des droits civiques. Ce contexte a donné à la bioéthique des origines une focalisation sur l'individu, insistant sur les droits et l'autonomie du patient - orientation aujourd'hui nuancée, voire critiquée.

• Pour d'autres enfin, la bioéthique est associée principalement à plusieurs scandales liés à la recherche en milieu médical, avec de graves abus de confiance envers les patients. Si ces scandales pouvaient rappeler les expérimentations criminelles menées par les nazis pendant la seconde guerre mondiale, ils ont également mis en évidence l'importance croissante de la recherche en milieu de soins institutionnel et la transformation profonde que celle-ci opère sur la relation médecin-patient. On prend ainsi progressivement conscience du fait que le but de la médecine hospitalière se révèle être autant celui d'accroître les connaissances pour faire progresser les moyens thérapeutiques dont bénéficieront les futurs patients, que de soigner ceux qui sont effectivement présents dans les services. Ce nouvel état de fait a abouti à la création d'instances spécialisées dans l'examen préalable des protocoles de recherche, les *Institutional Review Boards* (IRBs), dont l'ambition est d'établir « un plan proprement éthique des décisions », et de prévenir ainsi les situations qui entraîneraient un recours aux tribunaux. Malgré ces formes nouvelles de régulation des pratiques de recherche en milieu de soin, de nouveaux problèmes surgissent régulièrement, y compris à propos de la conduite d'essais cliniques dans des pays en développement¹⁷.

Quel que soit le « mythe d'origine » de la bioéthique aux Etats-Unis, celle-ci émerge pour l'essentiel comme un mouvement critique relatif aux transformations de la médecine, dans ses rapports avec la recherche scientifique et avec l'innovation technologique. Ce mouvement prend deux formes :

- celle d'une activité intellectuelle autour de centres multidisciplinaires dédiés à la recherche et parfois aussi à la formation de spécialistes dans le domaine ;
- celle d'une activité d'innovation en matière de régulation des pratiques médicales et scientifiques.

Aux Etats-Unis, le terme bioéthique renvoie donc à plusieurs types de faits : un ensemble de pratiques techniques novatrices, un champ de questions et de débat public, une nouvelle spécialité interdisciplinaire, et des innovations institutionnelles en matière de régulation des pratiques.

La bioéthique en France

Nombreux étaient ceux qui, au début des années 1980, considéraient la bioéthique comme un phénomène trop lié à la culture américaine pour être «importable» tel quel¹¹. Dans un certain sens, vu la manière dont la bioéthique a évolué dans le contexte sociopolitique de la société américaine de l'époque, ces personnes n'avaient pas tort. Et pourtant, un mouvement semblable a fini par se développer en France mais plus tardivement - dans les années 1980 - et très lentement. On a d'ailleurs préféré parler «d'éthique biomédicale», pour bien se démarquer de la bioéthique, telle qu'elle s'est développée aux Etats-Unis, et notamment de l'idée que l'on puisse former des spécialistes en la matière : on craignait, en effet, de déstabiliser ceux qui occupaient déjà une place d'expertise et d'autorité morale en matière de pratique médicale et de recherche scientifique. Des centres et des espaces dédiés à la recherche et à la formation en éthique biomédicale, éthique clinique, ou bioéthique ont, comme aux Etats-Unis, surgi un peu partout en France ; ils ont souvent été fondés, comme les instituts américains, conjointement par des médecins et des philosophes. Mais ces centres n'ont jamais acquis la même envergure que leurs homologues américains ; ils ne bénéficient pas du même renom ni de la même diffusion internationale de leurs travaux, probablement parce qu'ils n'ont pas les mêmes projets ni les mêmes ambitions¹².

En effet, l'émergence de la bioéthique en France se distingue principalement de la bioéthique aux Etats-Unis, parce qu'elle s'est imposée du haut vers le bas («top down») - une opération préventive, pourrait-on dire, contre les dérapages auxquels pourraient conduire les progrès des connaissances et les innovations technologiques et médicales. De manière symbolique, on peut situer les débuts de la bioéthique en 1983, lors de l'institution par décret présidentiel d'un Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé (CCNE), souvent désigné comme un «comité de sages». Cette instance avait pour mission «de donner son avis sur les problèmes moraux qui sont soulevés par la recherche dans les domaines de la biologie, de la médecine et de la santé, que ces problèmes concernent l'homme, des groupes sociaux ou la société toute entière¹³». Pour donner

à cette instance la stature qui lui manquait du fait qu'elle avait été instituée par décret, le CCNE a été ré-institué et l'ensemble de ses missions reprécisé par la loi du 29 juillet 1994 relative au respect du corps humain, précisément l'une des trois lois dites de bioéthique.

Pourtant, bien avant l'institution du CCNE, la création du Comité d'éthique de l'Inserm (1974) avait eu pour cause le même type d'événements que ceux advenus aux Etats-Unis : l'existence de projets de recherche qui impliquaient des pratiques discutables d'expérimentation sur des personnes vulnérables¹⁴. Mais ces événements n'ont jamais été connus du grand public et de ce fait n'ont pas suscité de débat. La connaissance des circonstances et des conditions dans lesquelles a été créé ce premier comité d'éthique français serait certainement une contribution importante à l'histoire de la bioéthique en France.

Le souci de mieux réglementer la recherche en milieu médical a toutefois fait discrètement son chemin en France. Dès les années 1980, les premiers comités d'éthique (dits locaux), semblables aux IRB américains, à composition souvent mixte (médecins et non-médecins), ont été créés à l'initiative de certains médecins dans des hôpitaux universitaires. La loi Huriet-Sérusclat, votée en 1988, a institué l'obligation de cette évaluation éthique des protocoles de recherche sur les personnes, et a créé les premiers «comités consultatifs de protection des personnes se prêtant à la recherche biomédicale» (CCPPRB¹⁵) sur l'ensemble du territoire français. Les problèmes, pourtant épineux, qui surgissent dans ce domaine suscitent peu d'intérêt auprès du grand public – un constat reflété peut-être dans le fait que la loi Huriet-Sérusclat a été votée à l'unanimité.

En effet, le débat public français s'est focalisé d'emblée sur les pratiques médicales qui semblent ébranler les normes sociales et les valeurs morales liées à la famille, à la naissance et à la personne, telles que l'utilisation de tissus foetaux, l'assistance médicale à la procréation, le diagnostic prénatal. Trois des cinq premiers avis du CCNE ont porté sur l'une de ces pratiques, et ce sont pour la plupart des pratiques directement ou indirectement liées au sexe et à la reproduction – l'assistance médicale à la procréation, les tests génétiques, et la circulation des produits du corps humains – qui sont

réglementées par la loi «relative à la bioéthique». Les débats publics qui ont précédé le récent réexamen de cette loi confirment cette tendance dans la mesure où l'anonymat du don de sperme, la gestation pour autrui, et la recherche sur l'embryon ont eu une couverture médiatique considérable et ont suscité des débats parlementaires passionnés. Cette tendance est accentuée par le fait que les débats sur ces pratiques deviennent l'occasion par excellence de mettre sur la place publique les questions relatives à l'inégalité de traitement des hommes et des femmes. L'usage du mot bioéthique semble ainsi se restreindre – tout au moins dans le débat public – à des pratiques qui modifient nos conceptions de la famille et des liens de parentés, du statut de l'embryon et de notre commune humanité – en d'autres termes des pratiques médicales qui véhiculent des transformations sociales et anthropologiques des relations entre êtres humains¹¹.

Par contraste, les problèmes liés aux prises en charge des patients en cas de maladie grave et leurs conditions de fin de vie (acharnement thérapeutique, euthanasie, suicide assisté), - thèmes fréquents dans le débat américain dès les années 1960 et 1970 -, ne sont devenus que très récemment en France l'objet d'une attention spécifique. Et comme nous l'avons déjà mentionné, ils ont été débattus dans un contexte distinct du réexamen de la loi relative à la bioéthique. Or ces pratiques, tout comme les questions relatives à la recherche en milieu médical, sont celles qui interrogent le plus fortement les conditions courantes de l'exercice de la médecine, notamment en ce qui concerne l'information du patient quant à son état et l'inclusion de celui-ci dans la prise de décision sur les moyens à mettre (ou à ne pas mettre) en œuvre pour les soigner. En privilégiant les pratiques perçues comme socialement problématiques, le débat français en matière de bioéthique semble ainsi préserver d'un retour critique l'exercice même de l'activité médicale.

En effet, de nombreux médecins ont été, dans les années 1980, fort réticents à toute législation réglementant des pratiques médicales spécifiques. Toutefois, ceux concernés par des pratiques innovantes controversées ont progressivement compris l'avantage de lois qui encadrent l'accès à celles-ci, notamment lorsque les décisions au jour le jour

soulèvent des questions ne relevant pas exclusivement de leurs compétences professionnelles (par exemple : doit-on accepter la demande d'AMP d'une femme seule ou d'un couple de femmes ?). Mais ils persistent – et peut-être à juste titre – dans leur objection de principe à toute disposition qui prescrirait une conduite relative à des actes qui nécessitent la mobilisation de leurs compétences spécifiques pour apprécier chaque situation.

Cette constatation conduit à ce qui pourrait être considéré comme le trait distinctif de la bioéthique en tant que fait de société en France : une propension à vouloir donner aux questions éthiques des réponses juridiques. Certes, cette activité législative est en partie dictée par le fait que le droit français, contrairement au droit américain, ne peut changer substantiellement par la seule jurisprudence. Toutefois, les questions morales qui surgissent dans la pratique médicale quotidienne ne renvoient pas nécessairement à des failles dans son encadrement juridique ; elles émergent le plus souvent d'un doute concernant la meilleure conduite à tenir dans une situation déterminée et exigent de ce fait une pratique délibérative rigoureuse et bien informée des données du problème.

Le fait de placer sur un plan juridique le débat éthique réduit ainsi tout dilemme moral à un problème d'interprétation du cadre juridique. Par exemple : Quels critères permettent de déterminer si une maladie justifiant l'accès au diagnostic anténatal est, selon les termes de la loi, d'une «particulière gravité»¹² ? Jusqu'à quel âge un homme et une femme sont-ils en «âge de procréer» et donc susceptibles de bénéficier d'une assistance médicale à la procréation¹³ ? Il donne également l'illusion que le travail normatif du législateur permet de clore le débat, alors que des problèmes complexes dans des contextes parfaitement conformes au cadre juridique ne cessent d'émerger, en amont et en aval du travail parlementaire.

La loi relative à la bioéthique permet-elle aussi à l'Etat d'organiser, d'encadrer et ainsi de mieux contrôler ce que la société française met sous ce vocable ? C'est ce que l'on peut penser en voyant sur le site web des Etats généraux de la bioéthique, débats publics organisés en 2009 dans la perspective du réexamen de la loi, que la définition de la

bioéthique proposée correspond au contenu de la loi¹⁰. Si tel était le cas, les conditions de la réflexion et du débat éthique, tant en ce qui concerne les lieux de ces débats que les parties prenantes, seraient appauvries, ce qui empêcherait peut-être la production de réponses innovantes, plus souples et mieux adaptées aux problèmes nombreux et complexes – éthiques, juridiques et autres – que posent les avancées de nos connaissances et de nos capacités technologiques.

Notes

1. La loi de 2011 fixe le nouveau délai à sept ans.
2. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1971.
3. Page 2 du premier numéro du *Hastings Center Report* de l'année 1975, qui rassemble en une seule publication, le bulletin créé sous ce nom en 1971, avec des articles courts, et le *Hastings Center Studies*, créé en 1973, pour la diffusion d'articles plus longs, conformes à une revue scientifique.
4. Callahan D., "Values, Facts, and Decision-making", *The Hastings Center Report*, n° 1: June 1971, p. 1.
5. Oxford University Press, 2008. Outre leur ouvrage, pour mieux connaître l'histoire de cette période, voir un supplément du *Hastings Center Report*, intitulé *The Birth of Bioethics*, vol. 23, n° 6 (Nov. – Dec. 1993), pp. S1-S16, qui publie les textes d'une conférence ayant réuni les protagonistes de cette histoire. Un imposant ouvrage en est issu : Jonsen A.R., ed., *The Birth of Bioethics*, Oxford University Press, 1998. Voir aussi une première histoire de cette période: Rothman, D.J. *Strangers at the Bedside : A History of How Law and Bioethics Transformed Medical Decision-Making*, Hawthorne, New York, Basic Books, 1991.
6. Voir note 2.
7. «The Institute was founded in 1969 to fill the need for sustained, professional investigation of the social impact of the biological revolution. Remarkable advances were being made in organ transplantation, human experimentation, prenatal diagnosis of genetic disease, prolongation of life and control of human behavior-and each advance posed specific problems requiring that scientific knowledge be matched with ethical insight. » *Hastings Center Report*, n° 1, 1971, page 2.
8. Voir site web du Hastings Center : <http://www.thehastingscenter.org/About/Default.aspx> . Accès 3 février 2012.
9. François-André Isambert, «Révolution biologique ou réveil éthique ?», *Cahiers STS (Science-technologie-société)* * 11 : Éthique et biologie, Paris, Editions du CNRS, 1986, pp. 9-41. P. 33.
10. Pour plus de détails, voir aussi mes propres articles sur ce sujet : «De l'expérimentation comme norme thérapeutique» in *La gouvernance des innovations médicales*, V. Tournay, dir., Paris, Presses Universitaires de France, 2007, p. 97-119 ; «Les essais cliniques : pourquoi sont-ils aujourd'hui critiqués ?», *Pour la Science*, n° 381, juillet 2009, pp. 18-21.
11. Des remarques en ce sens m'ont été faites à plusieurs reprises au début des années 1980.
12. Un ouvrage collectif récent reflète bien le type de production de ces centres: Hirsch E. (dir). *Traité de bioéthique*, Tome I, Fondements, principes, repères ; Tome II, Soigner la personne, évolutions, innovations thérapeutiques, Tome III, Handicaps, vulnérabilités, situations extrêmes. Paris, Erès, 2010.
13. Décret n° 83-132 du 23 février 1983 portant création d'un Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé, article premier.
14. Témoignage personnel.
15. Désigné plus simplement « comités de protection des personnes » (CPP) depuis la loi n° 2004-806 du 9 août 2004 relative à la politique de santé publique.
16. La couverture de deux récents ouvrages présentant une synthèse critique de la bioéthique – celui du juriste Daniel Bornillo, *Bioéthique*, Paris, Dalloz, 2011, et celui du professeur de médecine Didier Sicard, *L'éthique médicale et la bioéthique*, Paris, Presses universitaires de France, 2011 (Collection Que sais-je ?) – illustrent parfaitement ce propos. Ce n'est pas le cas du contenu : chaque livre élargit le champ couvert par le terme.
17. Article L2131-1 du Code de la Santé Publique.
18. Article L.2141-2 du Code de la Santé Publique.
19. <http://www.etatsgenerauxdelabioethique.fr/presentation-generale/la-bioethique-enquelques-mots.html>.

Observation de la Terre depuis l'espace : quelques exemples

par Anny Cazenave, chercheur au CNES

Anny Cazenave est chercheur au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale, Centre national d'études spatiales, Toulouse, France. Domaines de recherche : applications des techniques spatiales à l'étude de la planète (géodésie, structure interne de la Terre, rotation de la Terre, déformations globales de la Terre, niveau de la mer et climat, cycle global de l'eau et hydrologie continentale). 180 articles dans les revues internationales à comité de lecture. Investigateur principal de plusieurs missions spatiales (géodésie et océanographie). Membre du GIEC (auteur principal, 4^e et 5^e rapports). Membre de l'Académie des sciences. Membre étranger de la National Academy of Science (USA) et de l'Indian National Science Academy (Inde).



Résumé

Cet article présente quelques résultats relatifs à l'observation de la planète Terre depuis l'espace. On discute en premier lieu la mesure du champ de gravité de la Terre à partir des satellites géodésiques et l'apport de l'altimétrie spatiale à la connaissance du géoïde marin et de la topographie des fonds marins. Après un rappel du rôle joué par l'altimétrie de haute précision dans le domaine de l'océanographie spatiale, on discute plus spécifiquement la hausse du niveau de la mer - sa mesure et ses causes. On évoque ensuite la mesure par les techniques spatiales du bilan de masse des calottes polaires, une contribution grandissante à la hausse du niveau de la mer. On aborde pour finir l'apport de l'observation spatiale (en particulier de l'altimétrie et de la gravimétrie spatiales) à l'étude des eaux continentales (eaux de surface et stock d'eau total dans les grands bassins fluviaux), et plus généralement des ressources en eau.

Introduction

Depuis plus d'un demi siècle, les satellites artificiels observent et mesurent notre planète sous toutes les coutures, révélant quantité d'informations sur l'atmosphère, l'océan, les terres émergées et sur le globe solide. Si l'utilité de l'espace pour l'étude et la surveillance de l'environnement terrestre est devenue incontournable, elle l'est aussi pour mieux comprendre la structure interne de la planète ainsi que les phénomènes affectant les enveloppes fluides de surface. La Terre est en effet un système complexe dont les différentes composantes (de la partie la plus

Abstract

We present a selection of results related to the solid Earth and its fluid envelopes obtained in the recent years/decades using remote sensing techniques. We first discuss measurement of the Earth gravity field at different spatial scales and the mapping of the seafloor topography from satellite altimetry. Next we briefly mention recent advances in ocean dynamics based on high-precision satellite altimetry missions, and then focus on sea level rise.

We also discuss how remote sensing techniques, including space gravimetry, inform on the mass balance of the ice sheets, a growing contribution to sea level rise. Finally, we report on the monitoring of surface water levels (lakes, rivers, floodplains) by satellite altimetry and on the determination of total land water storage change at river basin scale, using space gravimetry observations.

interne du globe jusqu'à l'atmosphère et la biosphère) interagissent sur des échelles d'espace et de temps extrêmement variées. Pour décrire la globalité des phénomènes observés, les satellites sont des outils irremplaçables. Leurs avantages sont bien connus : ils offrent une vision globale et une résolution spatiale fine. Leurs observations couvrent des régions d'accès difficile, elles sont réalisées de manière quasi continue ou souvent répétées. Leurs mesures sont bien étalonées et accessibles rapidement.

Dans un grand nombre de cas, les observations sont réalisées à partir de techniques de télédétection,

dont la caractéristique est de décrire à distance les propriétés d'objets naturels ou artificiels, à partir des rayonnements qu'ils émettent ou réfléchissent. Mais d'autres approches sont aussi développées, notamment pour déterminer les propriétés physiques à grande échelle du globe terrestre ou encore les déformations de la surface terrestre. Parmi celles-ci, on peut citer l'embarquement sur satellites d'instruments permettant la mesure de phénomènes particuliers, la mesure de distances ou de vitesses entre le satellite et des balises placées à la surface terrestre, ou encore la mesure des déformations des trajectoires qui renseignent sur les forces maintenant les satellites en orbite, telle la gravité de la Terre.

On présente ci-dessous quelques exemples d'applications scientifiques de l'observation spatiale à l'étude du système Terre.

Le champ de gravité terrestre cartographié par satellite

Depuis plus de 50 ans, l'étude des orbites des satellites géodésiques a permis d'établir des cartes très précises du champ de gravité de la Terre à grandes longueurs d'onde. Plusieurs générations de modèles globaux du champ de gravité terrestre ont été publiées, en particulier par les chercheurs français. Le champ de gravité terrestre est loin d'être uniforme. Il varie d'un endroit à l'autre de la Terre. Les variations géographiques du champ de gravité résultent de la répartition non uniforme de la matière dans les différentes enveloppes du globe. On peut visualiser ces variations de gravité au moyen d'une surface appelée «géoïde», qui coïncide avec le niveau moyen des océans au repos. A grande échelle, le géoïde présente deux grandes bosses, l'une centrée sur l'Islande, englobant presque tout l'Atlantique nord, l'autre située au sud de l'Afrique entre Madagascar et l'Antarctique. Un creux situé au sud de l'Inde est aussi observé.

Le satellite européen GOCE mis en orbite en 2009 par l'Agence spatiale européenne (ESA) a permis d'obtenir une cartographie du champ du géoïde terrestre avec une précision sans précédent grâce à une nouvelle technologie utilisant un gradiomètre embarqué. Une vue du géoïde terrestre mesuré par GOCE en quelques mois seulement est présentée sur la figure 1.

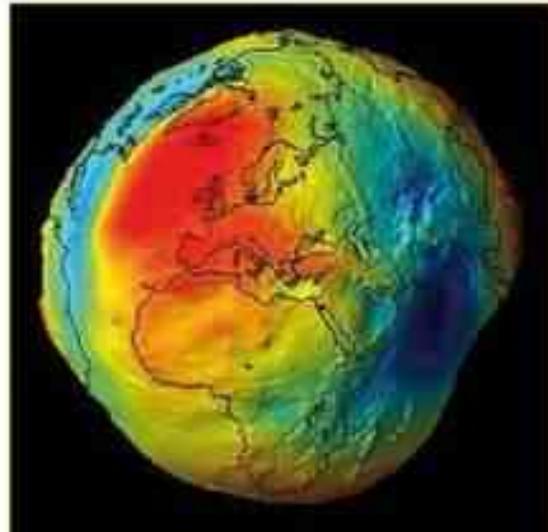


Fig.1 : les ondulations à grande longueur d'onde du géoïde terrestre mesurées par le satellite gradiométrique européen GOCE (source : ESA).

On sait aujourd'hui que les grandes bosses du géoïde coïncident avec les grands courants convectifs affectant le manteau terrestre. Les courants de convection à grande échelle dans le manteau terrestre sont responsables du déplacement des plaques lithosphériques à la surface de la Terre et de l'expansion des fonds océaniques, et indirectement de la formation des chaînes de montagnes continentales, de l'activité volcanique et sismique.

L'altimétrie spatiale appliquée à l'étude de la planète



Fig.2 : le satellite altimétrique Jason-1 développé par le CNES et la NASA et lancé en 2001.

L'altimétrie spatiale permet de cartographier directement à l'aide d'un altimètre embarqué, les ondula-

tions de la surface marine, avec une très grande résolution au sol. L'altimétrie radar a été développée dès le milieu des années 1970 pour étudier les océans. Le satellite altimétrique Seasat (USA) lancé en 1978 ne fonctionna que 3 mois mais fit une brillante démonstration des potentialités de l'altimétrie spatiale. Plusieurs missions altimétriques lui ont succédé : Geosat (1985-1989, USA), ERS-1 (1991-1996, ESA), ERS-2 (1995, ESA), Topex/Poseidon (1992-2006, Cnes-Nasa), Jason-1&2 (figure 2) (2001 et 2008, Cnes-Nasa) et Envisat (2002, ESA). Jusqu'au lancement de Topex/Poseidon (qui a marqué le début de l'altimétrie de haute précision), l'altimétrie spatiale a été surtout utilisée pour étudier la terre solide.

Les ondulations du géoïde marin : une image du fond des océans

Les ondulations de la surface marine cartographiées par altimétrie ont deux composantes : une composante permanente (invariable dans le temps mais qui varie géographiquement) due aux irrégularités du champ de gravité terrestre, et une composante qui varie dans le temps, résultant des phénomènes océanographiques (marées, courants, tourbillons, etc.). Les ondulations permanentes peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres et sont donc supérieures d'un facteur 10 à 100 à celles causées par les phénomènes océanographiques. Grâce au quadrillage très fin des régions océaniques (avec une résolution au sol meilleure que 10 km partout avec les satellites Geosat et ERS-1), l'altimétrie apporte des informations précieuses sur les composantes de petite échelle spatiale (10 km-500 km) du géoïde marin. Celles-ci sont une réplique quasi exacte de la topographie des fonds marins. Pendant des décennies, la bathymétrie (topographie des fonds marins) a été mesurée par sondage acoustique à partir des navires, laissant un vaste domaine océanique totalement inexploré, en particulier dans l'hémisphère sud. Grâce à l'altimétrie spatiale, la topographie sous-marine a pu être déterminée sur tout le domaine océanique avec une résolution de quelques km partout (Figure 3). Cette topographie montre la grande complexité des fonds marins. Outre les grandes structures déjà connues telles les dorsales océaniques, les zones de fractures et les zones de subduction (zones où les plaques lithosphériques s'enfoncent dans le manteau terrestre), ou encore les alignements de volcans sous-marins, la topographie globale des fonds marins



Fig.3 : carte de la topographie des fonds marins mesurée par altimétrie spatiale (source ESA)

révèle d'autres structures jusqu'ici insoupçonnées ou incomplètement cartographiées à partir des bateaux. D'innombrables montagnes sous-marines, dont la moitié d'entre elles n'avaient jamais été cartographiées, ont été identifiées. On a aussi découvert quantité de reliefs fossiles, témoins d'une activité tectonique aujourd'hui disparue. Outre leur intérêt majeur pour la géophysique marine, ces données sont aussi très utiles dans de nombreux domaines comme la navigation sous-marine, la pêche commerciale, l'exploration pétrolière en mer, etc.

L'altimétrie spatiale de haute précision pour étudier les océans et mesurer la hausse du niveau des mers

L'altimétrie spatiale de haute précision, développée depuis le début des années 1990 avec les satellites Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2 et Envisat, est aujourd'hui un outil précieux pour l'océanographie. Cette technique permet de mesurer avec une précision remarquable (environ 2 cm) la hauteur des océans par rapport à une référence fixe et ses variations avec le temps. En quelques jours seulement le satellite réalise un quadrillage complet de l'ensemble des océans (c'est le cycle orbital). D'un cycle à l'autre, le satellite repasse au-dessus des mêmes régions océaniques. Il peut ainsi détecter les variations de la hauteur des océans au cours du temps. Ces données sont utilisées pour mieux connaître :

- les courants marins et leurs variations
- les marées océaniques
- les perturbations naturelles du système climatique tel que le phénomène El Niño
- la hauteur des vagues et la vitesse du vent à la

surface de la mer
• les phénomènes turbulents de l'océan
• les variations temporelles du niveau moyen de la mer.

Réchauffement de la planète et hausse du niveau de la mer

Grâce à l'altimétrie spatiale de haute précision, on mesure aujourd'hui en routine l'évolution du niveau moyen de la mer au cours du temps. Depuis début 1993, le niveau moyen de la mer s'est élevé de 6 cm. La vitesse d'élévation moyenne (de 3,2 mm par an) est nettement supérieure à celle mesurée par les marégraphes au cours du 20^e siècle (1,8 mm par an) (Fig.4).

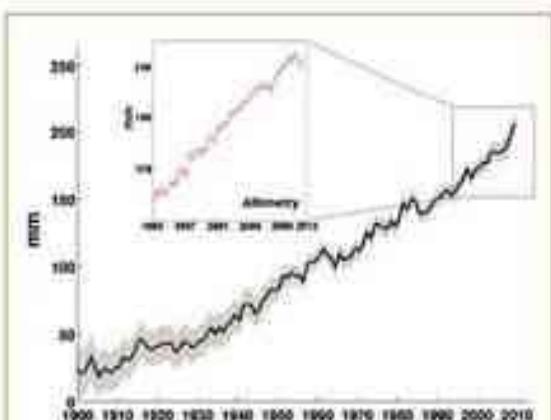


Fig.4 : l'évolution du niveau de la mer au cours du 20^e siècle (en noir : d'après les mesures marégraphiques ; en rouge : à partir de l'altimétrie spatiale TopeX/Poseidon, Jason-1 et Jason-2) (source : LEGOS)

L'élévation actuelle du niveau de la mer résulte de deux grands phénomènes : le réchauffement de l'océan et la fonte des glaces continentales.

Le réchauffement de la planète causé par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre n'affecte pas que les basses couches de l'atmosphère et la surface des continents. Grâce à des mesures de température de la mer collectées au cours des 5-6 dernières décennies entre la surface et 1000 m à 2000 m de profondeur dans l'océan, à partir de navires et plus récemment par des flotteurs

automatiques, les océanographes ont observé que l'océan s'est réchauffé de façon importante sur cette période. À cause de sa grande inertie thermique, l'océan stocke 90% de la chaleur excédentaire accumulée dans le système climatique depuis 50 ans à cause du réchauffement anthropique (15 à 20 fois plus que dans la basse atmosphère et sur les terres émergées). En se réchauffant, l'océan se dilate, ce qui crée une élévation du niveau de la mer. On estime qu'au cours des 2 dernières décennies ce phénomène contribue pour environ 30% à la hausse observée de la mer. Grâce à leur couverture complète du domaine océanique, les satellites altimétriques nous ont révélé que la hausse du niveau de la mer est loin d'être uniforme (Fig.5a et 5b). Dans le Pacifique ouest par exemple, la mer s'est élevée 2 à 3 fois plus vite qu'en moyenne depuis 18 ans. Nous savons aujourd'hui que cette importante variabilité régionale est causée par le réchauffement non uniforme de l'océan (Fig.5c). Résultat : la mer monte plus vite dans certaines régions que dans d'autres.

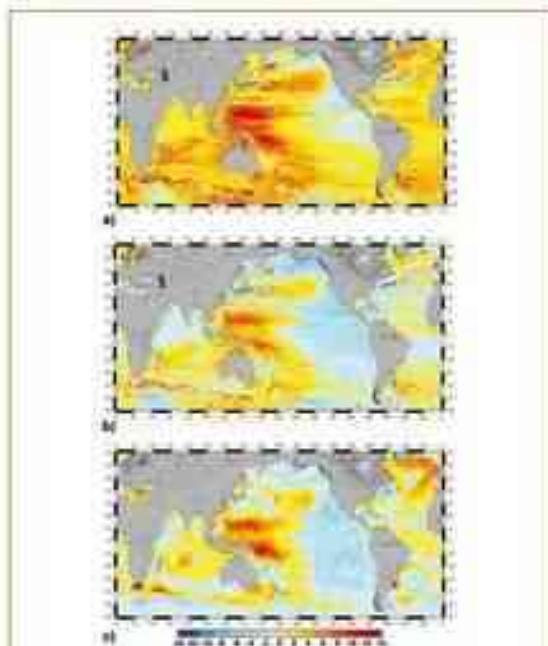


Fig.5 : (a) variations régionales des vitesses de variation du niveau de la mer mesurées par altimétrie spatiale entre 1993 et 2010. (b) Même carte que (a) mais avec l'élévation moyenne globale de 3,2 mm/an. (c) Variations régionales de l'expansion thermique des océans entre 1993 et 2010. (source : LEGOS)

Le réchauffement climatique actuel est aussi responsable de la diminution des glaces continentales. Le recul quasi global des glaciers de montagne enregistré depuis quelques décennies contribue lui aussi pour environ 30% à la hausse actuelle de la mer.

Malgré leur situation reculée, beaucoup d'informations ont été recueillies sur les calottes polaires (Groenland et Antarctique) depuis 2 décennies grâce à l'observation spatiale. Plusieurs techniques spatiales (l'altimétrie radar et laser, l'interférométrie radar et la gravimétrie spatiale, voir plus bas) permettent par exemple d'estimer leur bilan de masse, ce qui ne serait pas possible à partir de mesures *in situ*. La figure 6 montre la diminution de la masse de la calotte groenlandaise mesurée par la mission de gravimétrie spatiale GRACE. Entre 2002 et 2009, le Groenland a ainsi perdu environ 200 milliards de tonnes de glace par an. Les satellites ont aussi montré que l'Antarctique de l'ouest a perdu environ 150 milliards de tonnes de glace par an au cours des dernières années. Cette glace principalement déversée sous forme d'icebergs dans l'océan contribue à la hausse de la mer. On estime que les deux calottes de glace contribuent à environ 25% de la hausse actuelle de la mer.

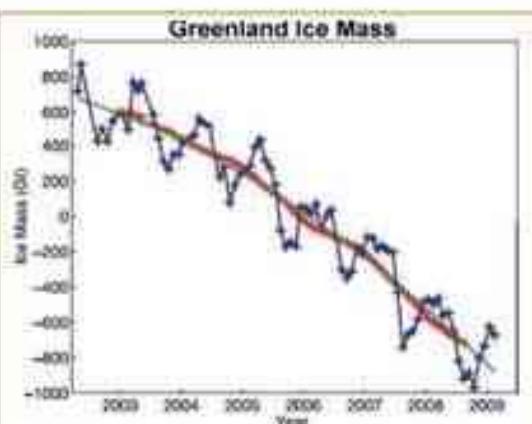


Fig. 6 : Evolution de la masse de glace de la calotte groenlandaise mesurée par GRACE entre 2002 et 2009 (source : LEGOS)

La mesure globale et continue de l'évolution du niveau de la mer par altimétrie spatiale et une bonne compréhension des différentes causes de cette évolution (notamment la perte de masse des

calottes polaires) sont d'un intérêt considérable pour l'amélioration des modèles de climat utilisés pour calculer la hausse future - encore très incertaine - du niveau de la mer.

Les eaux continentales observées depuis l'espace

L'eau sur Terre est continuellement échangée entre l'océan, l'atmosphère et les terres émergées par les précipitations, l'évaporation et l'écoulement à la mer via les réseaux hydrographiques (c'est le cycle de l'eau dont le moteur principal est le soleil). Sur les continents, le stock total d'eau contenu dans les sols, les aquifères, les réservoirs de surface (acs, plaines inondées) et le manteau neigeux fluctue légèrement en réponse à la variabilité climatique et au forçage anthropique direct (par exemple, la déforestation, l'occupation des sols, la construction de barrages sur les fleuves, ou encore le pompage des eaux souterraines et l'irrigation des cultures). Pour décrire et comprendre le bilan d'eau dans les bassins fluviaux et ses variations spatio-temporelles, les scientifiques ont besoin d'observations précises, globales et continues. Si des réseaux d'observation *in situ* (niveaux d'eau, débits, humidité des sols) ont été mis en place au cours des dernières décennies dans certains bassins, leur distribution reste très limitée et hétérogène. D'autant que depuis une vingtaine d'années, dans de nombreux pays, les réseaux ne sont plus maintenus. En outre, lorsque les données existent, leur accessibilité devient de plus en plus problématique.

La gravimétrie spatiale : un nouvel outil pour mesurer les ressources en eau

Il y a exactement 10 ans a été lancée la mission spatiale GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment). GRACE permet de mesurer les variations temporelles du champ de gravité avec une résolution temporelle de 1 mois. Aux échelles de temps saisonnières et interannuelles, les variations de la gravité résultent des échanges d'eau entre (et dans) les océans, l'atmosphère, les réservoirs continentaux et les calottes glaciaires (GRACE « voit » aussi les variations des masses d'air dans l'atmosphère mais ces effets sont corrigés). Les principales applications de la mission GRACE concernent la mesure du bilan de masse des calottes polaires (voir ci-dessus) et des stocks d'eaux continentales.

Les observations de la mission GRACE ont permis pour la première fois de quantifier à l'échelle de la planète entière les fluctuations des stocks d'eau avec d'importantes applications à l'étude du climat et à l'inventaire des ressources en eau. Une des plus spectaculaires applications de GRACE est la détection de la diminution du stock d'eau dans plusieurs aquifères de la planète à cause du pompage de l'eau pour l'agriculture et les besoins domestiques. Un exemple est montré sur la figure 7 pour le bassin du Gange en Inde.



Fig. 7 : diminution du stock d'eau souterraine dans le bassin du Gange entre 2002 et 2008, mise en évidence par la mission spatiale GRACE. Cette diminution a pu être attribuée au pompage de l'eau dans les nappes pour les besoins de l'irrigation des cultures (source : Thériot, V.M., Wahl, J., Swenson, S., 2009. Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations. *Geophys. Res. Lett.* 36, L18401. doi:10.1029/2009GL039401).

L'altimétrie pour mesurer les eaux de surface

Bien qu'optimisée pour étudier les océans, l'altimétrie spatiale est utilisée depuis une décennie pour déterminer les variations temporelles du niveau d'eau des lacs, des grands fleuves et des plaines inondées (Fig. 8).



Fig. 8 : évolution du niveau du lac Victoria (Afrique de l'est) entre 1993 et 2011 mesuré par altimétrie spatiale (source LEGOS).

Combinée avec l'imagerie satellitaire, l'altimétrie permet aussi de mesurer les variations des volumes d'eau des lacs et des plaines inondées. Sous certaines conditions, on peut aussi en déduire les débits des fleuves. Cependant, pour de nombreuses applications hydrologiques, l'altimétrie classique présente des inconvénients majeurs. En raison de perturbations causées par les berges et la végétation, l'écho radar réfléchi sur l'eau des rivières est souvent difficile à interpréter. La couverture des fleuves par les satellites altimétriques actuels est par ailleurs très insuffisante en raison de l'espacement de plusieurs dizaines de km entre les traces. De nombreuses portions de grands fleuves ainsi que nombre de petits cours d'eau ne sont pas survolés. Ces limitations ont conduit récemment la communauté scientifique internationale et les agences spatiales française et américaine à proposer un nouveau concept instrumental : l'altimétrie interférométrique, capable de fournir des hauteurs d'eau sur des fauchées de l'ordre de 50 km x 50 km de part et d'autre de la trace du satellite, avec une précision de quelques centimètres et une résolution au sol de l'ordre de 100 mètres. Cette mission appelée SWOT (Surface Waters- Ocean Topography) développée conjointement par le CNES en France et la NASA aux USA devrait voler à la fin de la présente décennie. Elle permettra de suivre les niveaux d'eau sur la majeure partie des cours d'eau du monde et de l'ensemble des zones inondées, de mesurer les

volumes d'eau de surface et les débits des fleuves, avec une couverture globale, une très haute résolution, une précision inégalée et un temps de revisite de quelques jours ; une véritable révolution dans le domaine de l'hydrologie !

Les ressources en eau depuis l'espace : un nouveau défi et un double enjeu

Avec la qualité de l'eau, la gestion des ressources hydriques au 21^e siècle constitue l'un des problèmes majeurs des sociétés humaines. La population mondiale croît à un rythme sans précédent : de 7 milliards en 2011 le nombre d'individus devrait passer à 9 milliards en 2050. Si plus de 80 % des eaux prélevées par les humains sont utilisées pour l'agriculture et l'industrie, l'utilisation domestique ne représente qu'une contribution modeste, de 10 %. Les plus gros consommateurs d'eau douce sont actuellement l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie, mais vers 2025 l'Asie consommera 10 fois plus d'eau douce que le reste de la planète. Or les ressources en eau de la planète sont limitées et mal réparties. Savoir comment elles évoluent en réponse au changement climatique et à la pression anthropique est un défi de première importance.

La description précise des variations spatio-temporelles des eaux continentales depuis l'espace est considérée aujourd'hui comme un objectif majeur avec un double enjeu. D'une part, un enjeu scientifique pour une meilleure compréhension du cycle global de l'eau. D'autre part, un enjeu socio-économique quant à l'inventaire et la gestion des ressources en eau ; les projections futures dans le contexte du changement climatique global et de l'augmentation de la démographie ; la prédition des crues et des sécheresses ; la prévention de certaines maladies tropicales comme le paludisme, liées à l'expansion des zones humides... pour ne citer que quelques exemples.

Conclusion

Ce bref survol montre combien les satellites sont précieux pour étudier la planète et suivre ses évolutions, notamment celles liées aux risques

naturels, au changement climatique et à la pression anthropique. Ces nouvelles préoccupations, devant permettre une meilleure gestion de l'environnement terrestre, comptent parmi les enjeux de nombreux programmes internationaux, tel le programme européen GMES (Global Monitoring for Environment and Security) dont la mission générale est de développer des services de fourniture d'informations dans le domaine de l'environnement à l'usage de la société, fondés sur l'utilisation de données in situ et spatiales. La communauté française et ses partenaires européens peuvent - et doivent - se mobiliser pour valoriser les produits issus de l'espace (dont certains très nouveaux comme ceux liés à la ressource en eau) dans les différents domaines de l'environnement terrestre. Il s'agit d'un défi important nécessitant une organisation optimisée regroupant chercheurs, industriels et utilisateurs venant d'horizons très divers,

Bibliographie

- Earth Observations from space, the first 50 years of scientific achievements, National Research Council, The National Academies Press, Washington DC, 2008.
- Understanding sea level rise and variability, Church et al. editors, 428 pages, Wiley- Blackwell, 2010.
- Les eaux continentales, rapport de l'Académie des sciences, sous la direction de Ghislain de Marsily, EDP sciences, 2006.
- Time-variable gravity from space and present-day mass redistribution in the Earth system, A. Cazenave & J. Chen, Frontiers Article, Earth Planetary Sciences Letters, 298, 263-275, 2010.
- Measuring global oceans and terrestrial fresh water from space, Alsdorf, D., L.L. Fu, N. Mognard, A. Cazenave, E. Rodriguez, D. Chelton and D. Lettemaier EOS, Transactions, AGU, v88, n24, p253, 2007.
- La Terre vue de l'espace, A. Cazenave et D. Massonnet, Bibliothèque Pour la Science, Editions Belin, 2004.
- Observing the solid Earth, oceans and land waters from space, A. Cazenave, The European Physical Journal, ERCA volume 8, 2008.
- Tiwari V. and Wahr J., GRL, 2009.

Mathématiques et océanographie : quelques exemples

par Anne-Laure Dalibard, chargée de recherche au CNRS

Anne-Laure Dalibard est chargée de recherche en mathématiques au CNRS, affectée au Département de mathématiques et applications de l'ENS. Ancienne élève de l'École normale supérieure, elle a réalisé sa thèse sous la direction de Pierre-Louis Lions, à l'Université Paris-Dauphine.

Ses travaux de recherche concernent l'analyse des équations aux dérivées partielles, et plus particulièrement l'étude asymptotique d'équations mettant en jeu des phénomènes de petites échelles (homogénéisation, couches limites). Ces dernières années, elle a étudié, en collaboration avec Laure Saint-Raymond, plusieurs problèmes de couches limites en océanographie. Elle a obtenu le prix Peccot du Collège de France en 2010.



Résumé

La modélisation des courants marins requiert une analyse mathématique fine des modèles, afin de simplifier et d'améliorer les simulations numériques. Néanmoins, la complexité intrinsèque des systèmes océaniques, due principalement à des effets géométriques et à la multiplicité des échelles en jeu, empêche de donner une description exhaustive des solutions des équations. Dès lors, l'enjeu pour les mathématiciens est d'isoler des sous-problèmes pertinents et abordables. Ces sous-modèles permettent de développer des outils d'analyse puissants en vue d'attaquer ensuite des problèmes plus sophistiqués. Après avoir détaillé l'ensemble des phénomènes en jeu, on présente ici un exemple d'étude mathématique autour des couches limites.

Abstract

Modelling of sea currents requires a detailed analysis of the models, in order to simplify and improve the numerical simulations. However, the intrinsic complexity of oceanic systems, mainly due to geometrical effects and to the multiplicity of relevant scales, prevents from providing an exhaustive description of the solutions of the equations.

Therefore the mathematicians' challenge is to isolate relevant and solvable subproblems. These subproblems allow the development of powerful analysis tools in order to later solve more sophisticated problems. After a detailed description of the physical background, an example of mathematical study around boundary layers is presented here.

Mathématiques et océanographie

L'étude mathématique des modèles océanographiques est un domaine en plein essor, grâce au développement d'outils fins d'analyse des équations aux dérivées partielles. L'importance des enjeux humains et environnementaux liés à ces modèles n'est plus à démontrer ; outre les interactions naturelles entre l'océanographie et la climatologie, la prédiction des zones de pêche et celle des zones inondables sont deux exemples d'application des équations régissant l'évolution des vagues et des courants marins.

Cependant, la complexité intrinsèque des modèles rend difficile le développement de simulations

numériques précises et fiables, même sur les meilleurs calculateurs. Dès lors, le rôle des mathématiques est d'élaborer des modèles simplifiés (appelés parfois modèles « jouets »), dont le but n'est pas tant de refléter la réalité que de comprendre certains mécanismes élémentaires, en vue d'une implémentation future dans des systèmes plus complets. Idéalement, l'idée est de remplacer le calcul (coûteux) d'une solution réelle des équations par celui (plus simple) d'une solution approchée, dictée par l'analyse mathématique.

L'océan, un système complexe

L'importance de la géométrie dans la modélisation des courants marins est la première source de

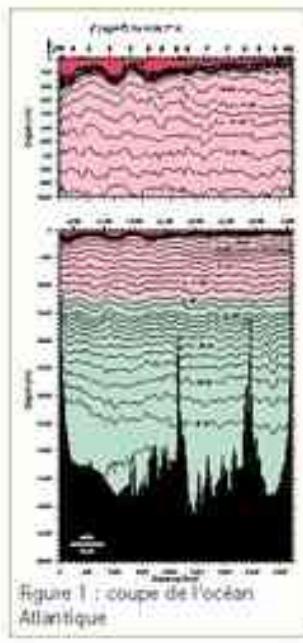


Figure 1 : coupe de l'océan Atlantique

complexité. Évidemment, prendre en compte la géométrie sphérique de la Terre est primordial en vue d'une description précise. Néanmoins, l'analyse mathématique d'équations aux dérivées partielles écrites en coordonnées sphériques engendre des difficultés techniques conséquentes, de sorte que la majorité des études préfère se ramener à une géométrie cartésienne. Par ailleurs, les fonds marins et les côtes présentent un relief très découpé.

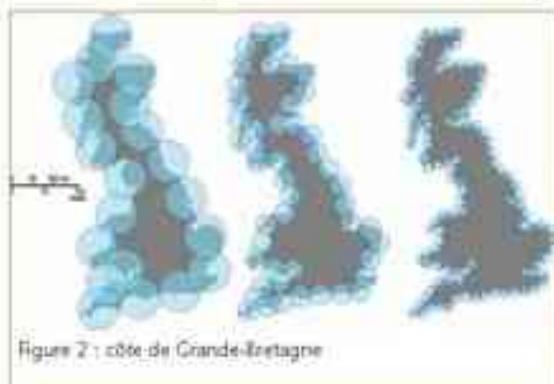


Figure 2 : côte de Bretagne

(figures 1 et 2), qui peut être abordé de deux façons différentes et complémentaires du point de vue mathématique : soit on considère que le bord du domaine fluide est irrégulier (c'est-à-dire qu'il peut posséder des arêtes et des coins), soit on modélise le bord à l'aide de fonctions régulières, mais ayant des variations spatiales très rapides. Chacune de ces représentations a un impact immédiat sur la solution des équations, mais aussi sur les outils à la disposition des mathématiciens pour étudier les propriétés de ces solutions.

Les océans sont en outre soumis à de nombreux **forçages**, qui sont en compétition les uns avec les

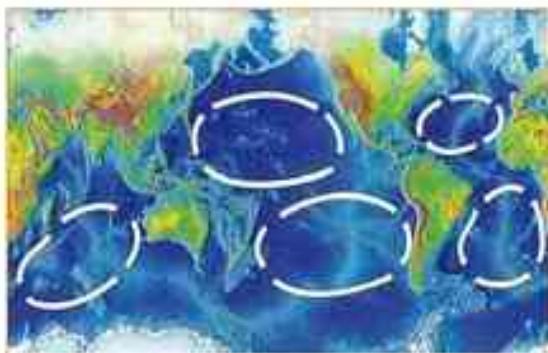


Figure 3 : les cinq gyres principaux

autres. La force de Coriolis, due à la rotation de la Terre, joue un rôle capital dans la dynamique. Il est bien connu, par exemple, qu'elle dicte le sens de rotation des «gyres» (tourbillons marins à l'échelle d'un océan, voir la figure 3) : sens horaire dans l'hémisphère Nord, anti-horaire dans l'hémisphère Sud. Le couplage avec l'atmosphère se traduit entre autres par l'entrainement par le vent des courants de surface, et est ainsi un des premiers moteurs de la circulation globale. Enfin, l'attraction gravitationnelle de la Lune est responsable des phénomènes de marées, bien que son incidence sur la dynamique globale soit moindre.

La co-existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles s'ajoute aux difficultés précédentes. Sur une échelle spatiale planétaire, le mouvement principal est dominé par la rotation terrestre. La description des grands courants océaniques (Gulf Stream, Kuroshio, etc.) est plutôt pertinente sur des échelles de l'ordre de 1000 km. Cette échelle intermédiaire est également adaptée à l'analyse de phénomènes quasi-périodiques, du type «El Niño». Pour finir, les phénomènes côtiers (houle, déferlement des vagues, marées) sont modélisés sur des échelles spatiales de l'ordre de 10 km. Évidemment, certains modèles couplent plusieurs échelles simultanément : la propagation des tsunamis, par exemple, a lieu sur des milliers de kilomètres, tandis que leur déferlement est très localisé en espace.

Pour finir, une composante importante de l'analyse mathématique des modèles océaniques consiste à comprendre le devenir des équations lorsque de petits paramètres (viscosité, rapport d'aspect, nombre de Rossby - qui mesure l'inverse de l'inten-

sité de la rotation) tendent vers zéro. Ce passage à la limite est difficile, car il peut s'accompagner d'un changement de structure des équations. On parle alors de problèmes de «**perturbation singulière**», dont un exemple est l'étude des couches limites, que nous présenterons au prochain paragraphe.

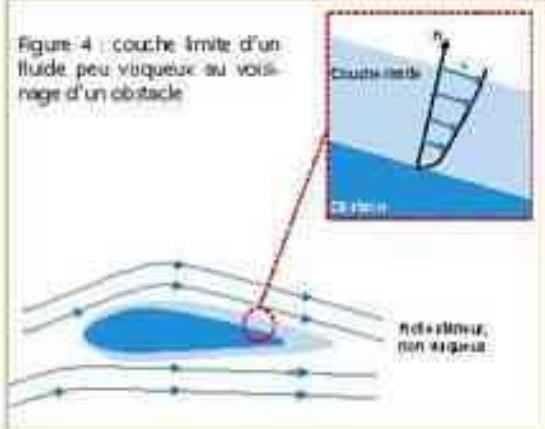
En conséquence, une description universelle des courants océaniques, à l'aide d'un jeu unique d'équations, serait non seulement inabordable – tant d'un point de vue numérique que mathématique – mais surtout non pertinente. Le rôle de la modélisation est dès lors primordial : il s'agit d'isoler des sous-problèmes (par exemple en choisissant a priori des échelles spatiales et temporelles), qui ne conservent qu'une partie des difficultés décrites ci-dessus, et pour lesquels l'analyse est possible.

Un exemple d'étude mathématique : les couches limites

Les premières pierres de la théorie des couches limites en mécanique des fluides furent posées par Ludwig Prandtl, en 1904, au Congrès International des mathématiciens à Heidelberg. Dans son article *Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung* (Sur le mouvement des fluides en présence de très faible frottement), il propose de décomposer un fluide «laminaire» peu visqueux, s'écoulant autour d'un obstacle, en une «couche limite», localisée dans un voisinage très mince de l'obstacle, et un «flot extérieur». Ces deux composantes de la vitesse du fluide possèdent des caractéristiques très différentes : le flot extérieur est non visqueux, et vérifie simplement une condition de non-pénétration sur la paroi de l'obstacle, c'est-à-dire que la composante normale de sa vitesse est nulle. En revanche, les effets visqueux sont prépondérants dans la couche limite, dont le rôle est d'assurer que la vitesse totale du fluide est nulle sur la paroi (figure 4). Cette description est encore largement utilisée de nos jours, et a été justifiée par de nombreuses expériences et simulations numériques.

Cette modélisation convient bien à la description des courants océaniques. En effet, l'observation pendant plusieurs jours des ondes longues dans l'océan met en évidence une propagation sans amortissement, ce qui indique que les forces de friction sont négligeables par rapport aux autres forces en pré-

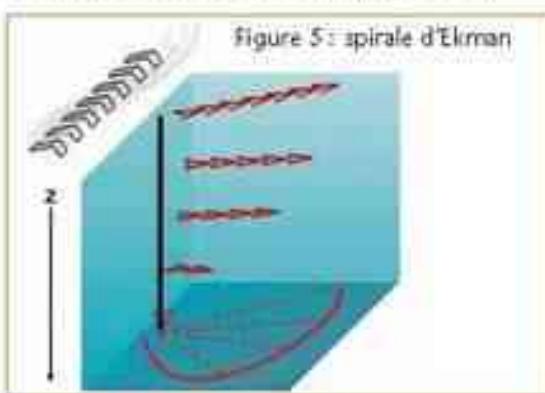
Figure 4 : couche limite d'un fluide peu visqueux au voisinage d'un obstacle



sence (pression, force de Coriolis). Par conséquent, la description des mécanismes pilotant la formation des couches limites océaniques devint, peu après les travaux de Prandtl, un sujet d'étude capital pour les océanographes.

Un premier type de couche limite océanique fut décrit par Vagn Walfrid Ekman, dans la thèse qu'il soutint en 1905. À la suite des observations de l'explorateur Fridtjof Nansen, qui avait remarqué que les icebergs ne dérivaient pas selon la direction du vent, mais selon un angle de 20° à 40° avec cette direction, Ekman proposa un modèle permettant de calculer la vitesse du fluide analytiquement. En négligeant les forces de pression et la terme d'advection⁴, il montra que dans un régime stationnaire, l'équilibre entre la force de Coriolis et les forces de viscosité dans la couche limite prédit un courant de surface faisant un angle de 45° avec le forçage exercé par le vent. Avec la profondeur, le courant diminue et tourne en s'écartant de cette direction : c'est la spirale d'Ekman (figure 5).

Figure 5 : spirale d'Ekman



De nombreux travaux mathématiques sont venus compléter l'analyse d'Ekman, en étudiant des effets plus fins : prise en compte de la rugosité des bords et de l'advection, résonances possibles entre les fréquences temporelles du forçage par le vent et les fréquences propres des ondes océaniques, étude de la stabilité de la couche limite en fonction du nombre de Reynolds, qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ces travaux récents ouvrent la voie vers la compréhension de modèles physiques plus réalistes.

Le deuxième exemple fondamental de couches limites océaniques concerne les courants se formant près des côtes. Ceux-ci ont été décrits par Walter Munk en 1950, en complément du modèle proposé par Harald Sverdrup pour la circulation des courants à l'intérieur des bassins océaniques. L'équation de Sverdrup stipule, dans sa forme la plus simple, que la composante méridionale de la vitesse est proportionnelle à la contrainte surfacique (liée au vent), le coefficient de proportionnalité étant égal à la variation du facteur de Coriolis avec la latitude. Cette équation permet de décrire efficacement le transport océanique à grande échelle ; néanmoins, elle impose a priori des vitesses non nulles sur les bords du bassin, qui doivent donc être corrigées à l'aide de couches limites. À proximité des côtes, plusieurs phénomènes, négligés dans le bassin, peuvent prendre de l'importance : la dissipation due à la viscosité, l'advection, ou la friction exercée par le fluide sur les fonds marins. En ajoutant simplement dans l'équation les termes de viscosité et en négligeant les deux autres, Walter Munk mit en évidence la formation de courants intenses sur les côtes ouest des bassins (par exemple le Gulf Stream le long des côtes américaines, le Kuroshio dans le Pacifique nord, le courant des Aiguilles dans l'Océan indien).

D'un point de vue mathématique, plusieurs travaux ont précisé la description de Munk, en montrant l'existence de singularités sur les extrémités nord et sud du bassin, par exemple. Mais dès que l'on essaie de s'éloigner de l'équation posée par Munk en prenant en compte le terme d'advection non-linéaire, on est aussitôt confronté à une difficulté de taille : l'équation de couche limite ainsi obtenue s'apparente à l'équation de Prandtl, qui est connue pour avoir de « mauvaises » propriétés mathématiques d'instabilité. En particulier, il est possible que

cette non-linéarité joue un rôle dans la séparation abrupte du Gulf Stream de la côte américaine, au niveau de Cape Hatteras. Cette séparation est encore mal comprise d'un point de vue physique ; l'enjeu mathématique est alors de proposer des modèles, incluant des effets fins (rugosité des bords, advection, géométrie générale des côtes et des fonds marins), et prédisant ce décollement, au moins d'un point de vue qualitatif.

Quelques enjeux actuels des mathématiques en océanographie

Une première question est de développer des outils permettant de traiter systématiquement les termes d'advection (sources de non-linéarité dans les équations, et en particulier dans les couches limites). La difficulté liée à la non-linéarité est double : d'une part, beaucoup d'outils adaptés aux équations linéaires deviennent inaccessibles (transformation de Fourier, résolution explicite). D'autre part, les termes non linéaires peuvent engendrer des instabilités, dont l'analyse mathématique est très ardue.

L'incidence de la géométrie (relief des fonds marins, rugosité des côtes) est un deuxième axe de recherche dont l'importance est cruciale pour les applications. Elle est par ailleurs liée au traitement de la non-linéarité : en effet, la superposition d'une rugosité de faible amplitude sur un bord lisse peut faire apparaître une non-linéarité dans l'équation de couche limite. À l'heure actuelle, seuls quelques travaux se sont concentrés sur cet aspect, pour lequel un travail de modélisation en amont sera nécessaire afin d'extraire des modèles pertinents de rugosité. Par ailleurs, soulignons que la quasi-totalité des travaux mathématiques en océanographie modélise le fond de l'océan par une paroi plate (ou un petite perturbation d'une paroi plate), ce qui semble peu raisonnable (voir figure 1). Ainsi, comprendre l'incidence des grandes variations des fonds marins sur la dynamique serait un grand pas en avant.

La non-linéarité peut également provenir d'un couplage de la vitesse et de la pression à d'autres caractéristiques du fluide (température, densité, salinité). L'analyse asymptotique de tels modèles a reçu relativement peu d'attention de la part des mathématiciens dans le cadre de l'océanographie, et soulève des questions hautement non triviales.

Par exemple, plusieurs couches limites, correspondant à chacune des quantités observées, peuvent se superposer. Il s'agit alors d'étudier comment celles-ci s'articulent les unes avec les autres. Par ailleurs, le couplage de la vitesse avec la température et la salinité est, avec le forçage par le vent, le deuxième moteur de la circulation océanique planétaire. En effet, lorsque les courants océaniques remontent vers les pôles, ils voient leur température diminuer et leur salinité augmenter. Par conséquent, la densité des courants de surface devient plus grande que celle des eaux profondes, et les eaux de surface plongent. Les courants en profondeur se redirigent vers les tropiques, où, réchauffés, ils remontent à

plus valable ; un changement de modèle devient donc nécessaire. La compréhension de cette transition vers la turbulence est un des enjeux majeurs de l'océanographie contemporaine.

Pour finir, il convient de souligner que les interactions avec l'atmosphère décrites jusqu'ici sont relativement simplistes : il s'agit principalement de l' entraînement des courants de surface par le vent. Une description plus précise couplerait l'évolution de l'atmosphère à celle de l'océan, en induisant une rétroaction des courants océaniques sur le flux des masses d'air. De telles problématiques appartiennent à l'étude du climat ; bien qu'un traitement mathé-



Figure 6 : circulation thermohaline

nouveau (figure 6). Ce phénomène à large échelle, appelé circulation thermohaline, est essentiel car il permet le transport de chaleur, libérée dans l'atmosphère, de l'équateur vers les pôles.

Les problématiques de stabilité ont déjà été évoquées. Loin d'être une simple curiosité mathématique, elles sont tout à fait fondamentales pour les applications, puisqu'il est généralement admis que l'instant auquel l'instabilité se développe est également celui auquel le flot cesse d'être laminaire ; une description turbulente est alors requise. Du point de vue de la modélisation, l'instabilité d'une couche limite signifie que la décomposition de Prandtl en un flot intérieur et un flot confiné près du bord n'est

pas rigoureux soit aujourd'hui hors d'atteinte, on peut espérer qu'il sera envisageable dans les décennies qui viennent, grâce à l'explosion actuelle des travaux sur ce sujet.

Bibliographie sommaire

1. Prandtl, L., Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. Verhandlungen d. III. Internat. Math. Kongr. Heidelberg, 8.-13. Aug. 1904, B. G. Teubner, Leipzig 1905, pp. 485-491.
2. Bresch, D., Desjardins, B. et Gérard-Varet, D., *Mathématiques Marines*, La Recherche, Mars 2005.
3. J. Pedlosky, *Geophysical fluid dynamics*, Springer, 1979.

Figures

Figure 1 : vue en coupe de l'Océan atlantique autour de la latitude de 7°N, avec les lignes de niveau de la densité. Le fond de l'océan apparaît en noir.

Source: WOCE Atlantic Ocean Atlas

Figure 2 : Comment estimer la dimension de Hausdorff de la côte de la Grande-Bretagne.

Benoit Mandelbrot, dans son article "How long is the coast of Britain?", avait montré que la longueur de la côte de la Grande-Bretagne dépend de l'échelle à laquelle on la mesure, ce qui, en termes mathématiques, signifie qu'elle a une dimension de Hausdorff non entière, et donc un caractère fractal, c'est à dire extrêmement découpé.

Source : Wikipédia, auteur : Alexis Monnerot-Dumaine

Figure 3 : Carte des cinq gyres principaux de l'océan.
Source : NOAA Ocean service education

Figure 4 : couche limite d'un fluide peu visqueux au voisinage d'un obstacle

Figure 5 : spirale d'Ekman.

Source : Wikipédia

Figure 6 : Circulation thermohaline. La circulation thermohaline mondiale correspond au couplage de plusieurs cellules de convections océaniques et participe à la redistribution de la chaleur. Source : Wikipédia, auteur : Luis Fernández García.

Lexique

a. Coordonnées sphériques : dans le système de coordonnées sphériques, un point du plan est repéré par sa distance à l'origine et par deux angles (la longitude et la latitude ou la co-latitude) : voir la figure 7.

b. Géométrie cartésienne : un repère cartésien est la donnée d'un point d'origine O et de trois vecteurs i, j, k non coplanaires. Les coordonnées d'un point M sont les réels x, y, z tels que $OM = x i + y j + z k$ (les vecteurs sont notés en gras).

c. Lamininaire/Turbulent : dans un écoulement lamininaire deux particules fluides voisines à un instant donné restent voisines aux instants suivants. Au contraire, un écoulement turbulent ne possède pas d'organisation apparente (voir figure 8).

d. Advection : l'advection est le transport d'une quantité (scalaire ou vectorielle), par un champ vectoriel (ici la vitesse du fluide). C'est une notion courante en mécanique des fluides car toutes les caractéristiques d'une particule fluide sont advectées lors de son déplacement au sein de l'écoulement. En particulier, le terme décrivant l'advection de la vitesse est quadratique : il fait intervenir des dérivées de quantités du type $v_j v_i$, où (v_1, v_2, v_3) sont les trois composantes du champ de vitesse du fluide.

e. Linéarité/non-linéarité : une équation est dite linéaire si toute somme de solutions est encore solution de l'équation (principe de superposition), et si toute solution multipliée par une constante est aussi solution de l'équation. Une équation non linéaire ne vérifie pas cette propriété. Par exemple, en raison de la présence du terme d'advection dans l'équation sur la vitesse cette dernière est non-linéaire.

Le test de logiciel : pourquoi et comment ?

par Marie-Claude Gaudel, professeure émérite, université Paris Sud 11

Marie-Claude Gaudel est professeure à l'université de Paris-Sud à Orsay depuis 1984, et maintenant professeure émérite. Auparavant, elle a été chercheuse à l'Inria de 1973 à 1981, puis responsable du groupe Génie logiciel au Centre de recherche d'Alcatel-Alsthom à Marcoussis de septembre 1981 à janvier 84. Ses recherches portent sur le logiciel : méthodes formelles, robustesse des programmes, test et certification (voir <http://www.iri.fr/~mcg/pubs/mcg.html>).

En 1984, elle a obtenu un Outstanding Paper Award de l'IEEE Chapter of Software Engineering pour le travail de son équipe à Marcoussis. Elle est Docteur Honoris Causa de l'EPFL. En 1996 elle a reçu la médaille d'argent du CNRS pour son travail sur le test de logiciel. Elle fait partie du comité de rédaction de deux journaux scientifiques : *Science of Computer Programming* (Elsevier) et *Formal Aspects of Computing* (Springer) et elle a présidé de nombreuses conférences internationales. Elle a présidé, entre autres, le conseil d'administration de RENATER et le conseil scientifique de l'Inria. Depuis 2006, elle préside le « Comité des programmes » du l'ITRA Digiteo.

Marie-Claude Gaudel est chevalier de l'Ordre national du Mérite et chevalier de la Légion d'honneur.



Résumé

Le logiciel est un élément inévitable de notre environnement et nous y sommes confrontés quotidiennement pour l'utilisation de tout appareil informatisé. Or n'importe quelle personne qui a été amenée à écrire un programme sait à quel point il est facile de faire des erreurs. Et toute personne qui utilise un système informatique a constaté qu'il y a des dysfonctionnements - pas autant qu'on le dit car le logiciel sert souvent d'alibi - mais il y en a. Dans cet article on introduit les problèmes théoriques et pratiques posés par le test de logiciel et on présente les principales avancées et perspectives dans ce domaine. Après un bref exposé des spécificités du test de logiciel, on explique la distinction entre méthodes de vérification statiques et dynamiques, le test étant la méthode dynamique par excellence. On rappelle les insuffisances de ces deux classes de méthodes : indécidabilité pour les méthodes statiques et incomplétude pour les méthodes dynamiques. On présente ensuite un certain nombre de méthodes de test en présentant comment elles sont associées à des hypothèses d'uniformité sur les comportements du système testé. Ces hypothèses permettent, quand elles sont valides, de répondre au problème de l'incomplétude. Elles peuvent être dans certains cas vérifiées par des méthodes statiques, permettant un couplage pertinent du statique et du dynamique, ou par des méthodes dynamiques aléatoires qui permettent une garantie probabiliste.

Abstract

Programs and software are pervasive in our day-to-day environment: we are faced up to them each time we use some computerised devices. Any person who had to write a program knows how easy it is to make errors. Any user of computerised systems happened to observe some software failures, not as many as what is said, since software "bugs" are often used as alibis, but there are some, and serious ones.

This article is an introduction to the theoretical and practical problems raised by software testing, and it sketches the main advances and perspectives in the area.

After a brief statement of the specificities of software testing, the important distinction between static and dynamic verification methods is explained, testing being the paradigm of dynamic methods. The main drawbacks of each class of methods are recalled, mainly undecidability for static methods, incompleteness for dynamic ones.

Then some of the main testing methods are presented, they are associated with some so-called uniformity hypotheses on the behaviour of the system under test. These hypotheses, when satisfied, solve the question of incompleteness. They may be verified statically, leading to a pertinent coupling of dynamic and static approaches, or dynamically by random testing, leading to some probabilistic guarantee.

Introduction

Le logiciel est un élément inévitable de notre environnement et nous y sommes confrontés quotidiennement pour l'utilisation de tout appareil informatisé. Or n'importe quelle personne qui a été amenée à écrire un programme sait à quel point il est facile de faire des erreurs. Et toute personne qui utilise un système informatique a constaté qu'il y a des dysfonctionnements, pas autant qu'on le dit car le logiciel sert souvent d'alibi, mais il y en a. Un système informatique associe du matériel et du logiciel. Le logiciel, composé d'un ou plusieurs programmes et de données, est stocké dans les mémoires du système. Ce sont les programmes qui contrôlent et permettent le fonctionnement et l'utilisation du système. Comme tout objet complexe, un système informatique doit être testé avant d'être mis en service. Matériel et logiciel sont testés selon des méthodes différentes, essentiellement parce que les types de fautes sont différents. Dans cet article on introduit les problèmes théoriques et pratiques posés par le test de logiciel et on présente les principales avancées et perspectives dans ce domaine.

Spécificités du test de logiciel

Le logiciel présente la particularité de ne pas être sujet aux erreurs de fabrication puisque cette fabrication se limite en général à une simple copie d'un original. Par contre il souffre très souvent d'erreurs de conception : le ou les programmes développés et installés ne font pas ce qui était attendu, ne correspondent pas aux besoins. Plus ces besoins sont complexes et de nature variée, plus le développement et la conception sont propices aux erreurs.

Ces besoins sont exprimés sous forme de spécifications, appelées aussi modèles. Voici un exemple - élémentaire - de spécifications :

- le système lit des nombres et fait leur somme ; quand il lit un zéro, il imprime la somme et s'arrête. Il ne doit jamais provoquer de débordement arithmétique, mais s'arrêter avant.

Cette description comprend deux parties :

- la première correspond à ce qu'on appelle une exigence fonctionnelle (elle énonce ce que doit faire le système).
- La deuxième est une exigence de robustesse.

On pourrait aussi avoir des exigences de performance, ou de facilité d'emploi, de bonne approximation du résultat, ou d'autres.

Le test fait partie des méthodes de vérification qu'un système satisfait aux spécifications souhaitées. C'est une méthode dite « dynamique » qui consiste à :

- choisir judicieusement un sous-ensemble fini des données possibles du système sur lesquelles on va le tester. Ce choix est basé sur des critères de sélection sur lesquels on va revenir ;
- assurer l'exécution des tests retenus. Cette activité nécessite souvent l'utilisation ou le développement d'un environnement de test et l'instrumentation du programme testé, par exemple quand le logiciel est destiné à être intégré à un système physique critique (avion ou satellite, central téléphonique, centrale nucléaire, chaîne de production, ...).
- dépouiller les résultats obtenus. Cette activité de décision du succès ou de l'échec des tests est basée sur les spécifications ; elle pose le difficile problème dit « de l'oracle », sur lequel on revient brièvement plus loin.
- évaluer la qualité de l'ensemble des tests effectués, qui est un des éléments pour décider de l'arrêt du test.

Ces activités posent de nombreux problèmes. Le point dur est qu'il est difficile de contrôler et d'observer l'exécution de certains logiciels, et même de la plupart d'entre eux. Mettre un logiciel en situation d'exécuter un certain test, et observer ensuite ce qui s'est passé, ceci sans biaiser l'expérience, est loin d'être évident en général. Un autre point dur est le problème de l'oracle mentionné plus haut. Il se pose quand on ne connaît pas le résultat attendu dans tous les cas (et c'est d'ailleurs pour cela qu'on a développé le programme sous test). Un exemple, parmi beaucoup d'autres, est le calcul d'un résultat numérique à \pm près quand on ne connaît pas le résultat exact. Comment tester que la fourchette d'approximation est bien respectée ?

Méthodes dynamiques ou méthodes statiques ?

Le logiciel présente une autre particularité, qui est d'être très difficilement exécutable et observable en cours de conception. D'où l'importance des

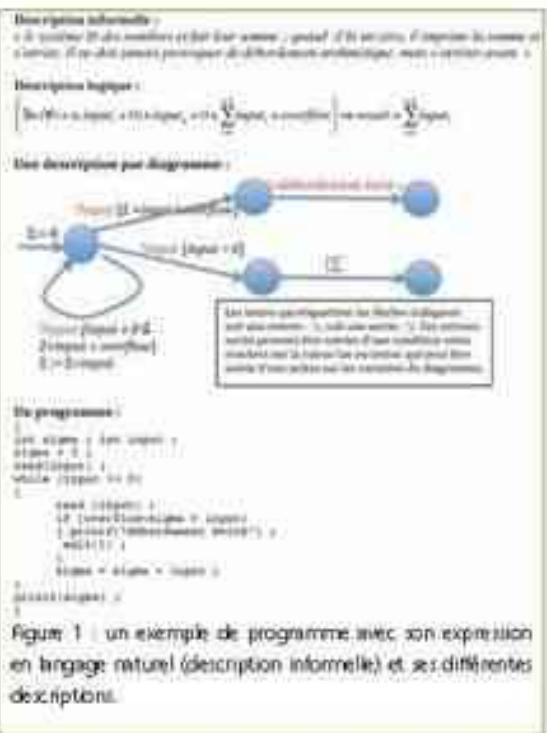


Figure 1 : un exemple de programme avec son expression en langage naturel (description informelle) et ses différentes descriptions.

documents et modèles qui accompagnent ce développement et qui servent de base aux méthodes de validation et de vérification. Ces documents peuvent être écrits en langage naturel, français, anglais, ou autre, comme pour l'exemple précédent, mais dans ce cas ils sont difficiles à exploiter. Les méthodes de validation et de vérification exploitent essentiellement trois types de documents de description : des spécifications logiques, des diagrammes, et finalement le texte du programme (voir Figure 1).

Ces descriptions peuvent être analysées pour s'assurer qu'elles correspondent bien aux besoins. On parle alors de méthodes de vérification statique¹, où il n'y a pas d'exécution du logiciel, par opposition au test qui est une méthode de vérification dynamique.

Les spécifications logiques peuvent être analysées via des outils de preuves, les modèles ou diagrammes via des outils de model-checking², et les programmes par des analyseurs spécialisés qui accompagnent parfois les compilateurs³. On peut aussi développer des méthodes de preuves pour les couples « programme, spécifications logiques » [Jones 2003] spécifiques à certains langages de programmation et certaines logiques.

Depuis des années un débat, pas toujours très scientifique, fait rage pour décider si la vérification du logiciel doit être statique ou dynamique [Dijkstra 1972, De Millo et al. 1979, Fetzer 1988] ou, plus raisonnablement, comment il faut combiner ces approches [Randell 2000, Gaudel 2011]. Les détracteurs de la vérification dynamique dénigrent sa non exhaustivité : on ne peut généralement pas tester toutes les données possibles. Les détracteurs de la vérification statique mettent en avant ses limitations dues à la complexité des outils (d'ailleurs, sont-ils corrects ?) et à des résultats d'indécidabilité.

Indécidabilités et logiciel

En effet, il faut savoir qu'il existe des résultats fondamentaux d'indécidabilité en programmation (sur la terminaison d'un programme, sur la satisfiabilité des prédictats dans certaines logiques, ...).

Clarifions un peu la notion d'indécidabilité : dire qu'un problème est indécidable ne veut pas dire qu'il n'y a pas d'espoir de trouver des solutions, mais seulement qu'il n'existe pas, dans le cas général, de méthode applicable d'une façon systématique pour le résoudre. De nombreux résultats existent sur comment, face à un problème indécidable, se ramener à des sous-problèmes décidables en fixant des paramètres ou en acceptant des approximations.

Dans le cas de la vérification de logiciel, il y a un théorème déprimant, le théorème de Rice qui établit que pour toute propriété non triviale des fonctions partielles, il n'y a pas de méthode générale et effective pour décider si un algorithme calcule une fonction partielle qui satisfait cette propriété (une fonction partielle si elle n'est pas définie pour certaines données, comme par exemple la division qui n'est pas définie pour les diviseurs nuls : beaucoup de programmes correspondent à des fonctions partielles).

Cet énoncé du théorème de Rice est très informel et mériterait d'être précisé, mais dans le cadre de cet article, il suffit à donner l'intuition d'un certain nombre de corollaires négatifs : pour les langages de programmation dits « Turing-complets », c'est-à-dire ceux qui permettent de décrire toutes les fonctions calculables, l'équivalence de deux programmes est indécidable et la satisfaction d'une spécification par un programme est indécidable.

De ce fait, tout outil automatique d'analyse statique qui considère des propriétés intéressantes sur des programmes réalistes repose soit sur des cas particuliers, soit sur des approximations : dans ce dernier cas cela peut mener à des fausses alarmes (sur-approximation), ou à des réponses inconclusives (sous-approximation). Les chercheurs du domaine de la vérification de programme privilient bien sûr la sur-approximation, tout en étudiant comment limiter la prolifération des alarmes, car il faut ensuite les valider ou les réfuter, soit par du test, soit par des méthodes statiques ad hoc. On dispose maintenant d'approximations performantes pour certaines classes d'erreurs de programmation. Entre autres exemples, on sait détecter statiquement si l'accès à un élément d'un tableau se fera toujours dans les bornes du tableau. Cela peut paraître un peu « gadget », mais cela empêche la mise en œuvre d'une des techniques de base pour introduire des virus dans les systèmes informatiques.

En conclusion, on a d'une part des méthodes statiques qui permettent d'analyser des programmes et des spécifications, sachant qu'en cas de résultat positif, on a une certitude que la propriété est satisfaite pour toute donnée, mais qu'un résultat négatif peut ne pas être pertinent. On a d'autre part des méthodes dynamiques qui permettent de tester les systèmes informatiques et de détecter efficacement des dysfonctionnements pour certaines données, mais qui sont incomplètes, sauf si on les couple avec des hypothèses, appelées hypothèses d'uniformité, que l'on peut vérifier par des méthodes –statiques ou dynamiques–.

La carte n'est pas le territoire

Les méthodes dynamiques sont incontournables : un système exécutable est de nature très différente d'une spécification logique, d'un diagramme ou du texte d'un programme. C'est une entité physique, obtenue par des opérations complexes (compilation, édition de liens, déploiement éventuellement sur plusieurs sites) à partir du texte du ou des programmes. Ces opérations complexes peuvent introduire des erreurs [Guigo et al. 1990, Pratt 1995] dans des programmes vérifiés statiquement.

Par ailleurs, on ne peut observer un tel système que par des interactions limitées entre le testeur et le

système qui s'exécute : on soumet des données et on constate des résultats. Même si l'état interne est accessible quand une défaillance se produit, il n'est souvent que partiellement observable ou interprétable car c'est du binaire (ah, les obscurs « memory dumps » d'autrefois!) ce qui pose des problèmes d'analyse et d'oracle. Alors, comment teste-t-on un système informatique ?

Les méthodes de test

De très nombreuses solutions ont été proposées pour la sélection des tests. On peut les classer selon les informations qui servent de point de départ à la sélection et selon la manière dont on se ramène à un ensemble fini de cas. Ce paragraphe présente une classification et l'illustre en détaillant quelques solutions, sans tenter une énumération exhaustive. On va distinguer les méthodes basées sur le domaine d'entrée du système, celles basées sur le texte du programme, celles basées sur les spécifications ou des modèles.

Méthodes basées sur le domaine d'entrée

Ce domaine d'entrée, c'est-à-dire l'ensemble des données possibles du système, est en général infini ou en tout cas beaucoup trop grand pour envisager un test exhaustif. Il y a deux grandes approches pour se ramener à un jeu de tests fini : le tirage aléatoire et la décomposition en sous-domaines. Ces approches sont souvent combinées avec d'autres, comme on le verra plus loin.

Le tirage aléatoire peut se faire selon différentes distributions. Une distribution uniforme est souvent simple à mettre en œuvre mais donne des résultats décevants : en effet la plupart des programmes sont organisés pour traiter un très gros sous-ensemble de données qui correspondent au cas « normal », et beaucoup de très petits sous-ensembles qui correspondent à des cas particuliers ayant peu de chance d'être atteints par cette méthode.

D'autres distributions, basées sur un profil d'usage, présentent l'avantage de détecter avec une très bonne probabilité les dysfonctionnements les plus susceptibles de se produire quand le système sera en opération, et permettent une estimation de sa

fiabilité. Une telle distribution associe à chaque donnée sa probabilité d'occurrence quand le système sous test sera utilisé. La difficulté est d'établir un profil d'usage fidèle. C'est possible dans certains domaines, comme les télécommunications, où on peut archiver de nombreuses exécutions.

La décomposition en sous-domaines d'uniformité, appelée aussi test par partition, consiste à déterminer un nombre fini de sous-ensembles du domaine d'entrée pour lesquels il paraît suffisant d'avoir un seul test. On fait une hypothèse d'uniformité sur ces sous-domaines: on considère que le succès ou l'échec du test y est identique pour toute valeur. On sélectionne donc une valeur par sous-domaine.

Le choix de la décomposition peut être guidé par le type des données: par exemple pour des entiers, on sélectionne une valeur négative, zéro, et une valeur positive. Mais il est souvent guidé par le domaine d'application, la spécification ou le programme (voir ci-dessous). Cette sélection est souvent complétée par des valeurs aux limites (c'est le cas de zéro dans l'exemple ci-dessus).

Méthodes basées sur le texte du programme

Ces méthodes sont basées sur des critères de couverture des éléments du programme, et on parle de test structurel car on utilise la structure du programme.

À titre d'exemples, les critères de test structurel les plus classiques sont :

- la couverture des instructions : lors de l'exécution du jeu de tests on passe au moins une fois par chaque instruction ;
- la couverture des enchaînements, qui requiert de passer au moins une fois par chaque enchaînement possible entre deux instructions ;
- la couverture des chemins possibles dans le programme, qui est souvent trop coûteuse en nombre de tests le nombre de chemins ayant tendance à exploser dès que le programme comporte des itérations.

Pour le programme de la Figure 1 :

- deux tests suffisent pour couvrir toutes les instructions : d'une part un entier positif suivi de 0,

d'autre part deux entiers positifs dont la somme provoquerait un débordement. Les exécutions de ces tests font passer dans la boucle, et l'un atteint l'impression de la somme, l'autre le diagnostic de débordement.

- Par contre l'enchaînement entre la première instruction de lecture et l'impression de la somme n'est pas couvert : pour assurer la couverture de tous les enchaînements il faut un troisième test, qui comporte uniquement la valeur 0.
- Enfin, il est impossible de couvrir tous les chemins car le nombre d'itérations n'est pas borné.

Ces méthodes induisent la définition de sous-domaines d'uniformité : par exemple le sous-domaine des données comportant d'abord un entier positif, puis un 0. L'hypothèse d'uniformité peut être validée par analyse statique du programme, en démontrant que dans tous les cas on exécute la même suite d'instructions, avec le même effet.

Les méthodes de test structurel présentent un défaut de base : elles ne testent que ce qui est dans le programme. Elles ne détectent pas les cas oubliés ou mal formulés. D'où la nécessité d'autres méthodes basées sur des spécifications ou des modèles.

Méthodes basées sur des spécifications ou des modèles

Ces méthodes utilisent soit des diagrammes, soit des spécifications logiques. Les descriptions en langage naturel sont rarement exploitables même si quelques recherches ont lieu sur ce sujet.

Test basé sur des diagrammes

Dans le cas de diagrammes, on retrouve des méthodes similaires à celles qui ont été présentées à propos du test basé sur les programmes, avec tout un corpus de résultats spécialisés sur la couverture des transitions (les flèches). L'intérêt de ce critère de transition vient du fait que les diagrammes sont en général conçus sans mémoire globale, et l'effet des transitions est seulement dépendant de leur état de départ.

La Figure 2 présente des diagrammes correspondant à un protocole appelé INRÉS (*Initiator-Responder protocol*). Ce protocole permet d'assurer

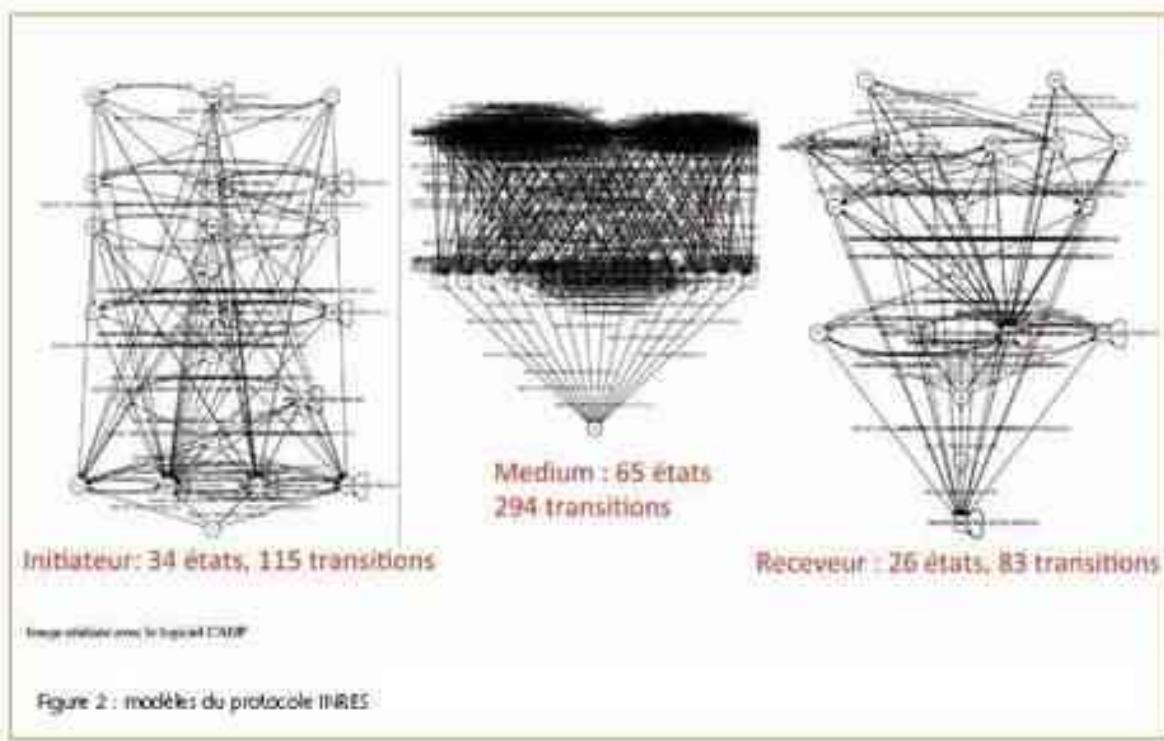


Figure 2 : modèles du protocole INRES.

un service fiable de transfert de données d'un site informatique vers un autre malgré un medium de connexion qui, lui, n'est pas fiable : des paquets de données peuvent être perdus lors du transfert.

Les modèles de la Figure 2 correspondent à gauche au logiciel du site de départ ou initiateur, au centre au médium (dont les défaillances potentielles sont décrites) et à droite au logiciel du site d'arrivée. Ces modèles se synchronisent 2 à 2 : certaines actions (transitions) du medium se font toujours avec une action du receveur, et c'est aussi le cas de certaines actions de l'initiateur. De ce fait, le système global, obtenu par composition des trois modèles, comporte 981 états et 2552 transitions. En raison de sa taille raisonnable et de sa relative complexité cet exemple est souvent utilisé, comme première expérience, dans les recherches sur la vérification de protocoles.

Pour le diagramme de la Figure 2, on obtient de l'ordre de 2000 tests, qui peuvent être générés automatiquement à partir du modèle. Le problème de ces approches est l'explosion du nombre des états dans les systèmes réels : on atteint couramment 10^{20} états et bien au-delà. Le modèle de la Figure 2 est donc petit et simple par rapport à ce qu'on

rencontre en pratique. De nombreuses recherches visent soit, à réduire le nombre des états en les regroupant, ce qui coûte en précision du modèle et mène à des tests infaisables (qu'on peut considérer comme des fausses alertes), soit à développer des méthodes probabilistes ce qui coûte en précision du résultat.

Test basé sur des descriptions logiques

Dans le cas de formules logiques, les outils informatiques de choix pour sélectionner des tests sont des preuveurs de théorèmes ou des solveurs de contraintes. Pour des logiques adéquates, ils permettent de décomposer ces formules sous une forme dite « normale disjonctive » qui énumère une liste de sous-cas disjoints qui correspondent à des cas de tests (sous l'hypothèse qu'ils soient satisfiables et qu'ils correspondent à des sous-domaines d'uniformité).

Dans le cas de la Figure 1, la prémissie de la formule logique va se décomposer en deux sous-cas, un où il n'y a pas débordement, et un où il y en a. Mais c'est un exemple extrêmement simple.

Cette approche donne généralement lieu à l'explosion du nombre des sous-cas, ce que l'on cherche à

maîtriser en inventant des stratégies de décomposition et de résolution intelligentes.

Comment lutter contre l'explosion du nombre de cas ?

Le maître mot dans cette brève (et incomplète) introduction au test de logiciel est « explosion » : explosion du nombre de chemins dans un programme, explosion du nombre d'états et de transitions dans un diagramme, explosion du nombre de sous-cas dans une formule. Les pistes de recherche intéressantes sont, d'une part, le couplage avec des méthodes statiques adaptées qui permettent d'éliminer des cas et de vérifier des hypothèses d'uniformité puissantes, d'autre part, le développement de méthodes de tirage aléatoire biaisées par des critères de couverture, qu'il s'agisse du programme, d'un diagramme, ou d'une formule.

Quelques références

- * DeMillo, R. A., Lipton, R. J. and Perles, A. J., « Social Processes and Proofs of Theorems and Programs », *Commun. ACM*, vol. 22(5): 271–280, 1979.
- * Dijkstra E. W., « The Humble Programmer », *Commun. ACM*, vol. 15(10): 859-866, 1972.
- * Fetzer H., « Program Verification: The Very Idea », *Comm. ACM*, Sept. 1988.
- * Gaudel M.-C., « Checking Models, Proving Programs, and Testing Systems », *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6706, 1-13, 2011.
- * Guiho G., Hennebert C., « SACEM software validation », IEEE, 12th international Conference on Software Engineering, 186 – 191, 1990.
- * Jones C. B., « The early search for tractable ways of reasoning about Programs », *IEEE, Annals of the History of Computing*, vol. 25(2):26-49, 2003.
- * Pratt V., « Anatomy of the Pentium bug », *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 915, 97-107, 1995.
- * Randell B., « Facing up to Faults », *The Computer Journal*, vol. 43 : 95-106, 2000.
- * Turing A. M., « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », *Proc. London Math. Soc.* (2), vol. 42, 230-267, 1936.

Lexique

- a. **Dynamique** : L'analyse dynamique de programmes est un ensemble d'observations réalisées sur un programme informatique en l'exécutant. Le test de logiciel est intrinsèquement une méthode dynamique et donne des résultats pour un nombre fini de données.
- b. **Statique** : En informatique, la notion d'analyse statique de programmes couvre une variété de méthodes utilisées pour obtenir des informations sur le comportement d'un programme lors de ses exécutions sans réellement l'exécuter. C'est cette dernière restriction qui distingue l'analyse statique de l'analyse dynamique. L'analyse statique peut donner des résultats sur l'ensemble des données possibles.
- c. **Model-checking**: Le model-checking est une méthode d'analyse statique de modèles finis (comme ceux de la Figure 2) qui décrivent des systèmes informatiques matériels et logiciels. Il s'agit de vérifier par exploration exhaustive du modèle si une propriété temporelle (par exemple : pour toute exécution, il existe un état dans le futur où un résultat est obtenu) est satisfaite. Ces méthodes permettent de vérifier de très gros modèles, mais le pouvoir d'expression des logiques est limité.
- d. **Compilateur** : un compilateur est un système informatique qui transforme un programme écrit dans un langage de programmation (le langage source) en un autre langage informatique (le langage cible). Pour qu'il puisse être exploité par une machine, le compilateur traduit le programme source, écrit dans un langage compréhensible par les programmeurs, vers un langage machine sous une forme binaire interprétable par la machine.

NB : certaines de ces définitions sont inspirées de Wikipedia : (http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal) où des versions plus développées peuvent être trouvées.

Nez électronique et applications

par Martine Lumbreras, professeure émérite et
Maryam Siadat, maître de conférences, université Paul-Verlaine de Metz

Martine Lumbreras est professeure en électronique. Elle a obtenu une maîtrise d'Électronique, Électrotechnique et d'automatics (1969), un DEA (1977) et une thèse de 3^e cycle (1979) à l'université des Sciences et techniques du Languedoc à Montpellier. Son premier poste comme assistante était en coopération (université du Bénin, 1969-1979). Elle a ensuite été nommée à l'université de Metz, pour être responsable durant 30 ans de la filière Génie électrique de l'Institut franco-allemand des techniques et d'économie de Metz-Sarrebruck (ISFATES).

Après la soutenance de sa thèse d'Etat, en 1987, elle s'est spécialisée dans les capteurs de gaz, et a créé en 1991 un groupe de recherche sur les capteurs de gaz et les nez électroniques, partie du Laboratoire d'automatisme et des sciences comportementales. Ayant pris sa retraite en 2010, elle a obtenu une position d'éméritat. Depuis 1998, elle s'est aussi investie dans des associations de promotion des femmes, AFFDU et, depuis sa création, Femmes & Sciences. Elle est chevalier de l'Ordre national du Mérite, et de la Légion d'honneur.

Maryam Siadat est enseignante-rechercheuse en automatique/électronique depuis 1991 à l'université de Lorraine. Elle a obtenu son diplôme d'ingénierie en électronique en 1983, et son doctorat en ingénierie biomédicale en 1989 à l'institut national polytechnique de Lorraine (INPL).

Son domaine de recherche concerne la détection des gaz, la caractérisation de capteurs, le traitement de données et des signaux, et l'instrumentation et mesure.

Leur collaboration a donné lieu à neuf thèses soutenues, une en préparation, et une habilitation à diriger les recherches (HDR).

Résumé

Les nez électroniques sont des appareils «sur mesure» utilisés dans la détection des mélanges gazeux (odeurs, vapeurs, gaz), et parfois l'estimation des concentrations de leurs constituants. Ils font en ce moment l'objet d'un domaine de recherche grandissant en Europe et aux Etats-Unis, pour de très nombreuses applications, notamment l'environnement, les industries agro-alimentaires (fraude ???), pharmaceutique, la parfumerie, la médecine... Ils permettent de travailler sur beaucoup de composés volatils organiques, auxquels ne correspond pas de détecteur spécifique, et constituent une alternative aux méthodes existantes complexes, longues et trop coûteuses, qui n'assurent pas forcément le suivi en continu. Leur conception fait appel à de nombreux



Maryam Siadat (à gauche sur la photo) et Martine Lumbreras

domaines connexes (métrologie, chimie, physique, électronique, informatique, statistique, modélisation...), ainsi qu'aux domaines correspondant aux molécules à détecter. L'apprentissage du système est une étape primordiale : il s'agit d'enregistrer une mesure sur le réseau de capteurs, puis de la présenter à un système de traitement de données en lui précisant le nom de l'odeur dont il est question. Cette opération est répétée plusieurs fois, pour toutes les situations « gazeuses » à envisager. Ainsi une base de données (ou bibliothèque composite) est constituée. Elle est établie à partir des paramètres représentatifs des mesures réalisées. Cet apprentissage permettra de réaliser des « classes » de données, grâce à des logiciels statistiques adaptés. Ce classement supervisé donnera des règles d'attribution à ces classes, et permettra au système, en phase de test, de retrouver lui-même le nom d'une odeur, ainsi que sa composition.

Abstract

The «electronic noses» are customized devices employed to detect and to identify gaseous mixtures, even to give the concentration of the atmosphere components. Nowadays, the research in this domain is more and more growing, in Europe and others countries in the world, for many applications (frauds??), such as environmental protection, food industries, perfumery, public safety, medicine, pharmacy... Electronic noses allow to detect many organic volatile compounds, for which there is not specific detector. They constitute an alternative to complex, long, and too expensive existing methods, unable to ensure continuous monitoring. Their conception deals with many related areas (metrology, chemistry, phys-

sics, electronics, informatics, statistics, modeling...) as well as areas related to the molecules to be detected. The system learning is a primary step: during a measurement under a gaseous atmosphere, we must record the sensors response in a treatment system, while specifying the name of the concerned odor. This process must be repeated many times for each studied atmosphere, and for all chosen atmospheres.

So a data base can be created, made from representative parameters of all the realized measurements. After this learning stage, a clustering software will classify the data analysis in "concentration" or "nature" groups. Using the group separation rules given by this supervised classification, the system will be able to find itself the name of an odor, or a concentration.

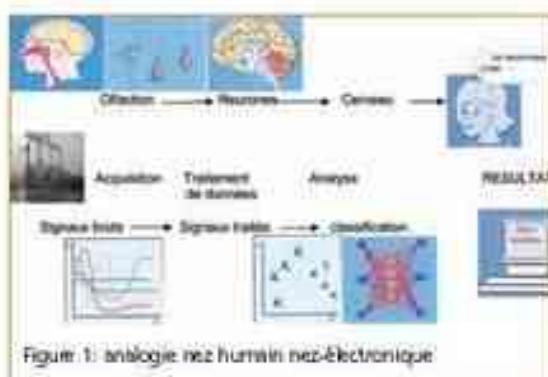
Historique

La première fois que ce concept a été énoncé semble se situer en 1923 avec Jean-Henri Fabre dans son livre «Souvenirs entomologiques». Il souhaitait l'avènement de ce qu'il appelait un «radiographe» des odeurs¹. En 1961 Moncrieff a développé un nez mécanique², puis Wilkens et Hatman en 1964 ont réalisé le premier nez électronique³. Ce n'est que plus de dix ans après, dans les années 1970-1980, qu'un groupe de recherche sur l'olfaction de l'université de Warwick a relancé ce concept par le développement de dispositifs multicapteurs de gaz associés à des techniques de traitement de données. En 1993 les premiers prototypes sont apparus et les premiers dispositifs commerciaux en 1994⁴.

Le nez électronique

Chez l'être humain, l'épithélium olfactif au niveau de la fosse nasale est constitué sur quelques cm² de plusieurs dizaines de millions de cellules réceptrices. La sélectivité du nez humain capable de distinguer plusieurs millions d'odeurs n'est pas le fait de capteurs ultra spécialisés, mais est le résultat d'un travail de recouplements et de convergences d'informations réalisé au niveau du cerveau. Le nez humain est capable de détecter quelques particules par milliers de milliards (10^{-12}) alors que les capteurs du commerce ne réagissent qu'aux particules par millions (10^{-8}).

Conception et réalisation du nez électronique



De même que pour le système olfactif humain (Fig. 1), le nez électronique est constitué de quatre parties fonctionnelles comprenant un système d'échantillonage de la substance gazeuse à analyser (narines, cils), un réseau de capteurs de gaz non spécifiques (cellules réceptrices) détectant des concentrations de l'ordre du millionième (ppm) et qui peuvent être de technologies différentes, un système de traitement du signal lié aux capteurs (axone), et enfin un procédé d'analyse et d'identification basé sur des algorithmes de reconnaissance de formes (cerveau). Les méthodes de classification utilisées sont le plus souvent les méthodes factorielles de classification telles l'Analyse en composantes principales (ACP) et l'Analyse factorielle discriminante (AFD) ou encore les

techniques neuronales. La première, l'ACP, méthode non supervisée, regroupe les mesures semblables en « classes », sans aucune affectation *a priori*. Cette méthode permet une visualisation des groupes. En introduisant des données supplémentaires dans le tableau, on peut suivre l'évolution des classes suivant le temps. La seconde méthode, supervisée, l'AFD, part d'une affectation connue *a priori* (concentration, taux d'humidité, nombre de gaz,...), par exemple des groupes d'affectation déterminés grâce à l'ACP. Elle calcule les règles de séparation des classes et permet d'identifier des échantillons inconnus. Ces deux méthodes sont décrites en détail plus loin.

Les gaz (polluants ou non) à détecter sont aspirés par une micro-pompe (Fig. 2) vers la cellule de mesure, placée en aval afin d'éviter des remous, qui pourraient induire du bruit dans la réponse. Dans d'autres travaux, nous avons utilisé de l'air synthétique porteur, barrant dans un liquide à identifier (huiles essentielles, parfum...). Quelle que soit l'atmosphère étudiée, le débit doit toujours être constant pour une expérience donnée, les capteurs étant sensibles à ce facteur expérimental.



Figure 2 : nez électronique de notre laboratoire

La sélection des capteurs : les capteurs utilisés à l'heure actuelle ne sont pas parfaitement sélectifs pour une espèce chimique particulière. Ainsi pour permettre d'identifier au mieux les constituants d'une atmosphère gazeuse, la matrice doit être formée de capteurs choisis avec des sensibilités croisées : pour une atmosphère donnée, les capteurs présentent des réponses différentes, et un capteur donné montre des réponses différentes aux différentes atmosphères gazeuses. Un capteur insen-

sible à un gaz donné ou à l'humidité permettra un bon recouvrement. Ces propriétés vont induire des « empreintes » (ensemble des réponses de la matrice de capteurs, pour chacun des composés gazeux à identifier) distinctes, d'un capteur à l'autre, d'une atmosphère gazeuse à l'autre, primordiales pour l'exploitation de la réponse des capteurs par des méthodes de reconnaissance de formes.

Les capteurs les plus utilisés sont les capteurs chimiques semi-conducteurs à base d'oxydes métalliques comme les oxydes d'étain, de zinc ou de tungstène dopés à divers métaux (palladium, platine, germanium). Leur commercialisation est sûre, ils sont peu onéreux. C'est pourquoi nous les avons choisis pour notre nez électronique. Leur principe est basé sur une modification, par adsorption préalable de l'oxygène de l'air, de la résistance électrique de ce matériau semi-conducteur composant la couche sensible du capteur. Les composés odorants diffusant jusqu'à cette surface réagissent avec l'oxygène qui libère alors des molécules porteuses de charges, qui modifient l'équilibre électrique du matériau. Chaque combinaison oxyde/dopant apporte une réactivité différente : certaines sont plus sensibles aux aldéhydes, d'autres aux amines, d'autres aux composés soufrés,... Ces capteurs sont relativement stables dans le temps, mais sensibles à l'humidité. La sensibilité est de l'ordre du ppm (partie par million), mais nécessite de maintenir les capteurs à température de fonctionnement constante, entre 200 et 450 °C.

Basés sur le même principe mais pouvant travailler à des températures ambiantes, les capteurs à polymères organiques offrent une très grande variété. Néanmoins ils restent moins sensibles, moins stables et fortement influencés par l'humidité. Les capteurs à ondes acoustiques peuvent être également utilisés. Leur principe repose sur une modification d'une fréquence de résonance. D'autres systèmes, les blocapteurs, mettent en jeu des réactions enzymatiques. Ils sont très sélectifs mais sont destinés à des applications très spécifiques.

Concernant le choix et le nombre de capteurs à utiliser, il n'y a pas vraiment de règles, il faut d'abord connaître les propriétés des molécules à détecter. D'où une collaboration avec les spécialistes concernés, afin de bien cerner la problématique, et parfois comparer nos résultats avec ceux obtenus

par d'autres méthodes. Il faut ensuite chercher les capteurs susceptibles d'avoir une réponse aux différentes molécules gazeuses, afin d'obtenir le système le mieux adapté à l'application. Mais utiliser trop de capteurs entraîne un traitement fastidieux, lourd et trop long.

La chambre de mesure : les capteurs sont placés en couronne, afin d'être exactement dans les mêmes conditions expérimentales par rapport à l'arrivée du gaz. Chaque exposition (10 minutes) à une atmosphère gazeuse est précédée ou suivie d'une régénération sous air synthétique seul (20 minutes). Comme on mesure uniquement la différence de potentiel aux bornes de chaque capteur, chaque borne des capteurs est reliée à une carte de traitement, associée à un microcontrôleur, qui va numériser le signal selon certaines conditions (temps de numérisation, nombre de bits,...) que l'utilisateur peut choisir. Nous avons installé dans le microcontrôleur un programme d'acquisition et de conditionnement du signal correspondant d'abord à la numérisation des réponses temporales des capteurs (1 point par seconde), suivi ou non d'un filtrage afin d'atténuer les bruits parasites. Un filtre choisi pour un capteur doit être efficace pour tout l'apprentissage d'une application donnée. L'action des composés volatils sur les capteurs est donc transformée en un signal électrique exploitable. Ces traitements préliminaires permettent d'extraire les paramètres représentatifs des réponses des capteurs.

La phase d'apprentissage : essentielle, elle doit être constituée d'un nombre suffisant (plusieurs centaines à un million) de mesures, afin de pouvoir appliquer une analyse statistique. Chaque mesure est répétée de 10 à 20 fois, et toutes les possibilités doivent être prises en compte : concentration, humidité, température du gaz. Dans le cas d'un gaz réducteur, la résistance de la couche sensible diminue, et donc la différence de potentiel aux bornes du capteur augmente. L'humidité agit comme un gaz réducteur. On obtient l'effet inverse dans le cas d'un gaz oxydant, avec très souvent une amplitude de réponse nettement plus faible que dans le cas d'un gaz réducteur. Dans le cas de mélanges avec des gaz oxydants et réducteurs, la réponse est différente selon la composition de la couche sensible du capteur, et aussi de la concentration de chaque constituant. La figure 3 nous montre la réponse des capteurs TGS 2106 (dédié à H₂S) et

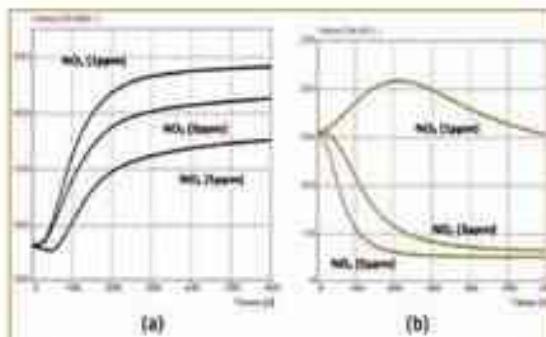


Figure 3 : réponses temporales de deux capteurs aux mélanges NO₂ (1, 3, 5 ppm) et H₂S (4 ppm)
(a) TGS 2106
(b) TGS 2610

2610 (dédié à NO_x) à des mélanges de NO₂ à 1, 3, 5 ppm avec du H₂S à 4 ppm. On voit sur la figure 3 (a) que le capteur dédié à H₂S, gaz réducteur, offre des réponses de type réducteur quelle que soit la concentration de NO₂. On observe une situation plus ambiguë sur la figure 3 (b), où le capteur, dédié à NO_x, a une réponse tout d'abord croissante, puis décroissante pour une concentration de 1 ppm de NO₂, les deux autres réponses étant totalement décroissantes pour 3 et 5 ppm de NO₂. Ces différences de comportement nous ont amenés, dans l'étude de 3 gaz polluants à différentes concentrations (NO₂, H₂S, SO₂), à caractériser les 3 « gaz seuls », les 3 mélanges binaires, et le mélange ternaire, en atmosphère sèche ou humide (différents taux d'humidité). Les mesures correspondant à des mélanges ne sont pas l'addition simple des mesures correspondant aux gaz seuls, les réactions chimiques en jeu sur la couche sensible étant différentes. Nous avons réalisé un nombre suffisant de mesures dans chaque cas, afin de pouvoir en tirer une information fiable, et de pouvoir vérifier le caractère « gaussien » des paramètres représentatifs extraits des réponses temporales.

A partir de cette étape, nous pouvons tracer des « empreintes », espérées différentes, caractérisant la réponse de l'ensemble des capteurs, et nous donnant une estimation qualitative rapide. Sur la figure 4, nous avons porté le rapport V_f/V_0 (V_f valeur finale, V_0 valeur initiale de la différence de potentiel aux bornes d'un capteur) de six capteurs pour une atmosphère, dans le cas (a) de 5 ppm de NO₂, puis de 5 ppm de NO₂ + 20 ppm de SO₂, et enfin de 20

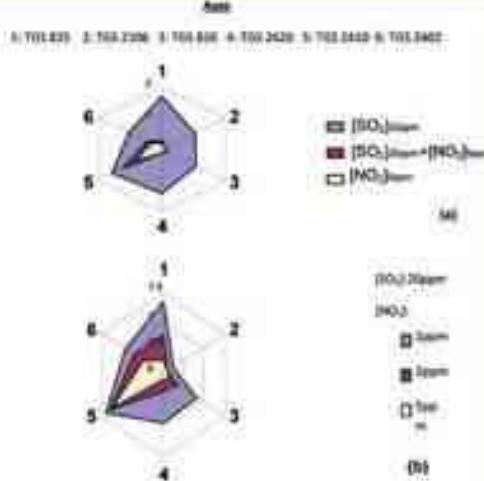


Figure 4 : représentation des « empreintes » V_f/V_0 des six capteurs employés pour a) NO_2 (5ppm), SO_2 (20ppm) et le mélange SO_2 (20ppm) / NO_2 (5ppm) ;
b) mélanges de SO_2 (20ppm) et de différentes concentrations de NO_2 , dans l'air sec.

ppm de SO_2 . On voit que l'empreinte jaune centrale s'allonge le long du capteur 5 (TG5 2610) le plus sensible à SO_2 pour donner l'empreinte brune. Ensuite, toutes les valeurs augmentent pour passer de cette zone à la zone bleue à cause de l'absence de NO_2 : tous les capteurs réagissent plus fortement au gaz réducteur SO_2 qu'au gaz oxydant NO_2 . Dans le cas (b), la valeur de la concentration de SO_2 reste fixe, et celle de NO_2 prend les valeurs 1, 3, 5 ppm. La figure de base est différente du cas précédent, on voit tous les capteurs réagir, plus ou moins fortement : cette forme de base est gardée, bien qu'étirée au fur et à mesure de la concentration de NO_2 . Le

capteur 2 ne réagit pratiquement pas à NO_2 . Ces empreintes donnent une indication rapide de l'évolution d'une atmosphère.

L'acquisition des données : les réponses entières des capteurs, une mesure par seconde, constituaient une base de données trop importante. C'est pourquoi nous avons sélectionné des paramètres représentatifs, qui doivent prendre en compte aussi bien la partie dynamique ou transitoire que la partie stabilisée ou permanente (figure 5). Nous avons ainsi extrait de la réponse temporelle des capteurs (a) les valeurs initiale V_0 , finale V_f , la pente à l'origine Pente, la surface sous la courbe S_t , et des combinaisons de ces paramètres. Depuis quelques années, nous travaillons aussi sur la courbe dérivée (b) de la réponse temporelle des capteurs, afin d'exploiter la partie transitoire, et donc de pouvoir prendre une décision plus rapidement. Cette courbe présente un maximum caractéristique, et nous en avons extrait deux paramètres : hauteur de pic Pic , et surface sous la courbe dérivée S_p .

Le traitement des données : nous avons rassemblé les p paramètres représentatifs des n capteurs dans un tableau de données, permettant l'exploitation par des méthodes statistiques de reconnaissance citées plus haut : l'ACP et l'AFD. En colonnes, on place d'abord les variables à expliquer, par exemple le nom du gaz, ou la concentration pour un gaz donné. Les colonnes suivantes constituent les variables explicatives, chaque colonne correspond à un paramètre représentatif pour un capteur. Par exemple V_0 (1), puis V_f (2), ... les valeurs initiales des capteurs 1, 2, ... On aura donc $p \times n$ colonnes. Chaque ligne du tableau correspond à une mesure. L'ACP et l'AFD donnent toutes deux une représentation graphique

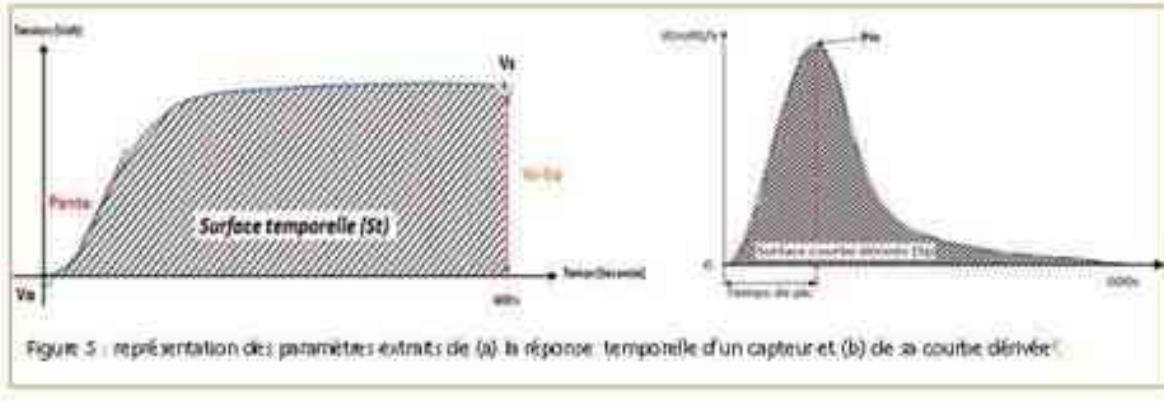


Figure 5 : représentation des paramètres extraits de (a) la réponse temporelle d'un capteur et (b) de sa courbe dérivée.

des observations dans le meilleur espace réduit. La première, méthode non supervisée, a pour objectif de décrire un ensemble de données en réduisant le nombre de variables: ces nouvelles variables sont des combinaisons linéaires des variables originales, et portent le nom de Composantes principales. L'ACP fournit une représentation visuelle plane sous forme de regroupements, selon les deux premières Composantes Principales. On obtient ainsi des informations sous forme de «groupes» ou «classes» de données. L'AFD est une méthode supervisée, elle offre comme l'ACP une représentation visuelle des données, en recalculant les variables de manières à ce que les barycentres des groupes soient les plus éloignés possibles les uns des autres, et les données d'un groupe les plus rapprochées possibles de leur barycentre correspondant. A partir des coordonnées des barycentres selon tous les axes discriminants, on obtient des lois de séparation des groupes. Elles permettent, dans un premier temps de valider a posteriori l'affectation des données prise a priori, en fournissant un taux de réussite par groupe ou global.

L'identification: les règles de séparation des groupes permettront ensuite d'identifier des atmosphères gazeuses test. Nous pouvons, par exemple, calculer la distance du point représentatif de l'échantillon inconnu au barycentre de chaque groupe. La plus courte distance donnera l'affectation, et donc l'identification de cet échantillon inconnu. Par conséquent l'AFD permet une prise de décision sur la nature ou encore la concentration de l'échantillon.

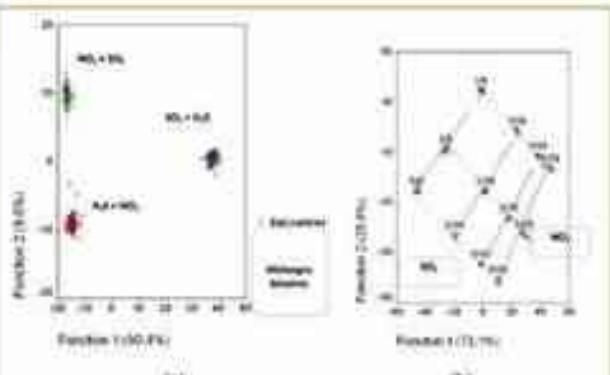


Figure 6 : (a) identification des concentrations binaires principales ; (b) identification détaillée des concentrations dans le groupe SO₂+NO₂. Pour toutes les concentrations de SO₂ (5, 10, 15, 20 ppm) et de NO₂ (1, 3, 5 ppm) + échantillon-test inconnu.

Nous avons parfois dû faire l'identification d'une façon hiérarchisée : atmosphère sèche ou humide, puis, selon les cas de mélanges, à 2 ou 3 constituants, identification du gaz prépondérant sur la réponse des capteurs, puis des gaz associés (nature du gaz, puis concentration).

La figure 6 présente l'identification (a) des mélanges binaires après la séparation en 3 groupes : gaz seuls, mélanges binaires, mélange ternaire. Des points inconnus ont été « bien classés ». La figure 6 (b) présente l'identification détaillée des différentes compositions du mélange binaire NO₂/SO₂. Les axes représentent les deux premiers axes discriminants, les pourcentages indiquent la représentation des données sur chaque axe.

Dans le cas de nuisances d'une ferme¹⁰ de canards, nous avons seulement établi des plages journalières d'odeurs, et les avons reliées à l'activité de ces animaux. Le nez électronique entraîné placé à l'intérieur permet ainsi de prévenir la pollution extérieure odorante, et donc la plainte du voisinage.

Une étude d'un parfum du commerce, sous trois formes différentes (élixir, eau de toilette, eau de Cologne) a permis de mettre en évidence chaque produit, et de relier des dilutions à l'aide d'eau et/ou d'alcool aux produits les plus faiblement concentrés, en prévention d'une fraude commerciale.

L'acquisition de données, le traitement et l'analyse des données ont été faits sur un ordinateur plus puissant que le microcontrôleur. Les règles de séparation, implantées dans le microcontrôleur, permettent l'identification d'atmosphères gazeuses

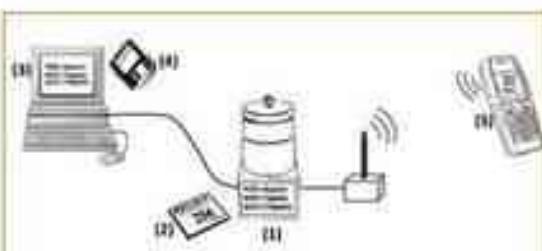


Figure 7 : fonctionnalités du nez électronique⁷ (1) éclairage LED ; (2) carte compact-flash ; (3) ordinateur secondaire ; (4) disquette ordinateur ; (5) téléphone portable

pratiquement en temps réel. Cette identification est donnée par notre nez électronique de différentes manières (figure 7) par affichage sur la boîte du nez électronique portable, sur l'écran d'un ordinateur qui lui est relié, sur un téléphone portable, via une antenne. Nous pouvons aussi stocker les données sur la carte compact-flash du micro-contrôleur. Une alimentation indépendante a été ajoutée, afin de pouvoir faire des enregistrements extérieurs (cartographie de pollution).

Conclusion

Les nez électroniques sont conçus pour une reconnaissance de gaz pour lesquels ils ont été entraînés. Ils doivent donc impérativement fonctionner dans un environnement adapté, afin d'éviter tout risque d'erreur.

Dans l'aspect identification, les nez électroniques constituent une alternative fiable, objective et bon marché aux « jurys de nez » (panel humain) jusqu'à sollicités : ils sont bien plus rapides, et présentent l'avantage de pouvoir aussi bien détecter des constituants gazeux nocifs inodores (oxydes de carbone, nitrates,...). De plus, ils ne s'habituent pas aux goûts et aux odeurs, contrairement aux humains, dont les capacités olfactives et gustatives diminuent très vite sitôt le premier contact.

Ils permettent de déterminer en quelques minutes, et parfois secondes, la composition d'un produit alimentaire (vin, huiles...), sa fraîcheur (poisson, fruit...), de détecter des fraudes (composition ou dilution, par exemple d'un parfum). Ils donnent donc la composition et la concentration. Ils permettent aussi de surveiller à l'aide d'empreintes le niveau de pollution de l'air, à l'intérieur ou à l'extérieur des habitations. Dans ce cas, on s'intéresse seulement au niveau de pollution globale à suivre.

Il existe quelques entreprises, dans le monde, commercialisant très cher des nez électroniques, car ceux-ci doivent toujours être adaptés à la situation. La ville de Montréal a ainsi installé un parc de nez électroniques pour contrôler sa pollution urbaine.

Un des enjeux majeurs est leur miniaturisation, qui permettrait d'équiper les personnes travaillant en milieu sensible. Un espoir est la détection d'explosifs, mais les capteurs actuels ne travaillent pas aux concentrations très faibles correspondantes (ppb, parts par billion).

Bibliographie

1. <http://michael.ozanon.free.fr>
2. Moncrieff R., An instrument for measuring and classifying odours, J.Appl.Physics, 16, 1661
3. Gardner J.W. and Bartlett P.N., A brief history of electronic noses, Sensors and Actuators B, 18-19, 1994
4. Cointre N., Pressions exercées sur l'environnement, Atlas atlantique permanent, Espace atlantique français, déc.1998
5. Wilkens W. and Hatman A., An electron analog for the olfactory process, ANN NY Acad.sci., 11, 1964, p. 608
6. D.C.Levy D.C., D.A.Barnett D.A. and G.A.Bell G.A., Electronic noses: prospects and application in Australian industry, Proc.of the 2nd Int. Conf. on Knowledge-based Intelligent Electronic Systems, Adelaide, Australia, april 1998
7. Strobel P., Thèse d'université, 30 juin 2006, Université de Metz, France
8. Samborana H., Thèse d'Université, en cours de rédaction, 2012, Université de Metz, France
9. Ifakir A., Thèse d'Université, 31 mars 2006, Université de Metz, France
10. Fuchs S., Thèse d'Université, 31 mars 2008, Université de Metz, France

Cancer et nanotechnologie

Innovation en diagnostic, vectorisation et thérapeutique

par May C. Morris, directrice de recherche au CNRS

May C. Morris est directrice de recherche CNRS à Montpellier, où elle développe des approches de détection et d'inhibition pour le diagnostic et le ciblage de biomarqueurs intracellulaires cancéreux, au sein de l'Equipe biologie chimique et nanotechnologie pour la thérapie. D'origine anglo-espagnole, May C. Morris a obtenu son doctorat en biochimie et biologie-santé à l'université de Montpellier, en 1997, sur la régulation du cycle cellulaire eucaryote. Elle a ensuite réalisé ses études postdoctorales au Scripps Research Institute, La Jolla, USA, sur le cycle cellulaire chez la levure *S. cerevisiae*. En 2000 elle a été recrutée au CNRS section « Thérapeutique, médicaments et bio-ingénierie », à Montpellier où elle a développé des technologies de délivrance cellulaire ainsi que des stratégies d'inhibition du cycle cellulaire. Elle a obtenu la médaille de Bronze du CNRS en 2006, a été finaliste Excellence en 2007, et lauréate « Chercheuse d'Avenir » Région Languedoc-Roussillon en 2009.



Résumé

Le cancer constitue une pathologie multi-causale caractérisée par une hyper-prolifération cellulaire incontrôlée au sein d'un tissu ou d'un organe, qui se répand à travers tout le corps par métastases, aboutissant à la mort de l'organisme. Si le cancer est aujourd'hui la première cause de mortalité mondiale, il existe depuis la nuit des temps, puisque les dinosaures développaient déjà le cancer, et les premières traces écrites datent des Egyptiens. Cependant, les origines moléculaires de cette maladie n'ont été découvertes que très progressivement au cours des dernières décennies. Aujourd'hui une meilleure compréhension des caractéristiques moléculaires et des voies de signalisation sous-jacentes au cancer permet de générer des médicaments « intelligents » ainsi que des outils sensibles pour le diagnostic. Outre les approches thérapeutiques et de diagnostic conventionnelles, la nanotechnologie constitue une puissance de frappe dans le domaine du cancer en contribuant au développement de thérapies ciblées, de nouvelles stratégies de vectorisation pour la délivrance des médicaments, à la conception de technologies innovantes pour la détection de bio-marqueurs cancéreux, et à la chirurgie assistée par l'imagerie.

Abstract

Cancer is a multicausal pathology characterized by abnormal, uncontrolled cellular hyperproliferation within a tissue or an organ, which spreads throughout the body, ultimately killing the organism. Although cancer is currently the first cause of mortality worldwide, it has been existing since the beginning of time, cancer having been found in dinosaur bones, and the first written descriptions of the disease dating back to the Egyptians. This being said, the molecular origins of this disease have only been gradually uncovered over the last decades.

Today a better understanding of the molecular features and signaling pathways underlying cancer allows to design "smart molecules" for medicine, as well as sensitive tools for diagnosis.

Besides conventional therapeutic and diagnostic approaches, nanotechnology constitutes a punching power in the field of cancer, by contributing to the development of targeted therapies, novel drug delivery strategies, and to the design of innovative technologies for detection of cancer biomarkers and image-guided surgery.

Cancer – Généralités

Le cancer constitue une pathologie multi-causale caractérisée par une prolifération cellulaire anor-

male, anarchique au sein d'un tissu ou d'un organe, qui se répand ultérieurement à travers tout le corps, aboutissant à la mort de l'organisme. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, le cancer est l'une

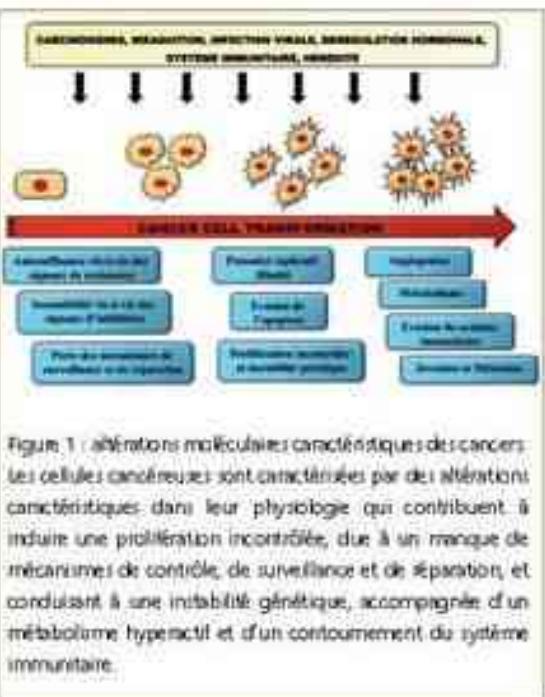


Figure 1 : altérations moléculaires caractéristiques des cancers. Les cellules cancéreuses sont caractérisées par des altérations caractéristiques dans leur physiologie qui contribuent à induire une prolifération incontrôlée, due à un manque de mécanismes de contrôle de surveillance et de séparation, et conduisant à une instabilité génétique, accompagnée d'un métabolisme hyperactif et d'un contournement du système immunitaire.

des premières causes de décès dans le monde, à l'origine de 7,6 millions de décès en 2008, soit environ 13% de la mortalité mondiale, un chiffre qui pourrait atteindre 13,1 millions en 2030 (OMS). Cette pathologie dévastatrice a été décrite dans tous les organismes vivants au cours de l'évolution, allant du corail à l'homme. Par ailleurs, on sait que le cancer existe depuis fort longtemps, puisque les dinosaures avaient le cancer (ostéosarcomes, hémangiomes et métastases osseuses), et des traces écrites relatant des descriptifs de tumeurs et de leurs traitements ont été laissés par les Egyptiens (Rehentulla 2010 ; David et Zimmermann 2010).

Les bases moléculaires du cancer ont été découvertes et étudiées très progressivement au cours des dernières décennies. On sait aujourd'hui que le processus conduisant au développement d'une cellule cancéreuse implique un circuit complexe d'altérations à l'échelle moléculaire, à la fois génétiques et épigénétiques, qui engendrent l'activation d'oncogènes et l'inactivation de gènes dits suppresseurs de tumeurs, et conduisent à une prolifération cellulaire anormale et incontrôlée, associée à une instabilité génétique et à des changements importants dans la physiologie et le métabolisme cellulaire. Il est aujourd'hui admis que l'hérédité n'est responsable que de 10% des cancers.

et que l'accumulation de mutations contribuant au développement du cancer est engendrée par différents facteurs environnementaux mutagènes, dont l'exposition aux ultraviolets et à des rayonnements ionisants ou à des produits chimiques carcinogènes, ainsi que certaines infections virales et dérégulations hormonales, l'immunosuppression ou -dysfonction. En 2000, Hanahan et Weinberg ont proposé une définition formelle des propriétés caractéristiques des cellules cancéreuses, soit :

- l'acquisition d'une suffisance aux signaux de croissance, et d'un potentiel répliquatif illimité,
- le développement d'une résistance aux signaux antiprolifératifs et à la capacité à éviter l'apoptose,
- une angiogenèse soutenue pour alimenter la tumeur en oxygène et en nutriments,
- la capacité à envahir les tissus adjacents, et à métastaser jusqu'à un site distant dans l'organisme.

Ces propriétés conduisent à une hyperprolifération associée à une instabilité génétique, un métabolisme très actif, et une capacité à contourner le système immunitaire (Hanahan et Weinberg, 2000 ; 2011 ; Kroemer et Pouyssegur 2008) (Figure 1).

Thérapies conventionnelles : chirurgie, radiothérapie et chimiothérapie

La chirurgie constitue l'une des premières lignes de traitements d'une tumeur solide, lorsqu'elle est accessible et bien délimitée. Ainsi, les Égyptiens décrivaient déjà très bien la chirurgie des tumeurs, tandis que les Grecs adoptèrent le principe de traitement humorale, consistant en un régime alimentaire strict associé à la prise de laxatifs et à des saignées. Les guérisseurs des tribus préhistoriques et les sorciers égyptiens, les Indiens et la médecine traditionnelle chinoise utilisaient les plantes et les herbes pour soigner différents maux, dont les cancers, sans comprendre les propriétés bénéfiques ou curatives des plantes utilisées. Aujourd'hui la nature et le mécanisme d'action de beaucoup de molécules issues de substances naturelles sont appréhendés. Ainsi, les plantes, algues, bactéries, éponges et autres invertébrés marins, constituent des substances naturelles riches en molécules à visée thérapeutique (Mann 2002). Avec le développement des technologies de synthèse chimique dans la seconde moitié du

vingtième siècle, plusieurs molécules naturelles ont servi de base pour générer des dérivés synthétiques à visée anticancéreuse. A titre d'exemple, on peut citer le taxol ou paclitaxel, initialement découvert dans l'écorce de l'if, puis dans les feuilles de cet arbre dans les années 1960 par Pierre Potier, qui mit ensuite au point la synthèse d'un analogue chimique, le doxétaxel, également connu sous le nom de taxotère, devenu aujourd'hui l'un des anticancéreux les plus utilisés au monde (Nicolaou et al. 1996).

La chimiothérapie conventionnelle, apparue dans les années 1940, repose sur l'administration de drogues «non-spécifiques», cytostatiques ou cytotoxiques (Chabner et Roberts 2005). Certaines ont une action anti-mitotique³, comme le docétaxol, alors que d'autres, comme le méthotrexate, un analogue chimique de l'acide folique, la camptothécine, et ses dérivés, et les drogues à base de platine, comme la cisplatine et l'oxaliplatin, vont interférer avec la réPLICATION de l'ADN, induire des lésions irréversibles, se fixer ou s'intercaler irréversiblement dans l'ADN, ce qui a pour conséquence de tuer les cellules en prolifération (Hurley 2002). Le principe de cette approche thérapeutique repose sur le fait que les cellules cancéreuses prolifèrent davantage que les cellules saines, ce qui en fait les premières victimes. Toutefois les cellules épithéliales saines (peau, cheveux, paroi intestinale) qui prolifèrent également de manière importante sont généralement affectées par les doses importantes des drogues administrées au patient, ce qui a pour conséquence des effets secondaires délétères (perte de cheveux, vomissements, etc.).

La radiothérapie agit selon le même principe, les rayons ionisants administrés aux patients ayant pour conséquence de provoquer des lésions génétiques fatales au niveau de la tumeur. La découverte de la radioactivité par Marie et Pierre Curie à la fin du 19^e siècle conduit au premier traitement non-chirurgical du cancer, mais aussi au concept de multiméthodologie, associant la chirurgie à la radiothérapie, à partir des années 1960, puis à la chimiothérapie (Barcellos-Hoff et al., 2005).

Approches classiques de diagnostic - détection de biomarqueurs cancéreux

Malgré les avancées importantes dans la caractérisation des traits moléculaires associés au cancer, la

complexité et l'hétérogénéité de cette pathologie, d'une tumeur à une autre et d'un patient à un autre, la rend particulièrement difficile à identifier à un stade précoce. Pourtant, cela permettrait potentiellement de traiter le site primaire de la tumeur et ainsi prévenir la dissémination des cellules cancéreuses en métastases et la progression de cette maladie à un stade terminal. On estime qu'un tiers des cancers pourraient être évités par la détection précoce et l'implémentation de programmes visant à détecter des bio-marqueurs de cette pathologie (OMS)

Le diagnostic classique d'une tumeur repose aujourd'hui encore sur la palpation et la détection par rayons X, par imagerie de résonance magnétique ou par TEP (tomographie par émission de positrons). Toutefois la résolution de ces approches est limitée, de sorte à ce que les plus petites tumeurs identifiées (de l'ordre de plusieurs mm³) contiennent déjà cent à mille millions de cellules cancéreuses, entièrement autonomes et capables de former des métastases. Par ailleurs, une fois la biomasse suspecte détectée, une biopsie est généralement réalisée, afin de vérifier la présence de bio-marqueurs dans les cellules dites cancéreuses. Cette approche est non seulement invasive et désagréable pour le patient, elle est de plus indirecte, et plus ou moins longue puisqu'elle dépend d'analyses antigéniques par des approches comme l'ELISA (dosage immuno-enzymatique sur support solide) ou l'immuno-histochimie, ou des méthodes d'analyse des acides nucléiques par RT-PCR (amplification par réaction en chaîne par polymérase après transcription inverse) ou par FISH (hybridation de sondes fluorescentes *in situ*).

Le profilage transcriptionnel ou protéomique⁴ d'échantillons de tumeurs a mis en évidence un grand nombre de bio-marqueurs potentiels (Whitfield et al. 2006). De plus la tâche est compliquée par le fait que ces bio-marqueurs, (protéines, acides nucléiques, métabolites, etc.) peuvent être exprimés en quantités très faibles, à peine détectables par les approches de diagnostic classiques, ou alors fortement exprimés, mais également présents dans les cellules saines. Enfin, il existe une grande hétérogénéité des bio-marqueurs pour un même cancer en fonction de son stade, mais aussi d'une personne à une autre. Ainsi le diagnostic d'un cancer requiert idéalement une approche personnalisée, adaptée à chaque cancer et à chaque individu.

Nanotechnologie et nano-médecine

Le développement de la nanotechnologie offre aujourd’hui des outils minuscules («nano» signifiant nain en grec), dont les propriétés exceptionnelles permettent d’envisager des applications pointues en biomédecine (nano-médecine). Par définition la nanotechnologie fait allusion à des technologies impliquant des objets/outils mesurant 1-100nm de diamètre (soit de 1 à 100 milliardièmes de m), taille similaire aux molécules biologiques, et donc potentiellement capables d’interagir avec celles-ci. La conception, l’ingénierie et l’application de nano-objets en biomédecine offre des perspectives révolutionnaires, permettant d’outrepasser les limitations des approches conventionnelles en thérapie génique et en vectorisation de médicaments, mais aussi en imagerie et en diagnostic. Les médecines «innovantes», développées grâce à la nano-technologie, offrent notamment la possibilité de concevoir des stratégies de ciblage moléculaire et cellulaire pour la thérapeutique, et de développer des approches de pointe en imagerie pour la détection précoce de bio-marqueurs, et pour assister la chirurgie.

Des nano-objets ont été développés à partir de matériaux organiques et inorganiques, adoptant différentes structures, particulières, cylindriques ou cristallines, et possédant des propriétés biologiques, thermiques, photo-physiques, photo-acoustiques ou encore magnétiques uniques (Figure 2). En outre, les propriétés physiques des nanoparticules sont particulièrement bien adaptées au développement de stratégies innovantes pour la médecine personnalisée. En effet, elles constituent de petits chevaux de Troie permettant de transporter jusqu'à la tumeur des agents cytotoxiques pour la thérapeutique et des agents de contraste pour l'imagerie. Par ailleurs, la nature synthétique des nanoparticules permet leur ingénierie et donc la modulation de leurs propriétés chimiques et physiques pour optimiser leur stabilité, leur ciblage ou leur fonction. Ainsi, la complexation d'agents chimio-thérapeutiques en formulations de nanoparticules permet d'améliorer significativement leurs propriétés pharmacocinétiques et pharmacodynamiques.

Parmi les nanoparticules organiques, qui ont l'avantage d'être biodégradables et potentiellement recyclables par l'organisme, on distingue notamment les

liposomes, les dendrimères¹ et les polymères², les protéines et les peptides, qui forment des assemblages multimériques³ encapsulant les cargos qu'ils délivrent. Parmi les nanoparticules inorganiques, citons notamment les particules d'or, d'argent, de silice ou d'oxyde de fer, dont les propriétés physico-chimiques sont d'un intérêt particulier pour l'imagerie et la photothérapie, et qui peuvent être conjuguées à leur surface avec différents agents thérapeutiques ou de ciblage. Les nanotubes de carbone sont des structures cylindriques de quelques nanomètres de diamètre à base de graphène (8) ; ils présentent également des propriétés très intéressantes pour la thérapie et le diagnostic, capables de franchir seuls la membrane cellulaire, et pouvant servir de plate-formes biocompatibles et biodégradables pour la multi-fonctionnalisation d'anticorps et de drogues, ou encore d'agents de contraste ou de sondes fluorescentes (Bianco 2008 ; 2009). Par ailleurs, les nanoparticules d'or, d'argent et les nanotubes de carbone possèdent des propriétés physiques qui permettent leur utilisation en traitement photo-thermique pour l'ablation des cellules cancéreuses, leur irradiation conduisant à une augmentation locale de la température.

Egalement issues de la nanotechnologie, une palette large et variée d'agents de contraste, de sondes fluorescentes et de radio-traceurs, qui offrent un éventail important d'opportunités pour l'imagerie du vivant et le développement d'approches de diagnostic (Weissleder & Pittet 2008). Citons notamment les «quantum dots» (boîtes quantiques), de petits cristaux semi-conducteurs qui présentent des propriétés électroniques associées à leur taille, et des propriétés photo-physiques d'intérêt majeur pour l'imagerie de fluorescence, avec une brillance et une stabilité photonique importantes (Michalet et al. 2005).

Nanotechnologie et vectorisation

L'homme rêve depuis toujours de pénétrer dans le corps humain pour l'explorer, comme l'illustre si bien le roman d'Isaac Asimov «Fantastic Voyage» paru en 1966, décrivant les aventures d'un vaisseau sous-marin qui est miniaturisé pour aller s'immiscer dans les profondeurs du corps humain (Asimov, 1966). Toutefois, les membranes biologiques constituent de véritables barrières de protection et

de défense et la plupart des biomolécules, notamment les drogues et sondes hydrophobes, sont incapables de les franchir pour accéder au milieu intracellulaire. L'une des avancées majeures dans le domaine de la nanotechnologie appliquée à la biomédecine est le développement d'outils dits «vecteurs», organiques ou inorganiques, permettant de transporter des biomolécules et facilitant leur pénétration dans les cellules, tissus et organes ainsi que leur ciblage spécifique vers des types cellulaires spécifiques, cellules cancéreuses ou tumorales.

Les nano-vecteurs et les stratégies de vectorisation qui ont été développées sont divers et variés (Figure 2). Si les vecteurs vitaux ont essentiellement été appliqués à la thérapie génique, des formulations nano-particulaires organiques d'origine lipidique, telles que les liposomes, constitués de polymères organiques, de protéines ou de peptides, ont été largement exploitées pour délivrer des petites molécules à visée anticancéreuse. A titre d'exemple mentionnons le Doxil® et l'Abraxane®, médicaments approuvés par la Food and Drugs Administration (Etats-Unis) pour le traitement clinique de différents cancers. Le premier constitue une formulation lipidique de doxorubicine, approuvée depuis plus de dix ans pour traiter le sarcome de Kaposi, puis le cancer du sein et de l'ovaire (Safra et al. 2000). Le second est une formulation nano-particulaire d'albumine couplée au paclitaxel, ce qui augmente significativement l'internalisation

cellulaire de ce dernier, et par conséquence son efficacité clinique, notamment pour le cancer du sein métastatique (Tomao et al., 2009).

Plus récemment, des formulations de peptides dits «pénétrants», issus de séquences naturelles capables de franchir des membranes biologiques, ont fait l'objet de développements pour des applications thérapeutiques associées à la délivrance de drogues, ou d'acides nucléiques mal assimilés par l'organisme (Morris et al. 2008). Des nanoparticules d'or ou d'argent sur lesquelles sont greffées des molécules thérapeutiques ont été proposées pour le traitement topique des maladies de la peau, comme le psoriasis et le cancer (Mirkin, 2011). Enfin le couplage d'anticancéreux à des nanotubes de carbone permet d'administrer des anticancéreux de manière efficace chez la souris, et d'affiner cette délivrance médicamenteuse à un ciblage tumoral, par conjugaison d'anticorps aux nanotubes (Blanco et al. 2008). Il est important de souligner que la taille de ces nanovecteurs leur permet passer à travers les pores de l'endothélium vasculaire (400-600nm) pour arriver à leur site d'action tumoral, où ils vont ensuite s'accumuler naturellement par l'effet EPR (Enhanced Permeability and Retention). En effet, la pression créée par l'hypoprolifération cellulaire au sein d'une tumeur, associée à son faible drainage lymphatique, favorise l'accumulation de nanoparticules de 100-200nm qui circulent dans le système sanguin (Torchilin, 2011).

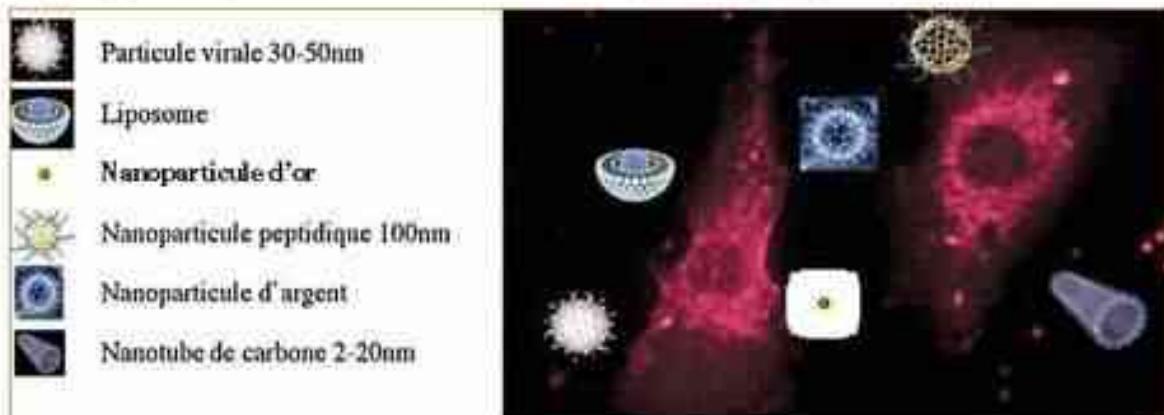


Figure 2 : nanotechnologies pour la vectorisation cellulaire. Différentes stratégies ont été développées pour introduire des biomolécules dans des cellules *in vivo*. Les nanoparticules vitales, les nanoparticules organiques lipidiques, protéiques, peptidiques, polymères et dendrimères, les nanoparticules inorganiques (or, argent, silice, oxyde de fer), et les nanotubes de carbone constituent quelques exemples de véhicules développés par les nanotechnologies.

Nanotechnologie et ciblage thérapeutique

La connaissance des origines moléculaires du cancer, et l'identification de bio-marqueurs et de cibles moléculaires d'intérêt pharmacologique permet aujourd'hui de proposer des stratégies ciblées pour le développement d'inhibiteurs à visée thérapeutique, mais aussi pour le développement de bio-sensoirs pour des stratégies de détection spécifiques et sensibles. Les leçons tirées du passé, et des limites des premières chimiothérapies, ont permis de comprendre qu'il fallait proposer de nouvelles stratégies plus ciblées, basées sur des médicaments dirigés spécifiquement contre les altérations moléculaires responsables des cancers, et administrés spécifiquement au site tumoral plutôt que de manière généralisée (Strebhardt et Ullrich, 2008). La thérapie ciblée est ainsi née dans les années 1990 avec pour conséquence un impact net sur l'efficacité des médicaments, et la réduction des effets secondaires lors de leur administration au patient. Le défi thérapeutique consiste à proposer des médicaments plus spécifiques et donc moins délétères pour l'organisme. A cette fin, plusieurs stratégies de ciblage sont employées pour contribuer à réduire les doses employées et les effets toxiques ou secondaires, tout en s'assurant de la biodisponibilité et de la stabilité du médicament administré, pour optimiser ses propriétés pharmacocinétiques. La nanotechnologie offre aujourd'hui la possibilité d'un ciblage à deux niveaux (Figure 3) : le ciblage moléculaire, consistant à concevoir un médicament qui va spécifiquement reconnaître et interagir avec une cible précise, responsable du développement d'un cancer, plutôt que d'agir sur un mécanisme cellulaire général ; la vectorisation ciblée ou ciblage cellulaire, consistant à diriger l'agent thérapeutique spécifiquement vers les cellules cancéreuses. Les assemblages nano-particulaires sont de plus couplés à des agents stabilisateurs pour permettre une diffusion prolongée dans l'organisme et réduire leur reconnaissance et opsonisation¹⁰ par le système immunitaire.

Parmi les différentes stratégies de ciblage moléculaire qui ont été développées, l'une des plus fréquentes consiste à cibler l'activité enzymatique de protéines, pour prévenir leur action délétère dans le contexte d'une pathologie. Plusieurs exemples peuvent être cités pour le ciblage de tyrosine kinases, dont l'Imati-

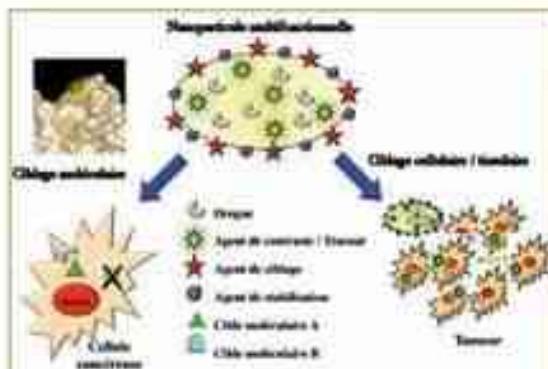


Figure 3 : nanoparticules, vectorisation et ciblage thérapeutique. Les nanoparticules sont des « chevaux de Troie » comportant des médicaments, des agents de contre-temps qu'ils vont transporter et relâcher au niveau d'une tumeur. Le ciblage moléculaire consiste à concevoir des médicaments capables d'interagir spécifiquement avec une cible moléculaire pour neutraliser son action. Le ciblage cellulaire consiste à diriger l'agent thérapeutique vers un récepteur spécifiquement exprimé à la surface des cellules cancéreuses. Les nanoparticules peuvent de plus être couplées à des agents stabilisateurs pour permettre une diffusion prolongée dans l'organisme et réduire leur reconnaissance et opsonisation par le système immunitaire.

nib/ Gleevec®), initialement identifié comme un inhibiteur de l'oncogène Bcr-Abl (Druker et al., 1996), aujourd'hui administré en clinique pour traiter certaines leucémies. Une approche alternative consiste à cibler un épitope¹¹ ou une interface de la protéine cible pour empêcher son interaction avec des partenaires ou une conformation structurale qu'elle adoptera pour son activation – on parlera alors d'inhibiteur compétitif ou allostérique, respectivement. La stratégie la plus développée pour le ciblage cellulaire consiste à cibler des récepteurs ou antigènes surexprimés ou exprimés spécifiquement à la surface de cellules cancéreuses grâce à des anticorps, des fragments peptidiques ou ligands complémentaires. Dans le cas du cancer, plusieurs récepteurs ont été identifiés comme étant surexprimés, comme le récepteur à l'acide folique, des récepteurs de facteurs de croissance comme l'EGF, et les intégrines surexprimées au niveau de l'endothélium tumoral (Ludwig et Weinstein, 2005). Ainsi, plusieurs stratégies de ciblage à base d'anticorps monoclonaux ont été développées avec succès (Schrama et al., 2006). On peut citer en exemple le Trastuzumab® /Herceptin®, thérapie à base d'anticorps monoclonaux, qui permet de cibler les récepteurs HER2/neu dans le cancer.

du sein (Hudziak et al. 1989), le Rituximab® qui cible l'antigène CD20 exprimé à la surface des cellules B dans les lymphomes non-Hodgkiniens (Maloney et al., 1997), et le Cetuximab®, qui cible les récepteurs EGFR dans certains cancers colorectaux (Jonker et al., 1997). Le ciblage des récepteurs VEGF surexprimés à la surface de l'endothélium angiogénique avec inhibiteurs de l'angiogenèse comme le Bevacizumab®/ Avastin® empêche la croissance extensive de vaisseaux sanguins qui alimentent la tumeur (Ellis et Hicklin, 2008).

Plus récemment plusieurs stratégies ont été développées pour le ciblage des intégrines, notamment grâce à des tripeptides RGD (acides aminés arginine-glycine-aspartate) (Desrosier et Cheresh, 2010). D'autres stratégies « intelligentes », conçues en guise de ciblage, consistent à exploiter les propriétés caractéristiques des cellules cancéreuses et des tumeurs, et de s'en servir comme d'un talon d'Achille, en particulier leur métabolisme très actif associé à l'acidification de l'environnement tumoral, à la sécrétion de protéases (métalloprotéases et cathepsines). Ainsi le couplage d'un sucre (2-désoxyglucose) à la surface de nanoparticules permet une vectorisation importante par le biais des récepteurs au glucose, surexprimés au niveau des cellules cancéreuses, métaboliquement très actives. La conjugaison d'un élément activable par le pH ou par clivage protéolytique par des métalloprotéases fait partie des stratégies développées pour favoriser le ciblage spécifique des nanoparticules thérapeutiques vers les tumeurs et cellules cancéreuses.

Nanotechnologies pour l'imagerie et le diagnostic

L'un des défis majeurs en biologie et en médecine moderne consiste à pouvoir visualiser et tracer des biomolécules dans leur environnement naturel de manière non-invasive, mais dynamique, pour étudier leur comportement dans un contexte physiologique et dans des conditions pathologiques. Au cours des dix dernières années, l'imagerie du vivant a bénéficié d'avancées significatives en physique et en chimie, en technologies de fluorescence et en biologie chimique, mais aussi de l'apport de la nanotechnologie en matière de vectorisation et de ciblage. En particulier, l'imagerie des tumeurs et des processus associés au cancer a fait d'énormes pro-

grès grâce au développement de nouveaux agents de contraste, sondes fluorescentes, traceurs et biosenseurs, associés au développement de stratégies pour leur délivrance et activation sélective dans des cellules cancéreuses (pour revue Morris 2012). Parmi les outils développés pour l'imagerie du vivant, on peut distinguer les petites molécules (radio-traceurs, sondes fluorescentes et « quantum dots »), les macromolécules (peptides, protéines, anticorps) et les nanoparticules (Weissleder et Pittet, 2008).

Les plus petites molécules développées pour l'imagerie comprennent les radio-traceurs et les sondes fluorescentes infrarouges. Les radio-traceurs sont générés par conjugaison d'un radioélément à une molécule vectrice, comme le 18F-fluorodésoxyglucose (FDG), couramment utilisé en diagnostic clinique pour mettre en évidence les structures métaboliquement actives comme les tumeurs par TEP (tomographie par émission de positons). Les traceurs fluorescents infrarouges possèdent des propriétés photo-physiques particulièrement bien adaptées à l'imagerie optique du vivant, comme le vert d'indocyanine (ICG) utilisé pour visualiser les structures angiogéniques (Slakter et al. 1995). Ces sondes peuvent être couplées à des molécules de transport, comme l'albumine couplée à une sonde infrarouge pour visualiser les nodules lymphatiques sentinelles (Ohnishi et al. 2005), ou encore à des ligands de récepteurs cellulaires, comme le RGD (pour les intégrines) (Chen et al. 2009) et le 2-désoxyglucose (récepteurs GLUT), analogue du FDG utilisé en TEP (Kovar et al. 2009), pour imager des tumeurs *in vivo*. Plus récemment, les « quantum dots », petits cristaux semi-conducteurs fluorescents très brillants et photostables, ont été proposés pour des applications en imagerie du vivant (Michalet et al. 2005).

Outre ces petites molécules, des stratégies plus ciblées ont été conçues pour la détection de biomolécules spécifiques. En effet la découverte de protéines auto-fluorescentes exprimées dans des organismes marins, suivie de leur clonage pour l'application à la biologie cellulaire (qui a valu le Prix Nobel de chimie en 2008 à Martin Chalfie, Osama Shimomura et Roger Tsien) a permis la conception de rapporteurs fluorescents pour étudier la localisation spatiale et temporelle de protéines dans des cellules vivantes (Tsien, 2005). En parallèle la synthèse de nouvelles sondes fluorescentes applicables au

vivant par les chimistes, et la naissance de la biologie chimique, domaine d'interface entre la chimie et la biologie, a conduit à la conception de stratégies pour appliquer ces sondes à la détection de molécules biologiques spécifiques (Lavis et Rainey, 2008). Ces avancées ont conduit au développement d'une nouvelle génération d'outils pour l'imagerie connus sous le nom de « bio-senseurs fluorescents » (Morris, 2010). Les bio-senseurs fluorescents sont dérivés de structures biologiques ou biomimétiques (généralement des peptides, protéines ou polymères) qui comportent un domaine de reconnaissance de la cible moléculaire, de son activité enzymatique ou de sa conformation, sur laquelle sont conjuguées une ou plusieurs sondes fluorescentes dont les propriétés changent lors de la détection de la cible (Figure 4).

Les bio-senseurs fluorescents permettent de « senser », c'est-à-dire de rapporter des changements dans les concentrations relatives, dans le comportement, ou dans l'activité biologique /enzymatique d'une cible en temps réel dans la cellule et dans un organisme vivant entier. Par ailleurs, ils offrent une solution sensible et non-invasive pour la détection de bio-marqueurs cancéreux par imagerie optique de fluorescence des cellules et tumeurs, qui pourrait palier aux inconvénients des approches indirectes actuellement réalisées à partir de biopsies (Morris 2012). Toutefois, l'administration de bio-senseurs fluorescents *in vivo* demeure limitée par les mêmes restrictions qui s'appliquent à la thérapeutique, et dépend par conséquent de stratégies de vectorisation et de ciblage similaires à celles développées pour l'administration de médicaments. Ainsi les rapporteurs, traceurs et bio-senseurs fluorescents doivent être complexés à des nanoparticules organiques ou conjugués à des nanoparticules inorganiques ou à des nanotubes pour assurer leur internalisation cellulaire efficace et leur ciblage vers des cellules cancéreuses.

Differentes stratégies ont été mises au point pour imager des tumeurs chez la souris. Certains bio-senseurs sont activables par l'environnement tumoral, plus particulièrement par le pH acide (Urano et al. 2009), par l'activité métabolique accrue, ou encore par la sécrétion d'enzymes possédant une activité protéolytique importante (Weissleder et al., 1999 ; Jiang et al. 2004). Enfin les sondes et traceurs fluorescents sont directement applicables à la chirurgie assistée par l'imagerie. En effet, cette technologie

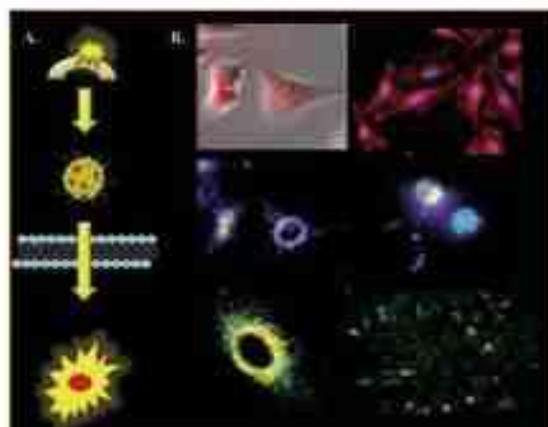


Figure 4 : nanotechnologies pour l'imagerie et le diagnostic. Le développement d'agents de contraste, de sondes fluorescentes, traceurs et bio-senseurs, associés au développement de stratégies pour leur vectorisation et leur ciblage, offre des solutions pour l'imagerie du vivant. A) L'agent de contraste, sonde fluorescente, traceur ou bio-sensor introduit sélectivement dans des cellules cancéreuses, devient visible et donc trouvable par l'imagerie. B) Exemples de cellules dans lesquelles différents bio-senseurs fluorescents ont été introduits par le biais de nanoparticules de peptides vecteurs (photos prises par M.C. Morris)

permet d'imager de manière très précise les cellules cancéreuses qui délimitent une tumeur, ce qui aide le chirurgien à mieux repérer les contours de la tumeur solide qu'il opère, ainsi que tout ganglion résiduel (Keeteweerd et al. 2011). D'autres traceurs peptidiques récemment développés offrent au chirurgien une visualisation directe des nerfs périphériques, ce qui lui permettra de ne pas les toucher pendant l'opération, évitant ainsi des désagréments postopératoires au patient (douleurs ou paralysies) (Whitney et al. 2011). Enfin, une nouvelle génération de sondes dites « multimodales » a vu le jour depuis quelques années, intégrant une sonde fluorescente avec un radioélément, ce qui permet une détection à double modalité, par imagerie optique et par TEP, et donc un gain d'informations d'autant plus important (Melendez-Alafort et al. 2012).

Conclusions et perspectives d'avenir – nanotechnologie

La nanotechnologie est une science interdisciplinaire qui a été nourrie par les efforts des physiciens, des chimistes et des biologistes et qui s'applique

aujourd'hui à différents domaines dont la science des matériaux et l'électronique, mais également les sciences du vivant et la médecine. Les propriétés uniques des nanomatériaux offrent des perspectives d'avenir prometteuses pour le traitement du cancer, le diagnostic et la chirurgie assistée par l'imagerie. L'apport de la nanotechnologie dans le développement des nanoparticules et des nanotubes permet aujourd'hui de proposer une thérapie ciblée, dont l'efficacité d'action et la réduction des effets secondaires sont nettement supérieures à la chimiothérapie conventionnelle.

La nano-médecine offre également l'espoir d'une approche thérapeutique combinatoire, par l'ingénierie de nanoparticules délivrant plusieurs drogues destinées à neutraliser différentes cibles au sein d'une même tumeur. Par ailleurs, le développement de nouveaux outils pour l'imagerie de bio-marqueurs cancéreux offre aujourd'hui l'espoir d'un diagnostic précoce et non-invasif du cancer, ce qui permettra potentiellement de réduire le nombre de cas de cancers évoluant vers un stade terminal. Ainsi, l'application biomédicale des outils issus de la nanotechnologie permet d'envisager l'évolution vers une médecine personnalisée, dans laquelle chaque patient et chaque cancer seront traités comme des cas individuels, aussi bien en termes de diagnostic que par rapport à l'intervention thérapeutique, au suivi de la maladie et la réponse au traitement. Afin d'exploiter les informations au maximum, la détection sera idéalement basée sur une approche multimodale, combinant différentes types de sondes et de traceurs, et l'intervention thérapeutique sera préférentiellement guidée par imagerie et combinatoire, associant les forces de différentes drogues dans un même « cocktail ». Ces développements permettent de rêver au monde de demain dans lequel ces stratégies seront couplées pour proposer une approche théagnostique, couplant directement le diagnostic moléculaire par imagerie de la cible avec l'intervention thérapeutique ciblée. Les « nano-technologistes » œuvrent déjà dans cette direction, pour développer des nanoparticules multifonctionnelles pour la vectorisation combinée et ciblée d'agents de contraste et de médicaments.

Remerciements

Les travaux développés par le Dr. M.C. Morris et les membres de son équipe de recherche sont soutenus par le CNRS et la Région Languedoc-Roussillon (subvention « Chercheuse d'Avenir »), ainsi que par des subventions par l'Association de recherche contre le cancer (Arc), l'Institut national du cancer (Inca) et l'Agence nationale de la recherche (ANR).

Références

- Asimov I., Kleiner H., Klement, O., «Fantastic Voyage», Edition New York, NY : Bantam Books, 1966.
- Barcellos-Hoff M.H., Park C., Wright E.G. «Radiation and the microenvironment-tumorigenesis and therapy», Nat. Rev. Cancer, vol.5, 2005, p.867-875
- Bianco A, Kostarelos K, Prato M., «Opportunities and challenges of carbon-based nanomaterials for cancer therapy», Expert Opin Drug Deliv., vol 5, n° 3, 2008, p. 331-342.
- Bianco A., «Les nanotubes de carbone : un nouvel outil contre le cancer», Médecine/Sciences, vol. 25, n° 2, 2009, p.125 - 127
- Chabner B.A., Roberts T.G.Jr, «Chemotherapy and the war on cancer», Nature Reviews Cancer, vol. 5, 2005, p. 65-72
- Chen K, Xie J, Chen X. «RGD-human serum albumin conjugates as efficient tumor targeting probes», Mol Imaging., vol.8, n°2, 2009, p. 65-73.
- David A.R., Zimmerman M.R., «Cancer: an old disease, a new disease or something in between?», Nature Reviews Cancer, vol. 10, 2010, p. 728-733
- Druker B.J., Tamura S., Buchdunger E., Ohno S., Segal G.M., Fanning S., Zimmermann J., Lydon N.B., «Effects of a selective inhibitor of the Abl tyrosine kinase on the growth of Bcr-Abl positive cells», Nat.Medicine , vol. 2, 1996, p. 561-566
- Desgrange JS, Cheresh DA, «Integrins in cancer: biological implications and therapeutic opportunities», Nat.Rev.Cancer, vol. 10, 2010, p.9-22
- Ellis L.M., Hicklin D.J., «VEGF-targeted therapy: mechanisms of anti-tumour activity», Nat. Rev. Cancer, vol. 8, 2008, p.579-591

- Hanahan D, Weinberg R.A., «The hallmarks of cancer», *Cell*, vol. 100, 2000, p.57-70.
- Hanahan D, Weinberg R.A., «The hallmarks of cancer: the next generation», *Cell*, vol. 144, 2011, p.646-674.
- Hudziak R. M., et al. «p185HER2 monoclonal antibody has antiproliferative effects in vitro and sensitizes human breast tumor cells to tumor necrosis factor», *Mol. Cell Biol.*, vol. 9, 1989, p.1165-1172.
- Hurley L.H. «DNA and its associated processes as targets for cancer therapy», *Nat. Rev. Cancer*, vol. 2, 2002, p. 188-200
- Jiang T, Olson ES, Nguyen QT, Roy M, Jennings PA, and R.Y. Tsien. «Tumor imaging by means of proteolytic activation of cell-penetrating peptides.», *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol.101, 2004, p.17867-17872.
- Jonker D.J. et al., «Cetuximab for the Treatment of Colorectal Cancer», *N Engl J Med.*, vol. 357, 2007, p.2040-2048.
- Keereweer S., et al. «Optical image-guided surgery- where do we stand ?», *Mol Imaging Biol.*, vol. 13, n°2, 2011, p.199-207
- Kovar JL, Volcheck W, Sevick-Muraca E, Simpson MA, Olive DM. «Characterization and performance of a near-infrared 2-deoxyglucose optical imaging agent for mouse cancer models», *Anal Biochem.*, vol. 384, n°2, 2009, p.254-262.
- Kroemer G, Pouyssegur J., «Tumor cell metabolism: cancer's Achilles' heel», *Cancer Cell*, vol. 13, n°6, 2008, p. 472-482.
- Lavis LD, Raines RT, «Bright ideas for chemical biology», *ACS Chem Biol.*, vol.3, n°3, 2008, p.142-55.
- Ludwig J.A., Weinstein J.N. «Biomarkers in Cancer Staging, Prognosis and Treatment Selection», *Nat. Rev.Cancer*, vol. 5, 2005, p.845-856
- Maloney, D. G. et al. «IDE-C2B8 (Rituximab) anti-CD20 monoclonal antibody therapy in patients with relapsed low-grade non-Hodgkin's lymphoma», *Blood*, vol. 90, 1997, p.2188-2195.
- Mann J., «Natural products in cancer chemotherapy: past, present and future», *Nature Reviews Cancer*, vol. 2, 2002, p.143-148.
- Melendez-Alafort L, Muzzio PC, Rosato A. «Optical and Multimodal Peptide-Based Probes For In Vivo Molecular Imaging», *Anticancer Agents Med Chem*, 2012 [Epub ahead of print]
- Michalet X., Pinaud F.F., Bentolila L.A., Tsay J.M., Doose S., Li J.J., Sundaresan G., Wu A.M., Gambhir S.S., Weiss S. «Quantum dots for live cells, in vivo imaging, and diagnostics», *Science*, 307, n° 5709, 2005, p.538-44.
- Mirkin C., «Opinion: Miniaturizing Medicine», *The Scientist*, 2011, Morris MC, Deshayes S, Heitz F, Divita G. «Cell-penetrating peptides: from molecular mechanisms to therapeutics», *Biol Cell*, 2008 vol.100, p.201-17.
- Morris MC. «Fluorescent biosensors of intracellular targets from genetically encoded reporters to modular polypeptide probes», *Cell Biochem Biophys*, 2010, vol. 56, n°1, p.19-37.
- Morris, M.C. «Fluorescent Biosensors for Cancer Cell Imaging and Diagnostics», *Biosensors and Cancer*, CRC press, Editor V.Preedy and J.Hunter, ISBN 978-1-57808, 2012, p.734-741.
- Nicolaou KC, Guy RK, Potier P., «Taxoids: new weapons against cancer», *Sci Am.*, col. 274, n°6, 1996, p.94-98.
- Ohnishi, S., Lomnes, S.J., Laurence, R.G., Gogbashian, A., Mariani, G., and Frangioni, J.V., «Organic alternatives to quantum dots for intraoperative near-infrared fluorescent sentinel lymph node mapping», *Molecular Imaging*, vol. 4, 2005, p.172-181.
- OMS Site Web <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs297/fr/index.html>
- Rehemtulla A., «Dinosaurs and Ancient Civilizations: Reflections on the treatment of Cancer», *Neoplasia*, vol. 12, n°12, 2010, p.957-968.
- Safra T. et al., «Pegylated liposomal doxorubicin (doxil): reduced clinical cardiotoxicity in patients

reaching or exceeding cumulative doses of 500 mg/m²», Ann. Oncol., vol. 11, 2000, p.1029-1033.

*Schrama D., Reisfeld R. A., Becker, J. C. «Antibody targeted drugs as cancer therapeutics», Nat. Rev. Drug Discov., vol.5, 2006, p.147-159

*Slakter JS, Yannuzzi LA, Guyer DR, Sorenson JA, Orlock DA. «Indocyanine-green angiography» Curr Opin Ophthalmol. Vol. 6, n°3, 1995, p.25-32.

*Strebhardt K., Ullrich A., «Timeline: Paul Ehrlich's magic bullet concept: 100 years of progress », Nat. Rev. Cancer, vol.8, 2008, p.473-480

*Tomaò S., Miele E., Spinelli G. P., Miele E., Tomaò, F. «Albumin-bound formulation of paclitaxel (Abraxane® ABI-007) in the treatment of breast cancer», Int. J. Nanomedicine, vol. 4, 2009, p.99-105.

Torchilin V., «Tumor delivery of macromolecular drugs based on the EPR effect», Adv. Drug Deliv. Rev., vol. 63, 2011, p.131-135.

*Tsien R.Y., «Building and breeding molecules to spy on cells and tumors», FEBS Lett., vol.579, n°4, 2005, p.927-32.

*Urano Y, Asanuma D, Hama Y, Koyama Y, Barrett T, Kamiya M, Nagano T, Watanabe T, Hasegawa A, Choyke PL, Kobayashi H. « Selective molecular imaging of viable cancer cells with pH-activatable fluorescence probes », Nat.Med. vol.15, 2009, p104-109.

*Whitney M.A., Crisp J.L., Nguyen LT, Friedman B, Gross LA, Steinbach P, Tsien RY, Nguyen QT. «Fluorescent peptides highlight peripheral nerves during surgery in mice», Nat Biotechnol. Vol. 29, 2011, p.352-356.

*Weissleder R., Tung C.H., Mahmood, U., Bogdanov A.Jr. «In vivo imaging of tumors with protease-activated near-infrared fluorescent probes», Nat. Biotechnol., vol.17, 1999, p.375-378

*Weissleder R., Pittet M.J. «Imaging in the era of molecular oncology», Nature, vol. 452, 2008, p.580-589.

*Whitfield M., George L.K., Grant G.D., Perou C.M. «Common markers of proliferation», Nat. Rev. Cancer. vol.6, 2006, p.99-106,

Lexique

1. Apoptose : mort cellulaire programmée : processus par lequel des cellules déclenchent leur auto-destruction en réponse à un stimulus

2. Angiogenèse : croissance de nouveaux vaisseaux sanguins

3. Anti-mitotique : qui bloque la division cellulaire

4. Protéomique : concernant l'ensemble des protéines d'une cellule, tissu, organe ou d'un organisme

5. Dendrimères : molécules synthétiques comportant des embranchements

6. Polymères : substances composées de plusieurs molécules

7. Multimérique : assemblage non-covalent de plusieurs entités • Polymérique : assemblage covalent de plusieurs entités

8. Graphène : polymère / cristal de carbone

9. Endothelium : paroi cellulaire interne

10. Opsonisation : recouvrement d'une cible (étrangère) par des molécules dites «opsonines» pour faciliter sa reconnaissance par les cellules du système immunitaire (macrophages) pour sa phagocytose

11. Épitope : partie d'une molécule qui constitue un site de reconnaissance par un anticorps

Les quasi-cristaux

par Marianne Quiquandon-Gratias, chargée de recherche au CNRS/ONERA

Marianne Quiquandon est chargée de recherche au Laboratoire d'étude des microstructures (LEM UMR104) unité mixte CNRS/ONERA (Office national d'étude et de recherche aérospatiale) à Châtillon dans le département des Hauts-de-Seine. Elle travaille dans le domaine des matériaux et tout particulièrement dans celui des quasi-cristaux. Après un DEA (Diplôme d'études approfondies, équivalent du Master2 d'aujourd'hui) en sciences des matériaux en 1982 à l'université Pierre et Marie Curie à Paris, elle a intégré le CNRS en 1984 au Centre d'études de chimie métallurgique (CECM) à Vitry-sur-Seine. Elle a soutenu sa thèse « Théorie dynamique de la diffraction des électrons rapides par les cristaux et les quasi-cristaux » en 1988 sous la direction du Professeur Michel Fayard.



Après avoir réalisé les premières simulations d'images de microscopy électronique en haute résolution sur les quasi-cristaux, elle a caractérisé certains défauts topologiques présents dans ces matériaux. Elle s'est ensuite spécialisée, en collaboration avec Denis Gratias et André Katz, dans la détermination de structures atomiques quasi-cristallines dans le formalisme d'espaces de grande dimension. Elle a prolongé cette étude aux structures approximantes des quasi-cristaux dont elle a identifié plusieurs représentants avec Annick Quivy et Yvonne Calvayrac dans l'alliage aluminium-cuivre-fer. Plus récemment, elle a proposé, dans le grand espace, une description unitaire des structures atomiques de deux phases icosaédriques prototypes présentes dans les alliages aluminium-cuivre-fer et aluminium-palladium-manganèse.

Résumé

Suite au prix Nobel de chimie 2011 décerné à Daniel Shechtman pour la découverte des quasi-cristaux, nous vous proposons une rapide présentation du contexte de cette découverte via l'historique des principaux articles, le paradoxe apparent posé par ces structures et les oppositions scientifiques qu'elles ont générées. On remontera aux précurseurs de cette découverte pour mieux comprendre la démarche scientifique ainsi que son évolution. On discutera enfin quelquesunes des avancées principales du sujet et les propriétés physiques de ces phases quasi-cristallines pour finalement s'intéresser à l'ordre géométrique qui pourrait exister dans des matériaux au-delà de l'ordre quasi-cristallin.

Abstract

After the 2011 Nobel prize in Chemistry attributed to Daniel Shechtman for the discovery of quasi-crystals, we give a short presentation of the discovery's context with the historic main papers addressing the apparent paradox posed by these structures and discuss the scientific reactions that this discovery generated. Some of the main progresses together with some of the physical properties of these materials will then be shown before finally raising the question of which other original kind of spatial order could be present in materials beyond quasi-periodicity.

La découverte

C'est le 12 novembre 1984 qu'un court article publié par quatre chercheurs Daniel Shechtman, Ilan Blech, Denis Gratias et John Cahn dans la prestigieuse revue scientifique *Physical Review Letters* annonce la mise en évidence expérimentale d'un

solide qui diffracte les électrons selon certaines orientations discrètes comme les cristaux mais avec une symétrie globale icosaédrique (voir fig.1, celle-ci incompatible avec la symétrie de translation cristalline). Ce solide est un alliage d'aluminium et de manganèse obtenu en projetant un mélange liquide en fusion sur une roue métallique tournant à grande

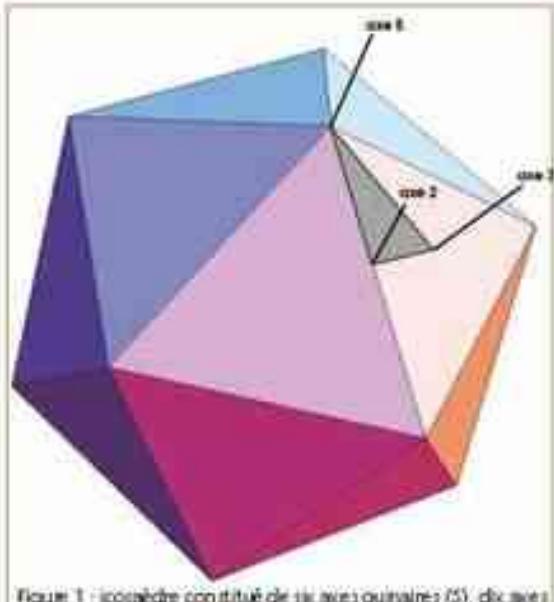


Figure 1 : icosaèdre constitué de six axes quinaires (3), dix axes ternaires (3) et quinze axes binaires (2).

vitesse. Au contact de celle-ci, le métal liquide se solidifie très rapidement, environ 1 million de °C par seconde - on dit qu'on effectue une trempe rapide - pour former un ruban de quelques micromètres d'épaisseur. C'est le 8 avril 1982 que Daniel Shechtman, enseignant-rechercheur au Technion (Haifa, Israël), observe au microscope électronique à transmission pour la première fois cet alliage,



Figure 2 : une fois observé au microscope électronique, l'alliage aluminium-manganèse présente des nodules dendritiques de quelques micromètres qui se développent au sein d'une matrice d'aluminium.

alors qu'il est chercheur invité au National Bureau of Standards - NBS - (aujourd'hui le National Institute of Standards and Technology, NIST) à Gaithersburg au Maryland, USA. Il voit une précipitation dendritique (Fig. 2) qui donne lieu selon certaines directions privilégiées à de remarquables figures de diffraction (voir Fig. 3).



Figure 3 : observés selon certaines directions, les précipités dendritiques de la figure 2 présentent cette magnifique figure de diffraction électronique où apparaissent des taches de diffraction fines qui se répartissent selon des pentagones de différentes tailles.

Le paradoxe de la découverte

Cette figure de diffraction qui présente une répartition quinaire de taches de diffraction soulève à l'époque un formidable paradoxe : aucune structure atomique cristalline ne peut admettre une symétrie quinaire, et, croit-on alors, aucune autre structure que cristalline ne peut diffracter selon des pics fins. En effet jusqu'en 1984, les états structuraux des solides peuvent être répertoriés par rapport à deux modèles extrêmes : l'état cristallin et l'état amorphe.

Au sein du cristal règne un ordre à longue distance, les motifs atomiques s'arrangent de façon périodique les uns par rapport aux autres de la même façon que la répétition des motifs d'un papier peint. Au contraire, au sein d'une structure amorphe règne au mieux un ordre à courte distance, les molécules ne se répètent pas de façon périodique, ne sont pas orientées de la même manière et ne sont généralement pas à égale distance les unes des autres.

Le phénomène de diffraction est un moyen bien approprié pour différencier ces deux états, cristallin ou amorphe. Quand on envoie un faisceau de particules sur un matériau (des électrons dans le cas du microscope électronique), elles sont déviées de leur trajectoire par les atomes du matériau. Ainsi, si le matériau est amorphe, on observera une série d'anneaux diffus plus ou moins marqués et caractéristiques de l'ordre à courte distance. Au contraire, si celui-ci est cristallin, la périodicité de la structure atomique fait que la diffraction est constructive cohérente pour certaines directions privilégiées associées de la géométrie du cristal et destructive pour toutes les autres ; on observe alors des réflexions fines et bien localisées dont la distribution reflète la symétrie du cristal. Or, la géométrie du cristal est soumise à de sévères contraintes de symétrie puisque le cristal résulte de la répétition d'un volume (comprenant le motif) face contre face, parallèlement à lui-même, sans vide ni superposition. Ce volume, appelé maille, est un polyèdre qui ne peut posséder que des symétries binaire, ternaire, quaternaire, et sénaire excluant en particulier la symétrie cinq. Or, le diagramme de la figure 3 montre une diffraction cohérente se répartissant précisément sur des pentagones réguliers ! Ainsi, en avril 1982, Daniel Shechtman était donc face à un diagramme de diffraction totalement paradoxal avec des réflexions bien localisées, apparaîtant comme une signature d'un cristal, mais dont la symétrie globale est quinaire, interdite par la cristallographie¹.

Devant cette situation, Daniel Shechtman chercha tout ce qui aurait pu donner un tel résultat dans le cadre de la cristallographie conventionnelle. En particulier, il chercha si le matériau observé n'était pas le résultat de diffractions multiples des électrons par un mélange homogène de micro-cristaux orientés selon un angle de 72° (correspondant à l'angle des vecteurs de base du pentagone régulier) les uns par rapport aux autres. Un tel mélange se nomme

«une macle» en cristallographie et ce, quel que soit l'angle entre les micro-cristaux. Mais toutes les techniques d'analyse les plus fines utilisées par Daniel Shechtman échouèrent : il fut impossible de trouver des micro-cristaux individuels qui auraient pu former ces micro-macles.

L'histoire des premiers articles

Daniel Shechtman en était là en 1982 et c'est presque deux ans plus tard qu'il convainc indépendamment Ilan Blech (professeur au Technion, Israël) et John Cahn (Senior Scientist au NBS, USA) de l'importance de ses résultats. Ilan Blech, au Technion, imagine alors un modèle structural construit en accolant deux à deux par une arête au hasard des icosaèdres de même orientation. La simulation numérique de la diffraction d'une structure constituée d'un millier de ces icosaèdres est stupéfiante : le diagramme est très similaire à celui de la figure 3. Ce travail², soumis une première fois à *Journal of Applied Physics*, fut refusé au prétexte qu'il n'intéresserait pas les physiciens, il fut finalement envoyé le 2 octobre 1984 à la revue *Metalurgica Transaction* et sortira en 1985.

Parallèlement, au NBS, John Cahn se met à la rédaction de l'article de 1984 autour de la question fondamentale d'une possible diffraction ponctuée selon une symétrie icosaédrique par une assemblée non périodique d'atomes. Pour discuter cette hypothèse, il collabore avec Denis Gratias (chercheur du CNRS au Centre d'études de chimie métallurgique - CECM - à Vitry-sur-Seine, France), également convaincu par les résultats de Daniel Shechtman. Le Français apporte un argument mathématique qui permet de lever le paradoxe du diagramme de diffraction de la figure 3, même si aucune explication n'est fournie. Dès 1925, le mathématicien Harald Bohr³, suivi en 1932 par Abram Besicovitch⁴, a démontré que la périodicité n'est pas une condition nécessaire pour obtenir une diffraction ponctuée comme dans les cristaux : la condition de «presque-périodicité», dont la quasipériodicité est un cas particulier, autorise aussi de telles diffractions. Cette distribution de matière, la quasipériodicité, condition plus faible que la périodicité peut, elle, être compatible avec la symétrie quinaire. Encore fallait-il trouver un algorithme de construction de ces objets quasipériodiques... Cet algorithme va être trouvé explicitement dès fin 1984 par Dov Levine et Paul Steinhardt⁵ et

début 1985 sous une autre forme plus simple par, en France Michel Duneau et André Katz¹, aux USA par Veit Elser² et en Russie par Pavel Kalugin, Alexey Titaev et Leonid Levitov³. Il est la suite d'autres études en mathématiques, en physique théorique et en cristallographie, qui sont bien antérieures à la découverte des quasicristaux.

Les précurseurs de la découverte

En 1972, le mathématicien français Yves Meyer (Prix Gauss 2010), à travers son ouvrage⁴ sur l'analyse harmonique qui reprend ses résultats plus anciens sur les nombres algébriques⁵, invente des ensembles non périodiques dits « harmonieux ». En 1974, le physicien théoricien anglais Roger Penrose construit des pavages⁶ ordonnés apériodiques et de symétrie quinaire à l'aide d'un nombre très

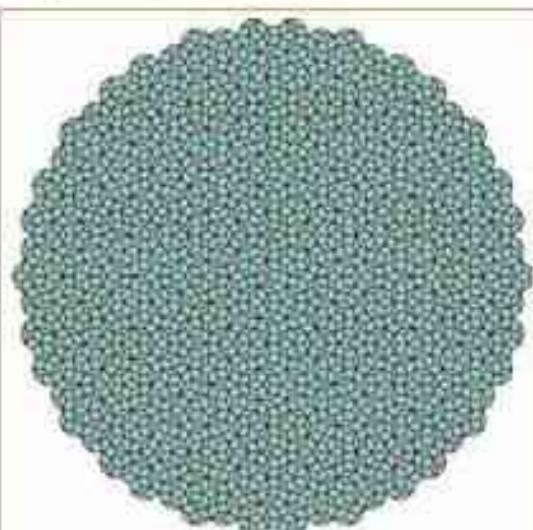


Figure 4 : pavage typique de Roger Penrose constitué de deux losanges prototypes, l'un d'angle au sommet $n/10$ et l'autre $n/5$. La symétrie globale est quinnaire

réduit de type de tuiles (deux) munies de règles d'accrolement, travail qui fut largement vulgarisé⁷ par Martin Gardner en 1977 (voir Fig. 4). En 1981, le cristallographe anglais Alan Mackay s'inspire de ces pavages pour imaginer des assemblages⁸ atomiques aujourd'hui très utilisés dans les études de structures atomiques quasicristallines (voir Fig. 5).

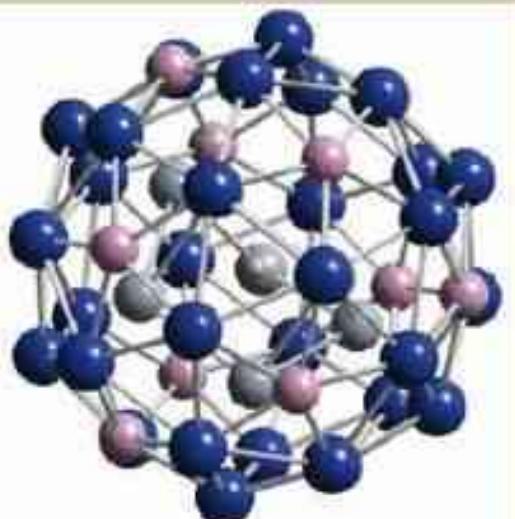


Figure 5 : amas atomique de Alan Mackay qui est constitué d'un atome au centre puis d'un petit icosaèdre suivi de grands bordodécaèdre et icosaèdre

Le cadre des quasicristaux

C'est le 24 décembre 1984 que le mot « quasicristal » apparaît dans l'article publié par Dov Levine et Paul Steinhardt qui réussissent à fabriquer un modèle d'empilement icosaédrique muni d'un ordre

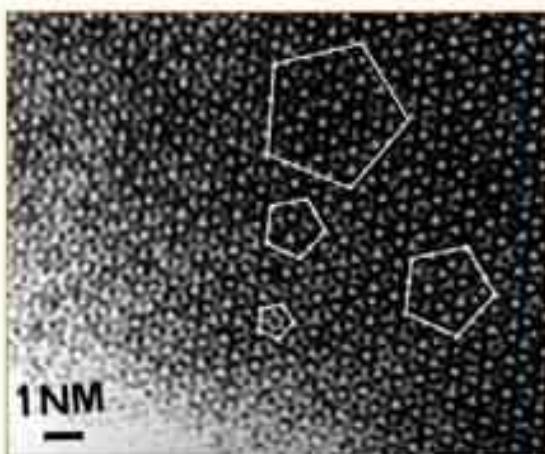


Figure 6 : après interférence des fréquences diffractées de la figure 3 on obtient cette image de microscope électronique à haute résolution qui montre la répartition des atomes au sein des dendrites de la figure 2 avec une distribution homogène et non périodique de pentagones.

à longue distance. Leurs résultats théoriques des diagrammes de diffraction sont en parfait accord avec les diagrammes expérimentaux de la figure 3. Dès janvier 1985, Richard Portier réalise des images¹³ haute résolution en microscopie électronique sur les quasicristaux d'aluminium-manganèse (voir Fig.6) qui révèlent la répartition des atomes au sein du matériau, ruinant ainsi l'hypothèse de micro-macles possibles pour expliquer la symétrie quinaire: on voit la disposition géométrique des atomes, une distribution non périodique mais homogène de pentagones qui provient d'un arrangement de symétrie icosaédrique apénodique d'atomes. Notons que les pentagones les plus petits ont des dimensions de quelques dixièmes de nanomètres qui correspondent à l'ordre de grandeur des distances interatomiques. Cette image prouve bien que le quasicristal aluminium-manganèse n'est pas une superposition de cristaux ordinaires qui formeraient une macle.

Malgré ce résultat, Linus Pauling, célèbre chimiste cristallographe ayant reçu deux prix Nobel (un en chimie en 1954 et le prix Nobel de la paix en 1962) s'oppose fortement aux quasicristaux et les interprète, dans une lettre¹⁴ au journal *Nature*, comme étant des macles multiples de cristaux cubiques. La conséquence aux USA est importante puisque l'article de Pauling freine l'intérêt des cristallographes américains pour cette découverte. Ce sont les physiciens américains qui vont s'intéresser aux quasicristaux et par conséquent les approcher plutôt au travers des modèles de pavages aléatoires qui font appel à des aspects entropiques et thermodynamiques¹⁵. L'Europe, elle, n'a pas suivi les recommandations de Linus Pauling et les cristallographes européens ont étudié les quasicristaux au travers des aspects structuraux, en s'intéressant plutôt aux phases icosaédriques en France et aux phases décagonales en Allemagne.

Le développement des recherches sur les quasicristaux

C'est une coïncidence heureuse qui a permis en janvier 1985 que l'expérience et la théorie se rejoignent pour aboutir à des modèles riches de conséquences. A cette période, un atelier de cristallographie mathématique fut organisé par Marjorie Sénéchal et Louis Michel à l'Institut des hautes études scientifiques de Bures-sur-Yvette. Il

se termina par la rencontre de Daniel Shechtman, John Cahn et Denis Gratias avec André Katz et Michel Duneau, cités plus haut et inventeurs de la méthode de coupe et projection, formalisme qui a permis de développer la quasicristallographie¹⁶ et qui est aujourd'hui bien reconnu et utilisé dans le monde entier.

Dès 1985, nombreux furent les scientifiques français qui s'impliquèrent dans le sujet des quasicristaux, ils constituèrent, pendant les dix années qui suivirent, l'une des principales communautés scientifiques sur le sujet, tant dans le domaine de la chimie que celui de la physique ou des mathématiques. Parmi ceux-ci, il y eut dès le début les personnalités scientifiques suivantes : outre Louis Michel, déjà cité, André Guinier, Jacques Friedel, Michel Fayard et Georges Martin. On peut dire que, dès 1985, la découverte de Daniel Shechtman a reçu un accueil très enthousiaste par la communauté scientifique française. Très rapidement on découvrira de nouvelles phases quasicristallines telle que la phase décagonale identifiée dans l'alliage aluminium-manganèse par Léonid Bendersky¹⁷ du NIST, puis de nombreuses phases icosaédriques dans des alliages ternaires à base aluminium.

Mais c'est surtout le premier quasicristal stable de dimension macroscopique qui va permettre aux études structurales de se développer considérablement. A partir de juillet 1986, Pierre Sainfort et Bruno Dubost¹⁸, deux chercheurs du centre de recherche Cégédur-Péchiney, découvrent après une solidification lente de l'alliage aluminium-lithium-cuivre le premier quasicristal stable et de taille macroscopique. Mais c'est surtout à partir de 1990 que la détermination structurale prend son essor grâce à la découverte des phases icosaédriques stables et macroscopiques dans les systèmes aluminium-cuivre-fer (en 1987) et aluminium-palladium-manganèse (en 1990) par An Pang Tsai¹⁹. En effet, en novembre 1990, Marianne Cornier-Quiquandon²⁰ et al. réalisent, au laboratoire Léon Brillouin par diffraction de neutrons, la première détermination structurale entièrement à six dimensions et polyédrale sur l'alliage aluminium-cuivre-fer, suivie l'année d'après, d'une nouvelle détermination structurale sur l'alliage aluminium-palladium-manganèse par diffraction des rayons X à l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) par Michel Boudard²⁰ et al.

Quelques propriétés physiques

Ces matériaux présentent certaines propriétés physiques assez particulières telle que la résistivité électrique^a. Celle-ci est très élevée dans le quasicristal, alors que chacun des éléments métalliques qui le composent a une résistivité électrique plutôt faible. Par exemple, le quasicristal aluminium-palladium-rhénium^b admet une résistivité basse température plus d'un million de fois supérieure à celle des métaux le constituant. Corrélativement, les quasicristaux sont de bons isolants thermiques, en particulier à basse température, et pourraient être utilisés en tant que revêtements thermiques dans des récipients, à froid, de gaz liquéfiés. Les propriétés mécaniques de ces matériaux sont aussi particulières : ils sont fragiles à basse température et ductiles^c à haute température. Des phases cristallines à grandes mailles ont un comportement mécanique similaire à celui des quasicristaux et, de manière inattendue, tout le formalisme développé pour décrire les défauts responsables de la déformation plastique dans les quasicristaux peut être réanalysé dans le cas périodique pour aborder de façon originale la description de la déformation plastique de ces cristaux à grandes mailles.

Au-delà des quasicristaux

De nombreux autres objets théoriques (tels que les pavages de Penrose pour les quasicristaux), parfaitement ordonnés à longue distance mais qui ne sont ni périodiques ni quasiperiodiques, sont obtenus à partir d'algorithmes déterministes de complexité finie. En effet, une des questions théoriques qui se pose à l'heure actuelle est le lien qui existe entre l'ordre spatial dans les solides et la diffraction. La nature peut encore nous faire des surprises et nous révéler la présence de tels objets dans des expériences.

Références bibliographiques

- 1 D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias & J. W. Cahn, Phys. Rev. Lett. 53 (20), 1951-1953 (1984).
- 2 D. Shechtman & I. Blech, Met. Trans. 16A, 1005-1012 (1985).
- 3 H. Bohr, Acta Math. 45, 29 (1924); Acta Math. 46, 101 (1925); Acta Math. 47, 237 (1926).
- 4 A. S. Besicovitch, Almost periodic functions, Cambridge (1932).
- 5 D. Levine & P.J. Steinhardt, Phys. Rev. Lett. 53 (26), 2477-2480 (1984).
- 6 M. Duneau & A. Katz, Phys. Rev. Lett. 54, 2688 (1985).
- 7 V. Elser, Phys. Rev. Lett. 54, 1730 (1985).
- 8 P. A. Kalugin, A. Y. Kitaev & L. S. Levitov, J. Phys. Lett. 46, L-601-607 (1985).
- 9 Y. Meyer "algebraic numbers and harmonic analysis", North Holland (1972).
- 10 Y. Meyer, lectures notes in mathematics n°117, Springer (1970).
- 11 R. Penrose Bull Inst Maths its Appl 10 n°7/8 266 (1974); ibid. Math. Intelligencer 2 32-37 (1979).
- 12 M. Gardner Sci. Amer. 236, n°110 (1977).
- 13 A. L. Mackay, Sov. Phys. Crystallogr. 26 (5), 517-522 sept-oct (1981); ibid. Physica 114A, 609-613 North-Holland Publishing Co. (1982).
- 14 R. Portier, D. Shechtman, D. Gratias & J. W. Cahn, J. Microsc. et Spectr. Electron. 10 n°2, 107-116 (1985).
- 15 L. Pauling, Nature 317, 512-514 (1985).
- 16 L. Bendersky, Phys. Rev. Lett. 55, 1461 (1985).
- 17 B. Dubost, J. Lang, M. Tanaka, P. Sainfort & M. Audier, Nature (UK) 324, 48-50 (1986).
- 18 A.P. Tsai, A. Inoue & T. Masumoto, J. Mater. Sci. Lett. 6 n°12, 1403-1405 (1987). A. P. Tsai, A. Inoue, Y. Yokoyama & T. Masumoto, Phil. Mag. Lett., 61-1, 9-14 (1990).
- 19 M. Cornier-Quiquandon, A. Quivy, S. Lefebvre, G. Heger, A. Katz & D. Gratias, Phys. Rev. B. 44 n°5, 2071-2084 (1991).
- 20 M Boudard, M de Boissieu, C Janot, G Heger, C Beeli, H-U Nissen, H Vincent, R Ibberson, M Audier & J M Dubois, J. Phys. Cond. Matter 4, 10149 (1992).
- 21 J.J. Préjean, J. C. Lasjaunias, C. Berger & A. Sulpice, Phys. Rev. B 61, 9356-9364 (2000).

Notes

- a Par analogie avec la théorie des nombres, on dit souvent que les approximants sont aux quasicristaux ce que les nombres rationnels sont aux irrationnels.
- b La cristallographie est la science qui se consacre à l'étude des cristaux à l'échelle atomique.
- c Schématiquement, on peut dire que l'entropie maximise le désordre d'un système au niveau microscopique.
- d La thermodynamique est la science qui décrit les phénomènes qui dépendent de la température.
- e La quasicristallographie est la généralisation de la cristallographie à des espaces de dimension supérieur à trois.
- f C'est la connaissance de la position et de la nature chimique des atomes dans le matériau.
- g Capacité du matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique.
- h Un matériau est ductile si il se déforme sans se rompre de manière irréversible par déplacement de la position relative des atomes.
- i La déformation plastique est la déformation irréversible d'un objet ; elle se produit par un réarrangement de la position relative des atomes.

Matière-antimatière, symétries et dissymétries

par Catherine Thibault, directrice de recherche au CNRS

Catherine Thibault est directrice de recherche émérite au CNRS, Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse, Orsay.



Après une formation d'ingénierie à l'Ecole supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI), elle est entrée au CNRS en 1964, et a soutenu sa thèse d'Etat en 1971 sur l'*«Étude par spectrométrie de masse en ligne de noyaux légers exotiques produits dans les réactions à haute énergie»*. Elle a ensuite consacré une très grande partie de sa carrière à mesurer les masses et étudier la forme de nombreux noyaux très éloignés de la stabilité (dits exotiques) jusqu'à quelques millisecondes de demi-vies, ce qui a permis d'obtenir des résultats importants dont certains très inattendus. En intermède, de 1992 à 2000, elle a participé à l'expérience de physique des particules CPLEar qui a étudié la dissymétrie matière-antimatière au Cern, ce qui est le sujet de cet article. En parallèle, elle a préparé des diaporamas adaptés au grand public et aux lycéens sur divers sujets (radioactivité, antimatière, destin des étoiles, énergies en particulier), qu'elle-même et des collègues ont présenté lors de nombreuses interventions.

Catherine Thibault est chevalier de la Légion d'Honneur.

Résumé

La première partie a pour but de familiariser le lecteur avec les connaissances actuelles sur les composants ultimes de la matière. La découverte de l'antimatière est ensuite présentée dans son contexte historique du début du 20^e siècle. On a alors pensé que ces deux sœurs jumelles -matière et antimatière- étaient destinées à se comporter de façon strictement identique vis-à-vis des différentes interactions. Mais il est montré ici que la deuxième moitié du 20^e siècle a apporté bien des surprises, et que le 21^e siècle se trouve actuellement confronté à plusieurs questions encore en suspens qu'il va devoir essayer de résoudre.

«Antimatière» s'oppose bien sûr à «Matière». Mais quel est le rapport exact entre matière et antimatière?

La matière et ses constituants ultimes :

En premier lieu, il peut être utile de rappeler quels sont les constituants de la matière. La figure 1 montre une mouche qui a une taille d'environ 1 cm. En utilisant une loupe, un microscope, un accélérateur de particules, on peut zoomer progressivement sur le cœur de la matière. La molécule d'ADN ne

Abstract

The first part aims to familiarize the reader with the current knowledge on the ultimate components of matter. Next, the antimatter discovery is presented within its historical context of the beginning of the 20th century.

It was afterwards thought that these twin sisters - matter and antimatter - were intended to behave strictly identical to the various interactions. However, it is here shown that the second half of the 20th century brought a lot of surprises, and that the 21st century is now facing several still outstanding issues that it will have to try to solve.

mesure déjà plus qu'un centième de micromètre, 100 fois plus petit, on trouve l'atome composé d'un noyau très dense autour duquel gravite un nuage d'électrons. Chaque électron porte une charge négative. Leur nombre détermine les propriétés chimiques : ainsi, l'hydrogène a 1 électron, le carbone en a 12, et l'uranium 92, ce qui a permis à Mendeleïev de classer les éléments chimiques.

Le noyau, très compact, est 10 000 fois plus petit que l'atome. C'est un agrégat de particules environ

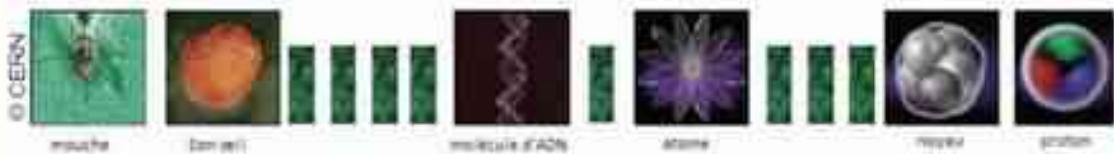


Figure 1 : les constituants de la matière avec un grossissement multiplié par 10 entre chaque image.

2 000 fois plus massives que l'électron : d'une part des protons porteurs d'une charge électrique positive, et donc en même nombre que les électrons ; le noyau d'hydrogène a 1 proton, le carbone en a 6 et l'uranium 92 ; d'autre part des neutrons sans charge électrique. En effet, 2 interactions sont en compétition dans le noyau : l'interaction électromagnétique, force de répulsion entre les protons porteurs de charges identiques, et l'interaction forte, force d'attraction entre neutrons et/ou protons qui permet de créer des noyaux stables quand le mélange protons-

enfin, il faut ajouter une 4^e particule à cette famille : le neutrino qui a une masse très faible et qui, n'étant pas chargé, est insensible à l'interaction électromagnétique. Comme l'électron, le neutrino n'est pas sensible non plus à l'interaction forte. Par contre, les 2 autres interactions connues, l'interaction faible, et la gravité agissent sur toutes les particules. La famille (électron, neutrino ν_e , quarks u et d) est accompagnée de 2 autres familles composées chacune de 4 particules analogues, mais plus massives et instables (Table 1).

	Charge	Famille 1	Famille 2	Famille 3
quarks	+2/3 -1/3	up u down d	charme c étrange s	top t beau b
leptons	-1 0	électron e neutrino ν_e	muon μ^- neutrino ν_μ	tau τ^- neutrino ν_τ

Table 1 : les 3 familles de particules. En rouge, elles sont sensibles aux 4 interactions ; en orange elles ne le sont pas à l'interaction forte ; en noir, elles ne le sont ni à l'interaction forte ni à l'interaction électromagnétique.

neutrons est correctement dosé : le noyau d'hydrogène a 3 isotopes stables³ avec 0, 1, ou 2 neutrons, celui de carbone peut en avoir 6 ou 7 ; par contre aucun noyau d'uranium n'est stable, ni aucun des noyaux au-delà du plomb qui a 82 protons.

Enfin, les protons et les neutrons eux-mêmes sont formés de 3 «quarks» : 2 quarks «up» u (charge +2/3) et 1 quark «down» d (charge -1/3) pour le proton, 1 quark u et 2 quarks d pour le neutron. Les quarks sont donc sensibles aux interactions électromagnétique et forte. Ces 2 quarks et l'électron (non sensible à l'interaction forte) suffisent à constituer toute la matière de notre univers. Actuellement, on pense que les électrons sont des particules «élémentaires» insécables et que les quarks le sont probablement aussi. L'interaction forte permet aussi d'assembler un quark et un antiquark pour former des particules appelées «mésons», qui sont toutes instables.

Et l'antimatière ?

La découverte de l'existence de l'antimatière est une histoire particulièrement fascinante et instructive. À la fin du 19^e siècle, les scientifiques pensaient avoir tout résolu. En particulier, le comportement des électrons semblait être très bien décrit par les lois de l'électromagnétisme établies par James Clark Maxwell. Mais, surprise ! Le 20^e siècle a tout remis en question. Dès 1905, Albert Einstein montra que les lois de Newton n'étaient valables que pour de faibles vitesses, et que pour des vitesses proches de la vitesse de la lumière, il fallait prendre en compte sa théorie de la relativité restreinte. Puis, en 1926, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg puis Erwin Schrödinger introduisirent la Mécanique Quantique et montrèrent que l'électron a un spin +1/2 ou -1/2 associé au sens de sa rotation quand il est en mouvement. En 1929, tous ces aspects ont été réunis en

une seule théorie par un jeune physicien anglais de 27 ans, très brillant, Paul Dirac. Mais son équation avait 2 solutions. Une controverse s'engagea alors sur l'interprétation de cette 2^e solution : une existence mathématique, mais sans signification physique ? Ou, au contraire, l'indication d'une nouvelle particule qui aurait une charge positive ? Comme la particule positive la plus légère connue était le proton 2 000 fois plus massif que l'électron, Dirac imagina l'existence d'un anti-électron, ou «positron» (ou encore positon en français)¹, très semblable à l'électron mais de charge positive. Pendant ce temps, à l'autre bout du monde, plus exactement au Caltech (Etats-Unis), un autre jeune physicien, Carl Anderson, étudiait les rayons cosmiques à l'aide d'une chambre de Wilson placée dans un champ magnétique. La trajectoire des particules est ainsi visualisée sous forme de petites gouttelettes, et le sens de sa courbure (induite par le champ magnétique) dépend du signe de la charge électrique. C'est ainsi qu'en 1932, lorsqu'Anderson remarqua des électrons chargés «à l'envers», c'est-à-dire positivement, il fit le rapprochement avec les suggestions de Dirac. Deux autres équipes dans le monde avaient déjà observé des électrons chargés positivement un peu avant Anderson, mais n'avaient pas osé publier leurs résultats craignant un artefact expérimental. Ainsi va la science... Dirac et Anderson eurent tous deux le prix Nobel, respectivement en 1933 et 1936.

S'est alors immédiatement posée la question de savoir s'il s'agissait d'un phénomène spécifique à l'électron, ou au contraire très général : le proton a-t-il un antiproton de charge négative ? Et le neutron, bien que non-chargé, un antineutron, etc. (la notation utilisée par la suite pour les antiparticules, excepté le positon, sera \bar{p} , \bar{n} , etc.).

Les positons observés par Anderson étaient créés par des réactions nucléaires entre les rayons cosmiques et l'atmosphère. En effet, selon la célèbre loi d'Einstein $E=mc^2$, l'énergie libérée E peut donner naissance à des paires particules-antiparticules de masse M . Mais pour la paire proton-antiproton, il faut disposer d'une énergie 2 000 fois supérieure à celle nécessaire pour créer la paire électron-positon. Les Américains se lancèrent alors dans l'aventure en construisant à Berkeley un accélérateur de particules, le Bevatron. Ce fut long et difficile, et les premiers antiprotons ne furent découverts qu'en 1955, rapidement suivis

par la mise en évidence de l'antineutron en 1956 (prix Nobel pour Chamberlain et Segré en 1959). En effet, bien que n'ayant pas de charge électrique, les antineutrons se distinguent facilement des neutrons par leurs produits de désintégration :

$$\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu, \text{ tandis que}$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

Il faut cependant remarquer que certaines particules, telles le photon γ ou le méson n^0 , sont identiques à leur antiparticule.

Les symétries C , P , T

Particule et antiparticule : deux soeurs jumelles, que l'on crée toujours conjointement, mais jusqu'où va leur ressemblance ? Ont-elles **exactement** la même masse, la même durée de vie si elles sont radioactives, les mêmes spectres lumineux s'il s'agit d'atomes et d'antiatomes ? Sont-elles soumises, avec **exactement** les mêmes lois, aux interactions électromagnétique, forte et faible, ou à la gravité ?

En physique des particules, 3 symétries discrètes sont essentielles : C , P , et T (Figure 2), ainsi que leurs combinaisons CP et CPT .

C , la conjugaison de charge inverse les charges, et transforme une particule en son antiparticule.

P , la parité, agit comme un miroir,

T , l'inversion du sens du temps, agit comme si on passait un film à l'envers.

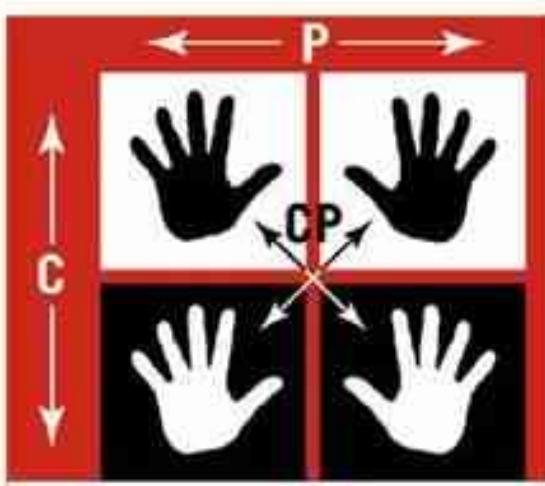


Figure 2 : symétries C , P , CP

A priori, on pourrait penser, ou espérer, que ces symétries soient parfaitement conservées (« invariantes »), c'est-à-dire que toutes les lois physiques soient identiques pour une particule et sa transformée par la symétrie considérée. Il peut paraître étrange que l'on ait pensé que T soit conservée car à notre échelle, quand on inverse le temps en passant un film à l'envers, le plongeur remonte sur son tremplin et le vase cassé se recolle miraculeusement. Mais à l'échelle des particules la conservation de T paraît tout aussi probable que celle de C et P , et, jusqu'à présent, toutes les observations montrent que c'est effectivement le cas dans les interactions forte et électromagnétique.

Par contre, pour l'interaction faible, aux USA en 1956, Tsung Dao Lee et Chen Ning Yang, deux jeunes théoriciens, ont remarqué qu'il n'existe pas de preuve expérimentale de la conservation de P ; et en particulier, que si l'hypothèse de violation de P était vérifiée, alors les 2 particules, θ^+ (theta⁺) et τ^+ (taut⁺) qui avaient été observées avec les mêmes masse et durée de vie pourraient être une seule et même particule, bien que se désintégrant vers des états de parité différentes. Quelques mois plus tard, toujours aux USA, Chien-Shiung Wu, « la Marie Curie chinoise », et ses collaborateurs réalisèrent une des expériences proposées par Lee et Yang et prouverent, en étudiant la désintégration β d'atomes de cobalt 60, que P n'est pas conservée dans l'interaction faible (prix Nobel 1957 pour Lee et Yang). La violation de P ainsi que celle de C peuvent même y être maximales! Ainsi il a pu être conclu que les 2 particules θ^+ et τ^+ sont une seule et même particule: le meson K^+ qui peut se désintégrer en violant P .

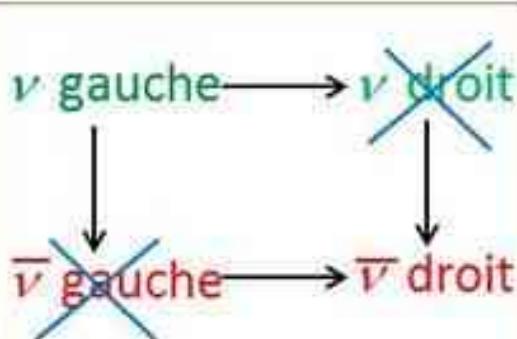


Figure 3 : le neutrino droit et l'antineutrino gauche n'existent pas.

L'exemple le plus frappant est celui du neutrino gauche (Figure 3) : P le transforme en neutrino droit qui n'existe pas, et C le transforme en antineutrino gauche qui n'existe pas non plus. Seule la combinaison CP qui le transforme en antineutrino droit aboutit à une particule qui existe.

On a alors misé sur l'invariance de la combinaison CP . Mais en 1964, une petite dissymétrie, tout à fait inattendue, a été mise en évidence aux USA par James Christenson, James Watson Cronin, Val Fitch et René Turlay qui ont observé que 2 % des mésons K (ou kaons) neutres pouvaient se désintégrer selon un mode interdit par la conservation de CP (prix Nobel 1980 pour Christenson, Cronin, et Fitch). Les kaons neutres K^0 et \bar{K}^0 font intervenir le quark «étrange» s , et sont respectivement composés de ($d\bar{s}$) et ($\bar{d}s$). Le modèle de base de la physique des particules appelé « Modèle standard » a pu prendre en compte cette violation de CP et a alors prédit une violation plus forte pour le méson $\bar{\Lambda}$ qui contient un quark b , ce qui a été confirmé par les expériences Babar aux USA et Belle au Japon. Mais très récemment l'expérience LHCb au Large Hadron Collider LHC du Cern (Organisation européenne pour la Recherche nucléaire) a mis en évidence la violation de CP aussi dans le méson charmé (avec un quark q , avec une amplitude beaucoup plus forte qu'attendu): affaire à suivre...

Depuis 1964, tous les espoirs se sont alors reportés sur la conservation de CPT . Dans ce cas, la foi en son invariance est très forte car elle s'appuie sur le «théorème CPT» qui est basé sur la théorie quantique des champs. Ce théorème a été démontré dans les années 1954-55, indépendamment, par divers théoriciens dont Gerhard Lüders, Wolfgang Pauli ou John Stewart Bell ; une démonstration plus générale en a été donnée par Rudolf Jobst en 1957. Les principales conséquences sont une stricte égalité des masses et durées de vie des particules et de leurs antiparticules. Jusqu'à présent, aucune faille n'a été trouvée ni pour e^-e^+ , ni pour P, \bar{P} , ni pour $K^0\bar{K}^0$. La comparaison directe des masses de e , e^- , P , \bar{P} , a atteint une précision de 10^{-9} (un milliardième) sans montrer aucun écart significatif ; ces mesures sont obtenues en comparant leurs fréquences de rotation, qui sont inversement proportionnelles à leurs masses, dans le champ magnétique d'un piège électromagnétique dans lequel on

les a continué. Pour le kaon neutre, la comparaison de masse est indirecte, mais la précision atteinte est 10^{-18} , soit 1 milliardième de milliardième, pour un niveau de confiance de 90 %. Les mesures de durée de vie sont beaucoup moins précises et donc peu significatives.

Posant alors que *CPT* est invariant, il faut fatallement que *T* soit violée. Des observations indirectes le suggéraient d'ailleurs, mais la première observation directe a été faite au Cern en 1998, par l'expérience CP-Lear à laquelle j'ai participé. Il s'agit à nouveau des kaons neutres. CP-Lear était capable «d'étiqueter» les K^0 et les \bar{K}^0 lors de leur création, et lors de leur désintégration. Or une propriété très particulière du kaon neutre est sa capacité d'osciller entre les 2 états K^0 et \bar{K}^0 . Ainsi en comparant en fonction du temps t la probabilité pour un K^0 créé au temps $t = 0$ d'être identifié comme \bar{K}^0 à l'instant $t = \tau$ de sa désintégration :

$$\bullet K^0 \text{ à } t = 0 \rightarrow \bar{K}^0 \text{ à } t = \tau,$$

avec celle du processus image par inversion du temps :

$$\bullet \bar{K}^0 \text{ à } t = 0 \rightarrow K^0 \text{ à } t = \tau$$

le résultat a été une différence de 6,6 % en faveur de la transformation $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$ pour τ compris entre 0,2 et 2 ns, preuve directe de la violation de la symétrie *T*.

La force de gravité

Nous avons vu que les symétries sont conservées

matière et antimatière ? En se basant sur le « principe d'équivalence » selon lequel un corps placé dans un champ gravitationnel subit une accélération g indépendante de la nature du corps, il y a là aussi une très forte présomption en faveur de l'invariance de l'attraction gravitationnelle. Mais il n'y a aucune preuve directe alors que certains théoriciens proposent la possibilité d'une attraction différente, voire même d'une répulsion.

Pour vérifier ce qu'il en est, il n'est pas possible d'utiliser des antiprotons car les forces électromagnétiques dues à l'environnement, et auxquelles ils sont extrêmement sensibles, masquent complètement les effets de la gravitation. Il faut donc utiliser de l'antimatière neutre, et l'antiatome le plus simple est l'anti-hydrogène $H^- (\bar{p} e^+)$. Si il est ultra-froid (énergie cinétique quasi-nulle), il est alors possible de le laisser tomber et de mesurer l'intensité et la direction de l'attraction gravitationnelle qu'il subit. Au Cern, plusieurs équipes travaillent à fabriquer des H^- depuis une vingtaine d'années. En 1995, 9 H^- ont été observés, mais ils avaient une grande énergie cinétique. En 1999, a été lancée la construction de l'Antiproton Decelerator AD qui décelère les \bar{p} de 3,5 GeV jusqu'à 5,3 MeV. En les ralentissant ensuite à une dizaine de keV par le passage dans une feuille mince, ils peuvent être capturés dans des pièges électromagnétiques et refroidis à moins de 100 meV équivalent à une température de 1200K, ce qui permet de les faire se combiner à un positon pour former un H^- (Figure 4).



Figure 4 : exemple de piège (expérience ATRAP) pour former H^- (tourné de 90°)

dans les interactions électromagnétique et forte, et que les symétries *C*, *P*, *T* et leurs combinaisons, à la seule exception de *CPT*, sont violées dans l'interaction faible. Mais qu'en est-il de la gravité ? L'attraction gravitationnelle est-elle la même pour

Les premiers H^- refroidis ont été obtenus en 2002, par les expériences Athena, puis Atrap¹. Depuis, plusieurs centaines de millions de H^- froids ont été fabriqués. Mais, pour étudier leurs propriétés, il faut disposer de temps, ce qui nécessite que les Hbar

eux-mêmes soient confinés dans un piège, opération très compliquée car ils n'ont pas de charge électrique ! Ce n'est qu'en 2011 que l'expérience Alpha¹ a réussi à piéger 309 \bar{H} pendant plus d'un quart d'heure, ce qui ouvre la porte aux premières études de spectroscopie laser qui seront un nouveau test de l'invariance de CPT.

Pour la gravitation, deux expériences sont en préparation, et nécessitent des statistiques importantes. L'efficacité de piégeage n'étant actuellement que de 1%, le Cern a décidé la construction d'un décelateur supplémentaire, Elena (Extremely Low ENergy Antiproton ring), qui décelera les \bar{p} de 5,3 MeV jusqu'à 100 keV, et les rendra plus faciles à piéger. Dans les 2 expériences, les positons sont d'abord combinés avec des électrons pour former des positroniums Ps, et les \bar{H} sont formés en capturant un positon lors d'interactions ($P_s - \bar{p}$). Dans l'expérience Aegis², un faisceau horizontal de \bar{H} est formé et accéléré, et g sera mesuré grâce à un déflectomètre couplé à un détecteur de position qui mesure le déplacement vertical du faisceau. Dans l'expérience GBAR³, un positon supplémentaire est capturé, ce qui permettra de former l'ion \bar{H}^+ qui peut être piégé et refroidi jusqu'à quelques neV (20 μ K). Un laser arrache alors le positon en excès, ce qui détermine le temps 0, et l'antiatome neutre tombe (ou s'élève si on croit la gravité de signe opposé pour des antiparticules). Si la gravité est inchangée, la vitesse de chute sera de l'ordre de 1m/s et des détecteurs placés à 10 cm au-dessus et au-dessous permettront de mesurer le temps d'arrivée et de déterminer g . Les deux expériences espèrent une précision d'au moins 1 % avec un but ultime de 1%. Affaire à suivre⁴...

Le lien cosmologique.

Dans notre univers, nous n'observons pas d'antimatière autre que les très faibles quantités produites dans les interactions entre les rayons cosmiques et le milieu interstellaire, alors qu'au moment du BigBang, les particules et les antiparticules ont toujours été formées par paires. Elles auraient dû ensuite toutes s'annihiler, reconvertisant ainsi leur masse en énergie selon $E=mc^2$, ce qui n'est pas le cas. Les observations montrent qu'à ce moment, les protons avaient un léger excès de un milliardième. Cette question n'est pas encore complètement élucidée,

mais l'une des conditions nécessaires proposées par Sakharov en 1967 est la violation de CP, mais elle n'est pas suffisante. Affaire à suivre là aussi...

Conclusion

La saga de l'antimatière a commencé à partir d'une équation mathématique. Près d'un siècle plus tard, il y a encore bien des zones d'ombre et elle nous réserve sûrement encore des surprises !

Références

1. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/48323>
2. Motivation for antigravity in General Relativity: G. Chardin, Hyperfine Interactions 109, 83 (1997)
3. <http://public.web.cern.ch/public/fr/Research/OtherExp-fr.html>
4. <http://cdsweb.cern.ch/record/1386684/files/moriond.in2p3.fr/11/transparents/dupre.pdf>
5. d'autres aspects de l'antimatière : <http://www.cnism.in2p3.fr/Grand-Public>

Lexique

- a. Isotopes : Les noyaux des isotopes ne diffèrent que par le nombre de neutrons. Ayant le même nombre de protons, ils correspondent donc au même élément chimique : par exemple l'uranium 235 (92 p et 143 n) et l'uranium 238 (92 p et 146 n) sont des isotopes de l'uranium.
- b. Quark : il n'est jamais observé seul. Soit 3 quarks se regroupent pour former la matière, en particulier les neutrons et les protons. Soit un quark s'allie à un antiquark pour former un Méson toujours instable.
- c. Positron, ou positon : antiparticule de l'électron. Même masse, mais charge électrique opposée (positive)
- d. Unité d'énergie utilisée en physique des particules : l'électron-volt eV, énergie d'un électron accéléré par une différence de potentiel de 1V, et toutes les dérivées : keV, MeV GeV, TeV,... vers les grandes énergies, meV, μ eV, neV,... vers les basses énergies. Equivalence température-énergie : 300K (température ambiante) correspond à 25 meV.

Jeanne Villepreux-Power : une pionnière de la biologie marine

par Josquin Debaz

Après une première formation en biologie, Josquin Debaz s'est tourné vers l'histoire des sciences dans le cadre d'une thèse sur les stations françaises de biologie marine et leurs périodiques scientifiques à la fin du 19^e siècle. Parallèlement à ses recherches actuelles en sociologie des controverses dans le domaine de la santé-environnement, il poursuit ses travaux en histoire des sciences en abordant les thèmes des institutions scientifiques de la Troisième République, du lien entre le développement des colonies françaises et la naissance des politiques de protection de la nature, ainsi que de celui de la place des femmes dans la communauté scientifique au travers de parcours particuliers comme celui de Jeanne Villepreux-Power, figure pionnière de la biologie marine, et celui de Marie Goldsmith, évo-lutionniste et militante politique.

Vous trouverez plus de détails sur le site de son laboratoire :

http://gipi-ahera.com/index.php?option=com_content&view=article&id=666&Itemid=2



Résumé

Jeanne Villepreux-Power (1794-1871), corrézienne d'origine modeste installée à Messine en 1818, publie en 1842 un guide historique et touristique de la Sicile ; cet inventaire érudit constitue une importante contribution à l'étude de la faune, de la flore et des fossiles de l'île.

La qualité de ses travaux scientifiques et son approche expérimentale ouvrent à cette autodidacte les portes de la communauté scientifique européenne. Pionnière de la biologie marine, elle met également au point des dispositifs qui comptent parmi les premières formes modernes de l'aquarium.

La Sicile n'a pas à envier aux nations puissantes et savantes une disciple des Cuvier, Lamarck, Blainville et Poll. Madame Jeannette Power, quoique n'étant pas native de notre île, nous appartient par élection. Ref. [20], page 1.

Jeanne Villepreux, ou si l'on préfère son nom de plume, Jeannette Power, est une figure scientifique des plus captivantes de la première moitié du dix-neuvième siècle. Sa carrière est en effet représentative d'une grande partie de l'activité scientifique de cette période, effectuée en parallèle avec le système académique, s'illustrant au travers de nombreux personnages particuliers et d'une multitude de sociétés savantes. Avec un savoir construit sur une base auto-didacte, la pratique scientifique de Jeanne Villepreux-

Abstract

Jeanne Villepreux-Power (1794-1871) was born in the Centre of France, during the Revolution, in a poor family. She came to Paris where she worked as a seamstress, married a wealthy Englishman (Power) with whom she settled in Messina, Sicily in 1818. In 1842 she published a scholarly inventory of Sicily, as a touristic and historical guide, which provided an important contribution to the study of the island's fauna, flora and fossils. The quality of her work and her experimental approach opened up to this self-taught the doors of the European scientific community. A pioneer in marine biology, she also developed devices that are among the earliest forms of the modern aquarium.

Power s'est toujours exercée dans un cadre dilettante. Sans jamais en faire une activité professionnelle, elle a su maintenir un réseau de correspondance avec d'autres scientifiques, parfois de tout premier plan tels que Richard Owen, surintendant du département d'histoire naturelle du British Museum à partir de 1856. Elle a appartenu à de nombreuses académies (en particulier la Zoological Society, la Cuvierienne de Paris et l'Accademia Gioenia di Scienze Naturali di Catania). En outre, ses recherches s'étant étendues dans toute la Sicile, elle a su développer un contact privilégié tant avec les savants naturalistes de l'île qu'avec les savoirs populaires, ceux des pêcheurs notamment.

Après avoir connu une certaine notoriété pour ses travaux sur l'argonaute (animal marin), elle est ensuite

tombée dans l'anonymat, pour être redécouverte dans les années 1990 par Claude Arnal, originaire de la commune de Juillac comme elle, Réf [2] à [7]. Il a systématiquement dépouillé les archives et les fonds de bibliothèque, fait traduire quand il y avait lieu, publié dans des revues savantes locales pour promouvoir sa protégée, et a entre autres, obtenu de nommer un cratère de Vénus en 1997 ($22^{\circ}S/210^{\circ}E$) à son nom. Désormais, l'association Jeanne Villepreux-Power - *Femme de science et artiste* l'accompagne et poursuit sa passion. Présidée par la peintre Anne-Lan, elle promeut la figure de la savante au travers de nombreuses communications, conférences, animations culturelles et diverses expositions.

Installée à Messine dans les années 1820 et 1830, Jeanne Villepreux-Power explore et parcourt en tous sens la Sicile et en établit un inventaire riche et précis, tant que le plan historique que pour ce qui concerne les fossiles et l'histoire naturelle, mais aussi les lieux et les monuments remarquables. Profitant de la richesse de la faune messinoise, elle va être une des premières à explorer les côtes en biologiste, et développer, pour poursuivre observations et expérimentations, des aquariums de recherche d'une grande modernité.

Jeanne la sicilienne

Jeanne Villepreux est née le 4 vendémiaire de l'an III (25 septembre 1794) à Juillac en Corrèze. D'origine modeste, bientôt orpheline de mère, elle n'a que 18 ans et sait tout juste écrire lorsqu'en 1812, elle se rend, à pied, à Paris. Devenue brodeuse chez une modiste, elle participe en 1816 à la confection de la robe de mariage de Marie-Caroline des Deux-Siciles avec Charles-Ferdinand d'Artois, second fils du futur Charles X. L'événement est très populaire et la robe, et particulièrement le travail de Jeanne, font sensation. C'est à cette époque qu'elle rencontre un négociant d'origine irlandaise, James Power, né à la Dominique, mais installé à Messine. Elle le rejoint et l'épouse en 1818.

Intégrée tant dans la société mondaine du royaume des Deux-Siciles que dans sa société savante, elle a su conquérir le cœur des siciliens, du professeur au plus humble. Elle s'instruit, apprend l'anglais et l'italien, se passionne pour l'histoire naturelle, entre en relation avec les élites naturalistes et confectionne

un cabinet récolté au long de ses explorations. Elle publie en 1842 un imposant *Guido per la Sicilia*.

[...] J'ai parcouru à pied et dans tous les sens, province par province, plusieurs fois toute la Sicile, pour faire des collections d'histoire naturelle et d'antiquités. Ces recherches me serviront également pour écrire un ouvrage scientifique, historique et statistique sur la Sicile et ses mœurs de ce pays [19, p. 8].



Figure 1 : carte extraite du *Guido per la Sicilia*

Cet ouvrage est tout autant destiné à être un guide pour les voyageurs (fig. 1), retracant l'histoire de la région, indiquant et décrivant pour chaque ville et village les sites à visiter, qu'une référence pour les savants naturalistes, recensant les collections et cabinets privés des amateurs et professionnels de l'île mais également établissant de nombreux inventaires. On y trouve 267 espèces d'oiseaux, une flore de 627 plantes et 66 arbres ; elle dénombre plus de 600 mollusques, 132 poissons et 116 crustacés. Elle énumère également les quelques 610 fossiles et 142 minéraux récoltés sur l'Etna et qui composent pour la plupart son cabinet personnel, ainsi que 250 coquillages fossiles. Parmi les suppléments, une liste de 75 éruptions de l'Etna est fournie ainsi que les statistiques des surfaces bolées du volcan.

Le travail de Jeanne est alors tout particulièrement apprécié des Siciliens eux-mêmes :

Nous ne pouvons pas taire le mérite qui revient à ce livre de ce qu'il rend cette vraie et impartiale justice qui nous a été depuis longtemps ingrattement refusée

[...] en nous dérobant cette civilisation qui nous met au rang des nations européennes les plus cultivées.

La justice et la vérité, dirigent la plume de la grande Giovanna Power, laquelle, en honorant les Siciliens, a fait rougir de honte nos détracteurs. Elle mérite à juste titre notre gratitude et nos éloges en tant que personne ayant reçu de la nature une âme noble et généreuse, dépouvie de cet orgueil qui gonfle l'esprit de ces vampires étrangers qui, parce qu'ils appartiennent à une Angleterre ou une France, nations de premier ordre, croient avoir un droit de dégrader par le blasphème et le mensonge une île, parce qu'elle est plus petite que l'Angleterre ou moins peuplée que la France. Réf. [1] page 61.

Après plus de vingt années de résidence à Messine, le couple Power quitte l'île pour le continent. Il s'installe à Paris, James devenant représentant pour la France de la *Submarine Telegraph Company*. Malheureusement, le cabinet d'histoire naturelle patiemment constitué par Jeanne ainsi que ses manuscrits sont perdus dans le naufrage du *Bramley* en 1838, engloutissant sous les flots une vie de travail sur les fossiles et la faune et la flore de la Sicile, les moeurs de divers animaux (ceux de la marte commune en particulier), et tout particulièrement sur les animaux marins.

Pionnière de la biologie marine

Au dix-huitième siècle, le comte de Marsigli, Filippo Cavolini, Jean André Peysonnel ou encore Lazzaro Spallanzani consacrent une part de leurs recherches à explorer les côtes et étudier leurs habitants, mais il faut attendre les années 1820 pour voir le duo Jean-Victor Audouin et Henri-Milne Edwards fonder une vraie biologie marine de terrain sur les côtes de Normandie. Dans cette discipline naissante, qui sera développée en France par leurs élèves de Quatrefages, Charles Robin et Henri de Lacaze-Duthiers, s'inscrivent parfaitement les travaux de Jeanne Villepreux-Power.

Pour ces biologistes, il n'est plus question de se contenter de travailler sur les collections :

Au siècle passé, le naturaliste pouvait se confiner dans son cabinet, dans son laboratoire ou dans son musée et là, isolé des bruits du monde, il compulsait les auteurs, étudiait les objets rapportés de loin par les voyageurs, il les classait et les décrivait à loisir, sans se

soucier beaucoup de connaître leurs mœurs, les conditions de leur existence, les pays où ils se trouvent. Il n'est plus possible de s'abstraire ainsi, la vie de recherches est une vie active, dans laquelle il faut payer de sa personne et ceux qui travaillent se rendent bien compte de cette nécessité. Ce n'est que vers le commencement de ce siècle que le monde de la mer attira réellement l'attention et que les zoologistes reconnaissent les nécessités d'étudier les animaux vivants et non ceux que l'alcool a durcis et altérés. Réf. [17] pages 6-7.

C'est donc dans les tout premiers temps de cette nouvelle pratique scientifique que le travail de Jeanne prend sa place. Durant les années 1820-1830, elle étudie l'alimentation et la digestion de la *Bulla lignaria* et de *Asterias (Astropecten) aurantiacus*, le poulpe *Octopus vulgaris*, la *Pinna nobilis*, le triton, la reproduction des testacés univalves marins, les mœurs du crustacé *poweri*, et tout particulièrement l'argonaute. Elle réalise ses travaux sur les lieux même de vie de ces animaux, avant les explorations naturalistes siciliennes de Quatrefages, et bien avant que Messine ne devienne la Mecque des zoologistes. Réf. [15].

Pour l'étude des organismes marins vivants, les naturalistes utilisaient déjà des vases d'eau de mer; c'est toutefois Jeanne Villepreux-Power qui, à partir de 1832, systématisé l'usage d'aquariums dans lesquels elle s'efforce de maintenir les conditions de vie nécessaires aux argonautes. Elle les appelle cages et les présente à l'Académie de Catane qui les dénomme *Gabbioline alla Power*.

La savante en développe trois variantes :

- Une première forme, en verre, est destinée à l'étude en cabinet, elle la destine à la conservation et l'étude des argonautes vivants ;
- Un second modèle plus résistant car disposant d'une armature extérieure, est destiné à être tour à tour immergé et émergé, afin de laisser les animaux dans leur milieu tout en ayant la possibilité de les en extraire pour multiplier les observations ;
- Enfin, une dernière cage, en bois et de grande dimension, est munie d'ancres pour être fixée au fond tout en laissant émergée sa partie supérieure.

Elle décrit ainsi cette dernière forme des « cages à la Power » :

Ces cages avaient 4 mètres de longueur, 2 mètres de hauteur, 1 mètre 10 centimètres de large. Je laissais entre les barres un intervalle nécessaire pour que l'eau de mer pût y circuler librement, sans que le mollusque pût en sortir avec sa coquille. Pour consolider ces cages, il y avait à chaque angle un morceau de fer. Une porte s'ouvrait au-dessus de la cage ; deux petites ouvertures avaient été ménagées à droite et à gauche ; de là, je pouvais sans être vu observer mes animaux. A chaque angle aussi j'avais fixé une ancre afin de la maintenir solidement dans la mer. J'introduisais dans l'intérieur de cette cage de l'algue, des plantes marines, de petites parties de roches, de petits cailloux, des millipora, des vénus, des tritons et d'autres mollusques conchyliifères.

Après en avoir obtenu l'autorisation administrative, elle implante ces aquariums près du lazaret de Messine, et y maintient vivants des argonautes pour ses expériences, en leur fournissant un apport nutritif quotidien fait de «mollusques testacés, vénus, cyathères, loligo cassés, [...] pêchés exprès à l'aide d'un râteau». Bien que l'endroit fut choisi pour son calme, un important orage brise les cages et les argonautes prennent la fuite. Jeanne Villepreux-Power répare et maintient son dispositif pendant plusieurs mois, jusqu'à parvenir aux observations décisives pour son étude. Sans vouloir ici trancher aucune question de priorité dans l'invention des aquariums modernes, on peut sans conteste affirmer avec Gage que ces Gabbolini alla Power constituent un tournant de tout premier plan dans leur histoire, Réf. [13].

Une démarche expérimentale

Une discussion scientifique est alors en cours sur le principal objet d'étude de Jeanne Villepreux-Power, à savoir si l'argonaute sécrète sa coquille, ou s'il la parasite comme le fait le bernard-l'hermite. De Blainville, professeur au Muséum à Paris et partisan du parasitisme, appelait la communauté à la recherche de l'animal producteur de la coquille. Pour Villepreux-Power, c'est le manque d'observations et d'expériences qui est à la source de cette confusion; aussi, inspirée par les précédents de Spallanzani et de Bonnet, c'est à l'expérimentation qu'elle entend laisser la charge de trancher entre les deux thèses.

Elle entend donc multiplier observations et expériences. L'animal se trouvant à profusion dans la baie

de Messine, elle peut l'installer à loisir dans ses aquariums et y effectuer les unes comme les autres. En septembre 1833, pour déterminer les capacités de sécrétion de l'argonaute, elle brise les coquilles de vingt-sept d'entre eux. Elle peut alors observer les animaux colmater les brèches avec des morceaux de coquilles laissées à leur disposition et les sécrétions de leurs bras membraneux. Elle présente alors ces résultats à l'Académie de Catane en 1834. Ce n'est qu'après avoir répété sur demande l'opération, et obtenu le même résultat, qu'elle convainc et obtient en particulier le soutien du professeur Carmelo Maravigna.

En 1835, elle fait transmettre à Sanders Rang son manuscrit pour qu'il le présente à l'Académie des sciences. C'est toutefois directement une note produite par Rang, qui reproduit et reprend plus ou moins à son compte les expériences de Jeanne Villepreux-Power, qui se voit attaquée devant l'Académie en 1837 par de Blainville. En effet, pour celui-ci, qui construisait alors une théorie de l'unité de la création basée sur des séries morphologiques homogènes, Réf. [14], l'animal et la coquille étaient si dissemblables et totalement déconnectés qu'ils ne pouvaient qu'appartenir à deux séries différentes. C'est pourquoi de Blainville maintient sa position :

Depuis que l'un de nous a publié les raisons sur lesquelles on peut appuyer l'opinion que les poules trouvées dans les coquilles d'argonaute y sont parasites comme les pagures le sont dans la coquille qu'ils habitent, raison auxquelles, il faut le dire franchement, on n'a encore opposé que des objections de peu d'importance, et faciles à réfuter, plusieurs personnes s'étant trouvées dans des circonstances favorables, ont cherché à éclairer la question. Réf. [8] page 602.

A l'occasion d'un passage à Paris, elle rencontre son contradicteur et peut lui fournir le mémoire que Rang devait présenter. Elle n'acquitte cependant pas l'assentiment de Blainville à ses vues, et il lui conseille de réitérer ses expériences.

Un allié inattendu va cependant venir à son secours. C'est en effet Richard Owen qui, en 1839, présente devant la Zoological Society les observations de Jeanne Villepreux-Power et, en répondant point sur point aux oppositions de Blainville, clôt la dispute. La naturaliste lui a fourni pour cela une collection d'*Argonauta argo* particulièrement bien conservée,

dans un liquide de son invention, et très bien conçue pour affirmer la justesse de ses positions.

La collection repose sur plusieurs séries qui permettent de déplacer jusqu'à Londres la méthodologie expérimentale employée.

Une première série déploie les différentes étapes de la croissance de l'argonaute. Elle établit ainsi aux yeux de ceux qui l'observent plusieurs points de la démonstration :

- l'animal occupe toujours la même position dans la coquille quel que soit son développement ;
- les individus les plus jeunes n'ayant pas encore pondu occupent l'intégralité de la coquille, et la forme de leur corps correspond parfaitement à celle-ci ;
- avec l'âge, l'ovarium se développe et crée un espace entre le corps et la coquille, dans lequel l'animal va conserver ses œufs pour les protéger.

De plus, le nombre de spécimens exposés permet à Owen de dresser une statistique du poids des corps et de la taille des coquilles, et de montrer leur distribution proportionnelle. Ainsi à l'opposé des habitudes des parasites, l'argonaute occupe donc toujours une coquille identique, de même espèce et de taille en rapport exact avec ses proportions. En outre, la fulgurante croissance mise en évidence par la collection rend difficile à expliquer l'art qu'aurait l'animal de trouver un parasite changeant chaque jour de coquille, et qui, de plus, serait toujours parvenu à échapper à la vigilance des naturalistes et collectionneurs.

Ensuite, la collection de Jeanne Villepreux-Power est d'une conservation telle qu'elle permet de confondre ceux qui n'ont jamais observé l'argonaute que sous la forme de coquilles sèches et rigides. À l'état naturel elles apparaissent souples, ce qui est indispensable pour la respiration et le déplacement de l'animal. Leur transparence permet d'expliquer aussi l'importante pigmentation de l'argonaute, et invalide ainsi un des arguments de Blainville.

Enfin, une autre série comprend six coquilles brisées par Villepreux-Power du vivant de l'argonaute. L'expérience consistait alors à isoler la coquille à différents intervalles après la fracture, entre dix

minutes et deux mois. La savante a ainsi pu envoyer à Londres la succession des étapes montrant l'argonaute réparant sa coquille :

- une fine membrane transparente est déposée à l'emplacement de la brisure ;
- un dépôt calcaire est progressivement appliquée sur cette membrane, en continuation d'une partie intacte de la coquille ;
- la réparation et la suture sont progressivement affinées et deviennent de moins en moins perceptibles.

Richard Owen peut ainsi s'appuyer sur une collection parfaitement conservée et particulièrement bien composée, pour non seulement affirmer ou infirmer les positions de Jeanne Villepreux-Power, mais également en convaincre ses pairs et invalider directement les arguments de Blainville.

Pl. III.



Figure 2 : dessin du poulpe de l'argonaute pris par madame Power en 1839.

© Bibliothèque du Muséum d'histoire naturelle

Conclusion

Autodidacte passionnée, Jeanne Villepreux-Power apporte au monde naturaliste une sensibilité qui la rapproche des espèces dont elle étudie tant la morphologie que les mœurs. Spécialiste de la Sicile, de son histoire comme de sa faune et de sa flore, tout autant que des fossiles qu'on y récolte, elle publie en un guide une somme qui fait date. Pionnière de la biologie marine, elle se plonge avec passion dans un monde encore bien méconnu par la communauté

scientifique. Elle va apporter les pratiques du cabinet d'histoire naturelle sur le terrain, pour y mener ses observations sur la faune marine, et déplacer le terrain vers le cabinet. Pour cela elle construit des cages spécifiques dans lesquelles elle recrée un milieu viable pour les espèces qu'elle étudie. Nommées Glaboline à la Power, ces dispositifs comptent parmi les premières formes modernes de l'aquarium. En outre, sa méthodologie ne se contentant pas de l'observation naturaliste, elle pratique systématiquement l'expérimentation, à une époque où cela relève encore de l'exception en biologie. Elle parvient même, en mettant au point une collection de spécimens adaptée, à transmettre les résultats de ses expériences jusqu'à la Zoological Society de Londres et trancher ainsi la querelle du parasitisme de l'argonaute. Son cabinet ayant malheureusement sombré dans un naufrage en 1838, il ne nous reste qu'une aquarelle de Jeanne Villepreux-Power pour témoigner d'un autre de ses talents, celui d'une artiste habile (voir Fig. 2).

Bibliographie

1. Francesco Aldaressi, «Intorno all Guida per la Sicilia - opera di Giovanna Power nata Villepreux - Napolie presso Cirelli 1842», *Giornale del Gabinetto letterario dell'Accademia Gioenia di Catania*, 1844, 9, 58-62.
2. Claude Arnal, «La Dame des Argonautes», *Bulletin de la Société des lettres, sciences et arts de la Corrèze*, 1994, 179-189.
3. Claude Arnal, «La bataille de l'Argonaute», *Ibidem*, 1995, 30-46.
4. Claude Arnal, «Jeannette Power-Villepreux, une naturaliste corrézienne en Sicile», *Ibidem*, 1996, 111-117.
5. Claude Arnal, «Une Corrézienne sur la planète Vénus», *Ibidem*, 1997, 86-94.
6. Claude Arnal, «Un beau cerveau corrézien», *Ibidem*, 2002, 45-51.
7. Claude Arnal, Jeanne Villepreux-Power 1794-1871. *Le destin exceptionnel d'une naturaliste oubliée*, Musée du Cloître de Tulle, 2007.
8. Henri de Blainville, «Rapport sur une note concernant le poulpe de l'argonaute, par M. Rang», *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1837, 602-611.
9. Josquin Debaz, «Cendrillon et la querelle de l'argonaute», *Pour la Science*, 396, octobre 2010, 82-86.
10. Josquin Debaz, *Les stations de biologie marine et leurs périodiques scientifiques (1872-1914)*, thèse de doctorat, Paris, EHESS, 2005.
11. Claude Duneton, *La Dame de l'Argonaute*, Paris, Denoël, 2009.
12. Eliana Ferrara, *James e Jeannette Power a Messina nella prima metà dell'800*, tesi di laurea, dir. Michela D'Angelo, Università di Messina, Facoltà di Scienze Politiche, 1999-2000.
13. Matilda Joslyn Gage, «Woman as an Inventor», *The North American review*, 1883, 136, 318, 478-489.
14. Gabriel Gohau, «L'unité de la création chez Blainville», *Revue d'histoire des sciences*, 1979, 32, 43-58.
15. Christiane Groeben, «Tourists in Science : 19th Century Research Trips to the Mediterranean», *Proceedings of the California Academy of Sciences*, 2008, 59, suppl. 1, 9, 139-154.
16. Nadine Lefebvre, *Femmes océanes. Les grandes pionnières maritimes*, Paris, Glénat, 1995.
17. A. Milne-Edwards, «discours», *Compte rendu des séances du Congrès International de Zoologie Paris 1889*, dir. Raphaël Blanchard, Paris, Société Zoologique de France, 1890.
18. Jeannette Power, *Guida per la Sicilia*, reimpr. sous la direction de Michela D'Angelo, Messine : Instituto di studi storici Gaetano Salvemini, 2008 (1842).
19. Jeannette Power, *Observations sur l'origine des corps météoriques, aérolithes, bolides*, Paris, Impr. A. Chaix, 1867.
20. Alessio Scigliani, «Madama Jeannette Power», *Passatempo per le Dame*, 1837, V, I, 1-4.

En marge du dossier : Jeanne Villepreux-Power : la reconnaissance en Marche... et en Limousin

par Fabrice Bonardi

Jeanne Villepreux-Power, l'injustice enfin réparée !

Après le bel article consacré par Josquin Debaz à Jeanne Villepreux-Power, Rayonnement du CNRS a souhaité en savoir plus sur l'association « Jeanne Villepreux-Power - Femme de Science et Artiste » qui s'est formée pour contribuer à la mise en lumière de cette grande dame injustement ignorée.

C'est ainsi que la rédaction a pu contacter Anne-Lan, artiste-peintre connue pour ses œuvres sur soie, et fer de lance de l'action pour la reconnaissance de la pionnière de la biologie sous-marine. Anne-Lan entend ainsi poursuivre le travail de Claude Arnal, qui a tiré de l'oubli ce génie féminin.

Aux origines de l'association

Suite aux patientes recherches de Claude Arnal, conférences, publications et expositions se sont succédées depuis quelques années, grâce notamment à la Société des lettres, sciences et arts de la Corrèze, à l'Aquarium du Limousin, à Récréascience, au musée du cloître de Tulle, au musée Labenche de Brive, à Juillac village natal de Jeanne Villepreux-Power...

En 2008, Anne-Lan fonde l'association culturelle « Jeanne Villepreux-Power - Femme de Science et Artiste », qu'elle préside aujourd'hui et qui œuvre grâce au concours du Docteur Vast et de présidents d'honneurs tels que le Professeur D'Hondt, attaché au MNHN, ancien président de la Société française de zoologie, Claudine Hermann, professeure honoraire à l'Ecole polytechnique, présidente d'honneur de l'association « Femmes & Sciences », Daniel Reys, océanographe, Sylvie Vaudair, astrophysicienne, membre de l'Institut, et bien entendu, Claude Arnal.

Dépuis, l'association - qui a permis l'édition de la biographie romancée de Jeanne Villepreux-Power « la Dame de l'Argonaute » (par Claude Duneton, éd Denoël), multiplie les expositions, les colloques et les conférences, entretenant ainsi de rendre sa

dimension internationale à cette figure de proue de la science. Un projet de rapprochement est à ce propos en cours pour créer des liens entre scientifiques français et siciliens. Le soutien de Claudine Hermann a par ailleurs permis l'inscription par la Commission européenne de Jeanne Villepreux-Power parmi les quarante femmes du passé les plus importantes en Europe pour la science. Depuis, la reconnaissance du monde scientifique international est en marche, sous la houlette d'Anne-Lan et d'historiens des sciences tels que Josquin Debaz (cf article page 70). Un récent congrès à Messine, une présentation à la BnF et une conférence au Muséum national d'histoire naturelle viennent d'en attester.

Parmi les récents motifs de satisfaction de l'association, on notera la création par Sophie Remy (Récréasciences) et Sylvie Delage (chargée de mission pour l'égalité des chances) d'un prix Jeanne Villepreux-Power, destiné à trois jeunes étudiantes en sciences du Limousin. Et au rang des projets ambitieux dont l'association ne manque pas, on remarquera, outre l'ouverture d'un site internet, l'organisation d'une grande exposition parisienne célébrant l'arrivée dans la capitale de notre naturaliste corrézienne, voici 200 ans, « à pied et dernière son troupeau de vaches »...





Anne-Lan

Anne-Lan, la présidente de l'association « Jeanne Villepreux-Power - Femme de Science et Artiste » est une artiste-peintre et sculpteur de talent. Et si son dévouement à la Dame de l'Argonaute est aussi fructueux, c'est parce qu'Anne-Lan pratique avec bonheur le don de soie...

Anne-Lan est née en Corrèze de parents médecins de campagne : père asiatique, mère française...

A travers l'art difficile, original et raffiné de la peinture sur soie, elle réussit à faire le lien entre ses deux cultures : maîtrise parfaite d'une technique orientale alliée à une inspiration qui s'alimente aux mythologies de l'occident. Son nom à lui seul exprime cette dualité : Anne pour l'Occident associé à Lan qui signifie « Reur d'Orchidée ».

Depuis 1978, de nombreuses expositions personnelles tant à Paris qu'en province ou à l'étranger -par exemple au musée de l'Histoire de la ville de Shanghai- lui ont permis d'étendre sa renommée et d'obtenir de nombreuses récompenses parmi lesquelles les médailles d'or du Festival international d'Osaka, du Salon international de peinture et calligraphie de Shanghai et d'Arts Science et Lettres, la médaille d'Argent du Salon international de Kyoto, la médaille de Vermeil de la Ville de Paris, la grande médaille de Vermeil d'arts, sciences et lettres.

Pour en savoir plus : www.anne-lan.com

Rubrique trajectoire : Toshiko Yuasa

par Gisèle Vergnes

Dans cette rubrique, des amis, des anciens ou des membres du CNRS retracent quelques éléments de la vie de scientifiques au parcours étonnant, au destin hors normes, ou tout simplement à la personnalité fascinante.

Gisèle Vergnes évoque pour le numéro 58 du bulletin la figure de Toshiko Yuasa.

Gisèle Vergnes entre au Laboratoire de chimie nucléaire du Professeur Joliot, fin 1955, en qualité de bibliothécaire. Elle crée la bibliothèque de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay et établit de nombreuses relations avec le CEA, Polytechnique, les universités...

Dans le cadre du V^e plan, elle représente l'IN2P3 - CNRS et, dès 1972, assure la collaboration de toutes les bibliothèques de ses laboratoires dans le cadre du réseau INIS (International Nuclear Information System) de l'Agence internationale de l'énergie atomique.

Elle a été une amie fidèle de Toshiko Yuasa jusqu'à la mort de celle-ci en 1980.



Une carrière atypique : Toshiko Yuasa (1909-1980)



Toshiko Yuasa vint au monde en 1909 dans une famille très ancienne et apparentée aux empereurs du Japon. Elle reçut pour cadeau de naissance un poignard joliment orné et destiné à être utilisé en cas de « seppuku » (suicide rituel des samouraïs). Son père était architecte de l'empereur. Elevée dans les traditions, mais curieuse et très assidue au travail, elle lut de nombreux ouvrages sur les sciences et voit une très grande admiration à Marie Curie qu'elle se promit d'imiter.

Mais, première difficulté, les filles ne pouvaient pas encore entrer à l'université. Donc, après avoir suivi les cours de l'Ecole normale supérieure, elle tenta anonymement de passer le concours d'entrée à l'université de Tokyo où elle fut effectivement reçue première. Malgré le scandale, les autorités de l'université l'autorisèrent à suivre le cours de physique où elle se maintint en tête jusqu'au diplôme. Elle fut ainsi la première à entrer à l'Université et ouvrit la voie aux femmes.

Elle refusa de se marier et annonça à sa famille qu'elle souhaitait se rendre en France pour devenir

l'élève du Professeur Frédéric Joliot au Collège de France. Sa ténacité proverbiale l'aida à convaincre sa famille et ses professeurs et c'est ainsi qu'elle débarqua en 1939 à Paris, et entra au Laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France.

Malgré les circonstances difficiles dues à la guerre et à l'occupation, elle y poursuivit ses travaux en qualité de boursière du gouvernement français. Constatant les privations de ses collègues, elle mit l'habitude d'apporter les sacs de riz (auxquels elle avait droit par son Ambassade) et d'en distribuer le contenu à tous les membres du laboratoire. Un autre de ses hauts-faits fut d'arracher une étudiante juive à la Gestapo et de lui sauver la vie.

En 1943, elle soutint sa thèse d'état sur la désintégration β, préparée sous la direction de Frédéric Joliot pour qui elle garda toujours une grande admiration.

La situation militaire évoluant à l'avantage des alliés, l'ambassade du Japon lui intima l'ordre, en 1944, de partir en Allemagne pour travailler dans le laboratoire de W.Gerlach ; après avoir tout essayé pour s'y soustraire, elle dut obtempérer et elle partit à regret.

A Berlin, elle travailla quelques mois ; elle assista à la chute de la ville et reçut de son Ambassadeur la

consigne de rejoindre le château de Sans-Souci à Potsdam où devait se regrouper le personnel diplomatique. Il faut imaginer cette jeune fille fuyant à vélo, avec son détecteur – dont elle ne voulait pas se séparer – sur le dos, traversant la ville totalement détruite avec des animaux du zoo courant affolés dans les ruines... Elle arriva néanmoins à Sans-Souci où l'Ambassadeur la prévint qu'elle devait se faire passer pour la cuisinière de l'Ambassade. Les Alliés, en effet, essayaient de capturer les scientifiques. Très inquiète, car elle n'avait aucune notion de cuisine, elle alla trouver le chef pour savoir combien de grains de riz il fallait par personne !

Le personnel diplomatique fut enfermé dans des wagons plombés (trois semaines de voyage) et c'est un miracle si Toshiko Yuasa réussit à atteindre le Japon et sa famille, après un dangereux épisode en Corée, car elle avait commis l'imprudence de descendre du train pour chercher son frère.

Elle assista, la mort dans l'âme, avec ses collègues masculins, à la destruction du cyclotron japonais jeté à la mer. Devenue professeur à l'Ecole normale supérieure de Tokyo et chargée de cours à l'université de Kyoto (la première femme au Japon), elle garda la volonté de retourner travailler au Collège de France.

« Une véritable ambassadrice de la science »

Elle réussit à prendre le premier bateau japonais en partance et débarqua en 1949 sur le sol français. Nommée Chargée de recherches au CNRS, puis maître de recherche en 1957, elle poursuivit ses expériences à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay.

« Jusqu'en 1967, ses travaux portèrent essentiellement sur l'émission β par différents noyaux radioactifs. (L'émission β a longtemps intrigué les physiciens - à juste raison - puisque c'est le premier exemple connu d'interaction faible et l'on sait le rôle essentiel que joue cette interaction).

Expérimentatrice acharnée, Toshiko Yuasa adapta à ses recherches certains appareils comme la chambre de Wilson ou en construisit de nouveaux, en particulier différents spectromètres magnétiques. Elle

obtint une série de résultats qui ont beaucoup apporté à nos connaissances : forme des spectres β , spectre des noyaux de recul et différents phénomènes associés,

En 1957, elle s'orienta vers l'étude des réactions nucléaires dans le domaine des moyennes énergies en utilisant les faisceaux du synchrocyclotron d'Orsay. Elle mit au point une chambre à bulles grâce à laquelle elle obtint des résultats intéressants sur les réactions $(p, 2p)$ et (p, px) . Elle développa ensuite des études systématiques sur la physique à petit nombre de nucléons en utilisant les réactions de diffusion et de cassure sur des noyaux légers. Là encore, elle développa de nouveaux moyens expérimentaux – en particulier pour la détection des neutrons – et elle établit une collaboration active avec différents théoriciens. Les résultats qu'elle obtint sont parmi les plus complets dans ce domaine et font référence pour la connaissance des interactions entre quelques nucléons».

Toshiko Yuasa a joué un grand rôle pour la formation de nombreux chercheurs français, japonais et d'autres nationalités, apportant aux jeunes toute l'aide qui lui était possible et parfois au-delà. Elle n'a cessé d'œuvrer au cours de sa carrière à une collaboration scientifique importante entre la France et le Japon dans le domaine de la physique nucléaire et de bien d'autres.

Connue de tous les Japonais de toute discipline, ils venaient la saluer dès leur arrivée à Paris. Elle était, en quelque sorte, l'Ambassadrice du Japon pour la science et nul n'a fait plus qu'elle pour la collaboration entre France et Japon.

Amoureuse de la France

Elle emmenait ses amis dans les rares restaurants japonais de l'époque pour apprécier les spécialités culinaires ou au Centre culturel de son ambassade pour y voir les films japonais et à l'Odéon pour le premier spectacle du Kabuki en France...

Très cultivée, et intéressée par les domaines de la connaissance et des arts, elle comptait de nombreux amis parmi les artistes, peintres, sculpteurs, poètes et écrivains... Elle a rédigé plusieurs ouvrages sur la France, Paris et la vie parisienne, mais ils ne sont malheureusement pas traduits. Elle aimait tant



Le personnel du Laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France en 1956. Frédéric Joliot (premier rang, au centre). Toshiko Yuasa (quatrième à droite, deuxième rang).

la France, tout en continuant à révéler sa patrie, qu'avant son décès, elle demanda de partager ses cendres : une moitié au Père Lachaise et l'autre au Japon dans la tombe familiale. Ce voeu a été respecté. Grâce aux efforts de son neveu et de ses amis, les archives le concernant sont conservées au Gender Study Center de l'université Ochanomizu de Tokyo.

En souvenir de la première femme physicienne du Japon, l'IN2P3-CNRS a créé, en 2006, le Laboratoire international associé Toshiko Yuasa en vue d'améliorer la collaboration de la physique des accélérateurs et de la physique des particules.

L'Institut de physique nucléaire d'Orsay a eu le privilège d'accueillir cette personnalité exceptionnelle qui a donné, par son œuvre et sa vie, bien des sujets de méditation. Douée d'une forte personnalité, d'une insatiable curiosité, elle s'intéressait à tout avec une très grande ouverture d'esprit. Très généreuse, elle laissa à tous un souvenir très fort et, malgré le temps passé, elle reste toujours présente dans le cœur de ses amis.

Citons l'une des dernières phrases qu'elle prononça avant sa mort : « il ne faut jamais travailler pour soi-même, mais pour l'avancement de la science ».

(Lu, vu entendu et...) retenu pour vous

Dans cette rubrique, les membres de la rédaction vous feront part de leurs « coups de cœur » en matière de livres, de films, de musique, d'artisanat, de vie quotidienne...

Filtrez les regards, pas la lumière !



Pour inaugurer la rubrique, voici une innovation sympathique capable d'améliorer la qualité de vie de chacun : le store d'intérieur UP Stores, qui se présente comme le « store du bon sens »... Cela paraît en effet si simple que l'on se demande pourquoi on n'y a pas pensé plus tôt...

Les chercheurs font rêver les enfants !

L'association Rayonnement du CNRS est, conformément à son titre et à ses statuts, particulièrement intéressée à tout ce qui contribue à une meilleure perception du CNRS, de ses chercheurs et de la recherche en général, par la société. De nombreuses actions menées par des adhérents au sein des Régions en témoignent, ainsi que les contacts entretenus avec des associations telles que « Chercheurs toujours ». La rédaction du Bulletin de l'association ne pouvait ainsi qu'être sensible à l'action menée par le CNRS en faveur des enfants hospitalisés.

C'est dans le cadre de l'opération *Passion-Recherche*, qui fédère les actions de culture scientifique menées par le CNRS en direction des jeunes publics, qu'a été créée l'opération « Les chercheurs font rêver les enfants », en partenariat avec la Fondation des hôpitaux de Paris/Hôpitaux de France et l'hôpital Robert Debré de Paris.

Cette manifestation, destinée aussi à éveiller la curiosité des jeunes à l'égard de la science et à leur

Rez-de-chaussée ? C'est vous, qui voyez !

Elégant, de style store-bateau, le principe d'UP Stores est de « remonter » le long de la fenêtre et de se positionner à votre idée, vous offrant ainsi une meilleure luminosité intérieure et une protection optimale contre les regards extérieurs indiscrets. Deux qualités jusqu'alors contradictoires, enfin réunies dans un système simple et efficace (le montage se fait sur les fenêtres, sans clou ni vis). La position et la hauteur du drapé sont réglables à volonté en bas, au milieu ou en haut de la fenêtre.

Conçu dans un esprit de mise en valeur des intérieurs, le store s'adapte à tous les changements de décoration grâce à 4 clips de fixation. Bref, une innovation qui nous a tapé dans l'œil !

Plus d'informations :

www.upstores.fr – Contact : info@upstores.fr

montrer qu'il oscille entre rêve et manips, entend surtout réconforter les jeunes hospitalisés, souvent exclus des manifestations scientifiques.

Ainsi, le CNRS propose-t-il une fois par mois l'intervention d'un chercheur sur le réseau de télévision intime de l'hôpital Robert Debré. Grâce à l'émission *boomerang*, tous les jeunes hospitalisés de Robert Debré peuvent découvrir un thème scientifique pratique, au cours de laquelle enfants et adolescents, animateurs et interviewers d'un jour, mènent les débats. Point d'orgue de cette collaboration : emmener des enfants découvrir sur le terrain les activités des chercheurs. Pour en savoir plus sur l'opération « Les chercheurs font rêver les enfants » et sur les animations scientifiques proposées par le CNRS, rendez-vous sur le site <http://iyates2.cnrs.fr/jeunes/2.htm>.

Le bulletin de l'association Rayonnement du CNRS, à l'écoute de toutes les suggestions pouvant concourir à cet objectif de partage et d'échange, relayera volontiers toutes les propositions d'aide et de soutien à de telles manifestations, exprimées par ses adhérents.

Hommage à... Olympe de Gouges

La rubrique hommage est ouverte aux membres de l'association qui souhaitent mettre ou remettre en lumière l'action d'un personnage historique ou contemporain. Héros éternels ou fugitifs acteurs du destin, ceux-là ont défriché pour les générations futures les chemins d'une société plus juste.

Pour inaugurer la rubrique, *Rayonnement du CNRS* a ouvert ses colonnes à Bernard Dupuis, bien connu des amateurs d'ouvrages du CNRS et qui, à l'occasion du numéro *Femmes en sciences*, souhaitait faire partager son admiration pour Olympe de Gouges.



Née à Montauban en 1748, Marie Gouze, dite Olympe de Gouges, est issue d'une famille modeste. Poursuivant jusque Paris son rêve de célébrité, elle s'y fabrique un nouveau nom, Olympe de Gouges, en même temps qu'elle y forge sa plume. Auteure prolifique, notamment de pamphlets, elle devient avec la Révolution l'une des premières féministes. Elle fait de la condition féminine et de l'égalité des sexes, jusqu'alors principalement évoquées sur le plan philosophique (Rousseau, Diderot, d'Alembert), un combat politique porté au cœur même de la Révolution, reprenant ainsi les écrits de Condorcet : « (...) tous n'ont-ils pas violé le principe de l'égalité des

droits, en privant tranquillement la moitié du genre humain de celui de concourir à la formation des lois, en excluant les femmes du droit de cité ? » (*Essai sur l'admission des femmes au droit de cité*, 1790).

Mais Condorcet est alors bien seul à prôner le droit de vote des femmes. C'est alors qu'Olympe de Gouges, plaçant les révolutionnaires face à leurs contradictions, publie en septembre 1791 sa Déclaration des droits de la femme et de la citoyenne.

Ses prises de position lors du procès de Louis XVI, qu'elle ne juge pas coupable en tant qu'homme mais comme souverain, ses pamphlets (contre Robespierre par exemple) lui valent alors de solides inimités. Mais Olympe de Gouges est viscéralement attachée à la justice et à sa liberté d'expression, qui lui vaudra de magnifiques formules, dont la plus célèbre reste « La femme a le droit de monter à l'échafaud ; elle doit avoir le droit de monter à la tribune ».

Olympe de Gouges est arrêtée le 20 juillet 1793, condamnée à mort par le tribunal révolutionnaire et guillotinée le 2 novembre 1793.

Déclaration des droits de la femme et de la citoyenne d'Olympe de Gouges

Article I - La Femme naît libre et demeure égale à l'homme en droits. Les distinctions sociales ne peuvent être fondées que sur l'utilité commune.

Article II - Le but de toute association politique est la conservation des droits naturels et imprescriptible de la Femme et de l'Homme : ces droits sont la liberté, la propriété, la sûreté, et surtout la résistance à l'oppression.

Article III - Le principe de toute souveraineté réside essentiellement dans la Nation, qui n'est que la réunion de la Femme et de l'Homme : nul corps, nul individu, ne peut exercer d'autorité qui n'en émane expressément.

Article IV - La liberté et la justice consistent à rendre tout ce qui appartient à autrui ; ainsi l'exercice des

droits naturels de la femme n'a de bornes que la tyrannie perpétuelle que l'homme lui oppose ; ces bornes doivent être réformées par les lois de la nature et de la raison.

Article V - Les lois de la nature et de la raison défendent toutes actions nuisibles à la société; tout ce qui n'est pas défendu pas ces lois, sages et divines, ne peut être empêché, et nul ne peut être contraint à faire ce qu'elles n'ordonnent pas.

Article VI - Voir l'encadré, d'actualité... électorale !
Article VII - Nulle femme n'est exceptée ; elle est accusée, arrêtée, et détenue dans les cas déterminés par la Loi. Les femmes obéissent comme les hommes à cette Loi rigoureuse.

Article VIII - La Loi ne doit établir que des peines strictement et évidemment nécessaires; et nul ne peut être puni qu'en vertu d'une Loi établie et promulguée antérieurement au délit et légalement appliquée aux femmes.

Article IX - Toute femme étant déclarée coupable; toute rigueur est exercée par la Loi.

Article X - Nul ne doit être inquiété pour ses opinions mêmes fondamentales, la femme a le droit de monter sur l'échafaud; elle doit avoir également celui de monter à la Tribune; pourvu que ses manifestations ne troublent pas l'ordre public établi par la loi.

Article XI - La libre communication des pensées et des opinions est un des droits les plus précieux de la femme (...)

Article XII - La garantie des droits de la femme et de la Citoyenne nécessite une utilité majeure; cette garantie doit être instituée pour l'avantage de tous, et non pour l'utilité particulière de celles à qui elle est confiée.

Article XIII - Pour l'entretien de la force publique, et pour les dépenses d'administration, les contributions de la femme et de l'homme sont égales ;

elle a part à toutes les corvées, à toutes les tâches pénibles ; elle doit donc avoir de même part à la distribution des places, des emplois, des charges, des dignités et de l'industrie.

Article XIV - Les Citoyennes et Citoyens ont le droit de constater par eux-mêmes ou par leurs représentants, la nécessité de la contribution publique. Les Citoyennes ne peuvent y adhérer que par l'admission d'un partage égal, non seulement dans la fortune, mais encore dans l'administration publique, et de déterminer la quotité, l'assiette, le recouvrement et la durée de l'impôt.

Article XV - La masse des femmes, coalisée pour la contribution à celle des hommes, a le droit de demander compte, à tout agent public, de son administration.

Article XVI - Toute société, dans laquelle la garantie des droits n'est pas assurée, ni la séparation des pouvoirs déterminée, n'a point de constitution; la constitution est nulle, si la majorité des individus qui composent la Nation, n'a pas coopéré à sa rédaction.

Article XVII - Les propriétés sont à tous les sexes réunis ou séparés: elles ont pour chacun un droit lorsque la nécessité publique, également constatée, l'exige évidemment, et sous la condition d'une juste et préalable indemnité.

* Note pour les lecteurs qui ne sont pas familiers de l'édition : Bernard Dupuit, du Service de l'Imprimerie du Siège, n'est pas (en tout cas à notre connaissance) un spécialiste des planigrades. L'ouvrage en question est en fait un petit pavé, situé au début ou à la fin d'un ouvrage, qui contient les mentions légales (éditeur et directeur de la publication, imprimeur, dépôt légal...) et le nom des collaborateurs ayant participé à la fabrication de l'imprimé.

D'actualité... électorale !

Article VI

La Loi doit être l'expression de la volonté générale ; toutes les Citoyennes et Citoyens doivent concourir personnellement ou par leurs représentants, à sa formation ; elle doit être la même pour tous : toutes les Citoyennes et tous les Citoyens, étant égaux à ses yeux, doivent être également admissibles à toutes dignités, places et emplois publics, selon leurs capacités, et sans autres distinctions que celles de leurs vertus et de leurs talents.

Le kiosque

Autre nouvelle rubrique, le kiosque... présentera des ouvrages publiés par des membres de l'association ainsi que des informations sur les événements et expositions artistiques auxquelles ils participent. Elle pourra par la suite s'ouvrir aux actions d'associations dont ils sont les animateurs.

Afin d'inaugurer la rubrique, et pour rester proche du thème central de ce numéro 58, la rédaction vous propose d'en savoir plus sur le concours international de «La Nouvelle George Sand», un concours de nouvelles s'adressant à toutes les femmes écrivant en français, créé en 2004 par un membre de la rédaction. La création du concours s'est inscrite dans le cadre du bicentenaire de la naissance de l'écrivain, en hommage à son œuvre, et pour souligner son apport considérable en faveur de l'égalité des sexes. Le concours entendait également rappeler quelles valeurs fondatrices véhiculent l'usage de la langue française : liberté, égalité, fraternité. Il entendait ainsi favoriser la langue française partout où elle symbolise les droits de l'Homme, et où elle peut représenter un espoir d'émancipation culturelle et sociale pour les femmes. Cela explique pourquoi il leur est réservé.

Devenu concours de la nouvelle George Sand de Déols en Berry pour souligner son attachement à la commune qui l'a spontanément soutenu, l'événement souhaite offrir un tremplin aux jeunes ou futures auteures, et mettre en lumière de nouveaux talents,



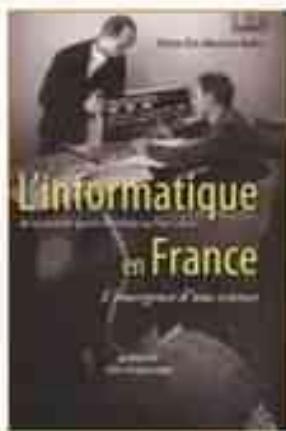
grâce notamment à l'édition des nouvelles primées (3 recueils à ce jour). Parmi les partenaires, l'entreprise PGA Electronic (avionique) remet un chèque de 2000 euros à la lauréate, tandis que l'Harmattan édite le recueil des nouvelles remarquées.

Il est à noter que la Mission pour la place des femmes au CNRS, alors dirigée par Geneviève Hatet-Najar, avait soutenu la création du concours.

Le thème de l'édition 2012 est < Désir(s) > (ouvert jusqu'au 30 juin 2012) En savoir plus : www.concours-georgesand.fr

Les ouvrages sont disponibles notamment chez l'Harmattan (<http://www.editions-harmattan.fr>).

Les livres signalés



La vie de l'Association

Présentation du Bulletin n° 57 «spécial Pologne»

À la suite du précédent Bulletin consacré à la Pologne, nous avons été invités le 8 février à le présenter au Centre scientifique à Paris de l'Académie polonaise des sciences (PAN). La seule contrainte fut la célèbre et dissuasive vague de froid, par contre le contact fut très chaleureux avec le directeur Jerzy Pielażek, son adjoint Bartek Szmoniewski, deux des co-rédacteurs polonais du Bulletin, Wojciech Szuszkielwicz et Jacek Bardowski, sans oublier Jerzy Jastrzebski (de passage en France la semaine précédente). Le programme comportait trois exposés avant la discussion générale.

Présentation par le Président de l'A3 Michel Petit

Fondée en 1990, l'A3 a pour objet le Rayonnement de la recherche scientifique et les échanges entre les anciens et les amis du CNRS en France et à l'étranger. Nous publions un bulletin trimestriel et entretenons un site Internet, pour nos adhérents, nous organisons un ensemble d'activités : visites, conférences, voyages, éveil à la science. L'accueil de collègues étrangers est également au centre de nos préoccupations, 6000 scientifiques étrangers sont accueillis en France chaque année, la plupart dans des labos CNRS. L'objectif de notre association est de les parrainer, les inviter à participer à nos activités et dans nos familles pour qu'ils nous rejoignent après leur retour chez eux. Pour maintenir des liens étroits avec ces chercheurs étrangers après leur retour dans leur pays, l'A3 souhaite la création de «clubs» d'amis, comme en Chine (2009), au Brésil (2010), en Pologne (2011). L'objectif est d'inviter nos anciens collègues à nous rejoindre et organiser des activités communes: échange de publications, visites, voyages, en collaboration avec la Derci du CNRS, ses 11 Bureaux à l'étranger et la Fondation nationale Alfred Kastler. Ces clubs ont vocation à faciliter la venue en France de chercheurs locaux, organiser des rencontres scientifiques sur place, favoriser les montages de coopérations (GDRI, UIA, PR).

Voyage en Pologne, le bulletin n° 57 et le projet de Club franco-polonais, par Paul Gille

L'intérêt de l'A3 envers la Pologne résulte d'une convergence exceptionnelle d'événements favorables centrés sur le beau voyage touristique de septembre 2011, tirant profit des coopérations sci-

tifiques actuelles ou passées, et de circonstances comme l'année Marie-Curie et même le jumelage Cracovie-Orléans ! La motivation des voyageurs et de nombreux liens personnels antérieurs ont facilité la mise en commun des spécialités : physique nucléaire et des particules, histoire de la Pologne, génomique, semi-conducteurs, souvenir de Piotr Słonimski, etc. Les institutionnels ont eu un rôle très positif, comme l'ambassade française, les musées Curie, le Centre scientifique PAN à Paris.

Pour les scientifiques polonais de toutes disciplines qui ont joué le jeu du dîner-rencontre, la coopération pour la rédaction du Bulletin A3 n°57, a été une étape forte en vue de la création d'un «club» franco-polonais. Ce Bulletin largement diffusé aux relais diplomatiques servira de vitrine de notre action. Certains articles seront republiés dans les Annales du centre scientifique PAN de Paris.

Réiproquement, l'effort de repérage effectué pour cette première rencontre constitue l'ancrage d'un réseau qu'il faudra entretenir en y intégrant les chercheurs actuellement en séjour en France. Il nous faut, à court terme identifier quelques événements (colloques, publications) donnant l'occasion de faire fonctionner ce club. Une démarche est en cours envers le prof. Michał Kleiber, Président de la PAN, pour obtenir son soutien à ce projet, sachant que les amis polonais concernés sont majoritairement des «actifs» plutôt que des anciens. Comme l'a souligné Jerzy Pielażek, le nom qui sera choisi finalement pour cette structure illustrera cette particularité.

Le domaine des semi-conducteurs, abordé par Wojciech Szuszkielwicz (Académie polonaise des sciences) constitue ainsi un exemple de la coopération franco-polonaise : l'orateur a choisi d'illustrer sa spécialité par des références historiques passionnantes (et un peu insolites !). Il a d'abord mentionné quelques événements pour rappeler la longue histoire des contacts franco-polonais pendant des siècles, illustrée par exemple par la Signature de Charlemagne avec son monogramme (31 août 790), une



Lettrine historiée de Charlemagne assis (vers 1050), le billet de 20 złotys à la gloire de Marie-Curie. Il a ensuite montré que, avant l'époque contemporaine du développement rapide de l'électronique du solide (illustrée par une photo du premier transistor sur une base de germanium ainsi que des circuits intégrés sur un « wafer » moderne de silicium), l'humanité a utilisé divers semi-conducteurs depuis l'antiquité. Des sulfures sont utilisés comme colorants, comme par exemple le dinabre (HgS) dans les fresques antiques ou bien la galène (PbS) pour les textiles ou les cheveux.

Finalement, il est revenu sur son article paru dans notre Bulletin 57, à propos des fils quantiques ($ZnTe$), étudiés en collaboration avec Jean-François Morhange (Institut des nanosciences de Paris). Il a mentionné aussi Bernard Hennion (Laboratoire Léon Brillouin) avec qui il a travaillé en diffusion de neutrons sur des multicoques magnétiques. Il a terminé par un hommage à l'ensemble de ses collègues parisiens, et en particulier à Michel Jouanne (1946-2006).

Pour en savoir plus sur le Centre scientifique à Paris de l'Académie polonaise des sciences :
<http://www.academie-polonaise.org/>
Contact A3 : Paul Gille, rayonnement@cnrs-orleans.fr

AQUITAINE

Les conférences grand public que le Rayonnement du CNRS organise sont très attendues et prisées par les habitants du sud bassin d'Arcachon, d'où le soutien logistique de la commune de Gujan Mestras.

Ainsi par exemple, la conférence sur les sources miraculeuses, résumée ci-dessous, a-t-elle fait salle comble, réunissant 160 personnes !

La conférence « Sources et fontaines guérisseuses et miraculeuses en Gironde » présentée par Didier Coquillas (Médiateur Histoire de l'association Terre & Océan) s'est tenue le 16 novembre 2011 au cinéma Gérard Philippe de Gujan Mestras. Il faut dire que le programme était alléchant :

On connaît les sources à dévotion de Bretagne ; on a également entendu parler des sources dites « miraculeuses » des Landes, mais connaissez-vous celles de Gironde ? Une vingtaine d'entre elles ont laissé des

traces dans notre histoire et certaines attirent toujours quelques pèlerins discrets mais bien présents, comme des gardiens de traditions ancestrales pluri-millénaires. Nous vous ferons l'état de ce patrimoine insolite et presque oublié. Ce sera l'occasion de faire un voyage dans le temps de pratiquement 6000 ans, de la source « néolithique » de Tauriac à l'imposante basilique de Notre-Dame de Lorette à Saint-Michel de Lapujade, en passant par la fontaine gallo-romaine de Bourg. Vous pensiez connaître le département de la Gironde, vous risqueriez d'être surpris !



Gros succès également pour la conférence du 15 février 2012, toujours au cinéma Gérard Philippe de Gujan Mestras et de nouveau avec Didier Coquillas :

« Sel de l'Atlantique, sel du Bassin d'Arcachon : une richesse oubliée ? »



Le sel est indispensable à la vie. Sans lui, nous ne pourrions pas même survivre sur notre planète. Ainsi, depuis les origines, le sel fait partie des quêtes permanentes des êtres vivants. Sa culture est envisagée dès le Néolithique (entre 3 000 et 2 000 ans av. J.-C.) et prouvée dès l'âge du Bronze (entre 2 000 et 750 av. J.-C.) sur la côte atlantique. Les traces anciennes de son exploitation ont été repérées tant



en Médoc que sur les rivages du Bassin d'Arcachon selon des techniques originales et indigènes. Ce n'est qu'au Moyen Âge que la technique des murs salants apparaît sur nos rivages sur des principes méditerranéens et va connaître ses plus grands développements. Et pourtant, quoique très proches, les salines arcachoniennes et médocaines n'ont pas la même histoire, la même évolution ni les mêmes techniques. Mais, passée la période faste du Moyen Âge, les conditions naturelles vont contraindre la culture du sel et provoquer son déclin dès le XVII^e siècle et sa disparition au XIX^e siècle malgré la création du domaine salicole de Certes au XVIII^e siècle. Cette richesse est-elle aujourd'hui définitivement abandonnée ?

Prochaine conférence mercredi 4 avril 2012 à 21h au cinéma Gérard Philippe de Gujan-Mestras : «Séismes et tsunamis : prévoir l'imprévisible...»
Par Alexis RIGO, chargé de recherche au CNRS

En 2004, une «nouvelle» catastrophe naturelle semble apparaître dans les médias et pour le grand public : le Tsunami ! Mais comme toutes les catastrophes qui ne sont pas provoquées par l'Homme, les Tsunamis, associés aux séismes, aux volcans et aux glissements de terrain en milieu marin, sont connus de certaines populations depuis des millénaires. C'est la mémoire des hommes qui flanche ! Sumatra en 2004 et le Japon en 2011, mais aussi le Chili en 1960, pour les cas les plus monstrueux, nous rappellent que la Terre n'est pas figée dans sa structure, que sa surface bouge, qu'elle montre une dynamique et qu'elle peut avoir des «pauts d'humeur» particulièrement dramatiques, dévastatrices et soudaines.

L'Homme paraît totalement démunie face à de tels phénomènes qui mettent en jeu des forces inouïes

et indomptables. Car malgré tous les efforts et les découvertes accomplis depuis un demi siècle sur ces phénomènes physiques terrestres, la prédiction n'est toujours pas à l'ordre du jour, voire, pour de nombreux sismologues, est impossible !

Mais si l'Homme ne peut pas maîtriser ces événements géologiques malgré sa technicité, il peut les étudier pour en comprendre les fonctionnements : comprendre les séismes et les tsunamis, c'est comprendre les processus physiques qui les déclenchent, c'est comprendre où et quand ils se produisent, et c'est donc tenter de ne plus se laisser surprendre, de se protéger !

Cela passe aussi de manière incontournable par l'éducation des populations et pas seulement celles qui sont directement exposées aux fureurs de la Terre.

Roland Canet et Philippe Plagand

CENTRE EST

Visite du laboratoire d'Analyse et de traitement informatique de la langue française (ATILF), Nancy - 13 octobre 2011

Une trentaine de personnes se sont retrouvées pour cette visite. Paul Imbs, linguiste et philologue, fut le fondateur du Centre de recherche pour un trésor de la langue française (TLF) en 1960. Ulteriorurement le TLF devient l'Inalif (Institut national de la langue française) puis en 2001 l'Atif, rattaché à l'Institut des sciences humaines et sociales du CNRS. Son directeur est Jean-Marie Pierrel, professeur à l'université de Lorraine.

Les axes scientifiques développés concernent principalement les thématiques suivantes :

- Linguistiques historiques française et romanes,
- Lexique et corpus,
- Acquisition et apprentissage des langues et le discours.

Nous avons apprécié les démonstrations proposées sur le dictionnaire informatisé du Trésor de la langue française, le dictionnaire du Moyen français et la base Frantext. Cette base de textes français

(littéraires, philosophiques et scientifiques) comporte plus de 4 000 références et reste la seule à proposer des recherches sur des écrits datant de 1180 à nos jours. Le fonds contemporain, postérieur à 1950, s'élève à plus de 800 textes.

L'objectif premier est d'offrir un répertoire de différents états de notre langue et de la création française à la communauté francophone et internationale. Dans ce but, plusieurs didacticiels ont été élaborés par des enseignants et des chercheurs pour faciliter la prise en main et l'utilisation du Français.

Il est à noter que l'Atiff héberge également un important centre documentaire qui concentre la bibliothèque ouverte aux enseignants-chercheurs. Une pièce fermée a particulièrement attisé notre curiosité, pour ne pas dire notre gourmandise. En effet un très précieux patrimoine, constitué d'imprimés anciens du XVI^e au XIX^e siècle, y est conservé à l'abri de la lumière et des variations de température.

L'Atiff participe à de nombreux projets coopératifs nationaux et internationaux et propose un ensemble de ressources pour l'étude et la connaissance de la langue française. Le laboratoire participe aussi activement à la diffusion de la culture scientifique et technique au sein de manifestations régionales et nationales (fête de la Science, Clubs et rencontres CNRS jeunes «Sciences et Citoyens», réseaux Hubert Curien, ...).

Nous remercions chaleureusement Jean Marie Pierrel et ses collaborateurs pour cette visite commentée où nous avons pu marier le papier et les nouvelles technologies de l'information.

Visite du musée de l'Histoire du fer de Jarville-la-Malgrange - 13 janvier 2012

La cérémonie rituelle des voeux a eu lieu, cette année, dans les locaux du musée de l'Histoire du fer, qui héberge le laboratoire ci-après et en présence d'environ cinquante personnes de notre Association.

En introduction à cette visite, notre collègue Marc Leroy, archéologue paléométallurgiste, chercheur au Laboratoire de métallurgies et cultures de l'Institut de recherche sur les archéomatériaux (iramat), UMR 5060 CNRS (universités de Nancy-Belfort,

Orléans et Bordeaux), a bien voulu nous présenter les travaux de son équipe dans le cadre d'un exposé, abondamment illustré et intitulé :

- «Recherches sur la sidérurgie ancienne : exemple de la forêt de Haye (Maron) et histoire des techniques».

La compréhension et la restitution des procédés métallurgiques anciens, leurs évolutions et leur place dans les sociétés anciennes sont les axes communs des différents programmes de recherche de l'Institut, développés principalement dans le domaine du fer.

Aux portes de Nancy, la forêt de Haye renferme des trésors du passé insoupçonnés !!!

Démontant les idées reçues et les affirmations péremptoires véhiculées par les milieux industriels à partir du XIX^e siècle, les recherches, conduites depuis une quinzaine d'années sur les vestiges archéologiques de la production sidérurgique ancienne, ont démontré sans équivoque l'utilisation très préférentielle du minerai oolithique aalanien (la minette) en sidérurgie directe dès la période romaine, durant tout le Moyen-Age et jusqu'au début de la période moderne.

Une récente campagne de fouilles, menée par les chercheurs lorrains, a permis de découvrir un atelier de production de fer, daté entre les XIII^e et XIV^e siècles, dans un état exceptionnel. À travers la fouille d'atelier de production, l'étude au laboratoire des vestiges de la production et la mise en place d'une approche expérimentale, l'équipe de recherche s'est attelée à restituer les conditions de ce minerai (pauvre en fer contrairement aux minerais « fer fort ») et à comprendre la manière dont les anciens forgerons en ont tiré le meilleur parti.

Le site de production récemment découvert date de la fin du Moyen Age. Il est constitué, entre autres, de deux bas-fourneaux, de zones de stockage et de concassage du minerai. Les informations ainsi collectées sont inédites et remarquables car très peu d'installations de ce type ont été fouillées à ce jour en Europe, probablement parce que, fréquemment situées en secteur forestier, elles sont difficilement décelables ou hors des zones touchées par les grands aménagements du territoire.

Cette période est très peu connue et ces vestiges représentent une opportunité unique pour comprendre cette époque charnière de l'évolution des techniques et notamment le passage progressif entre la production de fer en bas-fourneaux et la production de fonte en hauts-fourneaux qui se généralisera dans la région au XV^e siècle. De nombreux clichés photographiques ont encore enrichi cette conférence passionnante et un moule du bas-fourneau, le mieux conservé, a été réalisé par l'équipe, afin de sauvegarder l'information archéologique et de mieux enseigner ces techniques au public du musée.

Enfin, en complément de cet exposé scientifique et à notre demande, Marc Leroy a présenté des résultats d'une recherche extérieure au laboratoire (partenariat Région Lorraine, Drac, ONF, Inra) et qui concerne l'apport du laser (Lidar) scanner aéroporté pour l'étude des parcelles gallo-romaines du massif forestier de Haye (après la tempête très déstructrice de décembre 1999). Le Lidar permet de faire une microtopographie très précise du sol et sur une grande surface. Ainsi la campagne de 2007 en forêt de Haye a permis le lever du plus grand cadastre gallo-romain d'Europe avec la mise à jour d'un vaste réseau d'anciens chemins, de parcelles agricoles et d'habitations, ...

Nous tenons encore à remercier vivement notre collègue Marc Leroy.

Après les nombreuses questions au conférencier, nous avons poursuivi les discussions à l'occasion du déjeuner partagé ensemble au «Poivre Rouge», restaurant situé à proximité du musée.

L'après midi fut consacré à la visite agréablement guidée du musée de l'Histoire du fer. La création de ce musée est liée à la volonté d'Albert France-Lanord et d'Édouard Salin, alors directeur du musée Lorrain. Ce musée est inauguré en 1966 et reste malheureusement encore mal connu aujourd'hui. Il présente de façon chronologique, des origines au début du XX^e siècle, l'évolution des techniques de production du fer, de la fonte et de l'acier dans leurs contextes économiques, sociaux et culturels.

De l'outil à l'œuvre d'art et du document à la maquette, depuis les épées mérovingiennes jusqu'à la robe métallique en passant par le tronçon d'un

escalier originel de la Tour Eiffel, le matériau fer ne cesse de nous surprendre et de nous émerveiller. Les nombreux objets originaux et les maquettes finement étudiées et variées retracent les trois étapes essentielles de l'Histoire de la sidérurgie, à savoir la période de la méthode directe du minerai de fer (de 1500 avant J.-C. au XIV^e siècle), l'apparition du haut-fourneau et de la fonte (du XV^e au XVIII^e siècle) et la révolution industrielle de l'acier (du XIX^e siècle à nos jours).

En outre, des expositions scientifiques et techniques temporaires variées complètent régulièrement les présentations permanentes, à la satisfaction des élèves, des étudiants et des touristes.

En conclusion, le vendredi 13 janvier 2012 fut bien rempli en Lorraine !!!

Bernard Maudinas

CENTRE - ORLÉANS

Visite du Télégraphe Chappe à Baccon (45), 29 novembre 2011

Après le Bâtiment écologique, la Radio-astronomie et l'Archéologie préventive, notre branche régionale de l'A3 a opéré une visite de la Tour du Télégraphe



Chappe et des Appareils de télégraphie électrique à Baccon, près de Meung-sur-Loire. Cette découverte comprenait :

- La projection de 2 films sur la télégraphie Chappe, dont celui réalisé par l'Association Baccon Patrimoine (ABP) avec Valimage en 2010, et un diaporama complémentaire.
- La visite guidée de la Tour restaurée à l'identique avec son système de transmission. La lunette utilisée par les « stationnaires » est mise en place, et des panneaux de commentaire sont disposés sur les 4 niveaux. Une maquette du système à l'échelle 1/5 permet de comprendre le fonctionnement.
- La visite de la salle d'exposition : plus de 20 appareils de télégraphie électrique allant de 1850 à 1980 sont présentés, tels le Morse, le Beaudot, le surprenant Hughes, un Bélinographe et jusqu'au fax. Le patrimoine local est représenté par l'archéologie avec plus de 200 pièces trouvées uniquement sur la commune, dont certaines exceptionnelles.

L'histoire locale est à découvrir notamment dans l'Eglise Saint Quentin des XII^e et XIV^e siècles, avec son porche roman et ses vitraux représentant l'histoire du Saint (dont l'église possède des reliques), et F. Villon y a laissé des traces de son passage. Des randonnées partent du bourg vers le mémorial de la guerre de 1870 (pour évoquer la victoire de Coulmiers), le Chemin des boeufs, la source de la Grande mauve, le château de la Renardière et l'agriculture de Beauce.

Pour en savoir plus, voir le site Internet de l'ABP www.baccon-patrimoine.fr

Un projet de Conservatoire, outils & instruments de sciences

Cette idée a été présentée et débattue à la réunion des correspondants régionaux A3 le 19 janvier. Elle part d'une expérience personnelle : avoir vu la fin d'un labo historique, l'Institut d'embryologie du Collège de France à Nogent-sur-Marne, vidé de ses chercheurs partis dans d'autres laboratoires, et avoir pu sauver certains des matériels chargés de découvertes importantes qui ont marqué l'histoire des sciences biologiques, avant qu'ils ne soient détruits par un ferrailleur. Dans les caves des labora-

toires, dorment encore ces instruments, ils peuvent ressusciter pour l'intérêt de tous plutôt qu'ils ne disparaissent.

L'objectif serait de faire découvrir au public le monde de la science en redonnant vie aux outils et instruments devenus obsolètes, mais encore conservés dans les laboratoires, qui seraient confiés à l'A3 en partenariat en vue d'expositions. Ces objets témoins de l'histoire des sciences en général comme de la recherche locale, seraient porteurs d'une mission pédagogique et historique des organismes de recherche.

Comme moyens, il faudrait un accord de principe du CNRS à haut niveau pour commencer des démarches auprès des directeurs, des délégués, des labos. En s'appuyant sur nos membres A3 et, leur connaissance du terrain, on peut lancer un recensement ou une identification des outils, reconstituer leur mission et leur place dans l'histoire. Un petit comité serait chargé de juger leur intérêt et leur originalité en termes de nouveauté d'utilisation, de contribution dans l'avancée des mesures, de la connaissance en général. Par leur conception et leur réalisation, ils nous éclairent sur l'histoire de la science, d'un laboratoire, d'une ville, d'une région, de ses industries, de notre patrimoine. Il faudra trouver des partenaires (organismes de recherche, collectivités locales, ministères) pour envisager un financement du projet, du stockage des instruments, puis de leur exposition temporaire ou permanente. Pourquoi ne pas rêver ? Avec le soutien de sociétés savantes, de personnalités importantes, on peut donner le jour au Conservatoire des outils et instruments des sciences. Un beau challenge pour nous tous !

Contact : Paul GILLE, Jean-Pierre REGNAULT, rayonnement@cnrs-orleans.fr

ILE-DE-FRANCE

LES VISITES

Pinacothèque de Paris : Ilone et Georges Kremer
Héritiers de l'Age d'or hollandais
Conférencière de l'Echappée Belle - 4 visites

L'Age d'or hollandais désigne une période faste, le XVII^e siècle, où le pays a connu une richesse fulgurante et une paix exceptionnelle. Il devient ainsi

un refuge pour les artistes, les écrivains, les philosophes. Un extraordinaire mouvement artistique s'y développe, soutenu par une nouvelle catégorie de collectionneurs : les marchands et les bourgeois. Tout comme les amateurs éclairés de cette époque, Ilona et George Kremer ont rassemblé depuis plus de seize ans une collection exceptionnelle d'œuvres du XVII^e siècle hollandais. Ce couple a ainsi constitué une collection unique de maîtres aujourd'hui de réputation internationale, de Rembrandt à Franz Hals en passant par Pieter de Hooch, Gerrit Dou et Gerrit van Honthorst. Ils ont également accordé une place importante à des peintres désormais moins connus, mais tout aussi essentiels à l'époque.

Pour cette exposition, la Pinacothèque présente un ensemble de 57 œuvres exceptionnelles qui privilient la technique du clair-obscur développée et largement diffusée durant cet Age d'or. Le parcours se concentre sur les scènes de genre et les rapports sociaux entre les différents métiers de l'époque. Il révèle également l'avènement de la bourgeoisie dans le monde des amateurs d'art et l'intérêt de l'époque pour les natures mortes et les paysages. Un ensemble d'œuvres remarquables à découvrir.

Cité de l'architecture et du patrimoine au palais de Chaillot

L'hôtel particulier parisien

Conférencière : Madame Oswald

4 visites

Ce type d'hôtel, apparu au Moyen Âge, se développe au XVI^e siècle quand Paris redevient, grâce à François I^r, une capitale lieu de séjour de la monarchie. Pour la noblesse, il faut être à la Cour, près du Roi. C'est donc à Paris que l'on réside. On pourrait croire qu'avec Louis XIV et ses successeurs cette pratique se perd et que la noblesse se fixe à Versailles. Il n'en est rien. L'âge d'or de l'hôtel parisien se poursuit jusqu'au XIX^e siècle et son prestige persiste encore de nos jours comme en témoignent les grands musées, ministères et ambassades, qui y trouvent un décor digne de leur activité.

C'est cette histoire que cherche à faire revivre l'exposition. La première partie, de vastes dimensions, présente la reconstitution d'un petit hôtel type, entre cour et jardin. On en découvre les différentes pièces, décorées comme une véritable maison habillée.

La deuxième partie rappelle l'histoire de ces hôtels, du Moyen Âge à la Belle époque, grâce à une suite de grandes maquettes de bâtiments choisis pour leur caractère emblématique : hôtels de Cluny, Lambert, de Thélusson, enfin le Palais-Rose (seul édifice aujourd'hui disparu). Une documentation richement illustrée complète le tout.

La dernière section est consacrée à différents thèmes :

- évocation des rapports avec la ville,
- l'architecture extérieure, le décor intérieur,
- le jardin et son organisation.

Une très belle exposition à ne pas manquer

Cité de l'architecture et du patrimoine au palais de Chaillot

La galerie des peintures

Conférencière : Madame Oswald - 6 visites au moins

Lors de précédentes visites dans ce musée, Madame Oswald nous a présenté les façades reconstituées de nos grandes églises romanes et gothiques. Nous en avons admiré les décors et la réalisation. Mais, comment étaient les intérieurs ? Sous une appellation peu explicite, c'est ce que cette galerie permet de découvrir.

La Galerie des peintures est un des plus beaux lieux du musée. Les intérieurs des édifices y sont reproduits avec leurs structures de pierre telles qu'elles se présentent dans la réalité : colonnes, voûtes sculptées ou recouvertes de fresques. Le tout, réalisé dans les années 1930, a été repensé au début de ce siècle par Jean-Louis Cohen, architecte et historien. Le tout comprend aujourd'hui 90 peintures murales allant du XII^e au XV^e siècle, la plupart d'une étonnante beauté. Sous un éclairage tamisé, nous découvrons l'imposante coupole écorée de la cathédrale gothique de Cahors, le baptistère roman de Poitiers (1^{re} moitié du 12^e), avec ses couleurs reproduites au naturel, un vitrail de la Cathédrale de Bourges... Plus merveilleuses encore, la reproduction exacte de la crypte de la cathédrale d'Auxerre (XI^e siècle), avec le Christ et les quatre cavaliers de l'Apocalypse, ou l'église de Nohant, entièrement décorée de peintures.

Présentée par Madame Oswald, c'est une des plus belles et surprenantes visites de Paris.

Il suffisait d'attendre... la Grande exposition définitivement annulée cet automne, arrive au printemps à Paris...

Pinacothèque de Paris :
Les masques de jade Mayas
Conférencière de l'Echappée Belle
Au moins 8 visites

La Pinacothèque de Paris présente enfin la découverte archéologique la plus importante de la dernière décennie effectuée au Mexique : les masques en mosaïque de jade. Crées pour les gouverneurs les plus prestigieux des cités perdues mayas, ils avaient pour mission de leur assurer la vie éternelle après leur mort. Une quinzaine au plus ont été découverts à ce jour, présentés pour la plupart dans cette exposition.

Ces masques constituent un ensemble unique que le Mexique accepte exceptionnellement de dévoiler hors de ses frontières, mais qui a été admis dans le cadre des échanges bilatéraux avec la France. En présentant autour de ceux-ci une centaine d'œuvres qui quittent également pour la première fois le pays, la Pinacothèque propose une véritable plongée dans la cosmogonie sophistiquée et mystérieuse de cette culture millénaire. Cette exposition ne reproduit pas celle du Quai Branly qui présentait des vestiges mayas en provenance du Guatemala. Cette fois, les objets mayas exposés sont en provenance du Mexique.

Musée du Luxembourg :
Cézanne et Paris
Conférencière de l'Echappée Belle
Hélas, 2 visites seulement ont pu être obtenues. Plus de 60 personnes ont été refusées.

Paul Cézanne (1839 - 1906), que la légende décrit comme «le Maître d'Aix», solitaire et retiré en Provence, ne s'est jamais réellement éloigné de la capitale. Entre 1860 et 1904, à plus de vingt reprises il se rend à Paris et en Ile-de-France. Son œuvre témoigne de ces séjours au cours desquels il fréquente les impressionnistes, les réunions du café Guerbois ou de la Nouvelle-Athènes, sans oublier la maison du docteur Gachet à Auvers-sur-Oise ou celle de Monet à Giverny. A Paris, Cézanne se confronte tout autant à la tradition qu'à la modernité. Il y trouve

«les formules» avant de les exploiter en Provence.

Après 1890, critiques, marchands et collectionneurs commencent à s'intéresser à son œuvre. Le peintre se montre attentif à cette reconnaissance qui ne peut venir que de Paris. Il imprime ainsi sa marque à l'art moderne : l'avant-garde le considère comme un précurseur, «notre père à tous» selon la formule de Picasso.

Cette exposition, réalisée en partenariat avec le Petit Palais, le Musée d'Orsay (qui a prêté certaines œuvres) et le Musée des Arts Modernes, présente environ 80 toiles de Paul Cézanne. Elles nous éclairent sur les grands thèmes qu'il explore lors de ses séjours en Ile-de-France, retracant non seulement le temps qu'il passe à Paris, mais aussi son affection pour les paysages de la région²⁸, les natures mortes, les nus, les portraits. C'est donc un éventail important de l'œuvre du peintre qui sera présenté lors de cette exposition.

Musée d'Orsay
Degas et le nu
Conférencière : Madame Levasseur.
Au moins 6 visites.

Edgar Degas, de son vrai nom Hilaire Germain Edgar de Gas (1834-1917), naît à Paris dans une grande famille de banquiers. Après de brèves études de droit, il entre à l'Ecole des beaux-arts et travaille avec un disciple d'Ingres. C'est là qu'il acquiert la grande maîtrise du dessin qui constituera toujours une caractéristique majeure de son art. Il se rend ensuite en Italie où il étudie les œuvres du Quattrocento. De retour en France, il est attiré par les aspects courants de la vie de ses contemporains : musiciens, danseuses, autant de thèmes qu'on retrouvera dans son œuvre. A la fois peintre et sculpteur, lié avec Manet depuis 1862, il est aujourd'hui considéré comme l'un des représentants majeurs de l'impressionnisme français. L'exposition «Degas et le nu» organisée par le musée d'Orsay constitue un événement.

C'est la première depuis la rétrospective du Grand Palais, en 1988 et elle présente de nombreuses œuvres jamais exposées. De plus, les nus occupent une place prédominante dans l'œuvre de Degas. Il devient alors possible d'apprécier une évolution chez l'artiste, de l'approche académique et historique des

débuts à la représentation moderne du corps. Le visiteur le percevra à travers les différentes techniques utilisées : peinture, sculpture, dessin, estampe, et surtout le pastel que Degas a porté à son plus haut degré d'achèvement.

LES CONFÉRENCES.

Nous avons vivement regretté de devoir annuler la visite de La Maison de Balzac. Une exposition sur «Les grisettes» nous avait bien été annoncée, mais sans nous en préciser l'importance et la présentation. En fait, elle occupait tout l'espace, les objets appartenant à l'écrivain étant retirés – à l'exception de deux. La visite, dont le but était de retrouver l'atmosphère chère à l'écrivain, devenait sans objet.

Nous devrons malheureusement encore attendre, des ouvriers ayant pris le relais pour effectuer des travaux... De même, nous devons visiter la Conciergerie, mais elle aussi est victime d'une exposition qui retire à ce lieu de mémoire tout son caractère. Ici encore, il faut attendre.

PROGRAMME DES VISITES PRÉVUES

Avril

- *Musée des monuments français, Les fresques*
Conférencière Madame Oswald - 1 dernière visite
- *Musée Marmottan, exposition Berthe Morisot*
Conférencière Madame Oswald - 4 visites obtenues.
- *Musée du Luxembourg, Cima (un des maîtres de la Renaissance vénitienne)*
Conférencière de l'Echappée Belle
3 visites obtenues

Mai

- *Château de Versailles : Les appartements privés de Louis XV, décorés par Gabriel.*
Visites organisées spécialement pour nous par Mme Levasseur - 4 visites.
- *Musée Jacquemart-André, Des Pharaons noirs à Alexandre le Grand, Chefs d'œuvre de l'Art égyptien*
Conférencière de l'Echappée Belle - 6 visites obtenues.
L'Hôtel de Ville de Paris
Conférencière de l'Hôtel de Ville - 1 dernière visite.
- **Mal ou septembre**
Pour remplacer la visite annulée l'an dernier
Le Donjon du Château de Vincennes
Conférencière Madame Oswald
1 visite (2 si nécessaire).

Juin

- *Cité des Sciences et de l'Industrie*
Invitation personnelle du Musée :
Exposition « Gaulois, une exposition renversante »
Présentation par le Chef du projet et un guide
2 visites obtenues.
- **30 Juin Conseil d'Etat**
(visite demandée et obtenue en septembre 2011...)
Conférencière Madame Oswald. - 1 visite obtenue.

LANGUEDOC-ROUSSILLON

Notre antenne régionale tient sa permanence hebdomadaire le lundi après-midi, de 14h30 à 19h ; le local est situé dans le Bâtiment « Accueil » à la Délégation régionale, 1919, Route de Mende, à Montpellier.

Nos visites passées

21 Septembre 2011 : «Microphyt» à Baillargues

La SAS Microphyt a été créée en 2007 par Arnaud Muller-Feuga (Directeur), ancien chercheur Ifremer, assisté par Michel Lemar chimiste (Directeur-Adjoint), pour produire de la biomasse pure et stabilisée d'espèces de micro algues. Elle est localisée sur la route de Mudaison à Baillargues (Hérault) et implantée sur un site de 18.000 m². La Société comprend 5 personnes, dont les directeurs assistés par deux personnes dans le domaine de la recherche et développement, et une autre dans le domaine commercial. Dans sa création, la société a bénéficié d'aide régionale Business and Innovation Centre (BIC) de Montpellier agglomération et de fonds d'Oséo Anvar (achat de terrain 2007 et construction 2009). Le projet (2005) a été porté par les compétences des acteurs et l'adaptation à la région : ensoleillement important pour les photo-bioréacteurs, température moyenne convenable avec une eau douce obtenue par forage permettant l'alimentation des réacteurs de 5m³ et leur refroidissement.

La première partie de la visite commence par le traitement de l'eau (eau osmosée stérilisée), avec l'apport de nutriments et des oligoéléments adaptés à chaque culture d'algue. Un petit laboratoire adapté permet ces ajustements et le suivi des croissances des souches à l'échelle du laboratoire. Ces souches proviennent assez souvent de sélections obtenues et mises au point en milieu universitaire.

La seconde partie de la visite nous a conduits aux deux réacteurs tubulaires (verre pyrex) positionnés horizontalement (longueur 8m) dont la structure en serpentin représente une longueur totale de 1200m. Ces derniers sont localisés sous une serre spacieuse dont la capacité d'accueil pourrait être de 5 réacteurs. (photos).



Photos Marc LOCAF : le hall de production et détail des bioreacteurs.

La société Microphyt a défini, protégé et mis en œuvre une technologie adaptée à la culture des algues à croissance lente et/ou fragile selon des quantités de l'ordre de 10 kg de matière sèche et plus. Techniquement, tout l'art consiste à réaliser les

quatre transferts (lumière, masse, chaleur et quantité de mouvement) assurant la croissance algale en maîtrisant les contaminations. La théorie et l'expérience montrent que l'efficacité des solutions retenues n'est pas influencée par la taille du réacteur, ce qui offre des perspectives intéressantes en matière d'économie d'échelle. Deux espèces délicates, qui présentent des activités biologiques pour la dermo-cosmétologie, ont été produites dans les deux réacteurs de 5 000 L à raison d'environ 1 kg de matière sèche par jour (soit 5 kg de matière fraîche). La technologie de Microphyt présente donc un grand potentiel pour développer les productions issues de la biodiversité des micro-algues à des coûts très compétitifs.

Les secteurs les plus demandeurs étant la dermo-cosmétologie et les compléments alimentaires, certaines espèces présentent aussi des vertus intéressant l'aquaculture, la santé, la chimie et l'énergie. Actuellement la société travaille à compléter sa gamme d'équipements avec un réacteur de taille pilote pour des productions de l'ordre de 50 g/j destinées aux laboratoires, et des réacteurs de grande taille pour les productions de masse de l'alimentation, de la chimie et de l'énergie.

En conclusion nous garderons un excellent souvenir de cette visite, grâce à l'esprit ouvert et aux qualités pédagogiques des deux orateurs qui ont répondu avec précision, aux différentes questions posées par les membres de notre groupe.

Bernard Romestand - Hubert Blancon

26 Octobre 2011, «Les fourches de Sauve»

Sauve, ancien village gardois, adossé à de pittoresques falaises calcaires au bord du Vidourle : c'est un lieu qu'affectionne le micocoulier (ou micoucoulier), en botanique *Celtis australis*, un arbre de la famille des ulmacées, au tronc musculeux sous une écorce de pachyderme. C'est certainement en observant une curieuse particularité de la disposition de ses feuilles sur des tiges naissante, aux bourgeons axillaires dans un même plan, que vint l'idée très originale de concevoir une fourche en bois, il y a de cela 800 ans...

Nous commençons la visite en nous rendant dans un endroit où sont réparties au ras du sol, entre des



La future fourche - © Gérard Mennessier



Mise en forme et façonnage - © Gérard Mennessier



La fourche pleure - © Gérard Mennessier

roches calcaires qui affleurent çà et là, des souches de micocoulier peuplées de rejets qui s'élèvent à 1m60 ; coupés à ce niveau, ils développent trois, voire quatre ramifications issues de bourgeons bien disposés que l'on nomme «la fleur de lys» : L'architecture de la future fourche est déjà là... (il a fallu de 6 à 7 ans !).

Nous nous acheminons ensuite vers le site de fabrication, dans la pénombre d'une ancienne caserne de dragons au fronton audacieux ; un film nous retrace l'industrie de la fourche par le détail, puis nous voyons dans une pièce aux parois fuligineuses le four qui est le lieu où les fourches en bois sont chauffées : elles y « pleurent » leur sève, puis dans un sifflement caractéristique, elles avertiront que le bois est suffisamment sec. L'opération de façonnage est réalisée à chaud par un instrument de contrainte qui courbe la base des dents pour donner la forme à la fourche en bois de Sauve. Avant la cuisson, une simple lanière d'écorce a été déposée sur le bois, à la base des ramifications, elle dessinera par contraste de couleur la signature de l'outil fait dans cet atelier.

La fourche est aujourd'hui produite ici à 300 exemplaires, plus pour son aspect décoratif que pour une utilité : ...Plus peut-être pour se souvenir qu'elle était née en ces lieux et que l'on y a entretenu une

industrie créatrice d'un instrument léger, solide, peu dangereux (contrairement aux fourches métalliques lors de la distribution du foin), qui était indispensable aux fenaisons et à la manipulation des gerbes comme à la confection des litières pour les animaux. On nous apprend aussi qu'une autre production d'outils dérivés du micocoulier s'est installée dans les Pyrénées-Orientales à Sorède ; elle tient, principalement à la fabrication à chaud (ici aussi) de manches de fouets (le fouet pour calèche appelé : perpignan) et de cravaches tressées. Le bois de micocoulier sert aussi à fabriquer des cannes, des queues de billard, des avirons, des baguettes de fusil. Une nostalgie, une poésie et cette attachante évocation d'autres temps ont conquis l'auditoire...

Voilà une bien agréable visite à ce musée vivant, créé par le Conseil général du Gard et soutenu par une

population très attachée à ses traditions et à ses arbres au nom plein de douceur : le micocoulier. Tout fièrement il nous était dit : « Tout est bon dans le micocoulier » ; les fruits ou micocoules, petites baies brunes à la maigre chair très sucrée qui peut parfumer des alcools ; la graine qui produit une huile au parfum original, les feuilles qui servent pour le fourrage, et le bois dont nous venons d'évoquer diverses utilisations...

Hubert Blancou

Nos visites à venir

Mars 2012 (date à définir) : « Le métier de tailleur de pierre » - Le Pouget (34)

Avril-Mai-Juin :

• Météo-France, à l'aéroport de Fréjorgues, • Journée à Pomerols, • Le Château de Bocaud, à Jacou.

Programme des voyages en 2012

7 mars au 5 avril - Le Maroc : Splendeurs des villes impériales (pour mémoire).

23 au 31 mai - La croisière fluviale « Beau Danube bleu » avec 3 jours à Prague à l'hôtel, puis croisière de Linz à Budapest sur le MS Esmeralda 3*** en passant par Vienne, Melk, Bratislava...

Prix : pour 30 personnes taxe d'aéroport incluse : pont principal 1640 €, pont supérieur 1700 € pour 25 personnes taxe d'aéroport incluse : pont principal 1685 €, pont supérieur 1745 €.

14 au 24 juin - 3 nuits/2 jours ½ à Turin : visite du musée égyptien et de la ville et ses environs, excursion au Lac Majeur, puis départ pour Abano pour une cure thermale de 6 jours. Voyage complet.

14 au 25 septembre - Ouzbekistan : Route de la Soie Ourgentch, Khiva, Boukhara, Samarkande... carrefour des routes caravanières du papier, de la soie et de l'or. La patrie de Tamerlan nous fera découvrir les chefs d'œuvre de l'art ouzbek et les sites légendaires. Voyage complet. Prix : 1840 €.

28 septembre au 9 octobre, même programme avec un voyagiste différent :

Prix : 1825 €. Voyage presque complet

29 octobre au 5 novembre : Voyage intergénérations (grands parents - petits enfants) aux vacances de la Toussaint en Italie : Naples, Pompéi, Herculaneum, Salerne, Paestum, la côte amalfitaine, les champs Phlégréens, le Vésuve.

Prix : 1225 € en chambre double (possibilité d'avoir des chambres triples avec les jeunes enfants (70 euros de réduction)

Projets 2013

Une croisière dans les Fjords norvégiens est prévue du 25 juin au 3 juillet 2013. Compte tenu de la difficulté d'obtenir des places, nous devons lancer les réservations dès maintenant. Sur le pont principal :

Cabine extérieure : 2530 € - Cabine intérieure : 1820 €. Les personnes intéressées doivent maintenant se faire connaître pour que le programme et la fiche d'inscription leur soient envoyées.

Pour tout renseignement ou inscription, téléphoner (01 44 96 44 57) à la permanence du mercredi, ou envoyer un courriel à :

giseleolangevoyages@yahoo.fr

Gisèle Vergnes et Solange Dupont

Carnet

Erratum bulletin n°57, page 72, lire Rullière au lieu de Rullieu.

Compte-tenu des imprécisions de pagination de ce numéro, retrouvez le carnet sur www.rayonnementducnrs.com

Nouveaux adhérents

BERNARD	Jacques	Saint-Cloud	LELIEVRE	Gérard	Paris
BOUCHERLE	Jean	Entre-Deux-Guiers	LOPEZ	André	Toulouse
DAUBENTON-CARAFA	Yves	Etrechy	MARIN	Luc	Ludres
DELPECH	Odile	Rambouillet	MICHEL	Christine	Paris
DUCHESNAY	Arlette	Paris	PERSET	Françoise	Paris
DUCLERT	Françoise	Clamart	ROMESTAND	Bernard	St-Gély-du-Fesc
FONTAINE	Bernard	Marseille	ROSSET	Françoise	Paris
FRAISSIONES	Christine	Paris	ROUCHAUD	Jean-Claude	Créteil
GAILLARD	Claude	Boulogne	THIBAUT	Catherine	Le Chesnay
GIREL	Jacky-Marc	Chambéry	THUAUD	Nicole	Maison-Alfort
GUYOT	Michèle	Paris	VOLLET	Dominique	Paris
KIELBASA	Michèle	Orsay			

ACCES AUX BASES DE DONNEES SCIENTIFIQUES , VIA L'INIST

Depuis plusieurs années, notre Association cherche à mettre en place un moyen d'accès aux bases de données scientifiques, à l'intention de ses adhérents à jour de cotisation, afin que ceux-ci puissent continuer à se tenir informés de l'évolution des connaissances, même après leur départ en retraite.

L'INIST nous propose une période-test d'essai de quelques mois, avec entrée aux divers portails CNRS BiblioME, BiblioSHS, BiblioST2I, BiblioPlanets, TitaneSciences et BiblioSciences , donnant le droit aux utilisateurs de rechercher, interroger, imprimer et télécharger des articles pour leur usage personnel ou à des fins d'étude et de recherche, ceci « strictement réservé aux ayants droit CNRS membres de l'Association », pour leur seul usage personnel.

Lors de cette période d'essai, les conditions d'utilisation seront évidemment très strictes et contrôlées (téléchargement ou stockage de fascicules entiers et redistribution ainsi que usage commercial formellement proscrits). Notre attention a été attirée sur le fait que toute constatation d'utilisation anormale du service pourra donner lieu à la fermeture immédiate du compte concerné.

L'INIST établira des statistiques d'usage propre à chaque portail.

Si la possibilité que nous venons ainsi de mettre en place, via l'INIST, vous intéressait, veuillez prendre contact avec le secrétariat, Pascale Zanéboni, 01.44.96.44.57 afin que vous soit communiquée la marche à suivre ainsi que les identifiants et mot de passe temporaires qui seront nécessaires à toute interrogation.

Association des anciens et amis du CNRS

Adhésion ou renouvellement de cotisation pour l'année 2011

Montants :

Membre titulaire : 25 €

Membre bienfaiteur : 50 €

Nouvelles modalités de paiement : possibilité de régler la cotisation en ligne.

(les précisions vous seront transmises lors de la demande de renouvellement par courrier ou par mèd.)

Rappel :

l'adhésion à l'Association ouvre droit pour un an à la participation à l'ensemble des activités programmées par l'Association

Et vous permet d'avoir le service du «Journal du CNRS» et du bulletin de l'Association «Rayonnement du CNRS».

Dernières parutions

Bulletin n° 57 - décembre 2011 - *La Pologne*
Coordonné par Paul Gille : Dossier : *la Pologne*
François Batoil : *La Pologne - Présentation politique*
Paul Gille : *Rencontre entre amis et anciens en Pologne*
J. Bardowski, A. Gromadka, J. Rytko, W. Zagójski :
Le fondement du développement de la génomique en Pologne
Coopération avec le CNRS
Coopération franco-polonaise en biologie :
Claudine Kieda : *La coopération dans la recherche contre le cancer*
E. Janik, J.-F. Marhange, W. Szuszlewicz :
Coopération franco-polonaise dans le domaine des semi-conducteurs
Jan Stycke : *Coopération franco-polonaise en physique nucléaire et physique des particules*
Coopération franco-polonaise en physique nucléaire et physique des particules par Jan Stycke
Marc Bondiou et Jerzy Jastrzebski :
Laboratoire d'ions lourds - Cyclotron de Varsovie
Piotr Staniński par Marc Goergen : *Publique trajeotore*
Monique Bordry : *Marie Curie et la Pologne*

Bulletin n° 56 - juin 2011 - *L'essor du Brésil*
Christian Girault : *L'entrée du Brésil sur la scène mondiale*
Hervé Thiéry et Christian Girault : *Les biocarburants, croissance et limites d'une filière*
Hervé Thiéry et Nelli Aparecida de Mello-Thiéry : *Le terrain comme laboratoire, un voyage au Matto Grosso*
Luz Augusto Machado et Nelson Arai : *Les satellites d'observation météorologique au Brésil*
Luz Augusto Machado et Nelson Arai : *O uso de Satélites Meteorológicos no Brasil*
François Grenand : *Un pont entre la France et le Brésil : l'Observatoire Homme/Milieu sur le fleuve Oiapock*
Jean-Pierre Briot : *La coopération scientifique entre la France et le Brésil*
Anne Le Léon et Thierry Valente : *Le Cendre à São Paulo, un établissement au service de la coopération franco-brésilienne*

Le Secrétariat est ouvert

Les lundis, mardis, jeudis de 9 h 30 à 12 h 30, et de 14 h à 17 h

Tél. : 01 44 96 44 57 – Télécopie : 01 44 96 45 87

Courriel : anais-cmns@cnrs-dir.fr

Site web : www.cnrs.fr/Associations/

<http://www.anciens-anis-cmns.com> – <http://www.voyageenmemorie.com>

Siège social et secrétariat

3, rue Michel-Ange - 75794 Paris cedex 16

Marquette, numérisation et mise en page : Bernard Dupuis (Secteur de l'imagerie du Siège)
ISSN 1950-6542