

NUMÉRO
63

MAI
2011

cnrs
dépasser les frontières

MICROSCOOP

LE JOURNAL DU

CNRS

EN DÉLÉGATION CENTRE POITOU-CHARENTES



> BIOLOGIE

Termites, un monde de castes



> GÉOPHYSIQUE

Les argiles et l'origine de la vie



> ENVIRONNEMENT

Les plaines côtières menacées par les tempêtes extrêmes



> LABO EN DIRECT

L'étude des textes et de leur histoire dans le long millénaire médiéval

édito

2/ ÉDITORIAL

Microscop
Numéro 63
mai 2011

**CNRS Délégation
Centre Poitou-Charentes**

3E, Avenue
de la Recherche scientifique
45071 ORLÉANS CEDEX 2
Tél. : 02 38 25 52 01
Fax : 02 38 69 70 31
www.centre-poitou-
charentes.cnrs.fr
E-mail :
Eric.Darrouzet@dr8.cnrs.fr

Directeur de la publication
Patrice Soullie
Rédacteur de la publication
Eric Darrouzet
Secrétaire de la publication
Florence Royer

Ont participé à ce numéro

Nicole Bériou,
Xavier Bertin,
Jean-François Breilh,
Pascal Briostat,
Sébastien Busson,
Eric Chaumillon,
Armelle Combaud,
Marie-Luce Demonet,
Alexis Direr,
François Gervais,
Gilles Kagan,
Christophe Lucas,
Alain Meunier,
Laurent Picot,
Frédéric Pouget,
Mickael Krapytchev,
Jean-Yves Ramel,
Vinh Ta-Phuoc,
Valérie Thiery.

Création graphique
www.enola-creation.fr

Imprimeur
Imprimerie Nouvelle

ISSN 1247-844X



Photo de couverture

Alphonsus de Spina (franciscain espagnol converti du judaïsme), *Fortalium fidei* (1458-60). Incunable enluminé avec initiale historiée T (*Turris fortitudinis*) montrant l'attaque de la tour fortifiée de la foi. - Boulogne-sur-Mer, B.M., inc. 22 (Strasbourg, Johann Mentelin, av. 1472), f. 9



Ce second numéro de Microscop pour 2011 illustre une nouvelle fois la diversité et la richesse des sujets de recherche développés par les laboratoires de la délégation CNRS Centre Poitou-Charentes.

La première partie est consacrée à nos collègues historiens. Le dossier « Labo en direct » vous fera ainsi entrevoir l'histoire et les nombreuses activités de l'IRHT (Institut de recherche sur l'histoire des textes). Implanté à Paris et à Orléans, ce laboratoire de sciences humaines est antérieur à la création du CNRS. Vous découvrirez l'implication importante et historique du personnel de cette structure pour proposer aux chercheurs des bibliothèques virtuelles leur permettant d'avoir accès aux manuscrits anciens les plus rares. Vous découvrirez aussi, via un article du CESR (Centre d'Études Supérieures de la Renaissance), la difficulté à réaliser des fac-similés d'anciens manuscrits. Une équipe de recherche de cette unité a d'ailleurs été récompensée par Google pour le développement d'outils innovants dans la reconnaissance de caractères.

De même, vous partagerez le rêve de François Ier et de Léonard de Vinci qui avaient imaginé construire un palais aux proportions gigantesques dans la ville de Romorantin.

D'autres articles vous feront partager les sujets de recherche passionnants dans des domaines aussi variés que l'économie, la biologie, l'environnement, la géophysique et les matériaux.

Pour terminer, j'ai le plaisir de vous annoncer la nomination de Valérie SABOURAUD en tant qu'adjointe au Délégué régional à compter du 1^{er} mai 2011. Précédemment affectée à la DSFIM (Direction de la Stratégie Financière, de l'Immobilier et de la Modernisation), elle aura notamment pour mission la coordination des activités des services de la délégation et le suivi des conventions avec les partenaires académiques et les collectivités territoriales.

Je vous souhaite une très bonne lecture.

Patrice SOULLIE
Délégué régional

agenda

manifestations

LA FÊTE DE LA SCIENCE

La 20^{ème} édition est placée sous les thèmes de « L'année Internationale de la Chimie » et de « L'année des Outre-mer français ».

Du 12 au 16 octobre 2011

■ Pour en savoir plus :
www.fetedelascience.fr

DE LA MATIÈRE A LA VIE : CHIMIE ? CHIMIE !

Conférence de Jean-Marie LEHN,
Prix Nobel de Chimie

30 mai 2011 au Muséum d'Orléans

■ Pour en savoir plus :
www.dr8.cnrs.fr



Année internationale de la
CHIMIE
2011

colloques

9^{ÈMES} ASSISES DU RTMFM

Rencontres annuelles des responsables et personnels des plateformes de microscopie dans le domaine biophotonique. Ces assises sont un lieu d'échanges et de diffusion des savoir-faire.

Les 12 et 13 mai 2011 au Pôle Biologie Santé,
Poitiers

■ Pour en savoir plus :
<http://rtmfm.cnrs.fr>

LES ÉNERGIES DU FUTUR

La Fédération de recherche EPEE est l'organisatrice d'une journée d'échanges et d'information dédiée à la recherche et l'innovation autour de la valorisation de la biomasse en région Centre.

11 juillet 2011 à Orléans

■ Pour en savoir plus :
www.epee.cnrs-orleans.fr

SEMAINES D'ÉTUDES MÉDIÉVALES

Organisées par le CESCUM : conférences interdisciplinaires en français sur la civilisation médiévale, par des spécialistes internationaux.

Du 27 juin au 8 juillet 2011 à Poitiers

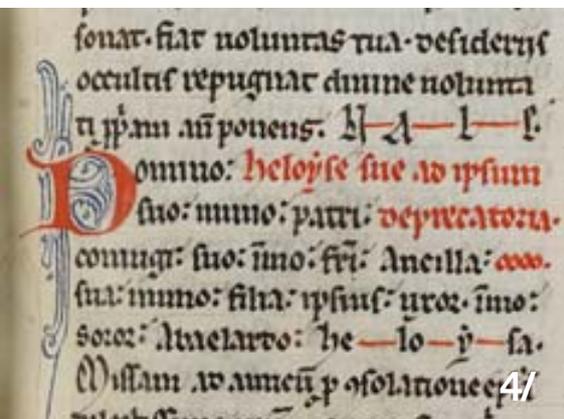
■ Pour en savoir plus :
www.mshs.univ-poitiers.fr/cescm

SOCIÉTÉ POUR L'ÉTUDE DES TEXTES ET DISCOURS (Society for Text and Discourse – ST&D)

Le 21^{ème} colloque pluridisciplinaire pour la promotion de l'étude des formes et structures du discours, des textes et des processus impliqués dans leur compréhension et leur production. Il est organisé au Centre de Recherche sur la Cognition et l'Apprentissage.

Du 11 au 13 juillet 2011 à Poitiers

■ Pour en savoir plus :
<http://cerca.labo.univ-poitiers.fr/>



4/

Microscop
 Numéro 63 – mai 2011

SOMMAIRE /3



8/



12/



16/



22/

Labo en direct

L'étude des textes et de leur histoire
 dans le long millénaire médiéval

■ 4/

Histoire

- Romorantin, le projet oublié de Léonard de Vinci
- Acquisition et indexation de textes de la Renaissance

■ 8/
 ■ 10/

Économie

Le financement de la dépendance

■ 12/

Biologie

- Termites, un monde de castes
- Les pigments marins et terrestres...

■ 14/
 ■ 16/

Environnement

Les plaines côtières menacées par les tempêtes extrêmes

■ 18/

Géophysique

Les argiles et l'origine de la vie

■ 20/

Matériaux

Supraconductivité, 100 ans déjà...

■ 22/

Restauration d'un des manuscrits sinistrés de la bibliothèque de Chartres (2010) : feuillet d'une Bible du début du XIIIe s. (Chartres, B.M., ms. 139)



L'étude des textes et de leur histoire dans le long millénaire médiéval

L'Institut de Recherche et d'Histoire des Textes (IRHT) est spécialisé dans l'étude des documents écrits et figurés. Ces textes datent de l'Antiquité au début de la Renaissance, et ont été produits entre Europe du Nord et pourtour méditerranéen. L'histoire des textes, de leur transmission et de leur réception, passe par l'examen des supports matériels de l'écrit, des écritures et des décors qui structurent la page, des livres manuscrits et des livres imprimés, des collections de livres qui se sont faites, défaites, refaites à travers les siècles.

L'IRHT est à la fois le plus ancien et le plus grand laboratoire propre de l'Institut des Sciences Humaines et Sociales du CNRS. Il a été fondé en 1937, deux ans avant la création du CNRS, par un jeune archiviste paléographe, Félix Grat. Cet historien diplômé de l'École des Chartres était soucieux de préserver la

mémoire écrite de la pensée humaine. Sous son impulsion, la mission première de l'Institut a donc été de promouvoir la conservation des textes écrits par leur reproduction photographique et l'étude de leur transmission par l'analyse aussi exhaustive que possible des manuscrits et des plus anciens imprimés. C'est ce

qui donne encore aujourd'hui à l'IRHT son caractère unique au monde.

Un laboratoire aux compétences multiples

L'Institut est une unité propre du CNRS réunissant aujourd'hui une centaine de personnes. Les chercheurs y travaillent

en étroite collaboration avec les ingénieurs et techniciens hautement spécialisés qui apportent aux équipes leurs compétences indispensables à l'alimentation, la valorisation et la diffusion des recherches. Outre des formes de savoir et de savoir-faire partagées avec les universités, l'IRHT accorde une importance spéciale aux sciences fondamentales permettant d'analyser sous toutes leurs facettes les sources manuscrites: lire et dater les écritures, expliquer les usages combinés du texte et de l'image, comprendre l'écriture musicale, étudier les livres comme des objets, avec un œil et une méthode d'archéologue, reconstituer virtuellement les collections grâce aux inventaires anciens et aux marques laissées sur les livres par leurs possesseurs, éclairer l'histoire de chaque texte qui, loin d'être figé dans une forme immuable, se présente en versions multiples qu'il faut identifier, répertorier, ordonner, scruter, pour rendre compte de ses métamorphoses et, a contrario, pour retrouver la version la plus proche de l'œuvre d'auteur. Implanté à la fois à Paris (en quatre sites) et à Orléans sur le Campus de La Source, l'IRHT peut de la sorte entretenir des collaborations étroites, jusqu'à l'association de chercheurs à ses équipes, avec les universités d'Orléans, Tours, Paris 1 et Paris 4, comme avec l'École des Chartes et l'École Pratique des Hautes Études où sont cultivées les mêmes exigences d'érudition dans l'approche de l'histoire des textes.

À l'ère de l'informatique

De tout temps, l'IRHT a diffusé le résultat de ses recherches en publiant toutes sortes d'inventaires, de répertoires et de catalogues. Des bases de données en ont pris aujourd'hui le relais: catalogue des manuscrits des textes grecs, répertoires des documents en langues romanes et de leur bibliographie, dictionnaire de latin médiéval, histoire de la transmission des œuvres antiques et médiévales en Europe du XIVe au XVIIe siècle, etc. Dès 2006, un catalogue des manuscrits liturgiques médiévaux et modernes a été publié en ligne,

ce qui permet des mises à jour régulières de son contenu, sur la plateforme numérique TELMA pilotée par l'IRHT avec le concours de l'École des chartes. La précocité des initiatives comporte ses contraintes: la base Initiale, alimentée depuis 1990 en descriptions de manuscrits enluminés et en indexation de leurs décors, a dû faire l'objet d'une migration dans une autre base pour devenir consultable gratuitement par tous sur Internet dans un très proche avenir.

Un riche éventail d'activités

Félix Grat, latiniste, voulait comprendre avant tout comment les œuvres des grands écrivains de la Rome antique nous étaient parvenues. Or ce sont les manuscrits médiévaux qui en ont gardé la mémoire. Toutes les langues, cependant, l'intéressaient. Fidèle à cette grande curiosité intellectuelle, l'IRHT compte aujourd'hui des spécialistes de latin et langues romanes, grec, hébreu, arabe, copte, syriaque, et il inclut dans son domaine de recherche les textes multilingues et les traductions. Des textes inédits sont encore découverts, notamment dans les manuscrits syriaques de la bibliothèque patriarcale de Charfet (Liban), en cours de catalogue.

Tous ces livres manuscrits, leurs héritiers directs (les « incunables », du latin *incunabulum* / berceau, imprimés au XVe siècle), mais aussi les documents d'archives qui recèlent les traces les plus vives du quotidien des hommes, sont les témoins privilégiés d'une culture à la fois matérielle, intellectuelle, et spirituelle.

De l'Antiquité au XVI^e siècle

Tous les supports de l'écrit peuvent être pris en compte, jusqu'aux *ostraca* coptes de la région thébaine et aux restes des rouleaux de papyrus d'Herculanum, carbonisés lors de l'éruption du Vésuve en l'an 79 de notre ère. Toutes les aires géographiques sont concernées par la production de livres manuscrits, encore vivace bien après le XVe siècle malgré l'invention et les progrès de l'imprimerie. Le passage du manuscrit à l'imprimé

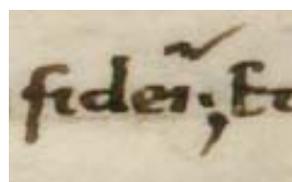


ne rompt pas la chaîne des habitudes de travail, et il faut parfois y regarder de près pour ne pas confondre certains incunables richement enluminés jusque dans leurs marges avec leurs cousins manuscrits, qui leur sont contemporains.

Des dizaines de milliers de photographies

Le laboratoire a réuni depuis sa fondation une quantité impressionnante de documents photographiques. Pionnier dans la constitution de collections de microfilms (plus de 75 000 sont conservés dans sa filmothèque d'Orléans), il a été chargé depuis une trentaine d'années de photographier, en des campagnes systématiques, les manuscrits des fonds anciens des bibliothèques municipales et universitaires françaises, avec le soutien financier des ministères de la Culture d'une part, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche de l'autre. À partir de 2008, il a résolument opté pour la photographie numérique couleur, renonçant du même coup au film argentique. Les ressources en microfilms de manuscrits du monde entier demeurent l'outil indispensable

Alphonsus de Spina (franciscain espagnol converti du judaïsme), Fortalitium fidei (1458-60). Incunable enluminée avec initiale historiée T (Turris fortitudinis) montrant l'attaque de la tour fortifiée de la foi. - Boulogne-sur-Mer, B.M., inc. 22 (Strasbourg, Johann Mentelin, av. 1472), f. 9



Écriture d'un collaborateur du diacre de Lyon Florus (mi IXe s.) : le signe ajouté au-dessus de la ponctuation de fin de phrase marque l'interrogation pour aider le ton du lecteur. - Lyon, B.M., ms. 484, f. 79r, l. 29



Caen, B.U., ms. 252105, f. 1v-2r : Coran sur papier (XVIIe s.) – campagne photographique de Basse-Normandie, 2008

des chercheurs qui se fournissent en reproductions à l'IRHT. En revanche, le rendu des matériaux dont sont faites les reliures et les feuilles des livres manuscrits, et aussi la qualité de restitution des formes, des lignes et des couleurs deviennent inégalables avec la photographie numérique à haute résolution, ce qui transforme radicalement les conditions de l'analyse documentaire.

Une bibliothèque virtuelle

Plus de 400 000 vues, soit de certains décors significatifs, soit de livres manuscrits entiers, sont aujourd'hui disponibles à la suite des campagnes menées dans les bibliothèques françaises. Avec le complément venant des numérisations progressives de microfilms, elles sont destinées à alimenter un entrepôt d'images, la Bibliothèque virtuelle des manuscrits médiévaux (BVMM), déjà consultable en interne à l'IRHT. La collection doit s'enrichir dans les quatre années à venir de reproductions de plus de 2000 manuscrits. Il restera ensuite à traiter les nouvelles acquisitions, et à promouvoir d'autres campagnes ciblées pour accompagner la recherche thématique, comme c'est déjà le cas avec le catalogage de la bibliothèque médiévale de Clairvaux, où les livres de droit et de médecine côtoyaient les textes de théologie et de dévotion au XVe siècle. Enfin, la BVMM a commencé à accueillir les reproductions de manuscrits détenus

par des musées et par des institutions ecclésiastiques, et cette ouverture augure bien des possibilités de communication contrôlée de reproductions de manuscrits figurant dans des collections particulières.

Repères pour l'étude des textes, de leur environnement et de leur histoire

La répartition du travail en sections, selon la diversité linguistique des sources, permet de maintenir à portée de main des chercheurs, à Paris et à Orléans, la plupart des livres dont ils ont besoin quotidiennement. S'y ajoutent les ouvrages de la bibliothèque centrale qui accueille au quotidien des lecteurs du monde entier : soit au total plus de 115 000 livres, 370 périodiques vivants et de nombreuses ressources électroniques.

Au cœur des recherches, les livres manuscrits sont particulièrement riches d'informations dans leur forme et leur contenu. Avant de les ouvrir, il faut considérer attentivement leur reliure : un livre entier sur celles des manuscrits de la bibliothèque municipale de Reims a été récemment publié par le laboratoire. Qu'elle soit d'origine ou refaite, la reliure apporte les premiers indices de l'histoire d'un manuscrit. Son étude permet d'identifier certains usages du livre : ainsi, la présence de chaînes caractéristique des usuels, fixés aux pupitres pour éviter les pertes par vol ou emprunt. Dans d'autres cas, les caractères origi-

naux des matériaux et des ornements, des marques héraldiques de possession ou des ex-libris signalent l'appartenance à une collection précise. À l'ouverture du manuscrit, on peut y découvrir des pages de garde faites de pièces rapportées, extraites d'autres manuscrits considérés par les relieurs comme moins précieux ou peu prisés parce qu'on n'en



Reims, B.M., ms. 1357 (XVe s., premier quart), contre agrafe en métal cuivreux estampé aux armes de l'archevêque Guy de Roye (1390-1409), possesseur du volume (écu à la bande posé sur une croix hampée)



Orléans, B.M., ms. 218 (190), contreplat sup. Sous le titulum crucis INRI peint dans une rosace, en bas, ex-libris en latin disant : « (Ce livre) appartient à Antoine Savary, prêtre curé de Haples près de Barastre [Pas-de-Calais] » (XVe s., 2^{ème} moitié). Cette Vie de Jésus-Christ était passée au XVIIIe s. dans la bibliothèque du monastère de Fleury (auj. Saint-Benoît sur Loire) : mention sur le premier feuillet, en haut.

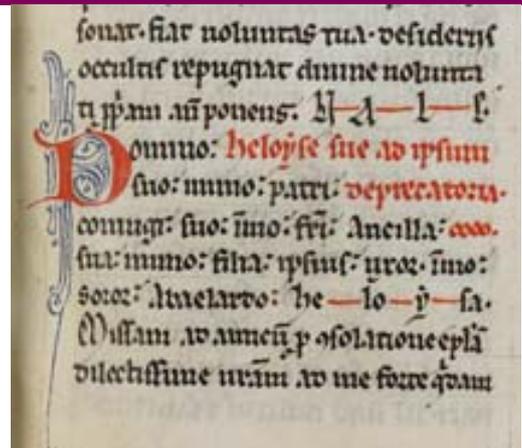
comprend pas le sens, faute d'en déchiffrer l'écriture, ce qui devait être le cas des manuscrits hébreux pour beaucoup de chrétiens. Un recensement systématique de ces fragments de manuscrits hébreux, qui sont quelquefois la seule trace attestée d'ouvrages perdus, est aujourd'hui en cours.

Parmi les divers modes de composition, une mise en page standardisée apparaît dès le XIIe siècle : le texte, placé au centre, est entouré de commentaires dans les marges, le tout étant calibré pour ajuster le commentaire au texte en tenant compte de leurs longueurs respectives. Trois siècles avant l'imprimerie, on a donc déjà inventé le manuscrit de consultation, encore enrichi par les index. La variété des contenus textuels, enfin, est infinie. Plusieurs œuvres réunies dans le même livre ont pu être copiées à des dates différentes. De cela, c'est l'écriture qui est le témoin de base, et l'une des compétences cultivées à l'IRHT consiste précisément à dater les écritures et à produire des catalogues de manuscrits datés. Quand le copiste n'indique pas lui-même la date d'achèvement dans la phrase finale ou

colophon, l'œil exercé du paléographe doit suppléer à l'absence d'indication explicite. Une méthode inattendue, mais d'une sûreté indiscutable, consiste à examiner les filigranes qui ornent certaines lettres initiales. Elle a permis de faire remonter d'un siècle, jusqu'aux années 1230-1240, la datation supposée du manuscrit Troyes, B.M. 802 : produit à Paris, il est désormais reconnu comme l'un des plus anciens et des plus complets témoins attestés de la correspondance d'Héloïse et d'Abélard. Des programmes de recherche spécifiques complètent cette activité fondamentale. Dans la section arabe, un financement européen soutient en ce moment l'étude de l'évolution de la pensée juridique musulmane et de sa structuration selon un système de normes juridiques, le fiqh.

Renaissance d'une collection sinistrée du XII^e siècle

En 1944, un drame survint à la Bibliothèque municipale de Chartres. L'incendie provoqué par un bombardement endommagea fortement les manuscrits médiévaux qui témoignaient d'une



Troyes, B.M., ms. 802, f. 78r. Initiale D filigranée marquant le début d'une des lettres d'Héloïse à Abélard, en latin : [la rubrique dit : « Requête d'Héloïse à lui-même »] ; le texte dit : « À son seigneur, bien plus, à son père, à son époux, bien plus, à son frère, sa servante, bien plus, sa fille, son épouse, bien plus sa sœur, à Abélard, Héloïse ».

période cruciale dans l'histoire intellectuelle de l'Occident : l'apogée de l'École de Chartres au XIIe siècle. Depuis 2006, une partie des feuillets froissés et rendus illisibles par la chaleur de l'incendie ont été traités par relaxation et humidification pour leur redonner leur forme initiale. Il faut maintenant les mettre en ordre, et identifier les fragments de textes. Ce défi est, pour l'historien médiéviste, l'occasion rêvée d'un enseignement vivant des méthodes d'analyse.

Une rencontre des cultures

L'histoire de la transmission des textes à laquelle se consacre l'IRHT fait donc une place de choix au rôle d'intermédiaire joué par les écoles et les bibliothèques. Elle conduit en même temps à faire surgir l'extraordinaire dynamisme des échanges entre cultures dans les domaines religieux, philosophiques ou scientifiques, à l'image même des livres manuscrits qui n'ont cessé d'être, pendant de longs siècles, des objets vivants. La conjonction de compétences fines et d'outils de valorisation à la pointe des nouvelles technologies est le meilleur atout pour entretenir, au profit d'un public élargi, le dialogue éclairé que s'efforce de construire l'IRHT. ■

Eric DARROUZET
Gilles KAGAN
Nicole BÉRIOU



Autun, B.M. S 89 (70), garde sup. v (XIIIe s.) d'un manuscrit d'œuvres médicales (fin XIIIe – déb. XIVe s.) : page des Institutes de Justinien avec la glose du juriste bolonais Accurse en marge. La miniature représente un prisonnier en chemise, encadré par deux clercs qui le présentent à un roi siégeant en justicier, le glaive à la main.

Romorantin, le projet oublié de Léonard de Vinci

Depuis les chansonniers des années 30, la pauvre ville de Romorantin est l'objet de moqueries motivées par son nom amusant et son supposé isolement. Sait-on seulement que François I^{er} et Léonard de Vinci songèrent un temps y construire le palais dont la cour de France ne disposait pas encore, un palais aux proportions gigantesques, de plus de 150 mètres de long, prolongé d'écuries, de places ornées de fontaines et de quartiers réservés à la noblesse ?

Le projet de palais double dans un feuillet du Codex Arundel, fol. 270v.

Des travaux menés depuis quelques années dans les archives de Romorantin ont conduit une équipe du Centre d'Études Supérieures de la Renaissance (CESR UMR CNRS / Université de Tours) à reconsidérer d'un autre œil les projets léonardiens en Sologne, reconnus depuis le XVIII^e siècle.

Comment écrire l'histoire d'un projet pratiquement sans archives puisque les comptes le concernant ont *a priori* disparu ? En 1972, un historien italien avait répondu à cette question en partant d'une relecture attentive des dessins de Léonard, d'une fine connaissance du contexte italien et d'une histoire rétrospective construite à partir de textes et de plans du XVIII^e et du XIX^e siècle. Lorsqu'à l'invitation du musée de Sologne, le CESR fût amené à rouvrir le dossier, l'optimisme n'était pas de mise, mais les chercheurs avaient tout de même en tête une méthode : partir des archives de la ville pour voir si l'entreprise léonardienne avait laissé des traces, puis mener une enquête de terrain à partir du cadastre ancien.

Les travaux avaient commencé

L'excitation fut grande quand les chercheurs découvrirent cinq volumes de comptabilité municipale concernant les années 1515-1519, couvrant donc la période de la présence en France de Léonard de Vinci, ainsi qu'un cadastre de 1820 révélant un « grand jardin » libre de construction à l'endroit où l'on supposait que le palais aurait été dressé. Grâce à l'aide de la ville de Romorantin, de la région Centre et du CESR, une équipe fut promptement constituée afin



de transcrire les textes arides mais prometteurs. En 2009, le CESR fut en état d'affirmer que le projet n'était pas resté un simple rêve d'architecte inspiré mais qu'il avait bien connu un début de réalisation puisque des milliers de tombereaux furent déplacés entre 1517 et le printemps 1518 pour mettre en état le lieu-dit de Mousseau et du Pont au Loup afin d'accueillir une terrasse à 5 mètres au-dessus de la Sauldre. En 2010, des fouilles archéologiques ont prouvé qu'une telle terrasse artificielle avait bel et bien été montée mais que ses matériaux n'apparaissaient pas dans les archives municipales, il fallait en déduire qu'on avait là affaire à des travaux payés sur le trésor royal. Peut-être s'agissait-il de ces investissements mystérieux mentionnés dans les Archives Nationales.

Un palais et d'importants aménagements hydrauliques

À quoi aurait bien pu ressembler le palais de Romorantin ? Il faut ici, pour commencer, partir des sources des *codices* léonardiens or ceux-ci racontent une histoire confuse car au moins cinq versions du projet ont survécu. Tout d'abord, une vue en perspective montre un édifice flanqué de pavillons carrés, situé sur une île accessible par deux ponts et présentant trois niveaux d'étages à arcades. Le bord de la rivière sur laquelle donnent les fenêtres du château est aménagé en gradins destinés à accueillir les spectateurs de joutes nautiques. Les autres propositions sont de simples plans : sur l'un d'eux, le palais est un quadrilatère à cortile à portique, doté de tours d'angles rondes avec des pièces carrées ainsi que d'une

>> Pour en savoir plus

Exposition « Léonard de Vinci : Romorantin, le projet oublié »,
exposition du 9 juin 2010 au 30 Septembre 2011
Musée de Sologne, 41200 Romorantin Lanthenay.

avant-cour flanquée d'écuries. Le bâtiment, équipé de façon hygiénique pour évacuer eaux usées et mauvaises odeurs, est conçu comme devant résister aux incendies. Un autre schéma offre une disposition similaire, à cette nuance prêt que le palais y est prolongé d'une place à colonnades, d'une longue avenue bordée d'une cinquantaine de maisons à colombages préfabriquées, ainsi que d'une église. Les deux derniers dessins évoquent des projets assez différents où cette fois les deux rives de la Sauldre canalisée sont aménagées: sur l'un d'eux, le palais réservé à la cour et aux officiers est situé sur la rive nord et les écuries sur la rive sud, sur l'autre, des palais jumeaux, sont prolongés en longueur de quartiers urbains et de places. Certains croquis suggèrent que les écuries étaient extrêmement sophistiquées, avec leurs mangeoires et leurs systèmes automatiques de nettoyage. Quelle option avait la préférence de François Ier? On l'ignore, néanmoins, on suppose que le fait que le Roi et sa mère, Louise de Savoie, aient fait appel spécifiquement à Léonard, qui, en 1506, avait déjà travaillé pour Louis XII et Georges d'Amboise, suppose que les aménagements hydrauliques revêtaient une certaine importance et que les antécédents italiens de palais (palais de Léon X, palais d'Urbino, rêves de Francesco di Giorgio ou de San Gallo) ont pu servir de base d'inspiration. Par ailleurs,

Léonard semble avoir été aussi intéressé par l'architecture gothique civile à la française, celle qu'illustrent les *Très Riches Heures du Duc de Berry*, il dessine ainsi des tours rondes avec des pièces rectangulaires, une idiosyncrasie française, ou des escaliers à rampe en double spirale typiquement solognots. La relecture des *codices* de Léonard à l'aune de cartes récentes et d'une étude sur le terrain, révèle par ailleurs l'intrication du projet palatial et des aménagements hydrauliques de la région. En effet, la condition même du début du chantier était la réalisation d'un canal joignant le Cher à la Sauldre afin de rendre cette dernière navigable, d'amender des terres, de nettoyer la ville et de pourvoir en énergie les moulins romorantinois afin d'encourager l'artisanat local. La tâche était titanesque puisque le dénivelé à rattraper était de 40 mètres ce qui aurait supposé des pompes aussi puissantes que celles de la future machine de Marly. À terme, Léonard envisageait même de conduire ses canaux jusqu'à Lyon, liant le réseau rhodanien au réseau ligérien!

Pourquoi le projet fut-il abandonné?

Peut-être François Ier a-t-il simplement changé d'idée, peut-être aussi la santé déclinante de Léonard rendait-elle impossible l'achèvement des travaux. Toutefois, l'on peut proposer un autre épilogue à cette histoire en rappelant



qu'en 1518, Léonard s'entretint au Clos Lucé avec Dominique de Cortone. Or, cet architecte élève de Francesco di Giorgio, semble avoir été l'auteur d'une maquette en bois qui fut retrouvée dans un grenier de Blois en 1682. L'objet, apparaissait comme une ébauche léonardienne de ce que serait Chambord: quadrilatère flanqué de tours, colonnades, symétrie centrale autour d'un escalier à deux rampes droites plus une. Il se peut donc que Chambord, pour la construction duquel Cortone avait envisagé le creusement d'un canal d'approvisionnement en matériaux, ait été une sorte de plan B substitué « modeste » à l'ambition avortée d'un « Versailles » poussant sur les bords de Sauldre. ■

Maquette proposant une restitution du cortile intérieur de Romorantin (réalisation du Musée Léonardien de Vinci)

Contact:

Pascal BRIOIST,
pascal.brioist@univ-tours.fr
Centre d'Études Supérieures de la Renaissance



Le Mabon, ruisseau correspondant au dessin par Léonard de Vinci d'un tracé de canal Cher-Sauldre



Restitution 3D virtuelle d'une maquette vue par André Félibien en 1682 dans un grenier de Blois.

Acquisition et indexation de textes de la Renaissance

Les sites offrant des fac-similés numériques de documents patrimoniaux, surtout d'ouvrages anciens de la période 1500-1650, rencontrent de nombreuses difficultés liées à des performances médiocres de la reconnaissance automatique de caractère et d'importantes variations graphiques. Celles-ci sont en passe d'être résolues.

La langue des classiques de la Renaissance (Montaigne, Ronsard, Rabelais) dans sa forme originale n'est pas aisée à traiter avec les outils linguistiques habituels. Le programme des Bibliothèques Virtuelles Humanistes (BVH) fournit des fac-similés numériques et des transcriptions qui sont les résultats de traitement par « Optical Character Recognition » (OCR) ou des transcriptions externalisées. Selon le niveau de scientificité et d'authenticité à at-

teindre, l'acquisition du texte peut conserver les graphies « quasi-diplomatiques », c'est-à-dire présentant l'usage ancien de *i/j* et *u/v* et des abréviations appelées « brévigraphes » (comme *ā* pour *an*, ou *am*), ou les régulariser.

L'utilisateur qui n'est pas un spécialiste ne trouvera que peu de résultats dans sa requête de mots ou de chaînes de caractères, à cause de ces « brévigraphes » (*faço* pour *façon*), d'une morphologie obsolète (*veus* pour *veux*, *moyp* pour *moi*), auquel s'ajoute le manque fréquent des tirets de coupure de mots en fin de ligne. Dans les éditions modernes qui respectent les graphies originales, on trouvera facilement la graphie « estude », mais si on cherche « étude », la variante ancienne ne sera pas proposée.

Quelle requête faire ?

Les corpus de Google ou de Gallica comprennent un grand nombre d'éditions de textes de la Renaissance, éditions qui ont, surtout depuis le XIXe siècle, modernisé plus ou moins l'orthographe. Lorsque sont conservées les graphies du français de l'époque (comme dans *veus*, *estude*, *moy*), il n'y aura pas de résultats dans Google Livres pour une requête portant sur « *veux* », « *étude* », « *moi* », sauf des suggestions de correction orthographique, grâce à de très puissants outils statistiques.

Ces suggestions peuvent ne pas être pertinentes. Supposons qu'une personne désire retrouver le contexte de l'expression exacte « *Que sais-je ?* », très célèbre, même si on sait qu'il s'agit de la devise de Montaigne. Si « *que sais-*

je ? » est recherché dans Google Livres, on n'aura accès qu'aux éditions modernes. Et si « *que sçais-je ?* » est recherché pour consulter une édition originale, on n'obtiendra pas de résultats, sauf pour les graphies alternatives que *scais-je/ que sçais-je* (*c/ ç* est neutralisé par le moteur de Google). Or l'outil « Analog » permettra d'accéder à « *que sçais-je ?* » à partir de l'orthographe moderne.

Pour fournir à l'usager un outil de recherche accessible, l'équipe des BVH développe deux méthodes d'amélioration des outils de recherche :

- la génération automatique de versions modernisées du texte (avec expansion des brévigraphes, modernisation des *i/j* et *u/v*), pour lesquelles les outils d'indexation habituels sont plus efficaces; en partenariat avec la société Digiscrib qui développe un progiciel spécifique.
- l'élaboration d'une indexation et d'un outil de recherche nouveaux et adaptables, avec extension automatique de la requête (moderne) aux autres formes présentes dans le texte; en partenariat avec le laboratoire FORELL (Université de Poitiers) pour l'outil Analog.

Au bout d'une année de recherche, les résultats seront livrés en open-source.

Des outils interactifs

Le Centre d'Étude Supérieur de la Renaissance (CESR, UMR CNRS / Université de Tours) travaille en collaboration avec le Laboratoire Informatique de Tours (LI - EA 2101 - PolytechTours) dans le domaine des « Digital Humanities ». Le LI a mis au point le



Illustration extraite du Roman de Tristan, chevalier de la Table Ronde - Anonyme, 1496 (Tome I, feuillet 18). (© Médiathèque Équinoxe Châteauroux Fonds Bourdillon)



Feuillelet extrait de *De civitate Dei* - Augustinus (sanctus), 1467.
(© Bibliothèque Municipale Bourges)

logiciel « Agora » de traitement automatique des images de documents anciens numérisés. Il permet l'identification et l'extraction automatique de différents éléments de contenu pouvant apparaître dans les ouvrages anciens et pouvant intéresser les historiens (letrines, bandeaux, portraits, notes manuscrites en marge, signatures...). Outre la définition d'algorithmes de traitement d'images suffisamment robustes pour supporter les spécificités des images de documents anciens, l'originalité des travaux réside dans la production d'une méthodologie générique, facilement adaptable à divers types d'images, interactives, et adoptant une approche incrémentale d'analyse du contenu des images. Contrairement à la plupart des logiciels

d'OCR exploitant classiquement une méthode de reconnaissance séquentielle des caractères, « Agora » procède par analyse de la redondance des formes extraites des images. Cette technique ne reconnaît pas les caractères isolément et indépendamment des autres mais regroupe les formes similaires en clusters sans rechercher à les identifier. Ce procédé est d'autant plus adapté aux documents anciens ou bruités qu'il ne nécessite pas de connaître au préalable les différentes formes (de caractères) qui vont apparaître ou devoir être reconnues.

Une fois les clusters de formes construits à l'aide d'un algorithme assez rapide pour traiter les millions de caractères ou morceaux de caractères pouvant apparaître dans l'ensemble des pages

gfe nestoit que ceste clause. Fay ce que
voudras. Par ce que gens liberes,
bien nez, bien instruits, conuersans en
compaignies honnestes ont par nature
vn instinct, a agussion, qui tousiours les
pouise a faictz vertueuz, & retire de vi-
ce lequel ilz nōmoient honneur. Iceulz

Extrait du feuillet 150 verso de *La vie treshorifique du grand Gargantua*
- François Rabelais, 1542. (© Médiathèque Équinoxe Châteauroux, Fonds
Bourdillon)

DEUX BOURSES DE RECHERCHE GOOGLE

« Google » a récompensé les recherches du CESR et du LI en leur accordant une bourse de 50000 \$ chacun. Ces financements concernent le développement d'outils innovants afin de permettre un traitement adapté de la typographie ancienne et d'améliorer les résultats des requêtes sur les textes en français de la Renaissance. Ces travaux affrontent deux difficultés importantes rencontrées par les bibliothèques numériques qui comprennent des documents patrimoniaux antérieurs à 1700 : les performances médiocres de la reconnaissance de caractères et l'importante variation graphique qui précède la stabilisation de l'orthographe moderne.

d'un ouvrage, il devient possible d'analyser et d'exploiter les clusters produits. Les chercheurs du LI proposent de définir différentes briques logicielles et interfaces permettant d'assigner automatiquement ou semi-automatiquement un identifiant à chacun des clusters pour obtenir une transcription de la majeure partie du texte en seulement quelques clics (de manière collaborative ou non). Les 200 plus gros clusters regroupent bien souvent plus de 80 % des caractères constituant le texte. Cette information sur la redondance des formes dans les ouvrages peut aussi être utilisée pour effectuer des analyses typographiques (production et exploitation de fontes anciennes, étude et suivi du matériel typographique utilisé par les imprimeurs de l'époque...). ■

ff o e Q x n e n s ß n a

Exemples de formes particulières pouvant apparaître dans les ouvrages anciens

Contacts:

Marie-Luce DEMONET – CESR

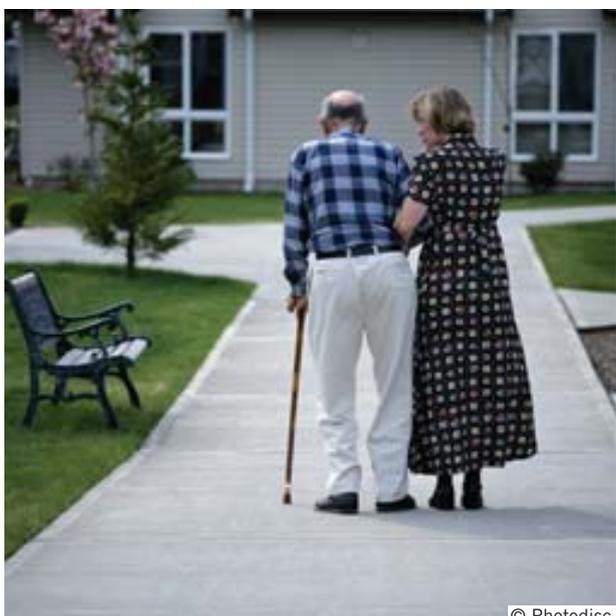
marie-luce.demonet@univ-tours.fr

Jean-Yves RAMEL - Laboratoire d'Informatique de Tours

ramel@univ-tours.fr

Le financement de la dépendance : entre le marché et l'État

Alors que l'année 2010 a été marquée par la réforme des retraites, l'année 2011 pourrait être celle de la remise à plat du financement de la dépendance.



© Photodisc

La dépendance, un risque principalement de fin de vie

La dépendance est une situation dans laquelle une personne ne peut plus assurer seule les gestes de la vie quotidienne comme se déplacer ou se laver et nécessite une assistance régulière à domicile ou dans un établissement spécialisé. C'est un risque apparaissant principalement en fin de vie. La probabilité à 65 ans de terminer sa vie dépendant est de 40 % en moyenne (OCDE 2005). Les femmes dont l'espérance de vie est supérieure à celles des hommes sont une population à risque. 52 % des femmes passent par une phase de dépendance contre seulement 29 % des hommes (OCDE 2005). La durée moyenne de dépendance lorsqu'elle survient est d'environ quatre ans pour les hommes et cinq ans pour les femmes.

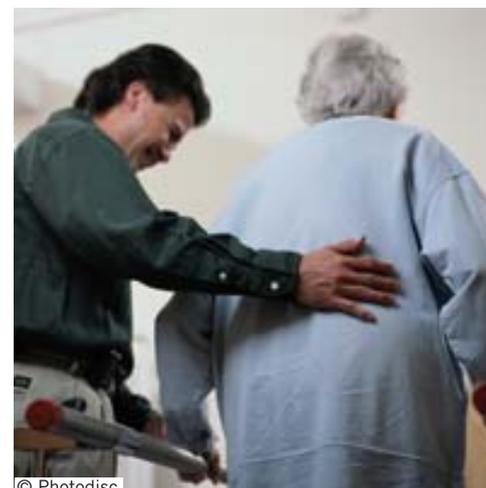
La création de l'Allocation Personnalisée d'autonomie (APA) en 2001 a constitué une étape importante dans la prise en charge de la dépendance. Délivrant une prestation moyenne de 450 euros, elle est cependant insuffisante pour couvrir les frais de maintien à domicile ou d'hébergement en établissement. Avec un coût de la dépendance compris entre 2000 et 3000 euros par mois et une retraite moyenne de 1 000 euros pour les femmes et de 1 600 euros pour les hommes, le reste à charge pour les ménages peut s'élever jusqu'à 1 000 euros, voire plus pour les petites retraites. Par ailleurs, le coût de la dépendance augmentera dans les décennies à venir avec l'arrivée aux âges élevés de la génération du baby-boom. Le nombre de personnes âgées dépendantes, qui est d'environ 1,2 million aujourd'hui, pourrait atteindre plus de 1,5 million en 2040. Il apparaît ainsi primordial d'anticiper cette évolution et de mettre en place dès à présent un mode de financement viable permettant d'assurer une prestation suffisante aux personnes dépendantes et à leur famille.

Recourir au marché pour financer la dépendance

Alors que le gouvernement évoque la solution d'un financement privé obligatoire, il convient de s'interroger sur les avantages comparés des modes de financement public et privé. Une première possibilité est l'assurance facultative qui repose sur la souscription volontaire de contrats privés d'assurance dépendance. Cinq millions d'individus ont souscrit un contrat dépendance en France, ce qui est à la

fois beaucoup en comparaison des autres pays développés et peu puisque la majorité de la population éligible n'est pas couverte. De plus, un grand nombre de contrats sont souscrits dans le cadre d'une garantie optionnelle ou dans un cadre collectif dans lesquels les cotisations versées sont souvent modiques et ne permettent pas d'obtenir une couverture suffisante.

Rendre obligatoire dès 50 ans la souscription d'une assurance dépendance privée comme le préconise le rapport de la députée Rosso-Debord rendu public pendant l'été 2010 permettrait de remédier au défaut d'assurance des ménages mais n'est pas exempt de critiques. Certes, comme le soulignent les défenseurs de cette option, l'obligation légale de contracter une assurance privée existe déjà dans l'assurance habitation et l'assurance automobile. Le risque assuré est toutefois très différent. Dans l'assurance auto et habitation, les assurés peuvent changer d'assureur chaque année et ainsi faire jouer la concurrence,



© Photodisc

ce qui n'est pas le cas de l'assurance dépendance, marché sur lequel l'assuré se lie à un assureur pour une période se comptant en décennies sans pouvoir renégocier les termes de son contrat ni transférer sa police chez un autre assureur. Cette solution est actuellement envisagée par le gouvernement soucieux de contenir la hausse des prélèvements obligatoires. Remarquons cependant qu'une cotisation obligatoire même payée auprès d'un assureur de son choix conserve toutes les caractéristiques d'un prélèvement obligatoire.

Un marché imparfait

De plus, le marché de l'assurance dépendance ne fonctionne pas bien en l'état actuel. Il est très concentré et peu concurrentiel. Parmi la trentaine de sociétés présentes sur le marché, quatre d'entre elles représentent en 2009 81 % des personnes couvertes et 74 % de la collecte globale. Chaque assureur ayant sa propre définition de l'état de dépendance, les contrats sont peu lisibles et la concurrence en prix est faible. Les dispositions des contrats sont par ailleurs peu attrayantes. La cotisation peut être réévaluée unilatéralement par l'assureur en cours de contrat en fonction de l'évolution de la sinistralité constatée. Seuls les états de dépendance les plus lourds sont assurés. La prestation prend la forme d'une rente viagère proportionnelle aux versements passés sans égards au coût réel de la prise en charge. Enfin, un délai de carence généralement de trois ans court après la souscription du contrat pendant lequel l'état de dépendance n'est pas assuré (le contrat est résilié si le risque de dépendance se réalise pendant cette période). Il serait par conséquent dangereux de simplement décréter l'obligation de s'assurer sans une réforme de fond du marché incluant la mise en place d'une grille commune d'évaluation des états de dépendance pour tous les assureurs, la création d'un contrat standard que



© Photodisc

tout assureur devrait proposer et dont les frais de gestion seraient négociés au plus juste par la puissance publique et la possibilité de transférer son contrat d'un assureur à un autre.

La solution publique

Une solution plus simple et plus juste consisterait à mettre en place un fonds de réserve alimenté par une revalorisation de la Contribution Sociale généralisée (CSG). Le fonds permettrait dès aujourd'hui d'améliorer les prestations versées dans le cadre de l'APA. L'accumulation d'excédents les premières années permettrait de faire face dans une quinzaine d'années à l'arrivée des classes nombreuses du baby-boom aux grands âges, stade de la vie où le risque de dépendance est élevé. Comparée à l'assurance individuelle obligatoire, cette solution ne proportionne pas les prestations aux montants précédem-

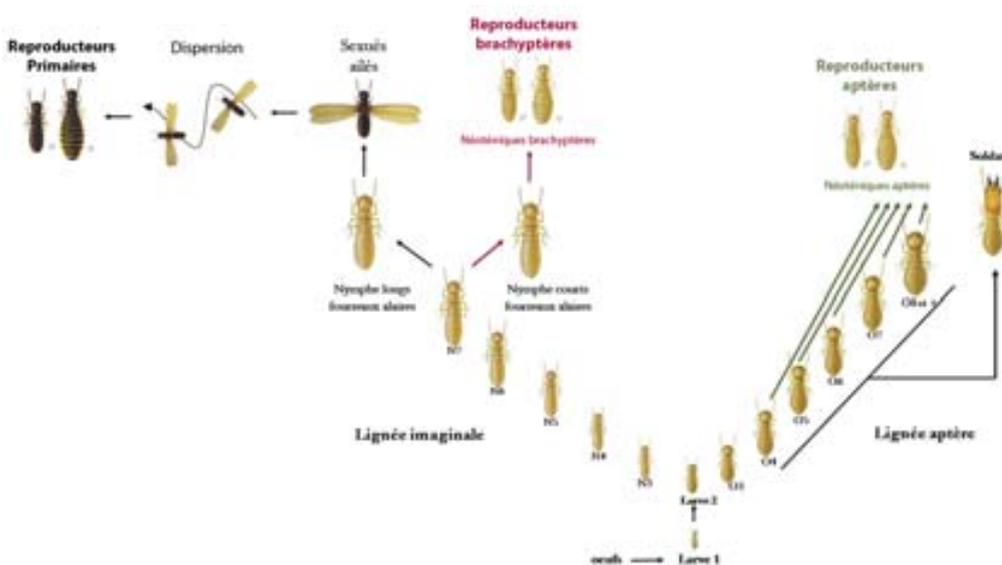
ment versés et ne crée pas d'inégalité face au risque de dépendance. Enfin, elle serait bien moins coûteuse. Il est connu que la Sécurité sociale publique fonctionne avec des frais de gestion inférieurs à ceux du privé, lequel doit financer les frais de promotion et de distribution des produits et la rémunération des actionnaires. La fragmentation de l'offre et l'individualisation des contrats ne permettent pas non plus d'exploiter les économies d'échelle dont bénéficie le régime public. Sur le marché américain, des études montrent que les détenteurs d'un contrat privé dépendance reçoivent en espérance seulement 82 centimes de prestations pour chaque dollar versé. ■

Contact

Alexis DIRER
alexis.direr@univ-orleans.fr
Laboratoire d'Économie d'Orléans

Les termites, un monde de castes

À l'instar des autres insectes vivant en sociétés, les termites ont développé un système de castes élaboré. Chaque individu de la colonie appartient à l'une ou l'autre caste et peut même dans certaines conditions en changer. Les aspects écologiques, physiologiques et génétiques de cette différenciation des castes sont étudiés par l'Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte (IRBI, UMR 6035 CNRS / Université de Tours).



Lignées et castes des termites européens du genre *Reticulitermes*. (© Christophe LUCAS/ IRBI)

Les termites vivent au sein de sociétés organisées pouvant compter plusieurs dizaines de milliers d'individus. En raison de différences morphologiques et comportementales, ils se répartissent dans différentes castes (ouvriers, soldats et reproducteurs). À la différence de l'hémisphère sud, toutes les espèces de termites européennes sont souterraines, localisées dans le sous-sol et dans le bois mort qu'ils consomment. Ils se rencontrent en milieu naturel (forêt) et parfois en milieu urbain. Leur présence dans les villes est due aux transports de matériaux de diverses natures (remblais, terre, bois, etc.) entre différents sites. Les termites sont présents ainsi dans toutes les grandes villes françaises. À la différence des colonies de guêpes qui ne vivent que quelques mois, les sociétés de termites sont plus péren-

nes ; elles peuvent se développer sur plusieurs années.

La naissance d'une colonie

Une fois par an, des termites ailés (futurs reproducteurs) s'envolent et quittent leur colonie mère (essaimage). Ce sont les seuls individus de la colonie à posséder des ailes. Lorsqu'ils se posent au sol, c'est pour se mettre en couple. Ils s'arrachent les ailes et recherchent un endroit pour fonder leurs futures colonies. Ils creusent la première salle souterraine de la termitière, ils vont s'y accoupler et y vivre toute leur vie, sans jamais revoir la lumière du jour. La ponte d'œufs devient l'unique activité de la femelle, et l'accouplement celle du mâle. Ils représentent le couple de reproducteurs primaires de la colonie, aussi appelés la reine et le roi. Ils s'occupent

des premiers œufs qui donneront les premières larves de la colonie.

Une société de castes

Chez les termites, le système de castes est plus complexe que chez les autres insectes sociaux, car sous certaines conditions les individus peuvent changer de caste. Cette capacité de changement permet aux colonies de s'adapter aux modifications de leur environnement.

Les larves peuvent se développer en deux lignées différentes. La première lignée (lignée nymphale, royale ou sexuée) est celle des nymphes qui donneront plus tard des individus sexués. Certains individus développent de longs fourreaux alaires (embryons d'ailes). Lors de la dernière mue, ils deviennent adultes avec de grandes ailes en abhorrant une livrée noire. Ce sont les reproducteurs primaires, c'est-à-dire les reines et rois de futures colonies. D'autres nymphes présentent de courts fourreaux alaires, avec une couleur jaunâtre. Elles restent dans la colonie mère et s'y reproduisent, renforçant ainsi le pouvoir reproducteur de la colonie. Ce sont les reproducteurs secondaires ou néoténiques brachyptères.

La seconde lignée (lignée aptère) contient le plus grand nombre d'individus (80-90 % de la colonie). Les larves se développent en ouvriers qui se chargeront de toutes les tâches de la colonie. Ils construisent la termitière, cherchent la nourriture, nourrissent les autres castes incapables de se nourrir seules (reproducteurs et soldats), s'occupent des œufs et des larves des



© Simon DUPONT / CNRS



© Eric DARROUZET / IRBI

Couple de reproducteur primaire (roi et reine, individus pigmentés) de termites *Reticulitermes flavipes*, entouré d'ouvriers blanchâtres. La reine présente un large abdomen (cliché S. Dupont).

Souche de bois colonisée et consommée par des termites.

premiers stades, etc. Ils sont blanchâtres et sont dépourvus d'yeux et d'ailes. Les ouvriers ont la capacité de se transformer morphologiquement par mue et ainsi de changer de caste. Ils peuvent se transformer en soldats avec une grosse tête pigmentée pourvue de mandibules; ils sont spécialisés dans la défense de la colonie contre les prédateurs (principalement les fourmis). Les ouvriers peuvent aussi se transformer en individus sexués dépourvus d'ailes, appelés néoténiques aptères. Ils semblent jouer le même rôle que les précédents néoténiques.

Des interactions multiples

Les milliers d'individus d'une colonie, issus du roi et de la reine, sont tous frères et sœurs, ils partagent le même bagage génétique. Malgré cela, ils se répartissent au sein de différentes castes avec des spécificités morphologiques, physiologiques et comportementales. Comment l'environnement ou les interactions comportementales peuvent influencer l'expression des gènes d'un individu au point d'entraîner des modifications profondes de son anatomie? Ces changements d'expression des gènes vont, à leur tour, modifier le comportement de l'individu ce qui aura un impact sur ses relations sociales avec les autres individus de la colonie et sur

l'évolution de la colonie dans son environnement. Cette globalité d'interactions entre environnement, génétique et comportement est à la base d'études réalisées à l'IRBI.

Comment devenir soldat?

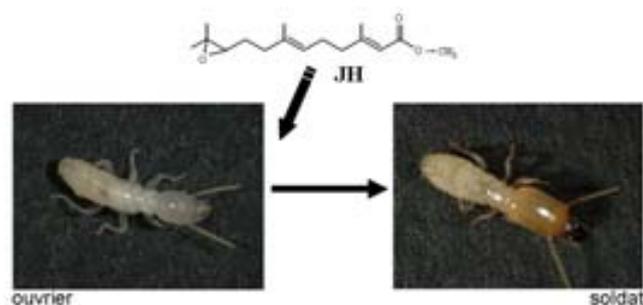
Une piste hormonale est à l'étude. L'hormone juvénile (JH) est l'une des principales hormones chez les insectes. Elle joue de nombreux rôles à divers stades de développement. Chez les larves, elle maintient les caractères juvéniles en favorisant les mues larvaires et en retardant la métamorphose (dernière mue qui donne un adulte). Chez l'adulte, la JH régule, entre autres, la reproduction. Des études ont montré sa capacité à induire la différenciation d'ouvriers termites en soldats. L'application de JH naturelle, ou d'analogues chimiques de la JH (JHA), par voie topique (contact sur le corps) et/ou alimentaire permet d'induire expérimentalement une différenciation d'ouvriers en soldats. En conditions naturelles, une augmentation brève de son taux dans l'hémolymphe (le sang des insectes) entraîne cette différenciation. En utilisant un JHA, les chercheurs de l'IRBI ont obtenu un rendement de 99 % de transformation des ouvriers en soldats. Ils analysent actuellement les mécanismes à la base de cette transformation. Quels sont par

exemple les facteurs environnementaux qui peuvent modifier le taux de JH dans l'hémolymphe et comment l'hormone entraîne ensuite la transformation de l'individu?

Des insectes utiles?

Les termites font partie des insectes qui ont mauvaise réputation. Ils sont considérés comme nuisibles en raison des dégâts qu'ils peuvent causer dans les habitations. Cependant, en milieu naturel, ils ont un rôle déterminant en assimilant les arbres morts et/ou malades. Ils participent ainsi au maintien de l'équilibre de l'écosystème forestier et au recyclage de la biomasse végétale. ■

Contacts:
Eric DARROUZET
eric.darrouzet@univ-tours.fr
Christophe LUCAS
christophe.lucas@univ-tours.fr



Un ouvrier termite (*Reticulitermes flavipes*) peut changer de caste et se transformer en soldat sous l'influence de l'hormone juvénile (JH). (© Eric DARROUZET / IRBI)



© LIENSs – Armelle COMBAUD

Prélèvement de Pourpres sur l'île de Ré.

Les pigments marins et terrestres, source de médicaments anticancéreux

En plus de leur fonction écologique, de nombreux pigments terrestres ou marins présentent des activités pharmacologiques d'intérêt pour détruire les cellules cancéreuses. La synthèse chimique de dérivés de ces pigments permet l'obtention de molécules plus sélectives, moins toxiques, et échappant à la chimiorésistance.

En dépit de progrès significatifs dans la prévention, le diagnostic et le développement de traitements innovants, le cancer représente encore la seconde cause de mortalité dans les pays développés. La découverte de nouvelles molécules anticancéreuses constitue donc un enjeu majeur de santé publique, permettant d'augmenter l'espérance et la qualité de vie des patients.

Des chercheurs de l'équipe « Molécules à Activité Biologique » du Laboratoire Littoral, Environnement et Sociétés (LIENSs UMR 6250 CNRS / Université de La Rochelle), travaillent à l'interface biochimie / chimie / pharmacologie pour synthétiser, extraire, purifier, et caractériser des pigments anticancéreux d'origine terrestre ou marine. L'évaluation de l'activité biologique de ces pigments est réalisée sur des lignées de cellules cancéreuses (cancer du sein, du poumon...), ou sur des cibles pharmacologiques isolées, telles que des enzymes intervenant dans la prolifération de

ces cellules. Ces études peuvent être complétées par la modélisation moléculaire de leur interaction avec ces cibles pharmacologiques.

Les indirubines, des pigments avec un fort potentiel

Dans les années 60, l'Académie de Médecine Chinoise étudia le *Danggui Longhui Wan*, un mélange de plantes efficace contre la leucémie myéloïde chronique, afin d'en purifier le principe actif. En testant séparément chez l'homme chacun des onze ingrédients de cette préparation, un seul (le *Xing Dai*) se révéla posséder l'activité thérapeutique. Celui-ci était une poudre bleue, extraite de plantes produisant de l'indigo. Les chercheurs ont montré que l'indigo était inactif mais qu'un contaminant mineur, l'indirubine, était responsable de l'activité anti-leucémique. La pourpre contenue dans les sécrétions hypobranchiales de mollusques gastéropodes tels que les *Murex* s'est également révélée contenir,

outre le 6,6'-dibromoindigo dominant, différentes indirubines diversement bromées.

En 1999, au cours de criblages de composés issus de la pharmacopée chinoise, l'indirubine et ses dérivés ont été identifiés comme des inhibiteurs des kinases dépendantes des cyclines (CDKs), des enzymes contrôlant le bon déroulement du cycle cellulaire et dont le fonctionnement est souvent dérégulé lors de la division des cellules cancéreuses. Plusieurs équipes ont depuis démontré l'activité de dérivés d'indirubines sur d'autres cibles pharmacologiques, telles que la kinase GSK-3. Les kinases, en particulier les CDKs et la GSK-3, représentent une des plus grandes familles d'enzymes impliquées dans la transduction du signal intracellulaire. Leur dysfonctionnement ou suractivation est à l'origine de nombreux cancers, maladies neuro-dégénératives et autres pathologies. L'obtention de ligands sélectifs et puissants capables de moduler l'activité de ces enzymes est



© LIENSs – Armelle COMBAUD

Extraction de la glande source d'indirubines



La pourpre, Ocenebra

donc importante. Des chercheurs du LIENSs se focalisent sur la synthèse chimique et l'évaluation biologique de nouveaux indigoïdes, structurellement proches des indirubines naturelles isolées du milieu marin, mais différant par l'ajout de cycles ou de groupements fonctionnels dans leur structure. La synthèse de séries d'indirubines diversément pharmacomodulées a d'ores et déjà permis d'obtenir des molécules très sélectives pour certaines CDKs. Elles sont en cours d'évaluation préclinique.

La violaxanthine, un composé contre des cellules cancéreuses du sein

Un travail de thèse récemment mené au LIENSs en collaboration avec le laboratoire IFREMER PBA de Nantes a mis en évidence par une approche bio-guidée, l'activité cytotoxique d'un pigment caroténoïde bien décrit pour son rôle écologique, la violaxanthine. À partir de la micro-algue marine *Dunaliella tertiolecta* (chlorophyte) cultivée en photobioréacteur, différents extraits ont été réalisés et évalués sur des lignées de cancer du sein et de la prostate. Un des extraits présentant une forte activité cytotoxique a été sélectionné puis la molécule majoritairement responsable de l'activité, purifiée. La caractérisation structurale de cette molécule par spectrophotométrie et spectrométrie de masse a permis d'identifier la violaxanthine, un pigment caroténoïde époxydé.

Cette molécule présente chez certaines microalgues est impliquée dans les mécanismes de photo-protection, et subit une dé-époxydation enzymatique réversible, connue sous le nom de « cycle des xanthophylles », en cas de forte irradiation lumineuse. Ce cycle participe indirectement à la dissipation thermique de l'excès d'énergie apporté par la forte irradiation.

Les travaux menés sur la violaxanthine purifiée à partir de *Dunaliella* ont démontré qu'elle inhibait *in vitro*, de façon dose-dépendante, et pour des concentrations très faible (0,2 μm), la croissance d'une lignée de cancer du sein hormono-dépendante. Les cellules traitées montrent des signes d'apoptose

précoce, un processus de mort cellulaire programmée comparable à un suicide cellulaire. L'analogie structurale de la violaxanthine avec d'autres époxycaroténoïdes ayant montré des activités antiprolifératives, telle que la fucoxanthine, suggère l'existence de cibles pharmacologiques communes, et confirme que le degré d'époxydation du caroténoïde influence sa cytotoxicité. Les époxycaroténoïdes sont abondants dans les fruits et légumes mais il n'existe pas d'évidence formelle qu'ils soient résorbés après consommation alimentaire chez l'homme. Chez la souris, la fucoxanthine est métabolisée avant résorption et ne présente pas de toxicité aiguë ou chronique, même à forte dose. Ainsi, si la consommation de microalgues comme aliment fonctionnel apportant des époxycaroténoïdes n'a probablement pas d'intérêt pour la prévention ou le traitement du cancer, ces pigments ainsi que leurs dérivés pharmacomodulés pourraient toutefois présenter une utilité pour des traitements par voie systémique. Des études complémentaires seront nécessaires pour préciser leur pharmacologie et valider leur intérêt *in vivo*. ■



© LIENSs – Armelle COMBAUD

La microalgue marine *Dunaliella tertiolecta*, source de violaxanthine

Contacts:

Laurent PICOT

lpicot@univ-lr.fr

Valérie THIERY

vthierry@univ-lr.fr

Les plaines côtières menacées par les tempêtes extrêmes

Les surcotes⁽¹⁾ provoquées par les tempêtes sont des causes majeures des submersions marines et de l'érosion des côtes. Les plaines côtières et marais s'étendant de la Gironde à la Vendée représentent, en termes de superficies inondables, un des domaines côtiers le plus menacé de France.

Ces vastes territoires sont situés sous le niveau de la mer en conditions de marée haute de vive eau. Si les digues ou les dunes qui protègent ces territoires sont submergées, l'inondation marine peut toucher des surfaces considérables (plusieurs centaines de km²). C'est ce qui s'est passé lors des tempêtes « Martin » (décembre 1999) et « Xynthia » (février 2010) et qui risque de se reproduire à une fréquence accrue. En effet, le réchauffement climatique entraîne une élévation eustatique⁽²⁾ du niveau marin et augmente le risque de submersion des côtes. Il pourrait entraîner une augmentation des instabilités climatiques et une augmentation de la fréquence des tempêtes responsables des surcotes et des submersions marines.

Principales causes des submersions marines

Le risque d'inondation en domaine littoral dépend du niveau de l'océan et de l'altitude de la zone côtière. Le niveau de l'océan est lui-même contrôlé par la marée, la pression atmosphérique, le vent et les vagues.

La marée sur les côtes atlantiques françaises est semi-diurne avec une grande vive eau⁽³⁾ par mois. Lors des marées hautes de vive eau, les surcotes peuvent avoir des conséquences catastrophiques car elles peuvent s'ajouter aux niveaux extrêmes de marée. Lors des tempêtes, la chute de pression atmosphérique provoque une élévation du niveau marin. C'est le phénomène du baromètre inverse : une chute de pression de 1 hPa (hectopascal) entraîne une élévation du plan d'eau de 1 cm. Ainsi une dépres-

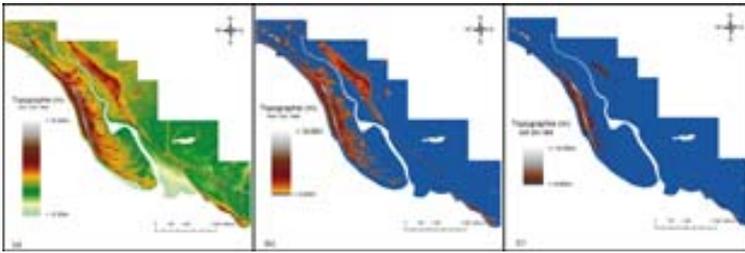
sion atteignant 968 hPa (cas de « Xynthia ») provoque une élévation du plan d'eau de 45 cm (la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est de 1013 hPa). Le vent contribue aussi à élever le niveau marin en repoussant l'eau à la côte. L'effet du vent est difficile à quantifier car il dépend de nombreux paramètres : vitesse, direction et durée du vent, fetch⁽⁴⁾, profondeur d'eau, rugosité du plan d'eau liée aux vagues. Les vagues contribuent à l'élévation du niveau marin selon plusieurs processus. En se déformant dans les zones côtières, elles induisent des contraintes orientées vers la côte et liées à la diminution de leur taille en se rapprochant du rivage. À cet effet s'ajoute l'effet des rouleaux. Ces deux processus génèrent une surélévation du plan d'eau de l'ordre de 10 à 20 % de la hauteur des vagues. Localement, celle-ci peut atteindre des valeurs plus élevées si les vagues défer-

lent sur des zones en pente forte. Enfin au niveau du rivage, le déferlement des vagues entraîne des fluctuations du plan d'eau pouvant propulser en hauteur de grandes quantités d'eau.

Les côtes dominées par les houles sont régulièrement soumises à des vagues importantes. Mais les barrières naturelles (plages et dunes) sont des obstacles relativement efficaces à la submersion et à la dissipation de l'énergie des vagues. À l'opposé, les côtes dominées par les marées (estuaires, lagunes, baies) offrent des barrières d'altitudes réduites. Elles sont caractérisées par des marais et plaines côtières de faibles altitudes représentant des territoires de sédimentation récente gagnés sur l'océan, sous l'effet de processus naturels, parfois amplifiés par la poldérisation. De plus, les estuaires, lagunes et baies sont généralement des lieux où l'onde de marée et les surcotes sont amplifiées. Pour ces raisons, ce sont

Vue aérienne de la pointe d'Arçay et de l'estuaire du Lay (à droite de la photo) et du pertuis breton et de l'île de Ré (à gauche de la photo). Au niveau de la Pointe d'Arçay, les dunes localisées au sud (gauche de la photo), sur la côte dominée par la houle, sont une protection côtière naturelle à la submersion. Au nord de la pointe (droite de la photo), la côte dominée par la marée qui borde l'estuaire du Lay est plane et n'offre pas de protection à la submersion. C'est par cet estuaire que la submersion principale a eu lieu.





Modèles numériques de la zone côtière de la Pointe d'Arçay et des communes de la Faute et de l'Aiguillon sur mer. (a) Le code de couleur indique les variations d'altitude. (b) Les territoires sous le niveau de la mer dans des conditions de marée haute de vive eau sont en bleu. Le cordon dunaire et les défenses de côte offrent un rempart continu face à la submersion. (c) Après le passage de Xynthia, ces derniers sont largement inondés.

en général les côtes abritées et non les côtes exposées à la houle qui sont les plus menacées par la submersion marine.

Quelques enseignements de la tempête Martin

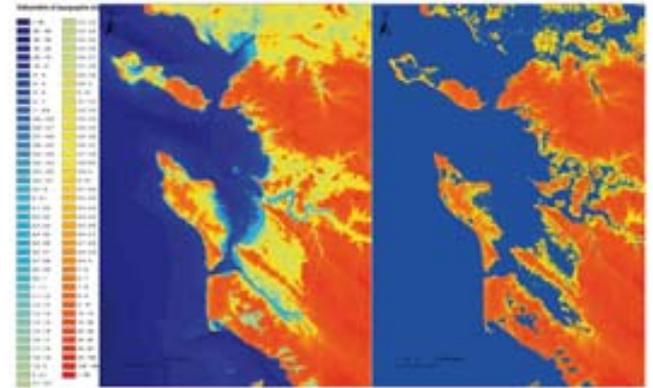
Bien que les surcotes soient régulièrement observées en hivers, leur prévision et celle des submersions est un défi majeur dans un objectif opérationnel. L'incertitude dans la prévision des surcotes est liée à la complexité de la propagation des ondes de tempêtes. Cette complexité tient à la présence de diverses interactions entre les vagues, les marées, les vents et la bathymétrie des fonds marins. Suite à la tempête « Martin », la plus destructrice du 20^{ème} siècle, les processus de propagation des ondes de tempêtes dans les Pertuis Charentais sont étudiés par des chercheurs de La Rochelle en collaboration avec le Laboratoire National d'Hydraulique et l'Environnement d'EDF. Le modèle numérique de la propagation des surcotes est basé sur le programme de simulation des marées et des surcotes TELEMAC et sur le code de calcul de propagation des vagues TOMAWAC. La comparaison des résultats du modèle avec les mesures a montré la nécessité d'une haute résolution spatiale pour simuler l'amplification des surcotes par petits fonds. Cette étude a révélé l'importance de la prise en compte des interactions non linéaires entre les courants de marée, la houle, le vent et les fonds marins. Les simulations de surcote montrent que la rugosité, accrue par les vagues, augmente la traction du vent sur la surface de la mer et aboutit

à une amplification du pic de la surcote de presque 50 %. Le frottement sur le fond est amplifié par les vagues ce qui atténue la surcote. La modélisation des effets amplificateurs (augmentation du couplage océan atmosphère) et atténuateurs (amplification du frottement sur le fond) des vagues a montré que l'amplification totale du pic de la surcote par les vagues est de 20 % dans le cas de zones portuaires où il n'y a pas de déferlement, mais peut-être bien supérieur à cette valeur dans des zones exposées à la houle et présentant du déferlement.

L'après Xynthia

Les immenses surfaces inondées lors de la tempête « Xynthia » et le drame humain associé ont rappelé l'extrême vulnérabilité des marais et plaines côtières de Charente-Maritime et Vendée à la submersion marine. Cette vulnérabilité a conduit des chercheurs du laboratoire Littoral, ENVironnement et Sociétés (LIENSS, UMR 6250 CNRS / Université de La Rochelle) à poursuivre les recherches sur les ondes de tempêtes et les surcotes. Trois catégories de verrous scientifiques ont été identifiées : une connaissance insuffisante de la topographie précise des zones côtières ; un manque de mesures hydrodynamiques lors des tempêtes ; des moyens numériques insuffisants pour les codes de calcul à haute résolution sur des territoires vastes, en prenant en compte toutes les interactions entre les fonds marins et la propagation des ondes de tempêtes.

Des mesures topographiques à très haute résolution par laser aéroporté



Modèles numériques de terrain Terre-Mer montrant les faibles altitudes des plaines côtières à gauche (tons jaune) et une inondation statique des ces plaines côtières en l'absence de défenses de côtes par marée haute de plus forts coefficients de marée.

(IGN) sont en cours de traitement et serviront de support au code de calcul à haute résolution. Les chercheurs déploieront aussi des instruments de mesures à la prochaine tempête pour valider les modèles numériques. ■

Contacts :

Eric CHAUMILLON

eric.chaumillon@univ-lr.fr

Jean-François BREILH

jbrel01@univ-lr.fr

Xavier BERTIN

xavier.bertin@univ-lr.fr

Frédéric POUGET

frederic.pouget@univ-lr.fr

Mikhail KRAPYTCHEV

mikhail.krapytchev@univ-lr.fr

GLOSSAIRE

⁽¹⁾ **Surcote** : surélévation de la surface de la mer par rapport aux variations de la seule marée astronomique, liée aux phénomènes météorologiques, généralement en raison d'une dépression météorologique.

⁽²⁾ **Élévation eustatique** : élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle globale due à une modification du volume des océans mondiaux.

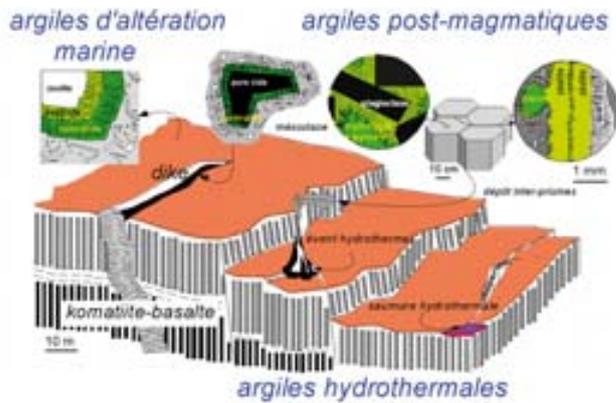
⁽³⁾ **Vive eau - morte eau** : il existe un cycle lunaire (28 jours) dominant avec deux périodes de 7 jours pour lesquelles le marnage⁽⁵⁾ est plus important (vive-eau) et deux périodes de 7 jours pour lesquelles le marnage est moins important (morte-eau).

⁽⁴⁾ **Fetch** : distance en mer ou sur un plan d'eau le long de laquelle souffle le vent sans rencontrer d'obstacle.

⁽⁵⁾ **Marnage** : amplitude de la variation de la hauteur d'eau entre une pleine mer et une basse mer successive.

Les argiles et l'origine de la vie

Le rôle que les argiles auraient pu jouer dans le grand théâtre de l'origine de la vie sur la planète Terre est une idée remontant aux années 40. Ces minéraux sont effectivement des candidats tout désignés pour la synthèse des premières molécules du vivant, les molécules pré-biotiques.



Représentation schématique de la croûte terrestre à l'Hadaéen formée de basaltes et de komatiites. Ces laves sont ponctuées d'innombrables microsites remplis d'argiles riches en fer et en magnésium.

Formés par l'empilement de feuillets d'épaisseur nanométrique (des phyllosilicates), certains minéraux, les smectites incluant la célèbre montmorillonite, sont les champions du développement de surfaces tant externes (limite des cristaux) qu'internes (zones interfoliaires avides de molécules d'eau). Du fait de leur structure lamellaire, ces minéraux présentent une incroyable diversité liée à leur capacité à « interstratifier » des feuillets de composition différente. Cependant, malgré cela, le débat scientifique est loin d'être clos car d'autres minéraux lamellaires sont jugés nettement plus efficaces, comme les sulfures de fer (mackinawite). Ils se forment dans l'environnement géochimique des sources hydrothermales océaniques (fumeurs noirs) qui apportent en outre l'énergie thermique capable d'activer les réactions de la chimie pré-biotique. Les sulfures possèdent au plus haut point la propriété d'échange d'électrons, propriété nécessaire au rendement catalytique.

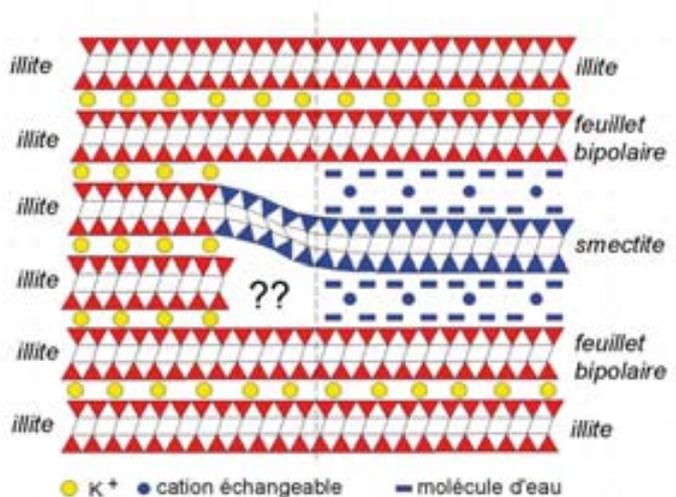
Un océan magmatique planétaire

Si la question de l'origine de la vie n'impose pas nécessairement un choix exclusif entre les deux possibilités (argiles ou sulfures), le scénario le plus probable doit être compatible avec la géologie très particulière de la Terre aux premiers âges. En effet, dans l'état actuel de nos connaissances, il est admis qu'à l'Hadaéen (4,5 – 4 Ga), un océan magmatique généralisé recouvrait la totalité de la surface de la planète. La surface solide était constituée de basaltes et de komatiites, c'est-à-dire de laves riches en fer et en magnésium. La surface de la planète était très mouvante (cellules de convection rapides et de petite taille) et constamment pulvérisée par le bombardement météoritique. Les océans, dont on sait qu'ils se sont établis très tôt sur la Terre grâce aux cristaux de zircons (4,4 – 4,2 Ga), étaient partiellement vaporisés sous l'effet des impacts les plus massifs.

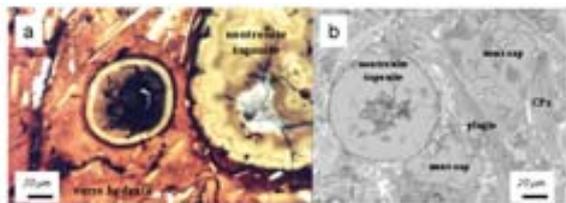
De l'argile sans eau liquide

Intuitivement, les argiles évoquent la boue ou le sol c'est-à-dire des matériaux provenant de l'altération des roches en contact avec l'eau. C'est le cas pour leur plus grande part actuellement, depuis la surface jusqu'aux environnements plus profonds (systèmes hydrothermaux ou diagénétiques). Cependant, « plus grande part » ne signifie pas totalité. En effet, on découvre maintenant que certaines argiles se forment directement lors du refroidissement des laves sans qu'il y ait eu altération, simplement par concentration des éléments volatiles et incompatibles dans les fluides résiduels piégés entre les cristaux. Ce processus avait toutes les chances d'exister à l'Hadaéen et d'être généralisé à la surface basaltique de la Terre.

Les argiles formées dans ces micro-systèmes basaltiques ont une composition chimique et une texture particulières. Elles sont riches en fer et en magnésium et sont capables d'adsorber



Représentation schématique d'un minéral argileux formé de l'inter stratification de feuillets non-expansibles (illite) et expansibles (smectite).



Microsites argileux dans une coulée sous-marine du geyot de Mururoa. a) Surface vitreuse de la coulée en contact avec l'eau de mer (altération sous-marine). b) Intérieur de la coulée sans altération; les argiles sont formées par les fluides résiduels piégés dans la porosité (vacuoles et vides diktytaxitiques).

de l'eau entre leurs feuillets (smectites de type saponite ou nontronite). Ce sont celles-là qui présentent les propriétés recherchées pour la catalyse des molécules prébiotiques : adsorption cationique et moléculaire qui concentre les composants élémentaires dans les zones inter foliaires et échange d'électrons grâce au fer. Leur texture dans les pores de la lave les prédisposant à offrir une grande surface de contact avec les solutions, elles se comportent comme des supports catalytiques actifs.

Un réacteur chimique à l'échelle planétaire

La probabilité que la catalyse des molécules prébiotiques réussisse de façon pérenne est très faible. Cela impose que les « tentatives » soient répétées un nombre incalculable de fois et qu'une partie des sites fertiles soient protégée des aléas thermiques et mécaniques dus au bombardement météoritique incessant. Les smectites ferreuses formées dans les pores des laves offrent cette double garantie. Ces micro-sites sont innombrables à l'échelle de la surface de la Terre et leur position dans une roche solide les protège bien mieux que ne le ferait un sol ou une roche ameu- blie. Cela nous amène à considérer l'origine de la vie d'une manière opposée à celle de Darwin qui soupçonnait une synthèse quasi miraculeuse dans une petite mare chaude. Cette vision sous- tend encore bon nombre de scénarii proposés par une communauté scienti- fique importante qui recherche cet

« Eden ». Toutefois, celui-ci n'est pas nécessaire : toute la surface de la Terre se comportait comme un réacteur chimique durant l'Hadéen.

La réponse à la question est sur... Mars

La Terre étant une planète géologi- quement active, la croûte basaltique de l'Hadéen a déjà été recyclée plusieurs fois et il ne reste que peu de témoins et aucun qui soit dans son état origi- nel. Il faut donc trouver un analogue de la Terre Hadéenne quelque part dans le système solaire. C'est la raison pour laquelle il faut aller sur Mars. En effet, l'activité géologique de cette planète s'est figée il y a pratiquement 4 Ga. L'hé- misphère sud, très cratérisé, est formé d'une croûte basaltique dans laquelle les argiles riches en fer et magnésium ont été découvertes par les missions

américaine (Mars Reconnaissance Orbi- ter) et européenne (Mars Express).

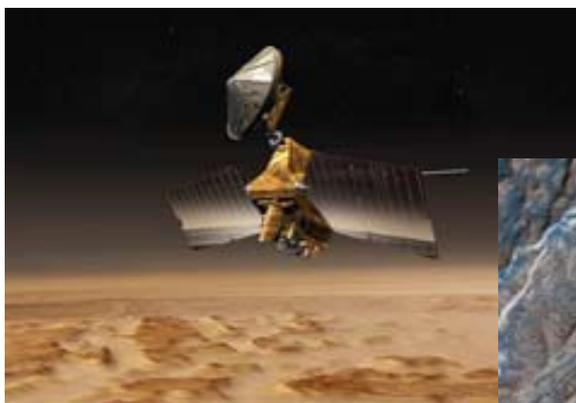
Quel rôle les argiles riches en fer et magnésium ont-elles pu jouer ?

La quête du Graal est semée d'em- bûches. En effet, si les argiles ferro- magnésiennes des basaltes et des koma- tiites ont pu concentrer les composants élémentaires, catalyser les réactions de la chimie pré-biotique et protéger leurs produits dans d'innombrables petits coffres-forts, il a fallu aussi qu'elles aient organisé la chiralité du vivant. En effet, les énantiomères (formes symétriques gauche ou droite de la molécule) des acides aminés et des sucres sont produits en égale quantité dans toute réaction chimique. Alors, comment le vivant où les acides aminés sont « à gauche » et les sucres « à droite » a-t- il choisi ? Cette question est, pour le moment, une grande énigme. Recher- cher l'origine de la vie est plus que jamais une aventure scientifique pluri- disciplinaire dans laquelle chimistes, géologues et astronomes s'engagent. C'est un domaine enthousiasmant au moins comme le sont tous ceux dans lesquels les argiles sont un enjeu scienti- fique. ■

Contact :

Alain MEUNIER

alain.meunier@univ-poitiers.fr



© NASA/JPL-Caltech

Vue d'artiste de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. En inséré, photo de la surface de Mars en fausses couleurs.



© NASA/JPL-Caltech / University of Arizona

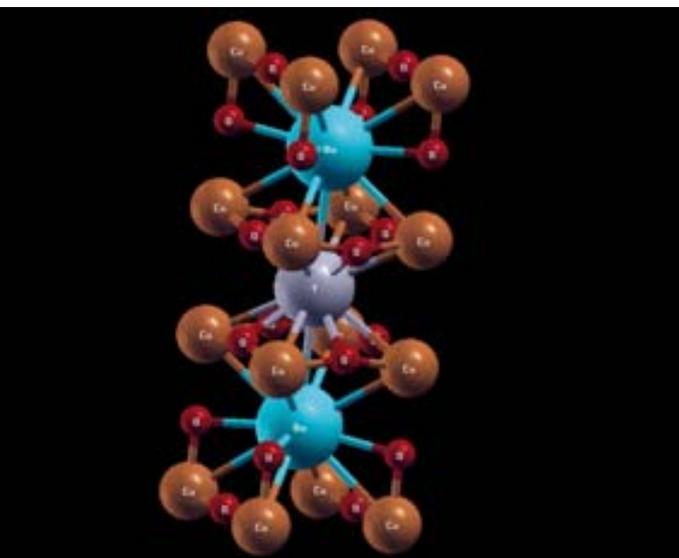
Supraconducteurs : 100 ans déjà...

La supraconductivité est un état quantique de la matière avec de nombreuses applications. Des métaux deviennent supraconducteurs quand ils sont refroidis à très basse température, parfois proche du zéro absolu. Ils présentent alors deux propriétés passionnantes, ils ne résistent plus au passage du courant électrique et expulsent des champs magnétiques.

La coïncidence de l'année mondiale de la Chimie et de la commémoration du centenaire de la découverte de la supraconductivité est heureuse. Cette propriété remarquable de certains matériaux n'est en effet observée dans aucun minéral naturel. Il a fallu que des chimistes les synthétisent (ou du moins mettent au point le procédé pour les extraire du minerai lorsqu'il s'agit d'éléments simples). C'est tout particulièrement vrai pour les supraconducteurs à haute température critique, des cuprates de lanthane, d'yttrium ou de bismuth, avec éventuellement du baryum, du strontium ou du calcium. Le phénomène de supraconductivité a été découvert par Kamerlingh Onnes, lauréat du Prix Nobel de Physique en 1913, à la suite d'une première expérimentation effectuée sur le mercure par



Cryocooler ou « super-réfrigérateur » permettant de refroidir les supraconducteurs à haute T_c jusqu'à 6 K et mesurer leurs propriétés optiques dans le visible et l'infrarouge, en particulier au voisinage de la température critique.



Structure cristallographique du supraconducteur à haute température critique $YBa_2Cu_3O_7$. Ce composé a une structure lamellaire formée de plans de cuivre et d'oxygène, supposée essentielle à cette supraconductivité.

son étudiant Gilles Holst. Onnes avait fondé un laboratoire de cryogénie qui le premier avait réussi à liquéfier l'hélium. La température de liquéfaction, 4,2 Kelvin (-269 °C), se trouve être précisément la température « critique », appelée T_c , en dessous de laquelle le mercure ne montre plus la moindre résistance électrique et expulse le champ magnétique (effet Meissner). Cette double caractéristique constitue la définition de la supraconductivité. Il s'avéra par la suite que d'autres métaux simples étaient aussi supraconducteurs mais toujours à très basse température, le record revenant au niobium avec une température critique de 9,2 K.

De nombreuses applications

Même si elle est déjà exploitée pour assurer le transport du courant élec-

trique sans pertes dans des lignes prototypes, superbe exemple d'efficacité énergétique idéale, une résistance nulle n'est pas la seule propriété phare des supraconducteurs. Peut-être plus spectaculaire encore est la lévitation d'un aimant au-dessus d'un supraconducteur, conséquence de son diamagnétisme « parfait » (effet Meissner). Un supraconducteur est repoussé suffisamment puissamment pour autoriser la lévitation magnétique d'un train au-dessus de « rails » constitués d'aimants. Ce train détient le record du monde de vitesse car les seuls frottements qui puissent la limiter sont ceux de l'air. Les appareillages de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) ou leurs cousins Imageurs par résonance magnétique (IRM) devenus indispensables pour la santé, ne fonctionnent que grâce à des

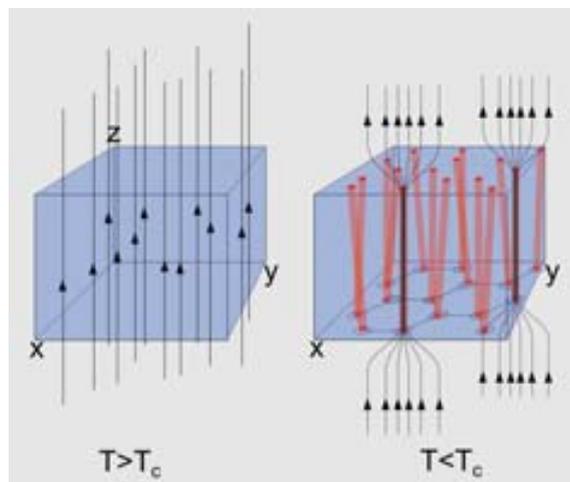
aimants supraconducteurs. Confiner le plasma dans le grand projet international ITER de réacteur de fusion thermonucléaire contrôlée, source potentielle d'énergie future, fait également appel aux aimants supraconducteurs. Les applications de la supraconductivité restent-elles confinées à la température de liquéfaction de l'hélium, coûteux? Elles le sont restées pendant 55 ans, jusqu'à ce que Bednorz et Müller découvrent les supraconducteurs « à haute température critique » fonctionnant à la température de liquéfaction de l'azote, un produit industriel courant et bien meilleur marché. Cette relance de l'intérêt pour cette propriété justifie le Prix Nobel qui leur a été attribué dans l'année même de leur publication.

Supraconducteurs à haute température critique

Alors que les électrons, portant la même charge électrique, se repoussent dans les métaux, ils s'attirent et forment des « paires de Cooper » dans l'état supraconducteur. La théorie BCS, établie par Bardeen, Cooper et Schrieffer en 1957, explique cette attraction entre les électrons comme une conséquence d'interactions complexes entre les électrons et les vibrations des atomes. La théorie BCS qui décrit l'état de résistance nulle et l'expulsion du champ magnétique, prédisait que l'état supraconducteur ne peut exister au-delà de 30 K. Jusqu'en 1986, c'est l'alliage Nb_3Ge qui présentait la plus haute température critique avec 23 K, quand il a été montré qu'un oxyde à base de lanthane, de baryum et de cuivre est supraconducteur à 35 K. Cette exceptionnelle découverte de la « supraconductivité à haute température critique » met en émoi toute la communauté scientifique. Dans les trois mois qui suivirent la publication, il a été découvert le composé $YBa_2Cu_3O_7$ avec une température critique de 93 K, supérieure à celle de liquéfaction de l'azote. À l'heure actuelle, le composé $HgBa_2Ca_2Cu_3O_x$ détient le record de température critique avec 133 K. On n'est malheureusement, pour les applications, pas encore à température

ambiante mais on a gagné un facteur 6! En 2008, l'histoire de la supraconductivité a connu un nouveau rebondissement avec la découverte des composés à base de fer et d'arsenic. Seuls les oxydes complexes de cuivre présentaient jusqu'alors de la supraconductivité à haute température critique. Malgré ces propriétés spectaculaires et les efforts considérables des chercheurs durant ces dernières décennies, il n'existe encore aucune théorie capable d'expliquer de façon satisfaisante le mécanisme de la supraconductivité à haute T_c .

Depuis plusieurs années, le Laboratoire d'Électrodynamique des Matériaux Avancés (LEMA – UMR 6157 CNRS / Université François Rabelais à Tours) synthétise et étudie les supraconducteurs à haute température critique. La méthode de synthèse par four à « fusion de zone » permet d'obtenir des monocristaux de qualité et de taille suffisantes pour l'étude des propriétés supraconductrices. Ces cristaux ont été étudiés par diffusion de neutron au Laboratoire Léon Brillouin (UMR 12 – CNRS / CEA) pour préciser les corrélations entre excitations magnétiques et supraconductivité. Plus généralement, ces études visent à comprendre l'origine de la supraconductivité à haut T_c à l'aide de mesures structurales, magnétiques, optiques, et de transport de courant électrique dans ces matériaux. Dans certaines conditions, les supraconducteurs à haut T_c , ne sont pas des diamagnétiques parfaits : ils n'expulsent pas complètement le champ magnétique. Celui-ci pénètre dans le matériau sous la forme de tubes de flux magnétique appelés « vortex ». Sous l'action d'un champ électrique, ces vortex peuvent se déplacer dans le matériau qui perd alors sa propriété supraconductrice. Il est donc indispensable de « piéger » ces vortex pour que le supraconducteur conserve une résistance nulle. De nombreuses études expérimentales et théoriques menées au LEMA concernent la dynamique et le piégeage de ces vortex. Expérimentalement, on irradie le matériau par des ions lourds pour créer des défauts colonnaires. En



Matériau supraconducteur soumis à un champ magnétique : au-dessus de T_c , le champ magnétique pénètre de manière homogène dans le matériau ; en dessous de T_c , le matériau devient supraconducteur. Si le champ magnétique appliqué est suffisant, celui-ci pénètre partiellement dans le supraconducteur sous forme de tubes de flux magnétique appelés « vortex ». Ces vortex s'organisent en un réseau hexagonal dans le matériau supraconducteur.

complément, on modélise le comportement dynamique des vortex.

Le coût de réfrigération ne rend pas encore ces matériaux suffisamment attractifs pour transporter le courant électrique sans perte. Mais si le coût de l'énergie électrique venait à augmenter... ■

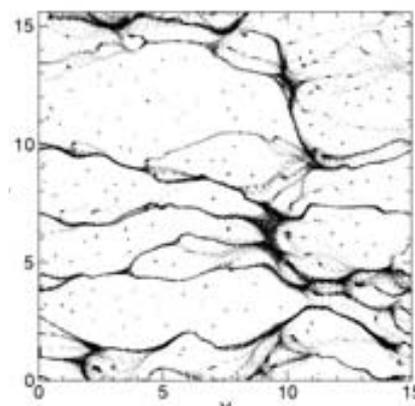
Contacts :

Vinh TA PHUOC

Vinh.ta-phuoc@univ-tours.fr

François GERVAIS

Francois.gervais@univ-tours.fr



Lorsque les vortex sont en mouvement, la résistance du matériau supraconducteur augmente. Pour conserver une résistance électrique nulle, il est nécessaire d'empêcher leur déplacement en les piégeant par les défauts intrinsèques du matériau, ou des défauts créés artificiellement. La figure présente une simulation numérique des trajectoires chaotiques des vortex. Alors que certains se déplacent, d'autres restent immobiles, piégés par les défauts du matériau.

Colloque

Energies du Futur

en région Centre

Le lundi **11 juillet 2011**
Campus CNRS d'Orléans

Valorisation de la **Biomasse**, Quels défis pour demain ?

Contacts : Pascal.Brautt@univ-orleans.fr
Communication@dr8.cnrs.fr

Plus d'infos sur : <http://www.epee.cnrs-orleans.fr/>

cnrs
Centre National de la Recherche Scientifique

Délégation
Centre Poitou-Charentes
www.cnrs.fr/centre-poitou-charentes

