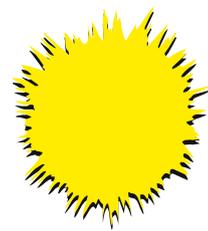


A3 Magazine

Rayonnement du CNRS



Recherche & Patrimoine culturel

APPORTS SCIENTIFIQUES
ET TECHNIQUES

RAYONNEMENT
DU CNRS

Association des Anciens et des Amis du CNRS



N° 81 - Automne 2023

A3 Magazine - Rayonnement du CNRS - Prix : 8 €

A3 Magazine - ISSN 1953-6542

Directrice de la publication : Elisabeth Giacobino

Rédactrice en chef : Véronique Machelon

Editrice : Vivienne Gianinazzi-Pearson

Maquette et mise en page : Bernard Dupuis

Comité de rédaction :

Fabrice Bonardi, Jacques Couderc, Laurent Degos, Bernard Dupuis, Alain Foucault, Elisabeth Giacobino, Vivienne Gianinazzi-Pearson, Paul Gille, Christian Girault, Liliane Gorrichon, Evelyne Jautrou, Marie-Françoise Lafon, Véronique Machelon, Dominique Simon.

Remerciements aux contributeurs de ce numéro 81

Sylvie Adamo-Raffin, Pierre Audin, Marie Laure Baudement, Amy Benadiba, Fabrice Bonardi, Jérôme Chappellaz, Gilles Chaumat, Jean-Patrick Connerade, Laurent Cortella, Patrice Debré, Damien Deldicque, Hannelore Derluyn, Julie Desarnaud, Philippe Dillmann, Alexandre Dumont-Castells, Anne-Julie Etter, Karine Froment, Oscar Fuentes, Juliana Gallon, Paul Gille, Jean Jouzel, Jean-Claude Marquet, Lily Martinet, Michèle Outters-Lafaye, Jean-Robert Petit, Geneviève Pinçon, Dominique Raynaud, Martine Regert, Jean-Noël Rouzaud, Anne-Sophie Rozay, Nadine Théveny, Mathieu Thoury.

La raison d'être de l'Association des Anciens et des Amis du CNRS

L'Association a été créée en 1990, dans le but de maintenir des échanges entre anciens et amis du CNRS, pour conserver un lien avec le CNRS, et pour continuer à œuvrer à son rayonnement. Ainsi, pour répondre à la première de ces missions et maintenir ces liens, l'Association offre aux adhérents de nombreuses occasions de communiquer et de se rencontrer. Nos adhérents reçoivent à leur domicile le Journal du CNRS et l'A3-Magazine, journal de notre Association qui paraît deux fois par an. Un autre type de lien est offert par notre site en ligne (www.a3cnrs.org) qui présente l'Association et ses diverses activités. Depuis l'automne 2020, une lettre électronique mensuelle est envoyée aux adhérents par courriel.

L'Association organise tous les ans une assemblée générale qui permet aux adhérents de se réunir et qui est suivie d'une partie culturelle et festive. Elle se tient alternativement en région et en Ile-de-France et, dans la mesure du possible, en visioconférence pour les adhérents qui n'auraient pu la rejoindre. La plus récente s'est tenue à Toulouse les 4-5 avril 2023. La prochaine assemblée générale se tiendra à Paris le 18 avril 2024.

L'un des piliers de l'A3 est constitué par des représentations régionales qui relaient l'information et sont déterminantes pour l'organisation de rencontres entre adhérents de la région concernée. Ces activités régionales ouvertes à tous nos adhérents, ainsi que les voyages en France et à l'étranger, ont bien repris. De plus, la mise en place depuis 2017 de rencontres scientifiques et culturelles sur une période de 5 jours permet, en partenariat avec une région, d'en faire découvrir les multiples facettes et, réciproquement, de mieux faire connaître notre association auprès des chercheurs et des autorités. Les prochaines rencontres scientifiques et culturelles sont prévues du 9 au 13 septembre 2024 en Normandie. Depuis 2019, l'Association décerne chaque année un prix national attribué à un jeune chercheur. Le prix national 2023 de notre association sera remis le 4 décembre 2023 à Florence Débarre (Institut d'écologie et des sciences de l'environnement) en présence du président du CNRS.

L'Association des Anciens et des Amis du CNRS a aussi pour mission de contribuer au Rayonnement du CNRS en France et à l'étranger, notamment par la diffusion de la revue A3 Magazine. En France, les échanges lors de visites scientifiques dans les laboratoires ou entreprises, notre participation aux journées de sensibilisation à la science, les conférences offertes dans certains centres ou milieux professionnels, constituent une contribution importante au rayonnement du CNRS, de la recherche et de la science dans le grand public. Les efforts entrepris pour un développement à l'international, en tentant de recréer des liens avec nos collègues étrangers, mis en sommeil ces derniers temps, méritent d'être réexaminés selon de nouvelles modalités et non sans avoir, au préalable, renforcé notre implantation nationale. L'Association reste ouverte à toutes les suggestions que nous proposeront nos adhérents comme aux demandes extérieures.

Elisabeth Giacobino et Liliane Gorrichon - Présidente et Vice-présidente de l'A3



Première de couverture : mise en page par Juliana Gallon (Haut la Main, Grenoble) ; crédit photo du chaland romain @ARC-Nucléart.



Quatrième de couverture : Le « masque de La Roche-Cotard » découvert dans une couche moustérienne datée de 75 000 ans à Langeais (37). L'analyse par tomographie montre une triple intervention humaine sur un petit bloc de silex local, pour lui attribuer l'aspect d'une face ou d'un masque humain ou animal. © Jean-Claude Marquet.

A3 Magazine N° 81 - Automne 2023

ÉDITORIAL DE LA PRÉSIDENTE	2	SPOTS	41
MOT DE LA RÉDACTION	3	• Zoom sur les recherches du CNRS sur les matériaux anciens : Ipanema <i>Mathieu Thoury</i>	41
RECHERCHE ET PATRIMOINE CULTUREL		• La Fondation des sciences du patrimoine fête ses 10 ans ! <i>Anne-Julie Etter</i>	45
<i>APPORTS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES</i>		• Louis XI, un roi tourangeau <i>Pierre Audin</i>	49
AVANT-PROPOS	4	• PATSTEC, 20 ans de sauvegarde du patrimoine de la recherche contemporaine <i>Marie Laure Baudement et Anne-Sophie Rozay</i>	53
• La recherche scientifique au chevet de Notre-Dame de Paris <i>Martine Regert et Philippe Dillmann</i>	5	• La recherche en temps d'épidémie, du SIDA au COVID, histoire de l'ANRS <i>Patrice Debré</i>	57
• Les apports de la recherche pour la sauvegarde du patrimoine archéologique <i>Alexandre Dumont-Castells</i>	10	• Le patrimoine naturel français : Centre d'expertise PatriNatT <i>Vivienne Gianinazzi-Pearson</i>	60
• La digitalisation de l'art pariétal et mobilier des grottes et sites ornés <i>Oscar Fuentes et Geneviève Pinçon</i>	14	KIOSQUE	61
• De la physique du bâtiment à la préservation du patrimoine culturel <i>Hannelore Derluyn et Julie Desarnaud</i>	21	• Apologie de la discrétion <i>Lionel Naccache</i>	
• Le patrimoine vivant : un objet de recherche pluridisciplinaire <i>Lily Martinet</i>	28	• Madame de Néandertal <i>Pascale Leroy et Marylène Patou-Mathis</i>	
• ARC-Nucléart : comment l'irradiation gamma permet de sauver le patrimoine culturel <i>Karine Froment, Laurent Cortella, Gilles Chaumat et Amy Benadiba</i>	32	• La surface des choses <i>Fabrice Bonardi</i>	
EN SAVOIR PLUS (livres proposés sur le thème du dossier)	39	• Tout comprendre (ou presque) sur la biodiversité <i>Philippe Grandcolas et Claire Marc</i>	
• Les patrimoines en recherche(s) d'avenir <i>Étienne Anheim, Anne-Julie Etter, Ghislaine Glasson-Deschaumes et Pascal Liévaux</i>		• Comment les scientifiques savent... ? <i>Anne Brès, Claire Marc et al.</i>	
• Notre-Dame de Paris, la science à l'œuvre <i>Philippe Dillmann, Pascal Liévaux, Aline Magnien et Martine Regert</i>		• Les souffrances d'Alexandre Dupont <i>Chaunes</i>	
• Mettre au monde le patrimoine <i>Anne Lehoërff</i>		PASSIONS D'ADHÉRENT(E)S	64
• Humanités numériques. La culture face aux nouvelles technologies <i>Dominique Vinck</i>		• Lire à voix haute <i>Michèle Outters-Lafaye</i>	
• Numérisation du patrimoine et modélisation des connaissances <i>Humanités numériques numéro 7</i>		• La Nouvelle George Sand <i>Nadine Théveny et Fabrice Bonardi</i>	
		• Que peuvent nous révéler les carbonisats des grottes paléolithiques ? <i>Damien Deldicque et Jean-Noël Rouzaud</i>	
		RAYONNEMENT DU CNRS	67
		• Claude Lorius, portrait d'un glaciologue français <i>Jean Jouzel, Jérôme Chappellaz, Jean-Robert Petit et Dominique Raynaud</i>	

Les textes publiés dans l'A3 Magazine n'engagent que les auteurs comme seuls responsables de leur contenu.

**Chères collègues et amis,
Chers collègues et amis,**

Ce premier semestre de l'année 2023 a vu disparaître notre cher Edmond Lisle, ancien président de l'A3 et co-fondateur en 1991 du Bulletin des Anciens et des Amis du CNRS, dont A3 Magazine est directement issu. Nous lui devons beaucoup et nous avons à cœur de lui rendre un premier hommage dans ce numéro 81, réservant les témoignages de ses amis et collaborateurs pour le numéro 82.

Comme vous, nous avons été heureux d'apprendre que des scientifiques français ont été récompensés par le prix Nobel de Physique. Il s'agit d'Anne L'Huillier, actuellement professeure à l'université de Lund en Suède, et de Pierre Agostini, qui après une carrière au CEA, a pris un poste de professeur aux Etats-Unis. Nous leur présentons nos sincères félicitations. Leurs travaux portent sur la génération et la caractérisation d'impulsions laser attosecondes (10^{-18} sec.) qui permettent de sonder, de manière ultime, la dynamique des électrons dans la matière. Pierre Agostini a obtenu ces résultats quand il était au CEA, où Anne L'Huillier a également conduit ses premières recherches décisives, avant de démontrer la génération d'impulsions attosecondes en Suède.

Nous nous intéressons dans ce Magazine à des données plus accessibles et moins fugaces. Elles sont relatives aux

éléments de notre patrimoine que des progrès techniques et la recherche scientifique ont permis d'éclairer, d'enrichir et de préserver. De la richesse patrimoniale de la nature aux techniques numériques ayant permis de reconstituer les grottes ornées préhistoriques, des connaissances en géomécanique au rôle surprenant de l'irradiation gamma dans ces études, la diversité des approches pourra vous étonner et va bien au-delà de ce que nous sommes à même de présenter ici.

Le caractère interdisciplinaire et la transversalité de ces travaux doivent être soulignés. Leur orientation, déterminante dans la conservation et la restauration du patrimoine, présente aussi d'autres facettes et vous conduira peut-être à poursuivre au-delà de ce numéro la découverte des domaines qui constituent « le patrimoine », attaché à notre passé, et le processus de « patrimonialisation », défini comme vivant, en mouvement (créant du lien, des dynamiques sociales, culturelles, territoriales). Rares sont les domaines de recherche où matériel et immatériel trouvent à s'épanouir !

Vous trouverez aussi les rubriques habituelles et les découvertes que nos adhérents nous proposent de partager. Nous vous souhaitons une bonne lecture et nous restons à votre disposition.

*Elisabeth Giacobino
et Liliane Gorrichon*

EDMOND LISLE NOUS A QUITTÉS



*Photo : Edmond Lisle en 2008
devant Magdalen College, Oxford.
© Ping Huang-Lisle.*

L'A3 CNRS vient de perdre une figure tutélaire : son Président d'honneur Edmond A. Lisle est décédé le 6 juin dernier dans sa 96^e année. Nous garderons le souvenir d'un grand ami et homme de science, chaleureux et généreux, dont la bienveillance a marqué tous ceux qui ont eu la chance de le côtoyer.

Il a été le 4^e président de notre Association A3, de 2004 à 2010, succédant à Jean-Baptiste Donnet, et aussi, dès 1991, membre fondateur et très actif du Comité de rédaction du Bulletin A3, devenu Magazine A3/Rayonnement du CNRS. Son action a été déterminante pour renforcer les liens entre anciens et amis et promouvoir le rayonnement scientifique du CNRS.

Grand économiste, il a multiplié les titres, les activités et les reconnaissances nationales et internationales, comme la direction du CRÉDOC (Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie) de 1967 à 1974 et du CREP (Centre de recherche économique sur l'épargne) de 1962 à 1974. Directeur de recherche au CNRS (1972-1996), il a été directeur scientifique du Département des sciences sociales de 1974 à 1981.

Un hommage lui sera rendu dans le prochain A3 Magazine pour exprimer toute notre reconnaissance. Nos pensées vont à son épouse Ping Huang-Lisle, co-fondatrice en 1996 avec Edmond du Programme Chine de ParisTech.

Ce nouveau numéro, nous l'avons consacré au patrimoine culturel, celui qui nous entoure et nous concerne tous en tant que citoyenne et citoyen. C'est aussi un sujet qui avec, entre autres, la restauration de Notre-Dame de Paris, a fait la une des médias ces derniers temps. Nous devrions d'ailleurs plutôt parler de patrimoines au pluriel tant est vaste et varié le sujet. Il est difficile d'en faire le tour en quelques pages. Aussi nous avons pris le parti dans ce numéro de nous recentrer sur un aspect peut-être plus méconnu du grand public, à savoir les nouveaux moyens scientifiques et techniques qui ont été développés et utilisés ces dernières années par les équipes travaillant sur les aspects variés du patrimoine. L'arrivée de nouveaux moyens d'investigation a révolutionné le domaine, permettant des découvertes décisives et ouvrant de nouvelles voies pour les recherches

concernant notamment l'identification et la conservation des patrimoines. Nous vous invitons donc à les découvrir et nous espérons que vous y trouverez beaucoup d'intérêt et de plaisir. Comme à l'accoutumée, vous trouverez dans ce numéro les comptes rendus de quelques livres qui ont retenu notre attention, quelques récits d'adhérents qui nous font partager leur passion et pour finir le beau portrait du glaciologue Claude Lorius. Et, nous sommes heureuses de partager avec vous le beau poème de notre ami Jean-Patrick Connerade pour son ami Edmond Lisle.

Très bonne lecture !

Véronique Machelon
et Vivienne Gianinazzi-Pearson

LA LONGUE VIE D'EDMOND LISLE

*Des rives de la baie des ombres
venait le messager discret
qui, des années, compte le nombre
pour demander s'il était prêt.*

*Toujours Edmond, levant son verre
au souvenir des disparus,
prolongeait son séjour sur terre
et renvoyait chez lui l'intrus :*

*J'ai mis vos dieux dans la balance
et j'ai pesé le prix humain
de leurs conflits. Ma vie avance
utilement. J'ai pris la main*

*sur le rapport entre les hommes
et le désir d'éternité.
J'ai travaillé sur ce qu'ils nomment
leur unique divinité.*

*J'ai vu que tous les dieux sont frères
dans la quête de l'absolu.
J'ai rassemblé tous leurs mystères.
Leurs désaccords sont résolus.*

*Messenger, rentre où vont les âmes !
Chaque instant que tu donneras
de plus évitera des drames.
Aide-moi ! Ne m'emporte pas*

*aux rives de la baie des ombres
où je sais que je finirai.
Le destin des mortels est sombre.
Leur avenir en pâtirait.*

*Le messager, embarrassé,
repartait régulièrement.
Longtemps, Edmond l'a terrassé
simplement par cet argument.*

Chaunes

DÉCÈS D'HUBERT REEVES

Nous venons d'apprendre avec tristesse le décès de l'astrophysicien Hubert Reeves, parti « rejoindre les étoiles ». Directeur de recherche au CNRS, c'était un grand savant universellement connu. Soucieux de mettre la science à la portée de tous, il avait entre autres collaboré par ses articles au Bulletin de l'A3. Il reste dans les mémoires comme un conteur merveilleux de l'histoire de l'Univers.

AVANT-PROPOS

« quel que soit l'avenir de l'architecture, de quelque façon que nos jeunes architectes résolvent un jour la question de leur art, en attendant les monuments nouveaux, conservons les monuments anciens. Inspirons, s'il est possible, à la nation l'amour de l'architecture nationale. » (Victor Hugo, *Préface de Notre-Dame de Paris*, édition 1832).

C'est déjà au 18^e siècle, avec la Révolution française, que l'idée du patrimoine culturel et de la protection des biens culturels autour des « objets nationaux qui, n'étant à personne, sont la propriété de tous [...] et recommandés à la surveillance de tous les bons citoyens » (Abbé Grégoire 1750-1831) est lancée, les premiers éléments étant les livres et les œuvres d'art, conservés ou exposés dans les premiers musées.

Le concept de protection du patrimoine s'affirme progressivement, pour aboutir à deux Conventions Unesco : l'une pour la protection du patrimoine mondial culturel et naturel de l'humanité en 1972, et l'autre pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel de l'humanité en 2003. Dans son ensemble, la notion du patrimoine culturel de l'humanité couvre un large éventail de sujets très divers avec une pluralité d'éléments qui ne peut aujourd'hui être ni vendu, ni donné à des particuliers, ni détruit. Pour figurer sur la Liste du patrimoine mondial, les sujets doivent avoir une valeur universelle exceptionnelle et satisfaire à au moins un des critères de sélection listés par UNESCO (whc.unesco.org/fr/criteres/).

La première Convention Unesco concerne surtout des biens matériels dont les paysages construits, monuments, sites archéologiques et géologiques, objets d'art et mobilier (peintures, manuscrits, instruments de musiques, etc.), du patrimoine subaquatique (navires, ruines sous les mers, etc.) et industriel (machines, bâti, etc.). La seconde englobe une expression culturelle contemporaine vivante ou menacée : traditions orales, pratiques sociales, communautés, rituels, connaissances, savoir-faire.... Dans les deux cas, la définition du patrimoine culturel à l'échelle nationale ou mondiale dépasse largement la simple

propriété personnelle. À ce jour, la France compte cinquante-deux biens inscrits au patrimoine mondial culturel et naturel et 26 éléments au patrimoine culturel immatériel.

Mais comment crée-t-on du patrimoine culturel pour le transmettre aux générations futures ? Le phénomène de patrimonialisation, qui s'est développé en France au XIX^e siècle notamment pour la sauvegarde des monuments historiques, désigne le processus de création, de fabrication et de reconnaissance de patrimoine. Les étapes de la patrimonialisation peuvent être ainsi : en premier, la découverte d'un objet ou sujet comme trouvaille, puis son authentification, la certification de l'existence de son monde d'origine, l'exposition du sujet au public et l'obligation de le transmettre aux générations futures. Le processus de patrimonialisation, qui travaille dans la continuité et construit du lien, relève de processus, d'interactions et de croisements, scientifiquement assistés pour la plupart.

De même, le patrimoine culturel qu'il soit matériel ou immatériel, bénéficie d'apports importants et parfois insoupçonnés de la recherche. En posant l'œil sur un détail, la recherche révèle bien des surprises au niveau de nouvelles connaissances scientifiques du patrimoine et des approches techniques innovantes mises en œuvre pour sa conservation, sa réparation ou sa sauvegarde



Bandeau du ministère de la Culture de la 40^e édition des Journées européennes du patrimoine en 2023.

*Vivienne Gianinazzi-Pearson
et Véronique Machelon*

La recherche scientifique au chevet de Notre-Dame de Paris



Martine Regert (A), DR CNRS, est chercheuse en archéologie biomoléculaire. Ses recherches concernent des substances naturelles archéologiques et les pigments préhistoriques. Directrice du CEPAM (UMR 7264, Cultures et Environnements. Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge) de 2012 à 2017 puis directrice-adjointe scientifique de l'Institut écologie et environnement (Inee) du CNRS (2017-2021), elle est nommée en 2019 chargée de mission avec Philippe Dillmann pour la coordination CNRS des recherches du chantier scientifique Notre-

Dame. Membre du Comité national (section 31) jusqu'en 2016, elle a aussi été membre du comité de pilotage du réseau national Compétences archéométriques interdisciplinaires de la Mission des ressources et compétences technologiques du CNRS.

Philippe Dillmann (B), DR CNRS à IRAMAT (Institut de recherche sur les archéomatériaux) et au NIMBE (UMR Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie), est responsable du laboratoire Archéomatériaux et prévision de l'altération au CEA. Il est spécialiste de la chimie et de l'histoire des métaux archéologiques. Il a dirigé le réseau national Compétences archéométriques interdisciplinaires du CNRS de 2010 à 2020. Il a été membre du Comité national (section 32) de 2010 à 2014. En 2019, il est nommé chargé de mission par le CNRS pour co-coordonner les recherches scientifiques autour de Notre-Dame de Paris. Il a reçu la médaille d'Argent du CNRS en reconnaissance de ses recherches innovantes.

Résumé : Dès la nuit du drame du 15 avril 2019, les laboratoires de recherche du ministère de la Culture (Laboratoire de recherche des monuments historiques et Centre de recherche et de restauration des musées de France) ont été mobilisés d'urgence pour accompagner les premières actions de sauvegarde de la cathédrale Notre-Dame et de son précieux mobilier. Largement au-delà de cette mobilisation, l'ensemble de la communauté scientifique et notamment celle dont les recherches portaient déjà sur les monuments gothiques en France et dans le monde a ressenti aussi une émotion spécifique. Cette émotion, alliée aux compétences acquises depuis plusieurs années sur les monuments gothiques, a rapidement amené les scientifiques des différentes institutions de recherche et notamment du CNRS, en lien avec les acteurs du ministère de la Culture, à faire des propositions d'actions autour de la connaissance et de la restauration de Notre-Dame ou, plus simplement, à mettre leurs compétences à disposition du chantier de restauration. Il s'agissait également de ne pas ajouter à la perte matérielle, la perte des informations scientifiques. Certaines devenaient accessibles du fait de la mise au jour de matériaux suite à l'incendie (agrafes métalliques, claveaux, éléments de polychromie). D'autres se devaient d'être appréhendées même sur des matériaux fortement altérés par le feu ; c'est le cas des bois des charpentes par exemple qui bien qu'en partie calcinés sont riches d'informations sur la chronologie, les environnements et les climats depuis le Moyen Âge jusqu'au XIX^e siècle.

Dès le lendemain de l'incendie de Notre-Dame de Paris (Fig. 1), la Présidence et certains instituts du CNRS recevaient plusieurs projets déjà structurés autour de l'étude

des bois, des approches de numérisation spatiale ou des plombs de la couverture. Parallèlement à ces propositions, ces scientifiques ont fondé l'Association des scientifiques au service de la restauration de Notre-Dame de Paris (<https://www.scientifiquesnotre-dame.org/>). Elle regroupe aussi bien des historiens, des historiens de l'art, des archéologues du bâti, des spécialistes de la restauration et de la conservation des matériaux du patrimoine que des scientifiques spécialistes de l'analyse des matériaux archéologiques. Elle a rapidement mis à disposi-

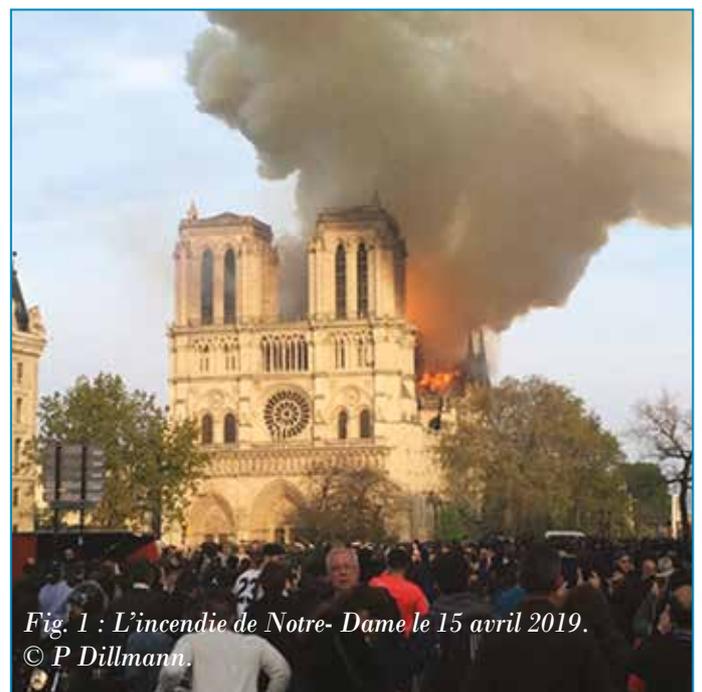


Fig. 1 : L'incendie de Notre-Dame le 15 avril 2019.
© P Dillmann.

tion des fiches techniques sur son site internet, qui ont permis de rétablir certaines vérités scientifiques parfois mises à mal dans le flot médiatique qui a suivi l'incendie.

Très rapidement également, le CNRS et le ministère de la Culture ont décidé de structurer ces dynamiques, de financer le démarrage des recherches et de proposer un cadre de recherche en créant une cellule de coordination destinée à mettre en place les actions de recherches autour de la restauration de la cathédrale et au-delà. La mise en synergie du CNRS et du ministère de la Culture, organisme et ministère œuvrant tous deux au niveau national, a été extrêmement efficace pour fédérer l'ensemble des forces et des compétences disponibles pour faire parler le patrimoine matériel et immatériel mis à mal par l'incendie. La recherche en France étant par ailleurs fortement distribuée sur le territoire au sein d'UMR (Unités mixtes de recherche), souvent sous tutelle d'un organisme de recherche et d'une université, c'est bien à l'échelle du territoire national, en lien avec les universités qu'il a été possible de travailler.

NAISSANCE DU « CHANTIER SCIENTIFIQUE CNRS/MINISTÈRE DE LA CULTURE »

C'est ainsi qu'est né le « Chantier scientifique CNRS/ministère de la Culture », coordonné par Philippe Dillmann (CNRS), Pascal Liévaux (Ministère de la Culture), Aline Magnien (Ministère de la Culture) et Martine Regert (CNRS). Il a rapidement structuré son action autour de 9 groupes de travail rassemblant chercheurs et ingénieurs du CNRS et du ministère de la Culture mais également enseignants-chercheurs des universités et personnels de l'ensemble des autres institutions de recherche françaises et internationales. Dès sa création, le chantier scientifique entretient des liens étroits avec le chantier de restauration, les programmes de recherche élaborés étant pensés en complémentarité des actions mises en place autour de la cathédrale. Très rapidement des contacts ont été pris avec la maîtrise d'œuvre en la personne des architectes en chef des Monuments historiques Philippe Villeneuve, Pascal Prunet et Rémi Fromont qui ont immédiatement entrevu les synergies possibles et les enjeux liés aux actions de recherche dont certaines pouvaient être directement utiles à la restauration. Les contacts avec la maîtrise d'ouvrage d'alors, assurée par la Direction des affaires culturelles d'Île-de-France et tout particulièrement Stéphane Deschamps (Conservateur régional de l'archéologie) et Dorothee Chaoui-Derieux (Conservatrice en chef du patrimoine dans ce même service) ont également été immédiatement fructueux avec le principal objectif d'assurer une continuité entre le sauvetage des vestiges issus de l'incendie, leur inventaire précis, leur

stockage à des fins d'études ultérieures et les programmes de recherche à plus long terme. Ce même état d'esprit a ensuite été complètement adopté par l'Établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris qui a repris la maîtrise d'ouvrage à la fin de l'année 2019 et avec lequel la bonne coordination s'est poursuivie grâce à des contacts réguliers, notamment avec Jonathan Truillet (Directeur-adjoint des opérations) sous l'égide du général Georgelin (1948-†2023), représentant spécial du Président de la République. Les relations sont également établies avec l'Inrap (Institut de recherches archéologiques préventives) qui assure les fouilles archéologiques au sein de la cathédrale sur prescription du SRA (Service régional d'archéologie). Ainsi débutait une aventure totalement inédite par son ampleur, les relations interinstitutionnelles mises en place et son interdisciplinarité.

MISE EN PLACE DES PROGRAMMES DE RECHERCHE INTERDISCIPLINAIRE

Les recherches menées par les 9 groupes de travail portent en grande partie sur les matériaux de la cathédrale. On pense bien évidemment immédiatement à la pierre, souvent très finement travaillée et assemblée et qui constitue le squelette de la cathédrale, qui va supporter les verrières, apportant et jouant avec la lumière. Mais ce squelette est également fait de bois pour ce qui est des charpentes et de fer, qui, on le sait par les études effectuées sur bon nombre d'autres monuments gothiques, lient les pierres entre elles ou ceinturent les murs et ce depuis les premières phases de construction du monument. Le plomb, enfin, est utilisé pour la couverture de l'édifice.

La datation des matériaux

Un premier niveau d'appréhension de ces différents matériaux réside dans la datation de leur mise en place et de leur utilisation dans le monument. Pour ce faire et en fonction du matériau, différentes approches et méthodologies peuvent être mises en œuvre. La première d'entre elles est celle de l'archéologie du bâti qui permet par la localisation relative des éléments étudiés, de déduire des informations sur la date (par exemple telle pierre sculptée dans un style du XIII^e siècle scelle un élément métallique qui lui est forcément contemporain ou antérieur). Ainsi, de proche en proche il est possible d'obtenir des chaînes d'informations chronologiques qui permettent de saisir les phases de construction d'un monument. Souvent le point de départ du raisonnement, l'accroche de l'élément datant absolu, réside dans la relation à un référentiel stylistique d'éléments architecturaux ou de matériaux déjà datés dans d'autres contextes (édifices) ou dans l'existence, souvent rare, de

textes historiques décrivant la mise en œuvre ou la construction de telle partie de la cathédrale. En parallèle, des informations de datation absolues peuvent être obtenues par l'analyse de la matière. Ainsi, pour le bois, l'étude de la succession et de l'épaisseur des cernes est représentative d'une époque dans une région donnée, avec une possibilité de datation à l'année près, parfois avec indication de la saison d'abattage des arbres, lorsque l'aubier est présent et que les cernes sont bien conservés et en nombre suffisant. Pour les métaux ferreux, qui sont constitués en partie d'aciers (du fer avec quelques dixièmes de pourcent de carbone), il est maintenant possible de dater ce carbone par la méthode du carbone 14 (Fig. 2). On date alors le charbon de bois qui a permis de transformer le minerai en métal. Par cette approche il a pu être montré que de nombreuses agrafes en fer avaient été utilisées dès les premiers temps de la construction de Notre-Dame de Paris.

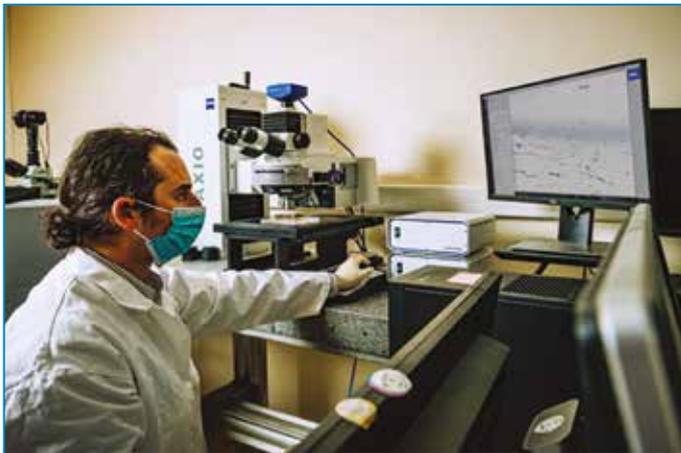


Fig. 2 : Analyse des agrafes en fer de la cathédrale Notre-Dame au laboratoire (voir aussi A3 Magazine N° 79, pages 58-62). © CNRS images.

La nature des matériaux

La datation n'est pas la seule information qui peut être lue dans les matériaux de la cathédrale. La nature des matériaux est à mettre en lien avec leur aspect esthétique (couleur et grain de la pierre par exemple, qui par ailleurs peut être recouverte de peinture, formant une polychromie, couleur des verres des vitraux) ou avec leur rôle dans la statique de l'édifice (résistance mécanique des pierres, du bois de la charpente ou des agrafes de fer qui lient les pierres de la cathédrale). Cette nature peut être déterminée par l'examen à l'œil nu de la part d'experts qui au premier coup d'œil savent préciser les essences des bois ou la nature de la roche. Le diagnostic peut et doit souvent cependant être approfondi en laboratoire par la mise en œuvre de méthodes d'analyses physico-chimiques variées allant de la microscopie

optique ou électronique à balayage qui donne des informations sur l'agencement microscopique des constituants de la matière (ainsi on peut déterminer si on a affaire à un fer ou un acier par un examen métallographique) jusqu'à des techniques d'analyses sophistiquées (Fig. 3). L'étude de l'interaction de divers rayonnements (visible, rayons X, faisceau de particules...) avec la matière peut en effet apporter des informations sur ces éléments constitutifs, la façon dont ils sont agencés à l'échelle microscopique et permettre ainsi de mieux définir les matériaux (telle roche peut être identifiée par la diffraction des rayons X qui sont envoyés sur elle). Enfin, d'autres essais mécaniques sont plus destructifs mais permettent de déterminer directement le comportement mécanique du matériau (résistance à la rupture, élasticité, dureté, etc.). Ils nécessitent alors un prélèvement mais sont fondamentaux pour modéliser et comprendre le rôle de chacun des matériaux dans le comportement global du monument dans l'histoire de sa construction et aujourd'hui, avant et après la restauration.



Fig. 3 : Analyse par fluorescence X (XRF) portable des bois sur le chantier de restauration. © P Dillmann.

La provenance des matériaux

La provenance des matériaux est également une information de première importance sur les pratiques de construction dans les sociétés anciennes mais également sur le développement de leurs réseaux d'échange. Celle-ci peut être déduite, ici encore de l'analyse de la matière qui vient compléter les rares informations données par les textes historiques. La présence de tel coquillage ou fossile microscopique dans une roche permet de la relier à son lieu d'extraction. Cela permet de retrouver certaines carrières anciennes ayant fourni les pierres de Notre-Dame, même si une part a malheureusement

disparu. De même la composition élémentaire ou isotopique des plombs, des impuretés des alliages ferreux ou du bois peut être analysée par différents types de spectrométries basées sur l'interaction de rayonnements ou de particules avec la matière. Cette composition constitue une véritable signature physico-chimique du matériau que l'on peut assimiler à une empreinte digitale ou une signature ADN. Cette empreinte ou signature peut alors être comparée à celle d'autres objets pour vérifier si elle est similaire, étayant l'hypothèse d'une provenance commune, ou à celle de matériaux (arbres, scories de réduction du minerai, minerai, roches...) trouvés par les archéologues sur les lieux de productions (ateliers, mines, carrières...). Dans ce dernier cas on en déduit un lieu de production. Pour ce faire les études font appel à des bases de données de ces signatures physico-chimiques qu'ils ont patiemment constituées en analysant les produits et déchets de centaines de sites de production médiévaux ou plus récents sur le territoire européen. Ces données sont stockées et sécurisées sur des serveurs dédiés du CNRS ou d'autres institutions. Ceci a été réalisé sur les bois de la charpente, les plombs et les renforts de fer de la cathédrale.

Contrairement à la pierre, au métal et au verre, le bois dont sont faites les charpentes est un biomatériau. De ce fait il comporte non seulement des informations techniques sur les modalités de réalisation des charpentes mais également un ensemble d'informations biologiques et environnementales. Nous avons vu que la croissance des arbres, qui se traduit par la formation d'un cerne annuel, permet d'obtenir des données chronologiques extrêmement précises. En déterminant la provenance des bois, les essences étudiées et leur âge au moment de l'abattage, il est possible de caractériser les modalités de sélection des arbres et de tester l'hypothèse d'une sylviculture spécifique à l'âge des cathédrales. La lecture des bois est aussi susceptible de contribuer à une meilleure connaissance du chantier de la construction : mise en œuvre et processus de levage, types d'assemblages, gestes techniques des charpentiers et outils.

Mais les recherches sur les bois de Notre-Dame dépassent largement cet objet d'étude ouvrant la voie à la restitution des climats passés. En effet, les bois carbonisés constituent une porte d'accès unique aux conditions climatiques pour identifier et caractériser l'Optimum climatique médiéval (OCM) de l'an mil au XIII^e siècle, qui est mal connu car les bois de cette époque sont rares. En retour, la mise en place d'une courbe de référence des variations des isotopes de l'oxygène permettra d'affiner l'attribution d'une date obtenue par les largeurs de cernes. Les arbres jeunes ou très stressés, sont en effet

plus difficiles à dater. Ces recherches contribueront également à affiner les datations archéologiques par le carbone 14, d'évaluer l'impact du vieillissement du bois sur le comportement mécanique du matériau et de comprendre les mécanismes physiques du séchage du bois vert (c'est-à-dire « jamais séché ») tel qu'il était utilisé dans la construction médiévale.

Les informations sur les sociétés anciennes

Du point de vue historique, la façon dont les matériaux de la cathédrale ont été obtenus et fabriqués revêt un aspect fondamental pour la compréhension des sociétés anciennes. Chacun de ces matériaux provient de matières premières (bois, roche, minerai) qu'il a fallu transformer ; il est parfois même, comme le plomb, un produit dérivé, un déchet issu d'une autre métallurgie. Ainsi, la façon dont ces matériaux ont été mis en œuvre suit ce que l'on appelle une chaîne opératoire, constituée par une succession de gestes techniques. Ces opérations utilisent des matières premières, des structures (foyers, fours, plus ou moins élaborés...), de l'énergie et des outils (marteaux ou scies actionnées par la force manuelle ou hydraulique, taillants pour la pierre). L'ensemble de ces aspects (matières premières, réseaux d'échanges de ces matières, savoir-faire, structures et outils) constitue un système technique propre à chacune des époques de mise en œuvre. Ceci nous apporte des informations primordiales sur l'organisation technique et économique des sociétés anciennes et notamment sur leur maîtrise de l'énergie pour l'exploitation des matières premières (températures atteintes dans les foyers de réduction du minerai et nature du processus pour l'atteindre par exemple). Ces chaînes opératoires et ces systèmes techniques peuvent être restitués par l'étude de la surface des matériaux, qui peut présenter des traces d'outils et de mise en forme (taillants pour la pierre, marteaux pour les métaux, ...). L'étude de la matière par des moyens d'analyses scientifiques peut ici encore apporter des éléments de compréhension de ces systèmes techniques. Ainsi l'analyse des composés formés dans les matériaux peut renseigner sur les températures nécessaires à leur formation et donc à celle des fours qui ont permis de les obtenir. La nature des pigments et les procédés mis en œuvre pour colorer le verre peuvent être étudiés. Il est possible également, par l'examen microscopique, de montrer si un matériau a été obtenu par le recyclage/assemblage de matériaux plus anciens ou disparates (c'est notamment le cas de beaucoup d'alliages ferreux sur la cathédrale). On peut, par l'analyse de la composition des mortiers, déterminer s'ils ont été réalisés à partir de chaux hydraulique ou aérienne ce qui renseigne sur les techniques de mise en œuvre sur le chantier.

Les mécanismes d'altérations des matériaux

Enfin, la dernière information que peuvent nous délivrer les matériaux de la cathédrale porte sur leur état d'altération avant l'incendie (altération des vitraux sous l'effet des intempéries et de la pollution) ou suite à l'incendie et indirectement sur les températures atteintes lors de l'incendie. Ici encore, l'examen de la matière par des méthodes spectroscopiques et l'utilisation de divers rayonnements permettent d'accéder à des informations sur les mécanismes d'altération. Ainsi, pour les températures, l'étude des charbons de bois carbonisés et notamment de la variation dont les atomes qui les constituent étaient agencés ont donné des estimations de températures. Il en est de même pour les couches de rouille des agrafes médiévales qui renforçaient le haut des murs et sur lesquelles reposaient les éléments de la charpente qui ont brûlé. Ces couches de rouille qui se sont formées depuis le Moyen Âge se sont transformées lors de l'incendie. L'étude de ces transformations et de la vitesse avec laquelle le fer s'est oxydé pendant l'incendie a permis de donner des indications sur les températures qu'ont subies les agrafes et les matériaux environnants.

UN CHANTIER SCIENTIFIQUE EXCEPTIONNEL

On voit ainsi comment l'étude de la matière et de la manière dont elle a été obtenue, mise en forme, utilisée et altérée constitue autant d'informations cruciales pour la restauration mais également pour la compréhension de cet objet gigantesque, complexe et mouvant à travers les époques qu'est la cathédrale Notre-Dame.

D'autres types d'études sont également menées par les groupes de travail. Ainsi, le décor ancien et son évolution à travers les siècles, notamment la polychromie qui subsiste encore à certains endroits de la cathédrale peut encore être étudiée, en profitant de la mise en place des échafaudages qui ont rendu accessibles des endroits encore jamais observés dans les hauteurs ou à l'inverse suite aux fouilles préventives qui doivent être faites avant de poser ces échafaudages. Les scientifiques du chantier s'intéressent également aux sons et à l'acoustique de la cathédrale, que ce soit dans le passé (comment on percevait la musique à Notre-Dame, mais également les bruits de la ville environnante), aujourd'hui ou demain (l'évolution de l'acoustique suite à la restauration). Les questions de structure et stabilité de l'édifice après l'incendie, ou liées aux choix pour la restauration sont également cruciales. Mais la cathédrale n'est pas composée que de pierre, de bois, de métal et de verre, elle est aussi le réceptacle d'imaginaires collectifs qui la font exister aux yeux du monde. Suite à l'incendie, chacun a exprimé sa tris-

tesse, sa colère, son désarroi. Ce sont ces réactions que les anthropologues et les sociologues s'attèlent également à étudier. Les approches numériques sont aujourd'hui intégrées dans la plupart des volets de la recherche, afin de traiter et de modéliser les données mais également, pour le patrimoine, de collecter, stocker et étudier les données de toutes sortes (relevés lasers du monument, dessins, photographies, mesures scientifiques, restitutions architecturales). Ceci constitue un véritable écosystème numérique que les scientifiques du chantier construisent, font évoluer avec le temps et étudient.

Le chantier scientifique, de par son ampleur et son interdisciplinarité, revêt ainsi un caractère unique, exceptionnel et exemplaire au sens où les méthodologies organisationnelles mises en place, souples et efficaces, pourront inspirer des opérations de recherche à venir d'envergure dans d'autres contextes, éventuellement de crise. Il se doit notamment de synchroniser des actions qui relèvent de temporalités, de rythmes et de budgets différents. Ainsi, la relative urgence du chantier de restauration ne suit pas les mêmes logiques que la recherche scientifique qui se déploie sur de longues années et qui se poursuivra bien après la fin de la restauration. L'architecte a ainsi besoin très rapidement d'un calcul de structure pour étayer ses choix techniques alors que modéliser un monument ancien, complexe, fait d'une grande variété de matériaux qui interagissent demande du temps. Les questions historiques relèvent d'un patient travail de relevés et d'études de la matière par des techniques parfois technologiquement très évoluées et complexes, combiné à l'étude des sources qu'elles soient textuelles ou iconographiques. Mais, pour la restauration, il faut connaître très rapidement la nature des matériaux et leur état d'altération afin de déterminer s'ils doivent être remplacés ou non, voire leur provenance si on veut restaurer la cathédrale au plus proche de son dernier état avant l'incendie. On perçoit ainsi les tensions entre des activités qui relèvent de l'expertise et qui doivent être basées sur des études et des référentiels déjà réalisés au moment où l'expertise est mise en œuvre et des recherches de plus longue haleine dont les générations futures profiteront. C'est la raison pour laquelle le chantier scientifique de Notre-Dame est un formidable défi technique, scientifique et humain qui regroupe des acteurs tous investis par leur mission. C'est une recherche au service de Notre-Dame mais également Notre-Dame au service de la recherche, qui dépasse largement le cadre de la cathédrale en inscrivant les recherches dans les contextes historique, spatial, social et environnemental du monument.

Les apports de la recherche pour la sauvegarde du patrimoine archéologique



Alexandre Dumont-Castells, docteur en archéologie et enquêteur judiciaire, est spécialiste du pillage et des trafics illicites des biens archéologiques en France. Il est chercheur associé près le Centre Camille Jullian (CCJ) à la Maison méditerranéenne des sciences de l'homme (MMSH) de l'université d'Aix-Marseille (AMU). Diplômé d'un DEA en archéologie en 2000 de l'université d'Aix-Marseille, il obtient un doctorat en archéologie en 2021 à l'AMU sur le thème : « Le pillage du patrimoine archéologique terrestre en France métropolitaine », sous la direction de M. Dominique Garcia, professeur des universités, président de l'Inrap (Institut national de recherches archéologiques préventives). Ses travaux privilégient le recensement et la compréhension du phénomène récent et historique des pillages et des trafics illégaux des mobiliers archéologiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur et plus particulièrement pour le département des Bouches-du-Rhône. Il est l'auteur de publications et d'articles sur les déprédations archéologiques.

Résumé : La recherche pour comprendre, évaluer et solutionner le fléau des atteintes anthropiques à la ressource archéologique patrimoniale française est récente. Elle suscite des questionnements qui enrichissent le débat : Quel est le cadre juridique et légal pour la protection du patrimoine archéologique français ? Comment est-il perçu par les publics ? Comment se traduit-il dans les faits ? Quels moyens sont mis en œuvre pour dissuader les atteintes des « archives du sol » ? Pouvons-nous dresser un premier bilan des apports de la recherche en région Provence-Alpes-Côte d'Azur et plus particulièrement pour les Bouches-du-Rhône ?

La destruction des Bouddhas de Bamiyan, en Afghanistan, en mars 2001, par les talibans et celle de juillet 2012, au Mali, des tombeaux de Tombouctou ont révélé que le patrimoine mondial de l'humanité était menacé. Il est la victime de guerres, d'idéologies et de trafics illicites qui en découlent, alimentés par ce que l'on nomme les « antiquités du sang ». Ces faits contemporains de destructions, de déprédations archéologiques, de commerces illégaux font l'objet de plusieurs études (1) et publications (2). Ces dernières contribuent à la recherche pour la protection du patrimoine des vestiges (3).

QUE PRESCRIT LA LÉGISLATION ?

C'est un axiome, le patrimoine archéologique français est en danger car il n'est pas renouvelable. Sa protection demeure un enjeu, donc juridique pour le législateur (4). Elle est prescrite par la loi en France¹ basée sur un régime juridique d'autorisations préalables (5). Ces dernières répondent au standard de la normalisation de la fouille archéologique édictée lors de la conférence internationale des fouilles au Caire, en Égypte (1937). Elles se norma-

lisent en France, avec la « loi Carcopino » (1941) et, à travers le monde, grâce à la Recommandation pour la normalisation de la fouille, prescrite par l'Unesco (1956). La France a souscrit aux nombreux traités internationaux² pour la patrimonialisation de cet héritage commun d'exception. La sauvegarde du patrimoine archéologique français est bien définie par le cadre juridique et légal qui, s'il n'est pas respecté, entraîne des poursuites administratives et /ou judiciaires contre celles et ceux qui l'enfreignent (notamment pour les codes du patrimoine, pénal, civil, de la sécurité intérieure, de la défense, de l'environnement, et du travail).

LES ÉCUEILS POUR LA PRÉSERVATION DE LA RESSOURCE ARCHÉOLOGIQUE

En 2013, la perception des publics était tranchée³. Les écueils étaient nombreux. Ils s'expliquaient par l'ignorance, la méconnaissance⁴ de cette législation, le désintérêt pour la problématique des pillages et des trafics illégaux des mobiliers archéologiques, ou l'image rêvée du chasseur de trésor, qui suscite l'envie, la sympathie du grand public pour des émissions (*Diggers*, *Britain's Secret Treasures*, etc.), des personnages réels (Franck Goddio, Tommy Thompson, etc.) ou fictifs (Tintin, Indiana Jones, Lara Croft, etc.) en soif d'aventures, de découvertes mais qui suscitaient des déprédations archéologiques.

LES DANGERS DE LA DÉTECTION DE MÉTAUX

En France, depuis 1975, c'est cette chasse au trésor grâce à l'utilisation de détecteurs de métaux qui s'est démultipliée. En 2018, l'archéologue Samuel Andrew



Fig. 1 : À gauche, deux détectoristes de métaux clandestins. © Anonyme. À droite, une excavation faite au marteau-piqueur sur un site de carrière antique de plein air. © A. Dumont-Castells.

Hardy estimait à 109 375 la population des détectoristes de métaux français (6). Chacun se met en quête de fabuleux trésors (Fig. 1). Généralement, ce sont ceux des Templiers ; dans l'Aude, à Rennes-le-Château, c'est celui de l'abbé Saunière (1852-1917). Cette recherche d'objets anciens se fait près des lieux de batailles (Alésia, etc.) parfois en s'aidant de l'imagerie aérienne accessible en ligne. Un sondage de 2010 de la Fédération nationale des utilisateurs de détecteurs de métaux (FNUDEM) informait que 68 % des usagers de détecteurs de métaux faisaient des recherches avant de partir prospecter : 51 % d'entre eux gardaient leurs trouvailles archéologiques tandis que 26 % les revendaient (7). En 2015, les médias évoquent de plus en plus les affaires judiciaires et les jugements. Depuis la fin 2021, neuf reportages ont été diffusés par TF1, BFMTV, France 2 et M6. En plus de la presse, le public ne méconnaît plus le sujet. Avant 2020, nous constatons que ces obstacles se traduisaient par un manque de savoir-faire, la non-priorisation « missionnelle », l'absence de synergie des services de l'État concernés par la lutte contre les atteintes portées au patrimoine des vestiges. De plus, certaines carences subsistent au sein des outils d'enregistrements des faits, notamment pour la classification des infractions au patrimoine archéologique. Ce qui affecte le traitement des données statistiques.

S'il s'agit bien d'un fléau, la réaction de la communauté des prospecteurs français ne s'est pas fait attendre. En effet, avant 2010, soutenue par des lobbies, elle bénéficie du vide juridique qui fait que la recherche d'objets anciens historiques peut se faire en toute quiétude, sur l'exemple de « modèles de conciliation⁵ » développés par certains pays du nord de l'Europe (Angleterre et Pays-de-Galles, Pays-Bas, etc.). La sensibilisation des médias, la prévention des publics, l'action judiciaire ont tôt fait de décrédibiliser l'argumentaire (rallyes-détection, dépollution, recherche d'objets perdus, de météorites, etc.) de celui qui n'a jamais pu démontrer l'intérêt et l'utilité de la quête dilettante de l'objet au moyen du détecteur de

métaux pour l'archéologie et la gestion de sa ressource. Une part de cette communauté s'obstine à prétexter ces activités plutôt que de se recentrer sur l'activité sportive, ludique du patrimoine.

Le contexte archéologique est quotidiennement détruit. Il est victime d'une part de l'artificialisation des sols pour laquelle l'archéologie supplée

par l'étude et d'autre part de la destruction avec ou sans usage du détecteur de métaux. Cette action illégale expose les infracteurs à des poursuites (Fig. 2). Ces actes illicites, préjudiciables à la ressource archéologique, traduisent surtout l'ignorance, la méconnaissance ou le déni de certains prospecteurs pour le contexte d'étude et l'archéologie. Certains adhèrent à une approche rétro-



Fig. 2 : Saisie chez un prospecteur de matériels de détection métallique, d'objets archéologiques et de revues spécialisées. © A. Dumont-Castells.

grade de la discipline : un ersatz de l'archéologie de l'objet, celle représentée par le personnage de fiction Benjamin Gates, celle qui s'oppose et essaie de survivre à l'archéologie normée du contexte.

COMMENT DISSUADER LES PRÉJUDICES ANTHROPIQUES FAITS AU PATRIMOINE ARCHÉOLOGIQUE ?

Des moyens développés pour dissuader les atteintes, ils sont surtout humains. Sensibilisés et informés, les

publics sont des sentinelles du patrimoine. La connaissance par l'étude de la dynamique du pillage, des trafics et des préjudices est un des apports de la recherche actuelle. Bien qu'ils se complètent, l'approche différencie le pillage historique (8) de celui du temps présent.

Le recensement des actes de déprédations à travers les sources archéologiques est indispensable mais l'étude privilégie aussi les jurisprudences. L'analyse archéologico-judiciaire permet de nous questionner ainsi sur les incidences, sur les raisons et sur les comportements des pillards et des trafiquants, sur la nature de l'objet convoité, etc. Selon l'approche historique ou contemporaine du phénomène nous pouvons nous demander si les actes des pilleurs s'inscrivent dans une démarche politico-militaire, socio-économique ou ludo-culturelle.

Avant l'arrivée du détecteur de métaux, des dépôts anciens d'objets (monnaies, haches, etc.) étaient découverts fortuitement, et c'était surtout le trafic du lapidaire (stèles, cippes, etc.) et le lithique qui alimentaient les collections (Fig. 3). L'usage abusif et illégal du détecteur a inversé la tendance puisqu'aujourd'hui se retrouvent sur les plateformes du web et les forums des

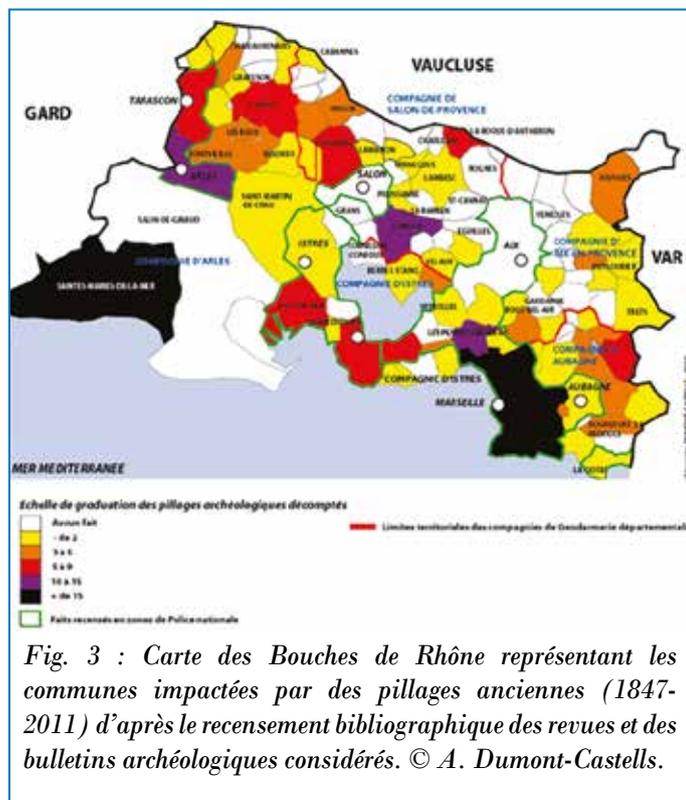


Fig. 3 : Carte des Bouches de Rhône représentant les communes impactées par des pillages anciens (1847-2011) d'après le recensement bibliographique des revues et des bulletins archéologiques considérés. © A. Dumont-Castells.

meubles archéologiques métalliques en or, électrum, argent ou bronze (monnaies gauloises, romaines, médiévales, etc.). En Provence-Alpes-Côte d'Azur, le conservateur régional de l'archéologie Xavier Delestre estime

que la détection clandestine c'est un dépôt monétaire découvert chaque mois, un millier de détectoristes identifiés, 5000 ha prospectés par an, 300 vendeurs réguliers sous pseudonymes sur les sites de ventes en ligne, 3000 objets archéologiques vendus pour le Vaucluse et 2 millions de monnaies anciennes découvertes clandestinement en 30 ans.



Fig. 4 : Pillages et trafics illicites de biens archéologiques 2021-2022 en ZGN-13. © A. Dumont-Castells.

Oltre ces études, dès octobre 2020, les services déconcentrés de l'État ont été sensibilisés ou formés grâce à la mise en œuvre d'une politique commune interservices pour la lutte et la protection du patrimoine archéologique provençal et nissard. La préfecture de région (DRAC-SRA) a signé plusieurs conventions avec la région de gendarmerie (2020), la douane judiciaire (2021) et la Cour d'appel d'Aix-en-Provence (2022). Des référents archéologie ont été formés et nommés au sein des unités de la gendarmerie nationale (73 gendarmes⁶), de la douane (SEJF), des magistrats des Parquets. En juillet 2022, le ministère de la Culture et la Direction générale de la Gendarmerie nationale (DGGN) ont décliné une convention-cadre au national. Ces rapprochements sont importants, car ils assurent une meilleure maîtrise du maillage territorial, des actions de nature préventive et de coercition pour juguler cette délinquance. Elles autorisent la création de la donnée judiciaire et administrative propice à l'étude.

Les Bouches-du-Rhône sont un exemple, le suivi des jugements et des procédures autorise la statistique. En 2015 les pillages et les trafics illégaux de biens archéolo-

giques sont passés de 4 faits à 34 en 2022 (Fig. 4). En région, le préjudice moyen annuel est estimé à 2 millions d'euros. La mise en place des référents archéologie doit permettre à terme de prévenir les atteintes. Une inflexion est attendue pour 2023. Elle devrait s'expliquer par une pratique plus retenue et avertie de la communauté des détectoristes, par la vigilance des référents archéologie, des publics, par la sensibilisation des élus, des polices municipales et de l'ONE.

Pour conclure, cette recherche originale et novatrice bénéficie de sources diverses (médias, littérature spécialisée, travaux scientifiques, bases de données, etc.) dont celles du web. À terme, elle autorise des orientations, des études universitaires sous divers aspects : disciplinaires, thématiques, périodiques, géographique et technologique. Ces connaissances permettront une meilleure sauvegarde et protection de la ressource archéologique.

RÉFÉRENCES

- (1) Dumont-Castells A (2021) *Le pillage du patrimoine archéologique terrestre en France métropolitaine*. Thèse de doctorat en Archéologie, Université Aix-Marseille (AMU), 796 pages.
- (2) Aprato G (2001) *Archeologia violata. L'Arma dei Carabinieri a tutela del patrimonio culturale*. Éditions De Luca, Rome, 110 pages.
- (3) Delestre L (2018) *Le pillage des archives du sol. La détection, un fait de société, un fait délictuel*. Mémoire de sciences politiques, Institut d'études politiques, 107 pages.
- (4) Camara A, Négri V (2016) *La protection du patrimoine archéologique – Fondements sociaux et enjeux juridiques*. Coll. Droit du patrimoine culturel et naturel, L'Harmattan, Paris, 246 pages.
- (5) Dumont-Castells A, Rambaud T (2021) L'archéologie ne retourne pas au Conseil constitutionnel. *L'Actualité Juridique du Droit Administratif* 42 : 2467-2472.
- (6) Hardy S-A (2018) Metal-Detecting for Cultural Objects until « There Is Nothing Left » : The potential and Limits of Digital Data, Netnographic Data and Market Data for Open-Source Analysis. *Arts* 7 : 40, 36 pages.
- (7) Dumont-Castells A (2020) Le détectorisme est autorisé dans certains états américains. *Lepetitjournal.com*. New-York, <https://lepetitjournal.com/new-york/le-detecto-risme-est-autorise-dans-certains-etats-americains-272105>
- (8) Dumont-Castells A Le pillage archéologique. Un état, une rétrospective dans les Bouches-du-Rhône (France). (à paraître).

NOTES

- (1) Les lois pour la protection des monuments historiques, la conservation du patrimoine culturel et l'exécution des fouilles intéressent l'article 4 du décret du 14 août 1792, la circulaire du 13 mars 1838, la loi du 30 mars 1887 abrogée par la loi du 31 décembre 1913, la loi du 27 septembre 1941 et les lois complétives : loi n° 80-532 du 15 juillet 1980, loi n° 89-900 du 18 décembre 1989, loi de 2004, décret n° 91-787 du 19 août 1991, loi n° 2008-696 du 15 juillet 2008 et loi n° 2016-925 du 7 juillet 2016.
- (2) Convention de La Haye (Pays-Bas - 1954), Recommandation de l'Unesco (1956), Convention européenne de Londres (R.U. - 1969), Convention de l'Unesco de Rome (Italie - 1970), Convention de l'Unesco (1972), Recommandation européenne 848 (1978), Recommandation 921 du Conseil de l'Europe (1981), Convention européenne de La Valette (Malte – 1992), Directive 19/7/CEE (1993), Convention d'Unidroit (1995), Convention de l'Unesco (2001), Résolution ONU 1483 (2003), Convention européenne de l'Unidroit (2005), Résolution ONU 2199 (2015), Rapport de l'Unesco (2016), Convention du Conseil de l'Europe de Nicosie (Chypre – 2017), Résolution ONU 2347 (2017), Résolution ONU 2482 (2019).
- (3) Depuis 2018, l'appropriation de la problématique, de la législation, des atteintes portées au patrimoine archéologique et la restitution des faits délictuels au grand public par les médias leur ont fait prendre conscience que la ressource archéologique n'était pas inépuisable et l'amputer empêchait l'archéologie de se réapproprier cette mémoire commune.
- (4) Ignorance de prospecteurs à vue ou de ceux aidés de moyens intermédiaires (détecteur de métaux, etc.) pour trouver des objets archéologiques. Ces derniers méconnaissent la loi le plus souvent ou sont mal informés sur la législation patrimoine par des professionnels peu scrupuleux.
- (5) S'appuyant sur les sciences dites participatives (public/scientifique). Initiatives encouragées à travers la Convention de Faro (2005). Cette dernière n'a pas été signée par la France qui a préféré un encadrement mieux défini par ses lois et par une participation citoyenne s'inscrivant dans la démarche scientifique.
- (6) En mai 2017, des référents ont été formés pour la gendarmerie maritime Méditerranée, en partenariat avec le DRASSM

La digitalisation de l'art pariétal et mobilier des grottes et sites ornés



Oscar Fuentes (A), Préhistorien, est adjoint scientifique au Centre national de préhistoire et chercheur associé au laboratoire UMR TEMPS (Technologie et ethnologie des mondes préhistoriques) du CNRS/Université Paris Nanterre. Il dirige l'étude de la grotte ornée de Commarque (Dordogne) et est membre des équipes de recherche des grottes Chauvet (Ardèche) et Cosquer (Bouche-du-Rhône). Ses recherches portent sur le rôle des images pour les sociétés du paléolithique supérieur, surtout la figuration du corps humain et ses enjeux sociaux et culturels, en croisant une démarche archéologique avec l'anthropologie sociale. Il travaille aussi aux développements de méthodes d'étude de l'art paléolithique en s'appuyant sur les technologies 3D.

Geneviève Pinçon (B), directrice du Centre national de préhistoire, membre de l'UMR TEMPS et chargée de mission au Musée d'archéologie nationale (Domaine de Saint-Germain-en-Laye), est spécialiste du Paléolithique supérieur et de l'utilisation des nouvelles technologies dans l'analyse de l'art rupestre, la conservation, le partage des connaissances et la valorisation des patrimoines. Responsable scientifique des recherches sur le site magdalénien du Roc-aux-Sorciers (Vienne) et membre de comités scientifiques pour la réalisation de Chauvet 2 (2015) et Cosquer Méditerranée (2022), elle pilote aussi des projets d'application de la 3D et a contribué à la réalisation de centres d'interprétation. Spécialiste de l'information géographique et membre du Conseil national de l'information géographique, elle a coordonné la conception et la mise en œuvre de l'Atlas des patrimoines au ministère de la Culture.

Résumé : Depuis la reconnaissance de l'art paléolithique vers la fin du XIX^e siècle en France, l'archéologie n'a eu de cesse d'adapter les outils de son temps pour documenter, étudier et conserver les grottes et abris ornés. La fragilité de ces sites a imposé aux archéologues la mise en place de protocoles qui se sont au fil des décennies de plus en plus adaptés aux contraintes du milieu et aux difficultés que pose l'étude du monde souterrain. Depuis les années 2010, se démocratise et se développe toute une stratégie d'études et d'analyses basées sur les outils numériques 3D. Le Centre national de préhistoire (CNP), service de la sous-direction d'archéologie du ministère de la Culture, développe et propose des outils à la communauté scientifique pour aborder au mieux les grottes et abris ornés. Face au changement climatique et aux situations de crise que vont connaître ces sites dans un avenir proche, le numérique joue un rôle important.

INTRODUCTION

Depuis la découverte d'Altamira à Santillana del Mar (Cantabrie, Espagne) en 1879 par Marcelino Sanz de Sautuola et la reconnaissance de l'art paléolithique marqué par la publication de « *Mea culpa d'un sceptique* » en 1902 par Émile Cathailhac suite aux découvertes françaises en Ardèche de la grotte Chabot en 1878, de la grotte de Pair-non-Pair en Gironde en 1883, de la grotte de la Vache en Dordogne en 1895 puis, enfin des Combarelles et de Font-de-Gaume en 1901 (1), la France est

riche de près de la moitié des sites ornés préhistoriques. Avec Altamira ou la Garma, l'Espagne est l'autre nation européenne possédant un tel patrimoine paléolithique sur son territoire. C'est pourquoi, les préhistoriens français et espagnols se concertent ou travaillent ensemble régulièrement pour mener à bien la conservation, l'étude et la valorisation de ces sites européens si singuliers.

L'ensemble de ces sites archéologiques qui se caractérisent la plupart du temps par des parois ornées de gravures ou de peintures, sont fragiles et nécessitent une recherche qui s'adapte à des conditions de conservation devant garantir leur pérennité à long terme. Ainsi recherche et conservation s'appuient systématiquement sur les outils les plus innovants qui peuvent être mis à leur disposition.

Tout un panel technologique s'offre aux préhistoriens que nous allons illustrer à travers des exemples d'usages mais aussi sur l'influence du numérique sur nos pratiques métiers.

CRÉER LA DONNÉE NUMÉRIQUE POUR LES GROTTES ORNÉES

Dans le cadre du numérique appliqué aux grottes ornées, il faut distinguer d'une part, les outils d'acquisition de ces données et, d'autre part, les outils de traitement et donc de leur valorisation. Pour les techniques d'acquisitions ou d'analyse, la règle commune est qu'ils

soient non invasifs, portables et manipulables dans un lieu au caractère confiné, étroit et à forte humidité. Depuis l'appareil photographique au scanner 3D, en passant par tous les outils d'analyse *in situ* comme le spectromètre portable couplant la FX et la DRX pour l'analyse directe sur la paroi des pigments sans prélèvement, ces outils sont exploités par tous les spécialistes selon leur discipline (Fig. 1).

Les modèles 3D sont quant à eux produits de deux manières : une acquisition par capteur laser (scan), on parle alors de lasergrammétrie ; ou bien par une série de prises de photo, il s'agit de photogrammétrie. Ces deux procédés permettent, sur la base d'un cahier des charges préalable à une commande de numérisation 3D, de générer des copies numériques à diverses résolutions, définitions et précision. En fonction de l'objectif de la numérisation, ces procédés peuvent s'associer pour permettre des usages à multi-échelle de ces données. Le Centre national de préhistoire (CNP) préconise avec l'appui de modèles de cahier des charges, un enregistrement le plus

précis et le plus exhaustif possible dans le but de disposer d'une archive et d'un objet support pour la conservation préventive et la recherche archéologique. Un modèle « public » est également encouragé pour une mise à disposition pour la médiation vers un plus large public.

Au-delà de tous ces outils de plus en plus performants, ce sont ceux mobilisés pour les analyses qui révolutionnent le métier du préhistorien. Les systèmes d'information géographiques (SIG), par exemple, sont depuis leur existence largement utilisés en archéologie, discipline inhérente au territoire. La Carte archéologique nationale (CAN), inscrite dans le Code du patrimoine français, permet une lecture continue du territoire des connaissances archéologiques. Cette CAN contribue à la gestion et aux développements de nouvelles problématiques territoriales. En changeant d'échelle, le SIG permet au niveau de l'entité archéologique qu'est la grotte ornée, de rassembler et superposer les données des multiples disciplines qui interviennent sur cet objet patri-



Fig. 1 : Utilisation de l'appareil de prise d'image à haute résolution macroscopique HIROX pour l'analyse des surfaces et notamment des pigments. Cl. O. Huard – Crédit Équipe Commarque MC / CNP.

monial. L'Atlas de la grotte Chauvet (2) démontre combien il est utile de compiler toutes les informations pour les mettre en perspective et aider à une lecture dynamique dans le temps et l'espace de ce lieu anciennement fréquenté par les humains. A la lecture de cet ouvrage, plusieurs images du paysage souterrain se dessinent selon les périodes, celui-ci étant plus ouvert à l'Aurignacien au temps des artistes qu'actuellement. (3). Au-delà de cette approche, de jeunes chercheurs s'attachent à restituer les informations pariétales que ce soit dans un but de développer une prospection prédictive (4) ou bien de caractériser spatialement l'intérieur des grottes ornées. Dans ce sens, Laura Louman aborde avec le SIG pariétal, une analyse spatiale de l'images et offre une lecture mesurée des empreintes de celles-ci dans la grotte (5).

Par ailleurs, le préhistorien se sert de tout logiciel quel que soit ce pourquoi il existe. C'est ainsi que Stéphane Konik a développé au CNP l'usage du « chronogramme » en s'appuyant sur le logiciel *Aeon timeline* utilisé par les romanciers, les scénaristes et les personnes en charge d'enquêtes policières pour gérer des chronologies, afin de mettre en perspective sur une ligne du temps les différents événements affectant une grotte ornée. Cet outil appliqué la première fois à la grotte de Lascaux a permis d'instituer les principes de régulation hygrothermique et du CO₂ restés en vigueur plusieurs

décennies et a aidé le conseil scientifique présidé par le professeur Yves Coppens à la prise de décision d'arrêter le pompage de l'air chargé en CO₂ au bas du Puits du Sorcier en janvier 2015.

L'introduction de la 3D et de tout l'écosystème numérique qu'elle engendre apporte aux préhistoriens, des modes de représentation de ces biens patrimoniaux particulièrement bien illustrés par les créations de facsimilés ou répliques (physiques et virtuelles) espagnoles et françaises (Lascaux 2, Lascaux 3, Lascaux 4, Chauvet 2, la Néogrotte d'Altamira, Ekainberri, Santimamiña), permettant de partager ces patrimoines avec le public (Fig. 2).

Mais au-delà de ces nouvelles ressources numériques et de la valorisation de ces sites, ce sont aussi de nouvelles pratiques appliquées à l'étude des parois ornées qui apparaissent dans le métier des préhistoriens.

DES CHANGEMENTS DE PRATIQUES INHÉRENTES À L'ÉCOSYSTÈME NUMÉRIQUE 3D DEVENU INCONTOURNABLE

Les préhistoriens, par le passé, se sont souvent confrontés seuls devant la paroi. Aujourd'hui, ce n'est plus le cas, bien au contraire. Désormais c'est l'ensemble de l'espace de la grotte qui est pris globalement, au sein d'une démarche intégrée, pour comprendre les activités

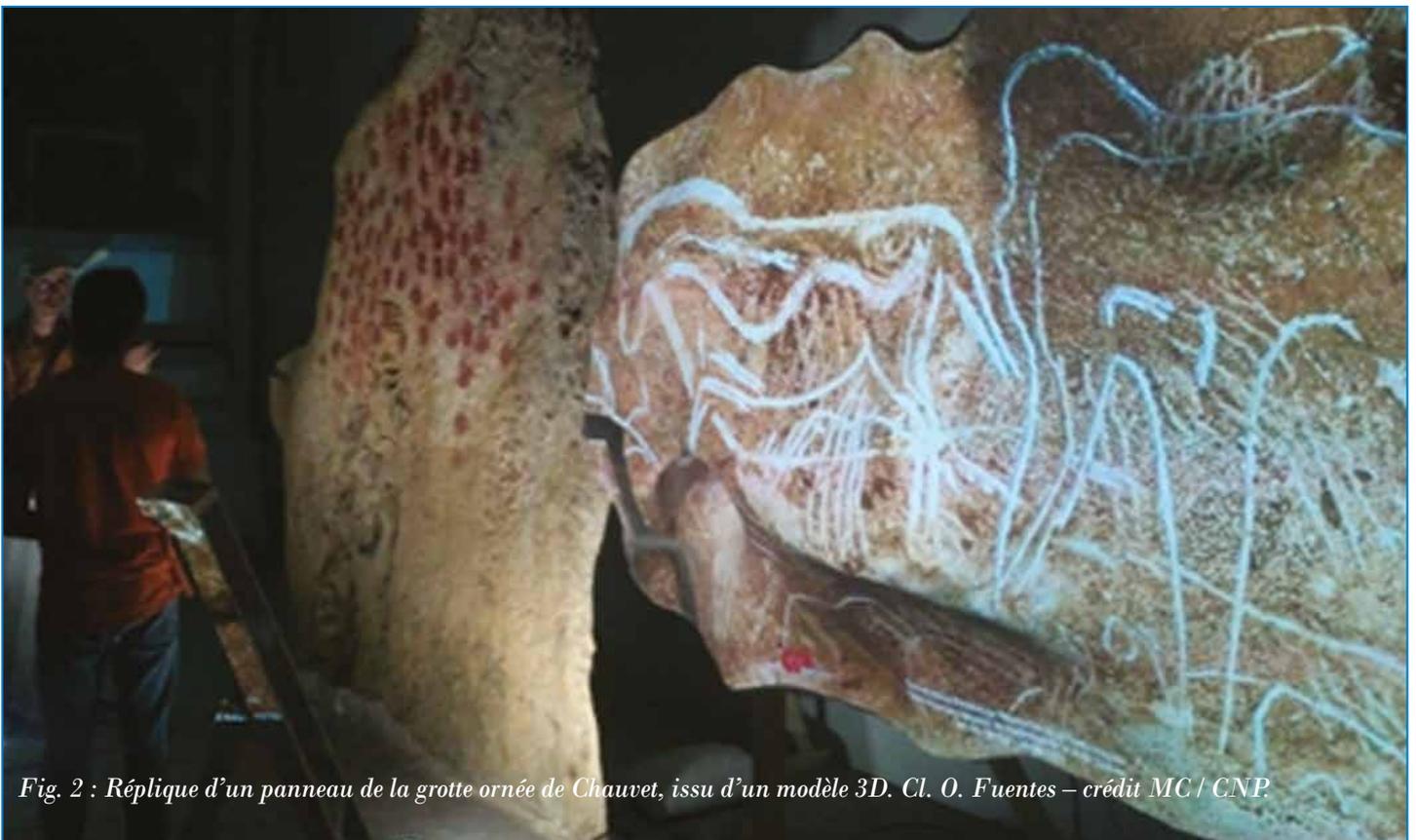


Fig. 2 : Réplique d'un panneau de la grotte ornée de Chauvet, issu d'un modèle 3D. Cl. O. Fuentes – crédit MC / CNP.

humaines qui s’y sont déroulées. Les outils numériques facilitent ces croisements entre disciplines et permettent de rassembler des données complexes et de les modéliser.

Les outils numériques permettent, notamment, d’ouvrir des actions de recherche collaboratives, qui peuvent se déployer par exemple dans la réalisation des relevés des parois. Les travaux de Joy Legay développés sur le relevé collaboratif mis en place au CNP participe à ces changements de pratiques appliquant une méthode de relevé « collaborative » (6). Cela permet de conforter l’objectivité de l’analyse de la paroi en croisant les regards de différents acteurs. Ces relevés se font en superposant l’analyse croisée d’une même surface par plusieurs « releveurs » en partant de documents images (photos) pris sous des angles de lumières tournantes. Cela permet ensuite de comparer l’écart entre les différents relevés et analyser ainsi les différences dans les lectures de paroi.

Le numérique et plus particulièrement la 3D encourage également les spécialistes à partager leurs données comme c’est le cas avec les SIG, mais aussi à les agréger sur le modèle 3D qui constitue alors le pivot central support des connaissances multidisciplinaires sur la grotte ornée. Plusieurs expériences dont par exemple celle que l’UMR MAP à Marseille a concrétisée avec la plate-forme Aioli. Cette plateforme d’annotation sémantique 3D permet à différents collaborateurs (archéologues, conservateurs, ingénieurs, restaurateurs, enseignants, étudiants, touristes) de produire des obser-

vations directement sur l’objet en positionnant précisément leurs observations sur le modèle 3D (7). Le partage et l’approche participative de cet outil aboutissent à de nouveaux modes d’enrichissement de la connaissance et ancrent l’analyse dans la pluridisciplinarité et la coopération.

Le relevé d’analyse pariétale, outil essentiel aux préhistoriens et pour les géo-sciences, change aussi dans le cadre de cet écosystème numérique 3D. Le passage en deux dimensions d’un relevé d’art pariétal rendant compte de figures en volumes, obligé jusqu’à présent, ne l’est plus. Il est désormais possible de réaliser un relevé d’art pariétal directement dans le modèle 3D (relevé en 3D dynamique), donc en trois dimensions, évitant ainsi toutes les distorsions auxquelles nous devons faire face jusqu’à présent (8, 9, 10) (Fig. 3).

L’analyse peut désormais s’appuyer sur les volumes qui étaient si importants pour les Paléolithiques qui en prenaient systématiquement compte lors de la réalisation des images sur les parois. Le fait de pouvoir réaliser un relevé d’art pariétal directement sur le modèle 3D permet non seulement d’intégrer les reliefs et les volumes dans la compréhension des formes et du geste, mais aussi de pouvoir agréger dans un même modèle, des études de surfaces conjointement, que ce soit du point de vue géo-archéologique ou géomorphologique. Au-delà des enjeux formels et de leur lien avec les supports, la 3D est aussi un outil à micro-échelle qui nous permet

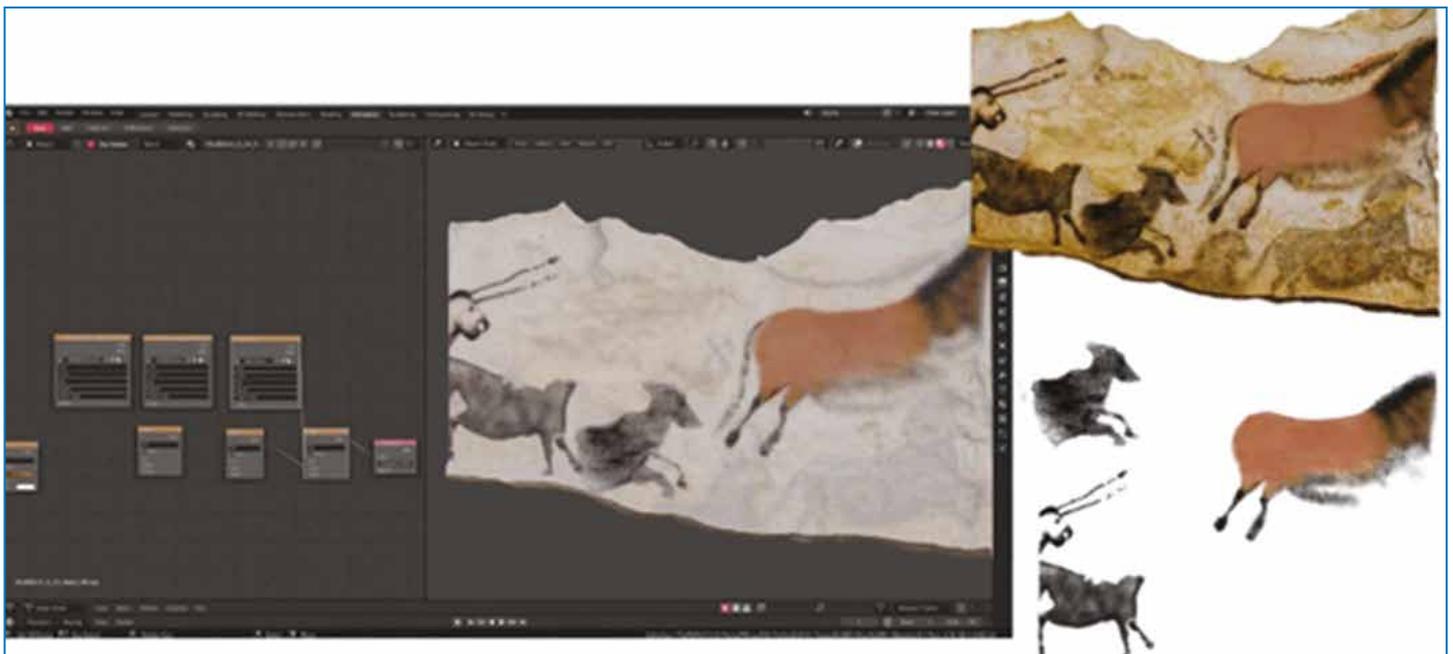


Fig. 3 : Relevé d’art pariétal directement réalisé sur le modèle 3D à l’aide du logiciel open source Blender. Relevé J. Legay Crédit MC / CNP.

une étude précise et approfondie des techniques et des gestes des artistes paléolithiques (10).

Enfin, ces changements de paradigmes qu'entraîne le tout numérique, soulèvent un autre sujet dont les préhistoriens s'emparent de plus en plus, la gestion de leur documentation scientifique numérique, dans le but de la rendre pérenne et de la partager pour ce qu'elle est. Ainsi se développe la description des métadonnées et paradata de toutes les données numériques produites (CNP-MAP, 2017).

L'ARCHÉOLOGIE DES GROTTES ORNÉES FACE AUX CRISES À VENIR : UN CHANGEMENT DE PARADIGME AVEC LES OUTILS NUMÉRIQUES

L'archéologie des grottes ornées s'inscrit, comme l'ensemble des disciplines des sciences humaines, dans les problématiques générales de son temps. Elle est totalement liée aux contraintes, changements et bouleversements que les sociétés peuvent connaître. Ainsi dans un contexte de crise climatique et de bouleversements des équilibres des écosystèmes, le monde souterrain est également impacté par ces changements. D'une archéologie projetée dans un développement durable (une écologie stable), nous devons désormais faire face à une écologie des ruptures, de l'instabilité et des crises.

Cela se traduit comme nous l'avons vu, par des déséquilibres constatés dans les grottes qui impactent directement la conservation des œuvres pariétales et les ves-

tiges archéologiques au sol. Les suivis climatiques dans plusieurs cavités depuis des décennies ont bien enregistré l'augmentation des températures moyennes. Ces changements de climat externes et internes produisent plusieurs déséquilibres, soit d'ordre biologique (développements de vie bactérienne), soit par la dégradation de la qualité de l'air, par la hausse notamment du taux de CO₂. L'ensemble de ces facteurs liés aux changements climatiques a un impact direct sur la conservation, mais aussi en termes d'accessibilité.

Cette question de l'accessibilité des sites est fondamentale pour les grottes ornées, en termes de suivi conservatoire comme sur le plan de la recherche scientifique. Sans un accès régulier possible au site permettant de l'épargner, il est donc primordial de mettre en place des nouvelles stratégies de conservation et de recherche. La fermeture de la grotte de Lascaux au public et les problèmes de suivi sanitaire qui en découlent ont mis en exergue la fragilité du milieu souterrain en lien avec les œuvres pariétales. D'autres grottes connaissent des difficultés d'accessibilité partielles (certaines zones de la grotte) ou sur l'ensemble du réseau. Le troisième réseau des Combarelles découvert en 2015 est très difficile d'accès et l'étroitesse des lieux ne permet pas de réaliser un travail *in situ*. La grotte de Cazelle (Dordogne), découverte en 2005 connaît la difficulté de circuler dans un réseau orné et étroit. Les changements climatiques impactent directement l'accessibilité des réseaux ornés, comme c'est le cas pour la grotte Chauvet (Ardèche) qui connaît une hausse du taux de CO₂ dans certaines parties ornées. Mais



Fig. 4 : Fac-similé de la grotte de Lascaux présenté au public à Lascaux 4. Cl. N. Cahoreau. Crédit MC / CNP.

l'exemple le plus emblématique reste la situation de crise que connaît la grotte ornée paléolithique de Cosquer (Marseille). Depuis sa découverte en 1991, la grotte Cosquer semi-noyée dans les eaux de la Méditerranée, connaît une hausse du niveau de l'eau (zone de marnage) qui ne cesse de monter dans la cavité. Ce phénomène est directement lié à la hausse du niveau de la mer impactée par le changement climatique. La conséquence directe est la perte progressive des sols archéologiques (sols d'occupation et l'ensemble des vestiges archéologiques liées à l'occupation paléolithique) mais aussi des dessins sur les parois. L'eau de mer (qui est également polluée) et ses mouvements sur les parois entraînent une perte des peintures, et des pellicules des parois se détachent de la surface. C'est ainsi une destruction irréversible et progressive des parois ornées de Cosquer qui est en marche.

Face à ces situations, l'archéologie doit évoluer et s'adapter à des conditions environnementales de moins en moins stables. Les outils numériques et notamment la 3D offrent la possibilité de cette adaptabilité par une démocratisation accrue des outils et par une technologie qui se développe continuellement. La difficulté se trouve donc non pas dans les moyens et les outils, mais dans la pratique humaine de cette archéologie, c'est-à-dire dans les méthodes et usages. C'est à ce niveau que les démarches, qu'elles soient archéologiques ou conservatoires, doivent faire leur mutation, être en rupture des pratiques traditionnelles, si l'on veut être dans un changement de paradigme qu'imposent les bouleversements actuels. C'est généralement en période de crise que s'opèrent les changements dans les pratiques. L'approche collective et intégrée des grottes ornées, bien patrimonial fragile, est un espace scientifique, méthodologique et technique où ces changements doivent se faire.

Il est donc primordial d'intégrer dans les démarches les écosystèmes numériques 3D qui ont la capacité de proposer des jumeaux numériques comme nouveaux espaces intégraux et délocalisés de ces biens patrimoniaux sensibles (11). Mais cette copie à multi-échelle, ne peut devenir un espace de travail que si les données qu'elle met à disposition sont exploitables, archivées, documentées et stockées sur le long terme. C'est pourquoi il est nécessaire de garantir la qualité de la documentation produite, en étant évolutive, opérante et interopérable. Chaque élément, quelle que soit son échelle dans l'espace numérique (du point au modèle), doit avoir ses métadonnées et être consultable sur le long terme. Cette question de la documentation qui enrichit la donnée est désormais incontournable pour permettre aux espaces numériques délocalisés d'être pertinents sur la durée et partageables.

Mais cette quantité d'information produite dans les démarches d'acquisition et création de données 3D se traduit par un volume toujours plus croissant. Se pose alors non seulement une problématique fondamentale afin de savoir comment et où stocker cette masse de données mais aussi un autre enjeu de taille, l'archivage pour garantir aux générations futures de toujours pouvoir accéder à ces copies numériques et de pouvoir à leur tour les exploiter.

DE LA DÉMATÉRIALISATION DES DONNÉES À LEUR RE-MATÉRIALISATION.

La numérisation 3D des grottes ornées a permis la création, la mise à disposition et la diffusion de copies numériques ouvrant la voie à des projets qui se sont multipliés ces dernières années, Chauvet 2, Lascaux 4 (Fig. 4) ou plus récemment Cosquer Méditerranée, que le CNP a accompagné dans leur réalisation. Grâce à des modèles numériques 3D, il est possible de proposer une matérialité de l'objet, ressemblant à l'original qui permet une rencontre physique avec la copie. Cette double existence des données (numérique et physique) se déploie aussi dans les processus de recherche et d'immersion. En effet, la réalité virtuelle permet d'évoluer dans l'espace de la grotte ornée de manière numérique et de façon simulée. Cette expérience se réalise dans le cadre de la médiation au travers des visites virtuelles (Lascaux VR par exemple) mais aussi dans le cadre de la recherche. Les travaux menés au CNP depuis ces dernières années ont permis de tester la démarche d'une recherche menée dans un espace de réalité virtuelle dans l'idée de disposer numériquement d'un laboratoire virtuel. Cela permet de simuler des dimensions que seule la 3D classique (sur écran) ne permet pas de concrétiser, comme le fait d'appréhender les espaces de la cavité, de se mouvoir dans le réseau, de se rendre compte des dimensions et de l'échelle de ce qui est observé. La simulation en réalité virtuelle permet donc d'ajouter à la 3D classique, une expérience de la copie numérique enrichie par la dynamique du mouvement. Cette expérience en réalité virtuelle offre un espace de travail numérique adapté à l'étude de l'art en grotte puisqu'il intègre la dimension des volumes. Tout l'enjeu se trouve alors dans l'implémentation nécessaire dans l'espace virtuel d'une série d'outil permettant de mener des actions de recherche ou de documentation.

La re-matérialisation des données numériques peut aussi se concrétiser au travers d'impression 3D permettant de réaliser des copies à différentes échelles d'un modèle 3D. Travail réalisé récemment au CNP par Emma Cabrera, l'impression 3D d'une surface de paroi par exemple, permet de déployer des actions de recherche

ou d'expérimentation de manière très précise, en intégrant la dimension de grandeur (il est possible d'expérimenter la taille de l'objet), tout en préservant le lieu original (12). Ces impressions 3D qui se déploient depuis plusieurs années dans le domaine de l'archéologie et notamment en archéologie préventive, trouvent sa pertinence dans l'étude d'une grotte ornée en complément de la dimension numérique de la grotte. La paroi dématérialisée devient également une copie, une archive du bien patrimonial qu'il conviendra également de documenter afin de garantir un archivage et un stockage sur le long terme.

CONCLUSION

Les grottes ornées de la préhistoire en tant que bien patrimonial fragile représentent des espaces souterrains complexes qui posent des enjeux tant sur le plan de la connaissance des sociétés du passé mais aussi sur le plan conservatoire d'un patrimoine unique. Les appréhensions de ces espaces par les différents acteurs de la recherche et de la conservation sont totalement liées et participent à la dynamique de ces sites. Leur accessibilité est donc primordiale pour enrichir la connaissance des sociétés du passé, pour œuvrer à leur conservation. Ces deux démarches participent tout autant à la troisième dimension de ces sites, c'est-à-dire leur médiation, leur valorisation. Porter à la connaissance du plus grand nombre et mettre à disposition des publics ces lieux qui seront de plus en plus inaccessibles, est indéniablement une nécessité pour les générations futures. Les outils du numérique et notamment les écosystèmes 3D sont autant de moyens et supports qui ouvrent un monde des possibles face aux changements auxquels nous devons faire face, mais ils nous imposent d'être acteurs dans les changements de pratique que nous devons également réaliser.

L'introduction du numérique et plus particulièrement de la 3D permet d'aborder les grottes en trois dimensions et de façon de plus en plus collaborative et participative. Elle permet de formaliser la description des données qu'elle produit afin de les rendre pérennes et partageables. Ainsi la communauté scientifique travaillant sur les grottes ornées paléolithiques bénéficie d'un nouveau contexte, lié au numérique, qui l'inscrit fortement dans le monde contemporain innovant et tourné vers l'avenir, en l'incitant à s'adapter comme l'humanité l'a fait depuis son origine.

BIBLIOGRAPHIE

(1) Capitan L, Breuil H (1902) Gravures paléolithiques sur les parois de la grotte des Combarelles près des Eyzies

(Dordogne). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 3 : 527-535

(2) Geneste J-M, Delannoy J-J (dir.) (2020) *Monographie de la grotte Chauvet-Pont d'Arc, vol.1, Atlas de la grotte Chauvet-Pont d'Arc*. Ed. La Maison des sciences de l'Homme, coll. « Documents d'archéologie française », Paris.

(3) Genuite K (2019) *Paléogéographies et reconstitution géomorphologique 3D : application aux environnements de sites ornés*. Thèse Université Grenoble Alpes (ComUE), 274 pages.

(4) Garate D, Intxaurbe I, Moreno-Garcia J (2020) Establishing a predictive model for rock art surveying: The case of Palaeolithic caves in Northern Spain. *Journal of Anthropological Archaeology*, 60 : 101-231

(5) Louman L, Fritz C, Desponds D et al. (2020). Le géoweb et la cartographie collaborative au service de l'étude de la grotte Chauvet Pont-d'Arc (Ardèche). *Fondation des Sciences du Patrimoine : recherches interdisciplinaires. Techné* 5 : 49-57.

(6) Legay J (2020) *Le relevé d'art pariétal collaboratif : de nouvelles modalités pour la recherche appliquée à l'étude de la grotte ornée de Commarque (Dordogne)*. Mémoire de Master 2, Université de Bordeaux.

(7) Abergel V, Pinçon G, Konik S et al. (2019) Harmonisation et diffusion des ressources numériques 3D des grottes ornées. *In Situ Revue des Patrimoines* [En ligne] 39. DOI : <https://doi.org/10.4000/insitu.21550>

(8) Fuentes O, Lepelé J, Pinçon G (2019) Transferts méthodologiques 3D appliqués à l'étude de l'art paléolithique : une nouvelle dimension pour les relevés d'art préhistorique. *In Situ Revues des Patrimoines*, [En ligne] 39. DOI : <https://doi.org/10.4000/insitu.21510>

(9) Barbuti P, Fuentes O, Konik S et al. (2023) Le relevé interdisciplinaire d'art pariétal paléolithique en trois dimensions : intérêt, méthode et premiers résultats. *Humanités numériques* [En ligne], 7. DOI : <https://doi.org/10.4000/revuehn.3410>

(10) Centre National de Préhistoire, MAP UMR 3495 (2017) *Livret méthodologique. Description des métadonnées des acquisitions numériques. Et quelques préconisations*. Ed. Centre National de Préhistoire, 33 pages.

(11) Rivero O, Ruiz-López J, Intxaurbe I et al. (2019) On the limits of 3D capture: a new method to approach the photogrammetric recording of palaeolithic thin incised engravings in Atxurra Cave (northern Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 14 : e00106. DOI : [10.1016/j.daach.2019.e00106](https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00106)

(12) Cabrera E (2023). *Penser la re-matérialisation pour la recherche. Apports, limites et perspectives*. Mémoire de Licence professionnelle, Université Cergy-Paris (CY).

De la physique du bâtiment à la préservation du patrimoine culturel



Hannelore Derluyn (A) CR au CNRS, obtient son doctorat à l'ETH de Zurich sur le transport et la cristallisation des sels dans les milieux poreux en 2012. Après un postdoctorat à l'université de Gand, elle rejoint le CNRS en 2016 au sein du laboratoire des Fluides complexes et leurs réservoirs (LFCR UMR 5150). Elle focalise ses recherches sur la dynamique des cycles précipitation-dissolution des sels en milieu poreux et la propagation des dommages associés. Elle a obtenu la médaille d'Argent de l'ETH en 2013, et une médaille de Bronze du CNRS en 2020.

Julie Desarnaud (B) obtient son doctorat à l'université d'Aix-Marseille en 2009 et concentre alors ses recherches sur la compréhension des mécanismes d'altération des milieux poreux par la cristallisation des sels, la durabilité et les traitements de conservation des matériaux du patrimoine et l'impact du changement climatique, dans plusieurs instituts (Laboratoire Navier, l'université d'Amsterdam, le Getty Conservation, le CSTC). Elle rejoint l'Institut royal du patrimoine artistique en 2020 comme scientifique de la conservation. Elle est vice-présidente du Comité scientifique international de la pierre (ICOMOS-ISCS).

Résumé : Les matériaux poreux sont omniprésents pour la construction des bâtiments, ainsi que dans les éléments décoratifs tels que les ornements de façades ou les sculptures. L'humidité est la cause principale de la dégradation de ces matériaux. Entre autres, les fluctuations de la teneur en eau entraînent des cycles de cristallisation et dissolution des sels qui sont à l'origine des altérations. L'eau dans l'enveloppe du bâtiment a plusieurs origines : les précipitations (pluies battantes), les eaux souterraines, et la condensation capillaire de l'air humide. Elle pénètre dans les maçonneries et peut être stockée à la surface ou en profondeur à l'intérieur de la structure du bâtiment. La préservation du patrimoine bâti est un véritable défi aujourd'hui qui nécessite une compréhension fine des mécanismes d'altération pour développer des techniques efficaces de restauration/conservation. Afin de relever ce défi, les apports de disciplines telles que la physique des milieux poreux et la physique du bâtiment sont indispensables. Les principes physiques appliqués au patrimoine bâti permettent d'expliquer les dégradations observées lors de diagnostics et d'élaborer des solutions de conservation. Dans cet article, les principes physiques de transport d'eau et de sels dans les milieux poreux seront décrits et illustrés par des cas pratiques sur site. Leurs applications concrètes utilisées pour traiter ou limiter les dégradations des monuments historiques et objets du patrimoine causées par les sels seront ensuite présentées.

L'humidité étant la cause principale de la dégradation des matériaux poreux du patrimoine bâti (1) (Fig. 1), il est indispensable de connaître les propriétés de transport de l'eau, comme les propriétés d'absorption et de rétention d'eau des matériaux utilisés pour la construction tels que la pierre, la brique, le mortier ainsi que le béton. Les méthodes non destructives de mesures des propriétés

de transport des matériaux de construction sont privilégiées sur site car il est rare de pouvoir prélever dans des édifices classés au titre de monuments historiques.



Fig. 1 : Dommages induits par de l'humidité : (A) humidité dans la maçonnerie d'une église provoquant la dégradation des briques. © J. Desarnaud ; (B) cristallisation de sel à la surface d'une façade suite à des remontées capillaires, provoquant des efflorescences et la formation d'écaillés (Mairie de Huesca, Espagne). © H. Derluyn.

LE TRANSPORT D'HUMIDITÉ

Le transport d'humidité se fait via le réseau des pores des matériaux poreux qui peut varier du nanomètre jusqu'à des centaines de micromètres pour les matériaux étudiés dans le domaine de la physique du bâtiment. Ces pores peuvent être plus ou moins connectés entre eux, ce qui va impacter le transport de l'humidité. Le matériau se compose d'une matrice solide et de pores. Le volume occupé par les pores définit la porosité du matériau définie comme étant le ratio entre le volume des pores et le volume total du matériel. Elle détermine

la capacité à stocker de l'humidité. Ainsi, un matériau saturé en eau avec une porosité de 25 %, par exemple une pierre de taille gréseuse, peut stocker beaucoup plus d'eau qu'un matériau ayant une porosité de 1 %, par exemple, du marbre. Dans les applications de la physique du bâtiment, les matériaux seront typiquement non-saturés, avec un certain pourcentage de pores remplis d'eau, lui conférant un certain degré de saturation en eau.

Le taux d'humidité (la saturation en eau) dans le matériau va varier en fonction du taux d'humidité de l'environnement qui l'entoure, ou par contact direct avec de l'eau liquide. Il va donc être impacté par l'humidité plus ou moins forte du climat, les pluies battantes, ou des variations des quantités d'eau venant du sol, avec deux cas extrêmes : i) l'absorption de vapeur ou d'eau liquide, qui dépend du transport de vapeur ou du transport par capillarité, et ii) le séchage.

Le transport de vapeur

Le transport de vapeur dans l'air ou dans un milieu poreux est induit par un gradient de pression de vapeur. La pression de vapeur est déterminée par l'humidité relative HR et la pression de vapeur saturante $p_{v,sat}$, qui dépend de la température. Ainsi, l'humidité relative est égale au ratio des pressions de vapeur $p_v/p_{v,sat}$.

Pour un milieu poreux saturé en eau et exposé à un environnement avec une humidité relative inférieure à 100 %, l'eau s'évapore et un processus de séchage va se mettre en place jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre en saturation d'eau (non-saturé) soit atteint. Initialement, le front d'eau se trouve à la surface, et aussi longtemps que le transport d'humidité de l'intérieur du matériau est en équilibre avec le transport de vapeur du front vers l'extérieur, le front d'humidité reste au même endroit. Cette période est définie comme la première étape de séchage, la vitesse de séchage étant presque constante et déterminée par l'humidité relative de l'environnement. Quand le flux d'eau vers le front d'humidité n'est plus maintenu, le front d'humidité se retire plus profondément dans le matériau, et la vitesse de séchage ralentit, évoluant vers la deuxième étape du séchage. Dans cette phase, les propriétés du matériau, telle que la perméabilité de vapeur, déterminent l'évolution de la distribution de l'humidité dans le matériau. La perméabilité de vapeur dépend du degré de saturation en eau du milieu poreux, elle diminue avec la baisse du taux de saturation pendant le séchage.

Le transport par capillarité

Lorsque le matériau est non-saturé et en contact avec

une source d'eau liquide, l'eau pénètre par capillarité. Ceci se produit à cause de la pression capillaire (p_c), qui est dans un pore, la différence de pression entre l'eau liquide et l'air qui sont séparés par un ménisque. L'énergie de surface des pores secs est plus grande que l'énergie de surface des pores saturés en eau. Le système diminuant son énergie lorsque la surface sèche est remplacée par la surface mouillée, les forces capillaires entraînent l'eau à se déplacer vers les zones où son énergie libre sera la plus basse (des zones mouillées vers les zones sèches). La hauteur maximale de l'ascension capillaire est définie par la loi de Jurin :

$$H = p_c / \rho g = 2\gamma \cos\theta / r\rho g$$

avec H l'ascension capillaire, γ la tension interfaciale liquide-air, θ l'angle de contact à l'équilibre entre le liquide et le solide, r le rayon des pores, ρ la masse volumique d'eau et g l'accélération de la pesanteur.

La pression capillaire, et la hauteur de la montée capillaire est d'autant plus grande que le rayon des pores est petit. Ainsi théoriquement dans un matériau avec des pores de 0,1 μm de diamètre, la hauteur maximale de l'ascension capillaire est de 15 m. Dans les bâtiments cette valeur n'est jamais atteinte car la hauteur maximale est un équilibre entre le débit d'absorption d'eau par capillarité et le débit d'évaporation de l'eau. Si des revêtements de surface ne modifient pas les propriétés de séchage des murs (revêtements hydrophobes), des hauteurs de frange capillaire de l'ordre de 1,5 m sont généralement observées (2). Quand un traitement hydrophobe est appliqué, l'angle de contact augmente, menant à une diminution, voir une non-existence de l'ascension capillaire.

Le transport par capillarité gouverné par un gradient en pression capillaire est décrit par la loi de Darcy :

$$g_l = -K_l \text{grad } p_c = \rho\varphi S_l u$$

où g_l est le flux de masse d'eau, K_l la perméabilité au liquide, φ la porosité, S_l le degré de saturation en eau liquide et u la vitesse d'absorption d'eau. Pour des milieux non-saturés, la perméabilité au liquide est fonction du degré de saturation en eau : plus la saturation est élevée, plus la perméabilité sera grande. Comme la hauteur maximale de l'ascension capillaire, la vitesse d'absorption d'eau sera dominée par les forces capillaires et ainsi par la tension interfaciale, l'angle de contact et la taille des pores. Des méthodes d'imagerie neutronique, comme illustré par la figure 2, permettent de visualiser directement l'absorption d'eau. Le contraste entre l'eau et la partie sèche du matériau est clairement visible. Grâce à l'acquisition d'images à intervalles réguliers, la

vitesse d'absorption peut être déduite, On remarque dans la figure 2 qu'à la fin de l'expérience le haut de l'échantillon n'est pas saturé en eau. Ceci est dû au fait que l'échantillon a subi un traitement hydrophobe à sa surface supérieure, rendant l'épaisseur traitée non-mouillante à l'eau, empêchant l'eau liquide de pénétrer cette zone et donc réduisant fortement la perméabilité.

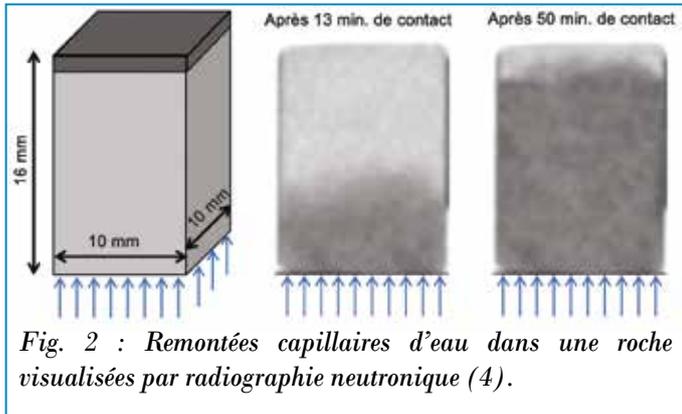


Fig. 2 : Remontées capillaires d'eau dans une roche visualisées par radiographie neutronique (4).

ÉVALUER LE TRANSPORT D'HUMIDITÉ SUR DES MONUMENTS HISTORIQUES : PIPETTE DE KARSTEN ET TEST À L'ÉPONGE

En amont de toute campagne de restauration, la réalisation d'un diagnostic est primordiale. Des mesures d'absorption d'eau informent sur la perméabilité des maté-

L'absorption d'eau des matériaux peut être mesurée directement sur site grâce à des méthodes non-destructives qui ne nécessitent pas de prélèvements, car il est rare de pouvoir prélever dans des édifices classés au titre de monuments historiques. Les plus utilisées sur le terrain sont : i) la pipette de Karsten (KT) et ii) les mesures à l'éponge (CSM) (Fig. 3). Les méthodes ont un champ d'application complémentaire : CSM est plus adaptée aux pierres à faible absorption, tandis que KT fournit des résultats plus pertinents pour les pierres à forte absorption.

Le test à l'éponge a été développé en 2004 par Tiano et Pardini (5). Une éponge certifiée, contenant une quantité d'eau choisie et connue (m_i) est pressée manuellement à la surface du milieu poreux à une pression maintenue constante grâce à la boîte dans laquelle se trouve l'éponge, pendant un temps donné t . Elle est ensuite retirée et pesée (m_f) pour en déduire la quantité d'eau qui a pénétré dans le milieu poreux. Le flux de masse d'eau est estimé selon l'équation :

$$g_t = \frac{\Delta m}{A \cdot t} = \frac{m_f - m_i}{A \cdot t}$$

où A représente la surface de l'éponge et Δm la quantité d'eau absorbée (calculée par soustraction de la masse finale de l'éponge m_f de la masse initiale m_i).

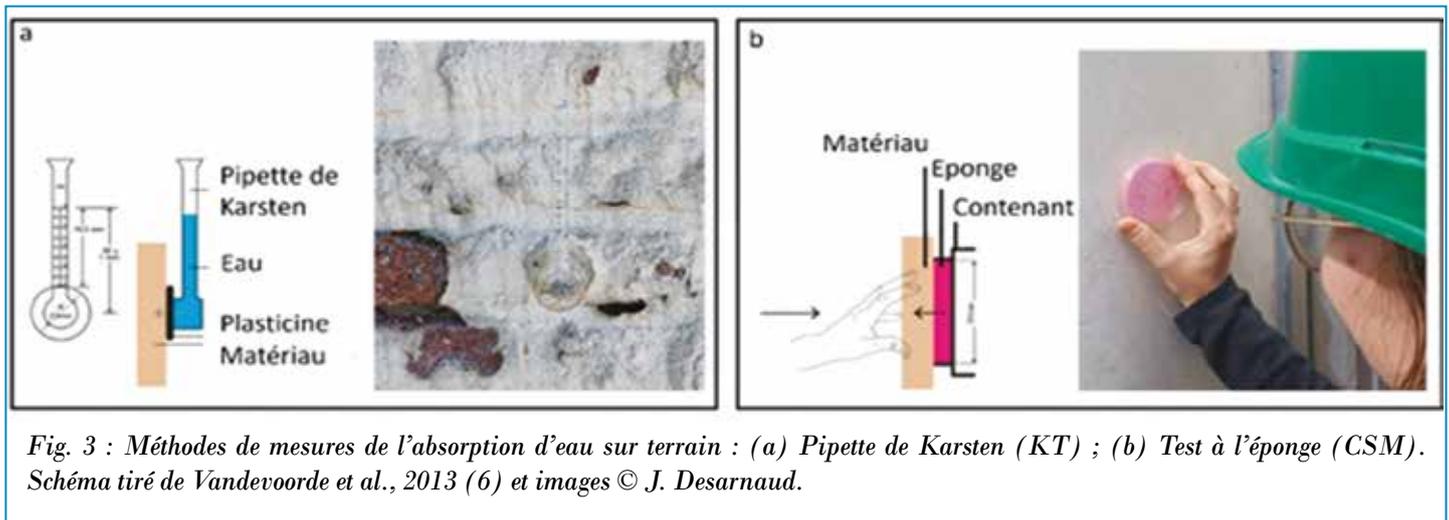


Fig. 3 : Méthodes de mesures de l'absorption d'eau sur terrain : (a) Pipette de Karsten (KT) ; (b) Test à l'éponge (CSM). Schéma tiré de Vandevoorde et al., 2013 (6) et images © J. Desarnaud.

riaux et apportent des informations indirectes sur les phénomènes d'altération, l'état de conservation des matériaux, et sur les potentiels traitements anciens présents et non répertoriés dans les archives. Ce dernier point est très important car certains traitements hydrofuges empêchent la pénétration de tout nouveau produit et dans la plupart des cas ralentissent l'évaporation de l'eau contenue dans l'édifice, risquant d'intensifier la dégradation.

La seconde méthode est la pipette de Karsten, qui a été développée en 1963 par Rudolf Karsten. Elle se compose d'un tube de verre ouvert et gradué avec un corps cylindrique plus grand à l'extrémité qui est scellé à la surface de la pierre par de la plasticine. Une fois fixée, l'eau est ajoutée dans la pipette et la quantité absorbée est enregistrée pendant le temps t . Le flux de masse d'eau est ensuite estimé selon l'équation :

$$g_{l\Delta 5-15min} = \frac{m_{15min} - m_{5min}}{A \cdot t_{10min}}$$

où A représente la surface du corps cylindrique en contact avec le milieu poreux et Δm la quantité d'eau absorbée pendant le temps de contact t . Conformément à la recommandation RILEM II.4 des mesures sont effectuées après 5 et 15 minutes de contact pour calculer le flux d'eau entre la 5^e et la 15^e minute ($\Delta 5-15$ min) selon cette équation.

LE TRANSPORT ET LA FORMATION DES SELS, ET LE DESSALEMENT

L'eau transportée n'est pas pure, elle contient, entre autres, des ions de sels dissous, comme des chlorures, des sulfates ou des nitrates. Ces sels peuvent être naturellement présents dans un matériau, ou peuvent avoir plusieurs origines comme les anciens traitements de restauration, les embruns marins et le sel de déverglaçage (chlorure de sodium), la pollution atmosphérique (sulfates), ou l'oxydation des matières organiques (nitrates). Ces sels peuvent causer des dégradations majeures qui peuvent être de nature plutôt esthétique, quand des cristaux de sels précipitent à la surface des matériaux (efflorescence), générant des taches blanches formées d'amas de cristaux (Fig. 1b). La dégradation peut aussi être de nature structurelle, lorsque les sels cristallisent à l'intérieur du milieu poreux (subflorescence), créant une force de cristallisation qui peut éventuellement fracturer le matériau. Dans ce dernier cas, des dommages mécaniques de type désagrégation granulaire, desquamation en plaque, écaillage (Fig. 1b) ou l'alvéolisation peuvent se développer (7).

Pour induire des dommages, il faut d'abord accumuler suffisamment de sels dans un endroit localisé, soit à la surface, soit sous la surface. Cette accumulation sera contrôlée par la compétition entre la diffusion et l'advection d'ions de sels, comme détaillé par la suite. Le rôle des scientifiques de la conservation consiste à trouver des méthodes permettant dans certains cas de limiter l'accumulation de sels, donc l'altération des matériaux et d'en d'autres cas d'extraire les sels lorsqu'ils ont atteint une quantité critique, comme illustré à la fin de cette section.

Le transport des sels par diffusion et advection

Tant qu'il n'y a pas de transport d'eau, les ions de sels ne font que diffuser au sein du liquide. La force motrice du transport est un gradient de concentration d'ions, qui peut être défini pour les sels dans un milieu poreux selon la loi de Fick (négligeant l'adsorption sur la paroi des pores) :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

où c est la concentration en ions et D_{eff} la diffusivité effective du milieu poreux. Dans un milieu poreux, la diffusion dépend de la tortuosité, τ , de la structure des pores, qui augmente la longueur effective du trajet : $D_{eff} = D/\tau$, où D est le coefficient de diffusion dans l'eau. En général, pour de nombreux matériaux poreux, τ est de l'ordre de 4-10 (8).

Lorsqu'il y a également un flux d'eau (ou advection), qui représente la plupart des cas d'intérêt pratique, les ions sont transportés avec le liquide. Simultanément à cette advection, les ions continuent de se déplacer en réponse au gradient de concentration. Pour un environnement complètement saturé, ceci est décrit par une équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial c}{\partial x} - uc \right)$$

où u [m/s] est la vitesse macroscopique du liquide dans le milieu poreux (càd, la vitesse de Darcy : $u = g/\rho\varphi$). Le premier terme du côté droit représente le flux ionique diffusif, le second terme le flux ionique advectif. Lorsque le flux advectif est dominant, la concentration augmente dans la zone où le liquide s'écoule, et la distribution de la concentration dans l'échantillon est hétérogène. Lorsque le flux diffusif est dominant, les ions seront transportés des zones de haute concentration vers les zones de plus faible concentration et la concentration s'équilibrera, conduisant à une distribution homogène de la concentration en sel. Cette compétition entre l'advection et la diffusion peut être décrite à l'échelle macroscopique par le nombre sans dimension de Péclet :

$$Pe = \frac{uL}{D_{eff}}$$

où L est la longueur caractéristique du système. Lorsque $Pe \gg 1$, le transport du sel est dominé par l'advection ; pour $Pe \ll 1$, le transport est dominé par la diffusion.

La précipitation et dissolution des sels

Les sels ont la capacité de cristalliser lorsque le seuil de saturation du sel est dépassé, c'est-à-dire, quand la concentration de la solution ionique dépasse la concentration d'équilibre. Dans les monuments, la cristallisation est typiquement induite par des changements climatiques, càd, des changements de température et/ou d'humidité de l'environnement. Focalisant sur l'humidité uniquement, c'est le processus de séchage qui permet d'atteindre le seuil de saturation du sel et à provoquer sa précipitation. Comme expliqué plus haut, le séchage consiste en deux étapes, où d'abord le front

d'eau se trouve à la surface, pour après se retirer à l'intérieur du milieu poreux. Le séchage est le processus prédominant qui va déterminer, en fonction du nombre de Péclet, si on forme des efflorescences ou des subefflorescences (Fig. 4). Dans le cas où $Pe \gg 1$, l'accumulation d'ions au niveau ou à proximité de la surface donne lieu à la cristallisation de sels dès que la concentration d'équilibre est atteinte (en supposant que la nucléation soit facile). Par contre, si $Pe \ll 1$, les sels peuvent se redistribuer vers les zones de plus faible concentration, afin d'éviter l'accumulation, en particulier sous la surface, diminuant le risque d'endommagement.

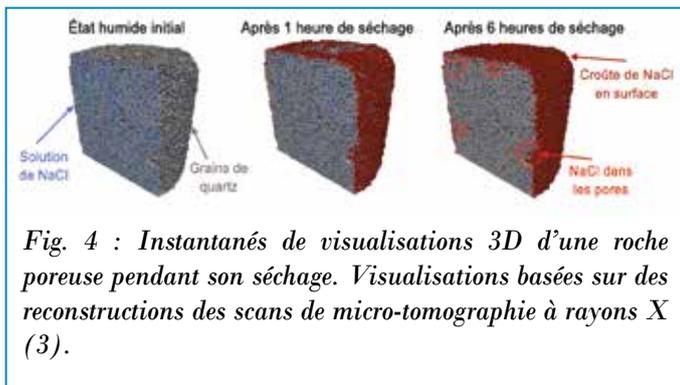


Fig. 4 : Instantanés de visualisations 3D d'une roche poreuse pendant son séchage. Visualisations basées sur des reconstructions des scans de micro-tomographie à rayons X (3).

Les cristaux peuvent être ensuite à nouveau dissous en introduisant de l'eau liquide dans le milieu poreux, ou par hygroscopicité, c'est-à-dire par contact avec de la vapeur d'eau. Les sels solubles peuvent être hygroscopiques, c'est-à-dire, avoir la capacité de fixer les molécules d'eau contenues dans l'air lorsque l'humidité relative de l'air est supérieure à l'humidité relative d'équilibre des sels. Si la quantité d'humidité adsorbée par les sels est assez grande, ils pourront passer en solution : c'est le phénomène de déliquescence. L'hygroscopicité d'un sel est d'autant plus grande que son humidité relative d'équilibre est basse. Par exemple, le NaCl a une humidité relative d'équilibre de 75 %, alors que celui du nitrate de calcium est de 54 %. Lorsqu'un bâtiment est contaminé par les sels hygroscopiques et que l'humidité relative de l'air ambiant est supérieure à l'humidité d'équilibre du sel, cela va se traduire par l'apparition de tache d'humidité sur la façade (Fig. 1a). L'hygroscopicité, la capacité à se dissoudre, à déliquescer et à cristalliser sont donc des propriétés importantes dans le mécanisme de dégradation des matériaux par les sels (2).

LE DESSALEMENT DES MONUMENTS ET DES OBJETS HISTORIQUES : COMPRESSES, IMMERSION DANS DES BAINS, ET CONTROLE DU CLIMAT ENVIRONNANT

Le traitement des matériaux constitutifs des monuments altérés par la cristallisation des sels n'est pas

chose aisée. Les méthodes utilisées permettent soit de stopper les cycles de dissolution - cristallisation en contrôlant les conditions climatiques environnantes - soit en extrayant les sels contenus dans le monument en ayant au préalable éliminé toutes sources d'eau. Dans ce dernier cas, l'extraction des sels peut se faire par application de compresses soit par immersion dans des bains d'eau. Dans les deux cas, les phénomènes d'advection et de diffusion et une combinaison des deux permettent d'expliquer le principe du dessalement (2).

Par application de compresses (objet non déplaçable, comme le Motomachi Buddha), (Fig. 5), les sels vont migrer du matériau vers la compresse lors de son séchage, principalement par advection. Ces compresses sont appliquées saturées en eau sur le matériau et retirées lorsqu'elles sont totalement sèches. Elles sont composées de plusieurs matériaux hydrophiles (cellulose, sable, argiles) dont les proportions régissent sa distribution de tailles de pores. Pour un dessalement optimal la taille des pores de la compresse est adaptée au matériau à dessaler. La présence de plus grands pores dans la compresse va permettre à l'eau contenue dans la compresse de saturer les pores du matériau et de dissoudre les sels présents. La compresse doit aussi contenir des pores plus petits que le matériau pour permettre à la solution ionique ainsi formée d'être absorbée par la compresse lors du séchage. Les ions migreront par advection dans la compresse.

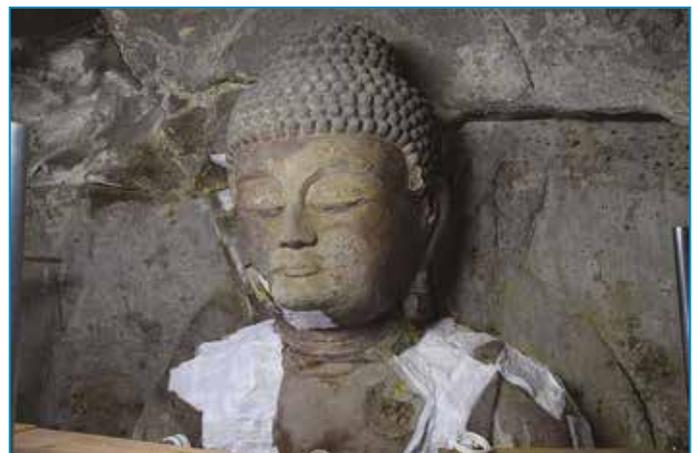


Fig. 5 : Dessalement par compresses du Motomachi Buddha, Oita, Japon. © H. Derluyn.

Dans le cas où l'objet contaminé par les sels est transportable, le dessalement peut s'effectuer par immersion dans des bains principalement par diffusion. Totalement immergé, l'eau va pénétrer par capillarité dans la porosité et dissoudre les sels présents. Un gradient de concentration va se créer entre la solution ionique ainsi formée

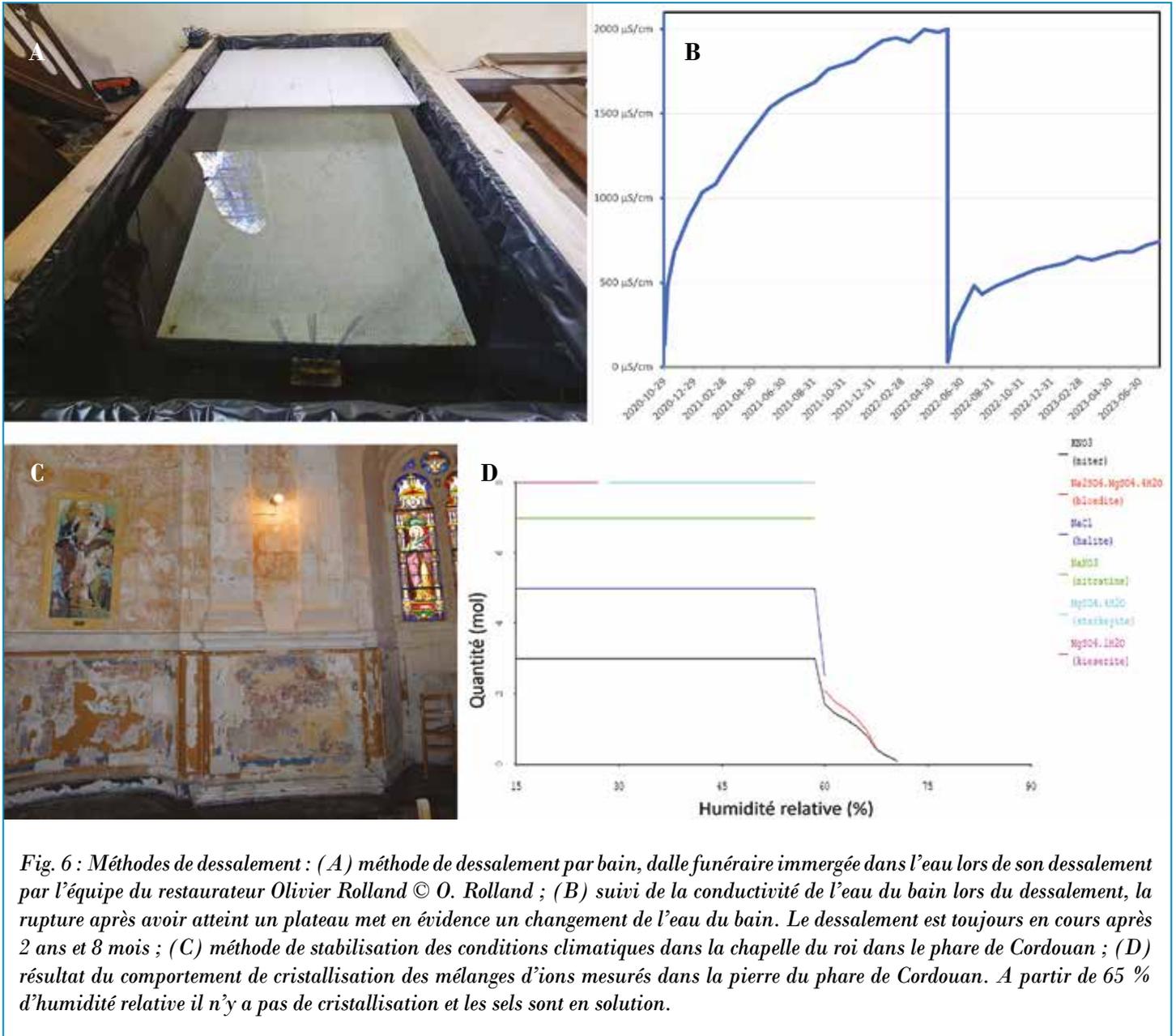


Fig. 6 : Méthodes de dessalement : (A) méthode de dessalement par bain, dalle funéraire immergée dans l'eau lors de son dessalement par l'équipe du restaurateur Olivier Rolland © O. Rolland ; (B) suivi de la conductivité de l'eau du bain lors du dessalement, la rupture après avoir atteint un plateau met en évidence un changement de l'eau du bain. Le dessalement est toujours en cours après 2 ans et 8 mois ; (C) méthode de stabilisation des conditions climatiques dans la chapelle du roi dans le phare de Cordouan ; (D) résultat du comportement de cristallisation des mélanges d'ions mesurés dans la pierre du phare de Cordouan. A partir de 65 % d'humidité relative il n'y a pas de cristallisation et les sels sont en solution.

et l'eau du bain entraînant la diffusion des ions de l'objet vers l'eau du bain afin d'homogénéiser les concentrations. Le suivi du dessalement se fait par mesure de la conductivité de l'eau du bain (Fig. 6A et B) jusqu'à ce que la quantité soit jugée assez basse pour ne pas engendrer de futures dégradations. Cette méthode peut être très longue (plusieurs mois voire plusieurs années) et nécessiter plusieurs bains. Des tests de faisabilité sont obligatoires avant tout dessalement par bain afin de s'assurer que l'objet peut supporter une immersion dans l'eau et, si nécessaire, une préconsolidation doit être effectuée.

Dans le cas où l'extraction des sels n'est pas possible, comme par exemple lorsque des peintures murales spé-

cifiques excluent l'utilisation de compresses, il est possible de limiter la dégradation par le contrôle des conditions climatiques environnantes. Comme il a été mentionné ci-dessus, la dégradation est causée par la force de cristallisation développée lors des cycles dissolution-cristallisation des sels confinés dans le milieu poral. Le contrôle des conditions climatiques va permettre de limiter le nombre de cycles voire même de les stopper en maintenant les sels dans un état soit dissous soit sous forme cristallisée. L'identification des sels et la détermination de la teneur en sel sont alors nécessaires et s'effectuent sur des échantillons de matériau prélevés sur l'objet ou le monument contaminé par les sels. Une analyse par exemple par chromatographie ionique permettra d'obtenir les quantités molaires de chaque ion.

En revanche ces résultats seuls ne permettent pas de savoir quel sel va cristalliser à quelle humidité relative et à quelle température. Pour cela un modèle thermodynamique va être utilisé (9) décrivant le comportement de cristallisation de mélanges de sels afin de prédire sous quelles conditions de température et d'humidité certains sels vont cristalliser. Lors de l'étude préalable à la restauration du phare de Cordouan (Fig. 6C), l'identification et détermination de la teneur en sels ainsi que l'analyse du comportement de cristallisation grâce au logiciel ECOS/RUNSALT (9-10) des sels en présence prélevés à plusieurs endroits dans la chapelle du Roi, a mis en évidence la présence de chlorure de sodium (NaCl), de nitrate de potassium et de sodium (KNO₃, NaNO₃). La modélisation a permis de montrer qu'au-delà de 65 % les sels sont toujours sous forme dissoute (Fig. 6D). Dans ces cas précis, la stabilisation des conditions climatiques au-dessus de 65 % permettrait de limiter fortement le nombre de cycles de dissolution/cristallisation donc de limiter la dégradation.

CONCLUSION

La conservation du patrimoine bâti est une discipline qui nécessite une approche interdisciplinaire afin de pouvoir apporter des solutions concrètes de terrain. C'est aussi une discipline qui scientifiquement a de nombreux attraits de par le nombre de facettes que ce domaine de recherche présente. Il est riche en questions ouvertes et de nombreuses avancées ont été rendues possible grâce à la mise en commun de savoirs divers et au développement de technologies de pointe comme nous pouvons le constater lors du chantier de restauration de Notre-Dame de Paris. La multidisciplinarité est la clé pour la sauvegarde de notre patrimoine, témoin de notre histoire et de notre passé, source d'inspiration pour notre futur.

REMERCIEMENTS

H. Derluyn remercie le Conseil européen de la recherche (ERC) pour son soutien dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'UE (convention de subvention n° 850853). J. Desarnaud remercie Sebastiaan Godts du KIK-IRPA et ECMH, bureau d'études spécialisé dans la conservation du patrimoine bâti en France, qui lui a donné l'opportunité de travailler sur le projet du phare de Cordouan et a fourni la photo utilisée dans cet article.

RÉFÉRENCES

- (1) Franzoni E (2014) Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. *Construction and Building Materials* 54 : 123-136.
- (2) Desarnaud J (2023) Les sels dans le patrimoine. Dans : Derluyn H, Prat M (Eds), *Cristallisation de sels en milieu poreux*, ISTE éditions, pages 181-206.
- (3) Derluyn H (2023) Observations expérimentales sur la cristallisation des sels dans les géomatériaux. Dans : Derluyn H, Prat M (Eds), *Cristallisation de sels en milieu poreux*, ISTE éditions, pages 115-144.
- (4) Derluyn H, Griffa M, Mannes D et al. (2013) Characterizing saline uptake and salt distributions in porous limestone with neutron radiography and X-ray microtomography, *Journal of Building Physics* 36 : 353-374.
- (5) Tiano P, Pardini C (2004) Valutazione *in situ* dei trattamenti protettivi per il materiale lapideo. Proposta di una nuova semplice metodologia. *Arkos* 5 : 30-36.
- (6) Vandevoorde D, Cnudde V, Dewanckele J et al. (2013) Validation of *in situ* applicable measuring techniques for analysis of the water adsorption by stone. *Procedia Chemistry* 8 : 317-327.
- (7) Derluyn H (2023) Comment le sel casse-t-il la pierre ? Dans *Etonnante Physique*, CNRS éditions (à paraître le 26 octobre 2023).
- (8) Flatt R, Mohamed NA, Caruso F et al. (2017) Predicting salt damage in practice: a theoretical insight into laboratory tests. *RILEM Technical Letters* 2 : 108-118.
- (9) Price CA (Ed.) (2000) An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials. *European Commission Research Report No 11*, (Protection and Conservation of European Cultural Heritage). Archetype Publications, London
- (10) Godts S, Steiger M, Orr SA et al. (2022) Modeling salt behavior with ECOS/RUNSALT: terminology, methodology, limitations, and solutions. *Heritage* 5 : 3648-3663.

Le patrimoine vivant : un objet de recherche pluridisciplinaire



Lily Martinet est chargée de mission pour le Patrimoine culturel immatériel (PCI) auprès du Département de la recherche, de la valorisation et du PCI au sein de la Délégation à l'inspection, la recherche et l'innovation (DIRI) de la Direction générale des patrimoines et de l'architecture du ministère de la culture (DPAC). Elle a été responsable de 2021 à 2022 du Centre français du patrimoine culturel immatériel. De 2018 à 2021, elle a occupé le poste de Senior Research Fellow à l'Institut Max Planck Luxembourg pour le droit procédural. Elle a été recrutée en tant que chargée d'études en 2017 à l'Institut des sciences sociales du politique pour la coordination du projet « Osmose le PCI dans les droits nationaux » (ENS Paris Saclay, université Paris Nanterre, CNRS). Elle a soutenu en 2017 une thèse sur les expressions culturelles traditionnelles en droit international publiée en 2019 aux Éditions de l'institut de recherche juridique de la Sorbonne. Elle est également diplômée de l'École européenne supérieure d'art de Bretagne. Elle a été admise au barreau de Paris en 2014.

Résumé : En introduisant en 2003 le patrimoine culturel immatériel comme une nouvelle catégorie patrimoniale en droit international, la Convention pour la sauvegarde du PCI a bouleversé les processus patrimoniaux. La recherche a constitué une ressource essentielle dans la réception de cette notion et la conception de nouvelles politiques publiques.

UNE CATÉGORIE PATRIMONIALE RÉCENTE

Le patrimoine culturel immatériel, ou patrimoine vivant, est un patrimoine rattaché à un groupe social plutôt qu'à une terre. Il peut s'agir de danses, de chants, de rituels, de jeux, de savoirs traditionnels, de savoir-faire, etc. Il a été consacré comme une catégorie à part entière tout d'abord à l'échelle nationale. Deux états pionniers en Asie, le Japon et la République de Corée, ont commencé à protéger le PCI après la deuxième guerre mondiale. Cette reconnaissance répondait principalement à des craintes d'occidentalisation et de modernisation soudaines de leurs sociétés (1). D'autres États connaissaient des notions voisines du patrimoine vivant, comme : le folklore, la culture populaire, ou le patrimoine ethnologique. Cependant, les régimes de protection de ces notions voisines étaient bien moins développés que ceux existant au Japon et en République de Corée.

L'affirmation du PCI sur la scène internationale a suivi un cheminement lent et sinueux marqué par plusieurs jalons (2). La Recommandation sur la sauvegarde de la culture traditionnelle et populaire adoptée en 1989 listait une série d'initiatives pour inciter les États à préserver ce patrimoine. Constituée de droit mou, cette recommandation n'a pas atteint ses objectifs. En parallèle, l'Unesco a

mis en œuvre deux programmes. Le premier, le programme des Trésors humains vivants élaboré en 1993 était inspiré des législations coréennes et japonaises (3). Il consistait à désigner comme trésors humains vivants des personnes possédant à un haut niveau des connaissances et des savoir-faire afin d'encourager leur transmission (Fig. 1). En France ce système s'est traduit par le titre de Maître d'art décerné à vie par le ministère de la Culture à des professionnels des métiers d'art possédant un savoir-faire remarquable et rare, et qui s'impliquent dans leur transmission à un, ou une élève. Un second programme, celui des Proclamations des chefs-d'œuvre du patrimoine oral et immatériel de l'humanité a institué une distinction internationale pour les manifestations du PCI et les espaces culturels leur correspondant. Ce programme a été couronné de succès : 90 pratiques ont fait l'objet d'une proclamation entre 2001 et 2005.



Fig. 1 : Vase réalisé par Hayakawa Shōkosa V (trésor humain vivant japonais), 内閣府, 2019.

Source : Wikimedia.org.

Ces initiatives ont servi de marchepied pour l'adoption en 2003 de la Convention Unesco pour la sauvegarde du PCI (4) (ci-après la Convention de 2003). Les fondements de cet instrument ont été grandement influencés par les préoccupations de la communauté internationale de l'époque. Il s'agissait notamment de réaffirmer les droits culturels et de promouvoir le respect de la diversité culturelle dans un contexte d'accélération de la mondialisation et de tensions succédant aux attaques du 11 septembre 2001.

La Convention de 2003 est venue ainsi combler une lacune en droit international. En effet, jusqu'alors il n'existait pas d'instrument multilatéral contraignant visant la sauvegarde du PCI (4). Elle a été conçue comme un pendant à la Convention pour la protection du patrimoine mondial culturel et naturel de 1972 (ci-après la Convention de 1972). Les dispositifs et mécanismes mis en place par cette première ont en effet été modélés sur cette dernière. La Convention de 2003 reprend notamment le système des listes et des organes de gouvernance similaires. Néanmoins, elle a été pensée pour pallier certains écueils de la Convention de 1972 dont l'application a engendré un patrimoine mondial imprégné d'exceptionnalisme et d'élitisme surreprésentant le patrimoine occidental, chrétien et historique. La Convention de 2003 était donc amenée à corriger ces déséquilibres. Ancrée dans la matrice des droits culturels, elle devait s'affranchir de toute hiérarchie en accueillant les expressions culturelles traditionnelles, les cultures orales et populaires du Sud global, de l'Asie, des peuples autochtones et des minorités. Elle devait également dans une certaine mesure dépasser le clivage entre nature et culture.

UNE CATÉGORIE PATRIMONIALE MOUVANTE

La Convention de 2003 est venue définir pour la première fois clairement le patrimoine vivant par un paragraphe complexe :

« On entend par "PCI" les pratiques, représentations, expressions, connaissances et savoir-faire - ainsi que les instruments, objets, artefacts et espaces culturels qui leur sont associés - que les communautés, les groupes et, le cas échéant, les individus reconnaissent comme faisant partie de leur patrimoine culturel. Ce patrimoine culturel immatériel, transmis de génération en génération, est recréé en permanence par les communautés et groupes en fonction de leur milieu, de leur interaction avec la nature et de leur histoire, et leur procure un sen-



Fig. 2 : (A) Tours humaines (photo E Sala & T García, 2006), inscrites en 2010 sur la Liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité. Source : Wikipedia.org. (B) : Le Tango (photo Manticora87, 2020), inscrit en 2009 sur la Liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité. Source : Wikimedia.org. (C) : Les savoir-faire artisanaux et la culture de la baguette de pain (photo Kos, 2009), inscrits en 2022 sur la Liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité. Source : Wikimedia.org.

timent d'identité et de continuité, contribuant ainsi à promouvoir le respect de la diversité culturelle et la créativité humaine » (article 2.1).

Quatre caractéristiques distinguent ainsi le PCI :

- son essence collective, c'est-à-dire qu'il est défini par une communauté, un groupe ou des individus, qui le reconnaît comme faisant partie de son patrimoine culturel ;
- sa transmission intergénérationnelle : il est transmis de génération en génération ;
- sa nature vivante et évolutive : il est contemporain et recréé en permanence ; et
- sa fonction sociale, qui réside dans le sentiment d'identité et de continuité qu'il procure à la communauté, au groupe ou aux individus qui le portent.

La Convention liste de façon illustrative et non exhaustive cinq domaines du PCI :

- les traditions et expressions orales comme les chants populaires, joutes verbales, poésies ;
- les pratiques sociales, rituels et événements festifs comme le Fest-Noz, les tours humaines (Fig. 2A) ;
- les arts du spectacle comme L'opéra de Pékin, le Tango (Fig. 2B) ;
- les connaissances et pratiques concernant la nature

et l'univers (par exemple la pratique agricole traditionnelle de la culture de la taille de la vigne en gobelet de la communauté de Pantelleria en Italie) ; et

- les savoir-faire liés à l'artisanat traditionnel comme les savoir-faire des couvreurs zingueurs parisiens et des ornemanistes, les savoir-faire artisanaux et la culture de la baguette de pain (Fig. 2C).

À l'usage, cette liste s'est étendue avec la reconnaissance de nouveaux domaines, tels que les pratiques alimentaires, comme le Repas gastronomique des français, la Diète méditerranéenne, ou encore les jeux et sports traditionnels (Les joutes sur échasses de Namur) (5). L'expansion constante du champ du patrimoine vivant rend parfois sa lisibilité complexe. Le patrimoine vivant englobe en effet une étonnante variété de témoignages de la créativité humaine allant de la pratique de la danse moderne en Allemagne au *nuad thai* (massage thaïlandais traditionnel) en passant par la pêche aux crevettes à cheval à Oostduinkerck.

La Convention pose toutefois trois garde-fous limitant la reconnaissance de PCI sous son empire : la conformité aux droits de l'homme, à l'exigence du respect mutuel entre communautés et d'un développement durable. Ces limites font notamment obstacle à la patrimonialisation de pratiques contraires au respect du bien-être animal, comme la corrida, ou reflétant des stéréotypes.

UN OBJET BOULEVERSANT LES PROCESSUS PATRIMONIAUX

Le PCI s'inscrit dans une approche anthropologique de la culture mettant en exergue les valeurs et les processus sociaux qui le traversent. Il s'agit donc d'un patrimoine mouvant qui évolue dans le temps, que les acteurs patrimoniaux doivent s'efforcer de garder vivant en permettant sa recréation permanente. Les termes de conservation, d'intégrité, d'authenticité associés au patrimoine matériel sont proscrits dans la gestion du PCI au bénéfice de la notion de sauvegarde qui désigne les mesures visant à assurer sa viabilité (6). La sauvegarde se décline en mesures d'identification, de documentation, de recherche, de préservation, de protection, de promotion, de mise en valeur, de transmission et de revitalisation.

Concernant les fondements de son régime, la Convention pour la sauvegarde du PCI s'ouvre sur une triple référence aux droits culturels, dans son préambule (7). La sauvegarde du PCI est conçue comme un moyen de réaliser le droit de participer à la vie culturelle et d'affirmer un pluralisme culturel. L'introduction des droits culturels a provoqué une redistribution des rôles des acteurs intervenant dans la chaîne patrimoniale. Le rôle

central des communautés, dans l'identification du patrimoine et sa sauvegarde crée un renversement de l'expertise patrimoniale. En plaçant au cœur de ses dispositifs les communautés, la Convention pour la sauvegarde du PCI a imposé le respect du principe de participation à l'administration, aux experts, aux institutions culturelles et aux professionnels du patrimoine. Le principe de participation a renouvelé la gestion du patrimoine culturel. Il impose une approche ascendante. Tous les processus de patrimonialisation ont dû être repensés pour respecter ce principe de participation. Ce réexamen a bénéficié d'apports importants de la recherche.

UN OBJET DE RECHERCHE POLYMORPHE

La recherche est étroitement liée au patrimoine vivant. Dès la phase d'élaboration de la Convention de 2003, la communauté internationale a fait appel à de nombreux experts. Sa ratification en 2006 par la France et son application en droit interne ont ouvert de nouveaux champs de recherche. Il fallait dessiner une grille inédite d'action publique et la superposer à l'existant. En France, la recherche a joué un rôle très important dans cette phase de réception en droit interne de la Convention de 2003. Au lieu de créer un organe *ad hoc*, la France a confié la question de la sauvegarde du PCI à une structure préexistante au sein du ministère de la Culture : la mission Ethnologie, qui avait succédé à la Mission à l'ethnologie, succédant elle-même à la Mission du patrimoine ethnologique (8). Créée en 1980, cette dernière avait notamment pour prérogative de mettre en œuvre une politique de la recherche ethnologique sur la France. Cet attachement organique à la recherche et à l'ethnologie, comme discipline de référence, a fortement imprégné le cadre d'application de la Convention en France.

Les chercheurs ont facilité tout d'abord la compréhension et l'acceptation de la notion de PCI en France. Plusieurs forums ont encouragé les discussions et la réflexion collective sur cette nouvelle catégorie de patrimoine. De 2006 à 2009, le séminaire « Patrimoine immatériel » co-construit par le Laboratoire d'anthropologie et d'histoire de l'institution de la culture (LAHIC) et la Mission ethnologie a ainsi rassemblé chercheurs et administrateurs du patrimoine. Il a donné lieu à une publication de référence (9). En 2011, la désignation par le ministère de la Culture d'un organisme compétent pour le PCI à Vitry : le Centre français du PCI (CFPCI), a offert un forum pérenne pour nourrir et renforcer cette réflexion. Le colloque international institué par le CFPCI en 2012 fait intervenir des chercheurs, des représentants des communautés et des représentants d'administrations et d'institutions culturelles chaque année autour d'une

thématique transversale, comme l'économie du PCI, le rapport à la nature, ou encore les métiers d'art. Les actes de ces colloques sont publiés en accès ouvert (open access) dans la revue numérique des Cahiers du CFPCI. Les ethnopôles¹ se sont également saisis de ce nouvel objet patrimonial dans leurs activités de recherche et d'action culturelle.

En parallèle de ces événements scientifiques et des thèses consacrées au PCI, de nombreux projets de recherche nationaux et internationaux ont été menés avec des approches complémentaires comme la création d'une cartographie des réseaux numériques des acteurs du PCI (2015-2017), le projet Europe Creative « *Intangible Cultural Heritage & Museums Project : IMP* » (2017-2019) ou encore le projet franco-letton Osmose « Le PCI dans les droits nationaux : dialogues avec la Convention de l'Unesco de 2003 » (2014-2019) (10).

La recherche appliquée occupe aussi une place importante en matière de PCI. Les chercheurs sont impliqués dans la mise en œuvre effective de la Convention de 2003 en accompagnant des communautés dans les procédures de reconnaissances. Le lancement en 2008, d'un Inventaire national du PCI, en application de la Convention de 2003, a constitué ainsi un outil idéal de rencontre entre les chercheurs et les communautés. Amorcé initialement par des enquêtes, cet inventaire est aujourd'hui alimenté par des demandes spontanées émanant directement des communautés. Ces démarches d'inventaire bénéficient souvent de l'assistance de chercheurs.

CONCLUSION

L'attachement porté par la France à la recherche dans le domaine de la sauvegarde du PCI est une singularité nationale, qui n'a pas faibli dans le temps. En 2023, le PCI est toujours bien réuni avec la recherche dans l'organigramme du ministère de la Culture. Le service responsable du PCI est le Département de la recherche, de la valorisation et du PCI. Enfin, la France a inauguré en 2022 une nouvelle Chaire Unesco dédiée au PCI et au développement durable (UMR 9022 Héritages : Culture/s, Patrimoine/s, Création/s). Cette Chaire ouvre un nouveau pan de recherche, qui correspond à l'évolution du cadre actuel dans lequel évolue le patrimoine vivant, 20 ans après l'adoption de la Convention de 2003.

RÉFÉRENCES

- (1) Wang L (2013) *La Convention pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel : son application en droits français et chinois*. L'Harmattan, Paris.
- (2) Smith L, Akagawa N (2009) *Intangible heritage*. Routledge, London.
- (3) Stefano M, Davis Peter P (2017) *The Routledge companion to intangible cultural heritage*. Routledge, London.
- (4) Lixinski L (2013) *Intangible cultural heritage in international law*. Oxford University Press, Oxford.
- (5) Csergo J, Hottin C, Schmit P (2020) *Le patrimoine culturel immatériel au seuil des sciences sociales*. Éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris.
- (6) Khaznadar C (2012) *Alerte : patrimoine immatériel en danger*. Actes Sud, Paris.
- (7) Blake J, Lixinski L (2020) *The 2003 UNESCO intangible heritage convention: a commentary*. Oxford University Press, Oxford.
- (8) Hottin C (2011) *Le patrimoine culturel immatériel : premières expériences en France*. Actes Sud, Paris.
- (9) Bortolotto C, Arnaud A, Grenet S (2011) *Le Patrimoine culturel immatériel. Enjeux d'une nouvelle catégorie*. Éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris.
- (10) Cornu M et al. (2020) *Intangible cultural heritage under national and international law: going beyond the 2003 UNESCO Convention*. Edward Elgar, Cheltenham.

NOTE

- (1) Structures labellisées par le ministère de la Culture croisant la recherche en ethnologie avec une action culturelle.

ARC-Nucléart : comment l'irradiation gamma permet de sauver le patrimoine culturel



Karine Froment (A), docteur en science des matériaux (1989), est ingénieur chimiste en recherche appliquée au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), dans les domaines du nucléaire puis des énergies renouvelables. Elle est mise à disposition et nommée directrice du GIP ARC-Nucléart fin 2015.

Laurent Cortella (B), ingénieur physicien du CEA au sein d'ARC-Nucléart, est en charge des activités d'irradiation gamma. **Gilles Chaumat (C)**, ingénieur physico-chimiste du CEA au sein d'ARC-Nucléart, est responsable des traitements et de la R&D liés à la consolidation des bois archéologiques. **Amy Benadiba (D)**, ministère de la Culture, est Conservatrice du patrimoine au sein d'ARC-Nucléart. Elle est en charge de la direction scientifique et culturelle et du suivi de l'ensemble des collections pour l'État. Elle assure également la communication de la structure aussi bien vers les clients d'ARC-Nucléart que vers le grand public.

Résumé : ARC-Nucléart est un Groupement d'intérêt public (GIP) dont les activités ont démarré il y a plus de 50 ans, sur le site actuel du CEA Grenoble. C'est l'irradiateur gamma construit avant les années 70 qui a suscité l'idée de se lancer dans la conservation du patrimoine culturel, idée unique au monde impulsée par Louis de Nadaillac, alors ingénieur au CEA. Depuis, de nombreux scientifiques lui ont succédé et l'atelier-laboratoire ARC-Nucléart s'est développé pour compter aujourd'hui 18 permanents, dont un conservateur du patrimoine, des ingénieurs et techniciens chimistes, physiciens, un biologiste-entomologiste, un photographe, un mécanicien, un régisseur des collections et plusieurs restaurateurs. Ses missions sont (i) la conservation-restauration des objets du patrimoine en matériaux organiques, (ii) la recherche liée à tous les traitements mis en œuvre leurs améliorations, et leur diffusion, (iii) la formation et l'information de tous les publics.

Les compétences d'ARC-Nucléart recouvrent un champ très large d'activités, mais aussi une diversité de matériaux traités. Tous sont des matériaux dits organiques, humides ou secs, polychromés ou non : bois (archéologiques ou sculptures), cuir, fibres végétales, cordages, matières dures animales comme les bois de cervidés, ambre, ossements... En irradiation, ARC-Nucléart traite également des archives, des sépultures, des momies, des collections d'histoire naturelle, des peintures sur toiles... Ce sont plus spécifiquement ces traitements et objets auxquels nous nous intéresserons dans la suite de cet article, mais le lecteur pourra se reporter à d'autres publications pour mieux connaître l'ensemble de nos activités (1).

LE SAUVETAGE DES MATÉRIAUX ORGANIQUES : LES TRAITEMENTS DE CONSERVATION

Les traitements biocides

La biodégradation est particulièrement redoutée par les conservateurs du patrimoine quand il s'agit de biens culturels. Il est de première importance de lutter contre ce type de dégradation en s'attaquant directement aux espèces vivantes qui en sont responsables.

L'anoxie sous azote, bien qu'inefficace contre les champignons, peut être utilisée contre les insectes. À quelques rares exceptions près, elle présente peu de risques pour les collections, mais sa fiabilité reste un point délicat (il est difficile de s'assurer que l'extraction de l'oxygène est telle que les conditions létales requises soient effectivement atteintes pour l'ensemble de l'objet considéré et en particulier à cœur), tout comme son danger d'utilisation pour les opérateurs.

L'irradiation par des rayonnements ionisants constitue, de nos jours, certainement la technique de désinfection des matériaux à laquelle les professionnels des services sanitaires accordent le plus leur confiance, que cela concerne les domaines de la stérilisation médicale (2), de la pharmaceutique et/ou parapharmaceutique (en particulier pour les cosmétiques), de la conservation agroalimentaire (3), ou autres.

Depuis les insectes ravageurs jusqu'aux bactéries pathogènes, en passant par les champignons dont les pourritures (par exemple la mэрule) ou les moisissures, la méthode a largement prouvé son efficacité et sa fiabilité.

Cela est d'autant plus vrai dans le cas des rayonnements gamma (γ), qui sont les plus pénétrants des rayonnements ionisants, et pour lesquels il est facile de s'assurer que les conditions physiques conduisant à la mort de l'espèce visée sont atteintes, même au travers d'objets emballés et conditionnés. La dose de rayonnement nécessaire au traitement biocide varie selon le type de ravageur à éliminer. Elle est de 500 Gy minimum pour les traitements insecticides et peut atteindre jusqu'à 10 000 Gy (10 kGy) pour les traitements fongicides. En comparaison, la dose létale chez l'humain est de 4 Gy.

Les traitements biocides curatifs (désinsectisation et désinfection) par exposition au rayonnement γ sont aussi utilisés avec succès dans le domaine du patrimoine (4). Pionnier en la matière, ARC-Nucléart pratique ce type de traitement depuis plus de cinquante ans (5, 6, 7). Du mobilier de particuliers aux collections prestigieuses des musées (à titre d'exemple la momie de Ramsès II traitée en 1977), ce sont ainsi plusieurs dizaines de milliers d'objets de tout type qui ont bénéficié de cette méthode.

Parmi les avantages, il y a le fait de pouvoir traiter en masse, sans contact, sans effet de température, sans utilisation de produits d'aucune sorte, chimiques ou autre, et donc sans aucune rémanence ni résidus. Le cas échéant, le fait de traiter au travers même de l'emballage et/ou du conditionnement évite les manipulations directes et répétées et les risques d'endommagement associés. Comparé aux autres techniques concurrentes (traitements chimiques par fumigation, injection ou application de surface, traitements physiques par anoxie, micro-ondes, froid, UV ...), le retour d'expérience est très positif : les traitements par exposition au rayonnement γ sont efficaces, fiables et sans risque pour les biens culturels et les personnes amenées à manipuler les objets traités.

Chaque cas étant spécifique, la méthode de traitement appliquée doit être envisagée globalement, en fonction des avantages, désavantages et compatibilités de chaque technique. En pratique, ce sont la fiabilité et l'efficacité qui justifient les traitements gamma, en particulier lorsqu'il s'agit de traiter des lots importants, des objets de grande dimension et/ou des objets conditionnés. Pour une désinsectisation, le traitement par exposition au rayonnement gamma est très adapté au mobilier, aux sculptures, aux objets ethnographiques, aux collections d'histoire naturelle, aux fonds d'archives ou documents papiers, ou tout autres objets du patrimoine en matières organiques. Pour une désinfection (élimination de microorganismes comme les champignons ou les bactéries), il n'existe aucune alternative présentant autant

d'avantages que le traitement par irradiation. En effet, lorsqu'une situation favorable à une prolifération est connue et fait peser un risque sur les collections, ou lorsqu'il n'est pas possible de maîtriser suffisamment les conditions climatiques, il devient nécessaire d'appliquer un traitement de désinfection pour éviter la prolifération des espèces nuisibles et leurs effets dévastateurs.

L'action de ce type de traitement est toutefois uniquement curative, ce qui réclame que des mesures préventives de conservation soient prises par ailleurs.

LA COMPATIBILITÉ DES MATÉRIAUX

Suivant la dose, les traitements par exposition au rayonnement γ peuvent induire des effets secondaires sur certaines classes de matériaux que l'on qualifiera dès lors de « sensibles ». La compatibilité des matériaux étant toujours étroitement liée à la dose, on se méfiera du cumul de dose que pourraient éventuellement engendrer des opérations répétées de désinsectisation ou de désinfection.

La première classe à considérer concerne les matériaux transparents ou translucides

Ces matériaux ne nécessitant pas ou rarement une désinfection pour eux-mêmes, ils sont toutefois susceptibles de se trouver en association avec des matériaux organiques qui eux le nécessiteraient. La plupart de ces matériaux (verre, cristaux, gemmes transparentes ou translucides, plastiques transparents ...) ont tendance à s'opacifier ou à se teinter sous l'action du rayonnement gamma et ce dès les doses de désinsectisation de l'ordre du kGy. Ces variations d'apparence sont toutefois généralement réversibles. Une observation détaillée de l'objet permettra souvent de vérifier si le traitement par exposition au rayonnement gamma est applicable.

D'autres matériaux comme le marbre, la porcelaine, la nacre blanche, l'ivoire, l'os, la corne et les écailles peuvent, suivant leur clarté initiale, présenter un jaunissement ou un « grisement » perceptible aux doses de désinfection de l'ordre de la dizaine de kGy, mais ce phénomène est quasiment indécélable à dose de désinsectisation.

La seconde classe concerne des matériaux sensibles du point de vue de leur intégrité mécanique

Aucune modification n'est constatée à dose de désinsectisation et même aux doses utilisées en désinfection, aucun problème d'intégrité n'est constaté. On observe parfois d'infimes changements à l'échelle microscopique qui sont sans incidence au niveau macroscopique. Par exemple,

on sait mesurer une diminution du degré de polymérisation de la cellulose pure à 10 kGy, mais celle-ci ne se traduit en aucun cas par une détérioration de ses propriétés mécaniques (8). De manière similaire, on relève un début d'altération de la structure protidique pour le cuir à des doses à peines plus élevées, ce qui encore une fois n'occasionne aucune dégradation sur le matériau. Ainsi, le traitement de documents graphiques ou d'archives est donc communément pratiqué, même à des doses de désinfection, suivant l'enjeu de conservation (9).

Bien que peu d'études académiques dédiées n'aient à ce jour concerné les textiles, leur comportement pourra être comparé à celui du papier pour les matières celluloseuses (origine végétale, coton, lin...) et à celui du cuir pour les matières protidiques (origine animale, soie, laine...). On pourra ajouter à cette liste les peaux, poils et plumes. Enfin, les très nombreuses études menées sur les autres matériaux : le bois, les pigments, les liants, les plâtres... montrent qu'ils ne présentent aucune sensibilité particulière à l'irradiation aux doses pratiquées.

Les analyses qui pourraient être effectuées ultérieurement sont aussi à considérer. Il est notamment légitime de se poser la question du devenir de l'ADN après irradiation. Néanmoins, les modifications induites par une exposition au rayonnement γ restent très faibles au regard de la dégradation naturelle de cette molécule, d'autant plus si l'on considère de l'ADN ancien déjà dégradé. Suite à une irradiation, les analyses ADN restent donc possibles ; des analyses de filiation ont d'ailleurs été pratiquées avec succès sur des momies inuites (Qilakitsoq) préalablement irradiées.

De même, les analyses isotopiques, élémentaires voire moléculaires, ne posent aucun souci particulier. Ainsi,

les datations au ^{14}C ne sont évidemment pas perturbées, tout comme les analyses réalisées dans le cadre d'identification de polychromie. Seules les techniques de datation de matières minérales par thermoluminescence, qui impliquent la mesure d'une dose naturelle de radioactivité, sont impactées.

LE PRINCIPE DES TRAITEMENTS À ARC-NUCLÉART

À leur arrivée à ARC-Nucléart, et avant leur traitement, les objets sont entreposés dans leurs conditionnements, en réserve dite « de quarantaine », à proximité de l'irradiateur. On utilise un irradiateur de type piscine, c'est-à-dire que, hors utilisation, les sources radioactives sont stockées dans une piscine dont l'eau agit en tant qu'écran et protège les opérateurs du rayonnement gamma. Cette piscine est reliée à la cellule d'irradiation, sorte de casemate dont les murs font 1,5 m d'épaisseur, par l'intermédiaire d'un canal qui passe sous le mur de celle-ci. Lorsque aucune source n'est à l'intérieur, l'accès dans la cellule est autorisé par une porte motorisée, sur rail, dont l'épaisseur est elle aussi de 1,5 m. Le personnel peut donc y installer les objets à traiter. Une fois le personnel sorti et la porte fermée, on peut faire remonter les sources réparties sur un panneau porte-sources mobile le long du canal, et les faire émerger de celui-ci dans la cellule pour irradier les objets qui y ont été déposés (Fig. 1).

Les sources de rayonnement sont des sources radioactives de ^{60}Co , dites « Sources scellées de haute activité » (SSHA), identiques à celles utilisées dans les irradiateurs industriels pour la stérilisation médicale. Elles sont en quantité suffisante pour réaliser classiquement les désinsectisations à 500 Gy dans la journée, suivant leur taille. Les objets, toujours dans leur conditionnement, sont généralement retournés à mi irradiation pour homogé-

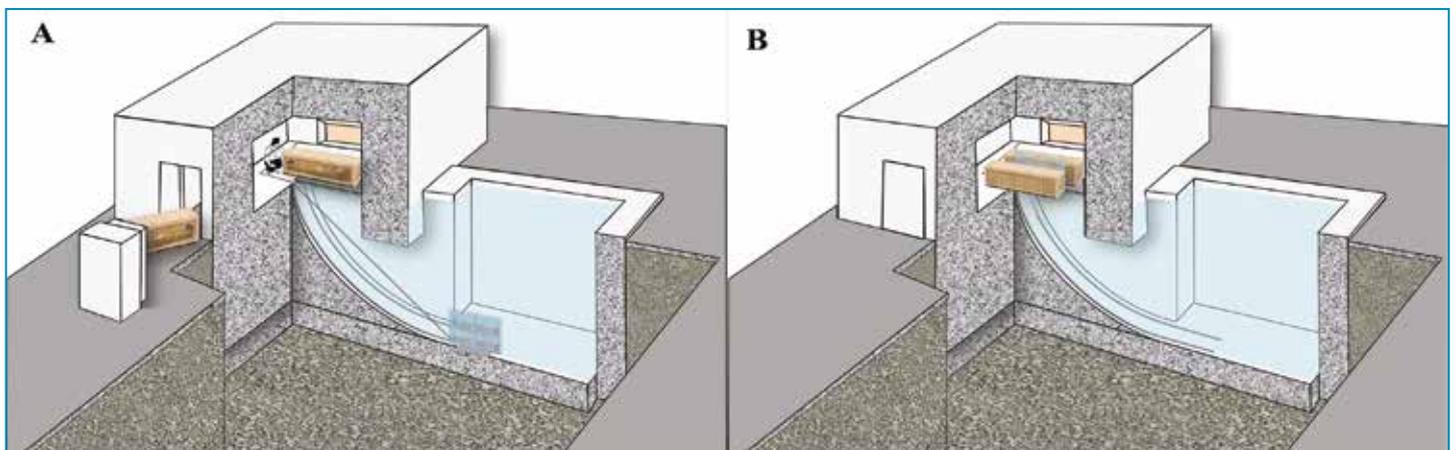


Fig. 1 : Schéma de principe de l'irradiateur piscine d'ARC-Nucléart. (A) Installation en cellule d'irradiation ; (B) Irradiation en cellule. Source : @ARC-Nucléart.

néiser la dose. Après traitement, les sources réintègrent la piscine de stockage, et le personnel peut récupérer immédiatement les objets. Ceux-ci sont alors acheminés vers les réserves saines de l'atelier, en attendant leur retour vers le client ou d'autres opérations de conservation et/ou restauration.

Suite à ces traitements, il n'y a aucun « effet post-irradiation » au sens d'une radioactivité induite :

- pas de contamination car les sources de ^{60}Co sont confinées et il n'y a aucune trace de contamination dans l'installation,
- pas d'activation, la matière traversée par le rayonnement gamma du ^{60}Co ne devenant en aucun cas radioactive, même pendant l'irradiation elle-même, car il n'y a pas modification du noyau atomique (pas de réaction nucléaire) dans la matière irradiée, mais seulement interaction avec le cortège électronique (ionisation) des atomes irradiés.

Les pièces peuvent donc être manipulées immédiatement après leur irradiation sans aucune précaution particulière.

LA DIVERSITÉ DES COLLECTIONS TRAITÉES

Le traitement de sculptures polychromes est largement pratiqué et extrêmement courant pour ARC-Nucléart (Fig. 2), comme celui de tout type d'objets en matériaux organiques (mobilier, objets ethnographiques, instruments de musique, collections d'histoire naturelle, œuvres d'art moderne et contemporain...).



Fig. 2 : Traitements de désinsectisation par irradiation gamma de statues en bois polychromé dans la cellule d'irradiation. Source : @ARC-Nucléart.

Parmi l'ensemble des objets traités par ARC-Nucléart, le plus prestigieux est peut-être la momie du pharaon

Ramsès II. En 1976, du fait de l'absence de véritable politique de conservation préventive au sein du musée du Caire, l'application d'un traitement fongicide s'est révélée nécessaire pour la momie de Ramsès II, c'est l'irradiation qui a été retenue (Fig. 3) et qui, au terme d'une campagne d'essais de grande ampleur, a montré qu'elle présentait un niveau d'innocuité satisfaisant.



Fig. 3 : Irradiation d'une momie égyptienne dans l'irradiateur du CEA-Grenoble. Source : @ARC-Nucléart.

Le traitement de fonds d'archives ou de bibliothèques s'est aussi très largement développé ces dernières années en France, à l'instar des Archives nationales de Fontainebleau, traitées à ARC-Nucléart (Fig. 4). En mars 2014, deux bâtiments des Archives nationales du site de Fontainebleau ont été fermés en raison de désordres structurels. Quinze mois plus tard, les premiers intervenants autorisés à entrer à nouveau dans l'un d'entre eux découvrirent un sinistre de grande ampleur : la totalité du 5^e sous-sol, abritant entre autres les archives privées d'architectes et les dossiers de naturalisation depuis les années 30, était inondée par 5 cm d'eau. Les moisissures, conséquences de la présence de l'eau durant plusieurs mois, touchaient gravement plus de la moitié des archives.



Fig. 4 : Fonds d'archives du Département du Rhône en cours d'irradiation. Source : @ARC-Nucléart.

Confrontées à plus de 11 km linéaires de rayonnages à traiter (plus d'un millier de m³), les équipes des Archives nationales s'aperçurent rapidement que les délais de traitement à l'oxyde d'éthylène qu'elles utilisaient jusqu'alors n'étaient pas acceptables, et ont finalement retenu l'exposition au rayonnement gamma pour cette opération de grande ampleur.

Les résultats des analyses microbiologiques avaient révélé quatre souches fongiques majoritaires appartenant à deux genres différents, *Aspergillus* et *Penicillium*, pour lesquelles une dose de 3 kGy se révélait suffisamment efficace. Il a alors été décidé de traiter l'immense majorité des archives dans un irradiateur industriel, selon les processus automatisés appliqués en stérilisation médicale. Les fonds d'architectes, qui présentaient des matériaux divers pour lesquels des compléments d'études sur le comportement sous irradiation étaient nécessaires, et des formats non palettisables, furent quant à eux traités à Grenoble dans l'irradiateur d'ARC-Nucléart. Au total, 54 « unités de traitement », regroupant 482 rouleaux et 443 portefeuilles de plans, ainsi qu'une vingtaine de boîtes de grande dimension dites « cercueils », ont été irradiées entre 3 et 10 kGy à Grenoble, et 1 170 palettes pour 56 000 boîtes d'archives standards dans un irradiateur industriel à Marcoule, aux mêmes doses.

Traités en moins d'un an, ces fonds sont maintenant disponibles pour les démarches administratives des particuliers qui en ont besoin et pour les chercheurs qui traitent par exemple des politiques de naturalisation autour de la seconde guerre mondiale.

La peinture de chevalet peut également être traitée sans contrainte par exposition au rayonnement γ . Le recours à cette technique est plutôt pratiqué pour des traitements fongicides, y compris pour la mûre.

ARC-Nucléart est également à même de traiter des vestiges archéologiques en matériaux organiques issus de fouilles en milieux humides. Ainsi, en 2020, l'ensemble de la sépulture d'un abbé, datant de la période médiévale et comportant des restes organiques, a été traité à dose fongicide et bactéricide pour permettre sa conservation dans l'attente de son étude en laboratoire (10).

LES TRAITEMENTS DE CONSERVATION : LA CONSOLIDATION PAR IMPREGNATION ET LE TRAITEMENT « NUCLÉART »

Les traitements de conservation appliqués par ARC-Nucléart ont pour principal objectif de consolider la structure fragilisée des bois anciens. Le principe de base est d'utiliser la porosité naturelle du bois, en particulier

quand il est altéré, pour y injecter des résines qui, en se solidifiant, vont lui conférer des propriétés mécaniques améliorées.

Si le bois est sec, l'utilisation de résines acryliques, dissoutes dans un solvant organique sera privilégiée pour consolider partiellement les zones proches des surfaces du bois, le plus souvent au pinceau. Pour des consolidations plus marquées, on procédera localement à des injections de résine époxyde à l'aide d'une seringue, qui bien qu'irréversibles permettent un apport de consolidant plus significatif que les techniques fondées sur l'évaporation d'un solvant pour obtenir la transformation liquide/solide.

Pour des dégradations encore plus sévères, altérant l'ensemble du volume de l'objet, une technique de consolidation invasive et irréversible faisant intervenir une résine radio-polymérisable peut être recommandée : c'est le procédé « Nucléart ». Cette technique, développée par le laboratoire dans les années 70, consiste à imprégner l'objet dans tout son volume à l'aide d'un autoclavage en deux étapes : une mise sous vide pour dégazer le bois, suivie d'une mise sous pression du bois immergé dans une résine styrène-polyester pour permettre l'imprégnation à cœur. À l'issue de l'imprégnation, l'objet est essuyé avant d'être irradié sous rayonnement gamma pour initier la polymérisation et le durcissement de la résine *in situ* dans le bois : un réseau tridimensionnel entre les molécules cycliques du styrène et les chaînes carbonées du polyester se forme et consolide alors le bois de manière irréversible.

Les bois archéologiques arrivent à ARC-Nucléart pratiquement toujours à l'état humide. Pour leur consolidation, une résine de la famille des polyéthylènes glycols (PEG) est généralement utilisée. Les PEGs ont l'avantage d'être solides à température ambiante et solubles dans l'eau, permettant une imprégnation du bois par immersion dans des solutions aqueuses de PEG titrées à 30-35 % massiques. Une opération de séchage est ensuite réalisée. En effet, les bois archéologiques très dégradés ayant perdu une bonne partie de leur charge cellulosique ne sont plus en mesure de supporter leur propre séchage à l'air : leurs parois cellulaires ont tellement été érodées par les attaques bactériennes qu'elles ont perdu leur rigidité initiale. Par conséquent, si un séchage à l'air était pratiqué, les forces capillaires exercées par l'eau sur les parois ramollies engendreraient un effondrement cellulaire généralisé du bois, susceptible de provoquer des déformations et des pertes de volume de plus de 50 % ! Pour éviter ce scénario, les ateliers spécialisés réalisent le séchage des bois archéologiques gorgés d'eau par lyophi-

lisation sous vide. Avec ce procédé, il n'y a plus d'eau en phase liquide dans le bois après congélation, le séchage étant réalisé par sublimation de l'eau, sans déformation du bois. Contrairement au procédé « Nucléart », le procédé PEG/lyophilisation (PEG-LYO) est réversible, au moins dans la théorie, car aucune réaction chimique n'est réalisée durant le traitement : pour le transporter au sein du bois, le PEG est simplement dissous dans l'eau.

Pour des bois archéologiques composites contenant des concrétions minérales ou des métaux sensibles à l'humidité, ou encore si le procédé PEG/lyophilisation n'est pas suffisant pour consolider des parties très dégradées, il est possible d'utiliser le procédé dit « Nucléart mixte » car la résine styrène-polyester est particulièrement hydrophobe. On commence alors par consolider très partiellement et sécher le bois par PEG-LYO, puis on applique ensuite le procédé « Nucléart » pour le consoli-



Fig. 5 : Chaland romain (I^{er} siècle), Arles Rhône 3 (AR3), découvert en 2003 dans le Rhône et restauré à ARC-Nucléart, présenté dans l'extension du musée départemental Arles antique. Source : @ARC-Nucléart.

der de manière très significative, tout en rendant le matériau moins sensible à l'humidité.

QUELQUES EXEMPLES DE RESTAURATIONS

Avant de conclure, évoquons quelques exemples d'objets restaurés à la suite des traitements précédemment exposés.

Parmi les objets archéologiques restaurés par ARC-Nucléart, le chaland Arles Rhône 3, enfoui dans le Rhône depuis le I^{er} siècle après J.-C. (Fig. 5). Pour des raisons pratiques, il a été prélevé, en plusieurs sections positionnées sur des supports métalliques, qui ont rapidement été rapatriées dans les locaux grenoblois d'ARC-Nucléart. Après nettoyage des sédiments et consolidation grâce au traitement PEG-LYO, et au Nucléart mixte pour la proue dont les aplats métalliques faisaient intégralement partie et ne pouvaient être déposés, les opérations de restauration ont duré environ deux ans. Elles ont consisté à débarrasser le bois de tous les clous métalliques présents, enlever les concrétions d'oxyde de fer présentes, puis à remonter chaque section du bateau à l'aide de collages, assemblages ou juxtapositions grâce au support spécialement conçu et réalisé à cette fin, avec l'aide d'un chaudronnier travaillant en même temps que les restaurateurs. Des masticages et comblements ont été utilisés pour remplir les lacunes existantes avec des matériaux neutres et de manière réversible. Des retouches colorées à l'aquarelle ont permis de faire une réintégration des zones de comblements. Enfin, une restitution d'une partie manquante de la proue a été réalisée « à l'identique » en bois neuf pour les besoins de l'exposition au musée d'Arles.

Le traitement Nucléart peut aussi être appliqué en sculpture, lorsque le bois est extrêmement dégradé par les insectes xylophages et les attaques fongiques, et que

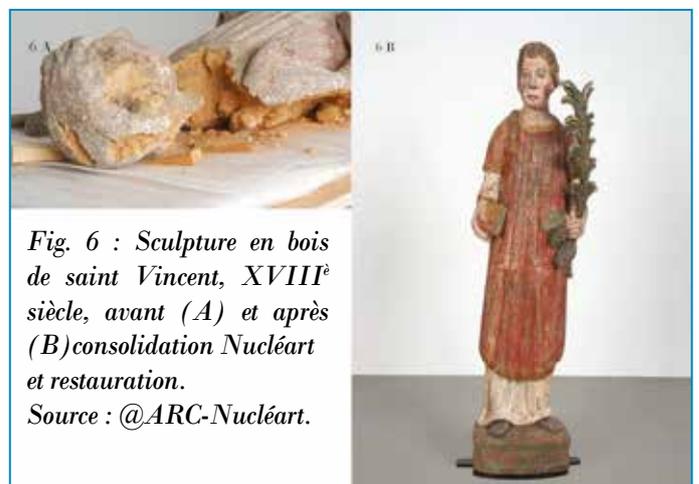


Fig. 6 : Sculpture en bois de saint Vincent, XVIII^e siècle, avant (A) et après (B) consolidation Nucléart et restauration.

Source : @ARC-Nucléart.

les consolidations avec des résines acryliques réversibles ne sont pas suffisantes. Par la suite, des opérations spécifiques visant à restaurer l'objet en tant qu'œuvre peuvent être effectuées : comblement de lacunes de polychromie, masticages, retouches et mise sur support pour sécuriser les sculptures. C'est le cas du sauvetage d'une sculpture de saint Vincent du XVIII^e siècle, provenant de Suzannecourt (Haute-Marne), dont le bois était en grande partie réduit en très fines poussières (Fig. 6).

CONCLUSION

Le rayonnement gamma est au service de la conservation du patrimoine depuis plus de 50 ans à ARC-Nucléart, et l'atelier-laboratoire reste encore à ce jour le seul à pratiquer régulièrement le traitement Nucléart, dont il est à l'origine. L'AIEA a d'ailleurs montré tout son intérêt en nous désignant, en février 2023, Centre collaborateur. C'est une reconnaissance de l'ensemble du travail réalisé, pour les objets du patrimoine qui sont passés à ARC-Nucléart, mais aussi pour la formation et l'aide apportée à tous les pays du monde dans lesquels nous avons contribué aux formations, colloques, expertises...

Espérons que cet élan de soutien permettra à ARC-Nucléart de poursuivre son chemin encore au moins 50 ans et même plus, pour que les objets du patrimoine puissent eux aussi être étudiés, conservés et exposés pour les générations futures.

RÉFÉRENCES

- (1) Cortella L et al. (2019) Clefs CEA juin. Edition numérique n°1, <http://www.cea.fr/multimedia/Lists/StaticFiles/clefs/science-histoire/index.html>
- (2) IAEA (2008) *Trends In Radiation Sterilization of Health Care Products*, IAEA, Vienna.
- (3) Ferreira ICFR, Antonio AL, Cabo Verde S (Ed) (2018) Food irradiation technologies: concepts, applications and outcomes. *Food Chemistry, Function and Analysis No. 4*, The Royal Society of Chemistry, London.
- (4) IAEA (2017) Use of ionizing radiation for tangible cultural heritage conservation. *AIEA Radiation Technology, Series n° 6*, ISBN : 978-92-0-103316-1.
- (5) ARC-Nucléart (ouvrage collectif) (2000) *Conservation-Restauration des œuvres d'Art – 30 ans d'activité d'ARC-Nucléart*. Edité par Ph Coeuré, X Hiron et P Veyseyre, ARC-Nucléart, Grenoble.
- (6) Ramière R (2002) La désinfection des biens culturels par irradiation gamma. Dans « *Les contaminants biologiques des biens culturels* », Muséum national d'histoire naturelle, Paris, Elsevier.
- (7) Cortella L et al. (2020) 50 years of French experience in using gamma rays as a tool for cultural heritage remedial conservation. *Radiation Physics and Chemistry* 171 : 108726.
- (8) Adamo M, Magaudda G, Tata A (2004) Radiation technology for cultural heritage restoration. *Restaurator* 25 : 159-170.
- (9) Boustia F et al. (2019) Le traitement des archives aux rayonnements Gamma : vers une méthodologie. *Support Tracé* 18 : 147-158.
- (10) Meunier L, Cortella L (2023) Extraction and short-term stabilisation of a 13th century AD grave. *Proceedings of the 15th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials*, Mainz, Germany.

Les patrimoines en recherche(s) d'avenir, Étienne Anheim, Anne-Julie Etter, Ghislaine Glasson-Deschaumes, Pascal Liévaux (dir.), 2019. Presses universitaires de Paris Nanterre (coll. « Les passés dans le présent »), 354 pages.



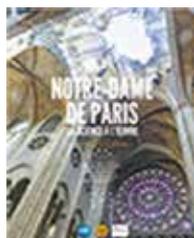
Le patrimoine culturel recouvre une réalité complexe. Il capte l'ensemble des problématiques de son époque. Il est le lieu où ne cessent de s'articuler des enjeux normatifs, sociaux, politiques, épistémologiques, où se reconfigurent en permanence les rapports entre passé, présent et futur et où les échelles varient, du local au global.

L'ère numérique, avec les transformations qu'elle induit dans les processus de patrimonialisation comme dans l'étude des patrimoines, accroît cette complexité tout en appelant de nouveaux regards critiques.

Telle est la perspective du présent ouvrage, qui déploie deux grandes thématiques. Il aborde d'abord les historicités, les spatialités et les reconfigurations temporelles du patrimoine, puis sa production sociale et enfin les médiations, appropriations et ressentis auxquels il donne lieu. Il traite ensuite de l'articulation entre matérialité, immatérialité et dématérialisation, en étudiant cette dernière et ses effets, l'évolution des connaissances sur la matérialité des œuvres, les usages du numérique pour l'accès au patrimoine et sa médiation.

Nourri d'un travail collaboratif d'ampleur, il met en lumière les nouvelles pollinisations entre le monde académique et les institutions culturelles patrimoniales et l'accroissement qualitatif qu'elles constituent. Il montre également que l'interdisciplinarité, si elle est conçue comme un processus de co-translation et de co-construction, constitue un formidable levier pour l'avenir de la recherche sur les patrimoines.

Notre-Dame de Paris, la science à l'œuvre, Philippe Dillmann, Pascal Liévaux, Aline Magnien, Martine Regert, 2022. Éditeur Cherche Midi, 184 pages.



Découvrir les secrets révélés par le grand incendie et les coulisses du monumental chantier scientifique de restauration de la cathédrale. Au lendemain de l'incendie de Notre-Dame du 15 avril 2019, la mobilisation succède instantanément à l'émotion. Une formidable aventure scientifique démarre alors. Son objectif : recueillir un maximum de données sur les centaines de

tonnes de matériaux qui jonchent le sol. Bois de charpente, pierres, métaux, etc. sont ainsi triés, répertoriés, stockés en vue d'être sauvegardés, étudiés, analysés et parfois réemployés. Une véritable auscultation du monument blessé est menée par neuf groupes composés de scientifiques issus d'une cinquantaine de laboratoires – historiens, archéologues, anthropologues, acousticiens, informaticiens et spécialistes des matériaux. Leur mission est double : réaliser un travail de recherche sur la mémoire de la cathédrale et accompagner le grand chantier de restauration mené par les architectes et compagnons sous la supervision du maître d'ouvrage.

Ce livre, illustré d'images exceptionnelles, permet de comprendre comment Notre-Dame a été pensée, bâtie, rénovée en revisitant notre connaissance du monument à chaque période de son histoire. L'ouvrage revient aussi sur l'épisode traumatique de l'incendie et sur la formidable mobilisation nationale et internationale qu'il a suscitée. Il nous plonge enfin dans sa mémoire foisonnante, jalonnée de rencontres avec les plus grands noms de la culture, de la technique, de la littérature et de l'art en général. Un voyage dans le temps au cœur de ce chef-d'œuvre architectural unique pour tous les amoureux du patrimoine de l'humanité.

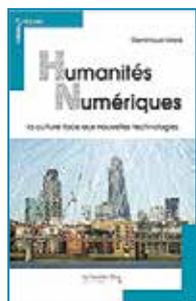
Mettre au monde le patrimoine, Anne Lehoërff, 2023. Éditeur Le Pommier, 142 pages.



Les vestiges archéologiques sont là, cachés, sous la terre, sous les eaux, autour de nous. Présents et invisibles. Hérités du passé, ils sont un patrimoine qui ne devient réalité que lorsque l'archéologie les met, littéralement, au monde. Ils entrent alors dans un cycle de vie nouveau, une chaîne au cours de laquelle interviennent fouille, enquête,

étude en laboratoire, production de connaissances, exposition. Objets de recherche, ils acquièrent, grâce à cette archéologie en actes, un statut, une valeur. Ils deviennent un enjeu pour la science, un fait de société, un repère pour le citoyen. Dans ce texte engagé, Anne Lehoërff interroge les rapports entre « archéologie » et « patrimoine » et les replace au cœur de la société contemporaine. Tout en les inscrivant dans le temps long, elle soulève des questions aussi contemporaines qu'épineuses, tels le pillage, les restes humains ou la restitution aux pays d'origine des objets hérités du passé colonial... Numérisation du patrimoine et modélisation des connaissances.

Humanités numériques. La culture face aux nouvelles technologies Dominique Vinck, 2016. *Le Cavalier Bleu*, Paris, 168 pages. Recension par Evelyne Thomas.



« Il ne s'agit pas d'une révolution numérique, mais d'une civilisation numérique ». Cette phrase prononcée par Irina Bokova, directrice de l'Unesco, résume à elle seule l'importance des humanités numériques. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, celles-ci ne sont pas l'affaire de quelques *geeks* lettrés, mais, traitant de notre patrimoine et de nos identités, elles nous concernent tous et nous accompagnent déjà au quotidien. Dématérialisation du savoir, démocratisation de la culture, mais aussi mort du livre et création de nouvelles inégalités, les humanités numériques font débat : quelles limites fixer à la collecte et l'exploitation des données ? Quel rapport voulons-nous entretenir avec notre passé et les autres communautés ? Comment réguler les usages délictueux ? Au travers d'une analyse précise et d'exemples concrets, Dominique Vinck montre que les humanités numériques vont bien au-delà de la bonne maîtrise de l'informatique. Elles sont un défi posé à notre société pour la nouvelle humanité que nous voulons construire.

Numérisation du patrimoine et modélisation des connaissances, *Humanités numériques* numéro 7.

La revue francophone numérique *Humanités numériques* a été créée en 2020 « pour rendre disponibles et faire mieux connaître les travaux d'un champ de recherche



aussi divers que dynamique » (Editorial tome 1, 2020). Dans ce numéro thématique sur le patrimoine, onze articles traitant de la numérisation du patrimoine culturel sont répartis en trois sections : modélisation des connaissances, visualisation en 3D, patrimoines matériels et immatériels. Les travaux rassemblés présentent une communauté scientifique large à l'œuvre dans leurs pratiques, faisant usage de modèles formels, d'outils numériques et de restitutions 3D.

Comme Sylvain Laubet et Mureil Guedj écrivent si bien dans l'Introduction : *L'étude des patrimoines matériels et immatériels est au croisement de cultures et de pratiques diverses, tant par ses matériaux que par ses méthodes, et est naturellement conduite à mobiliser des technologies numériques. Aussi est-il important de cerner ce que les interactions du numérique, du patrimoine et de l'histoire font en retour aux disciplines concernées. C'est avec cette ambition que ce numéro de la revue entend traiter de la numérisation du patrimoine et de la modélisation des connaissances, au sens large d'élaboration de modèles formels et au sens plus précis de conception de représentations visuelles.*

S'adressant surtout aux spécialistes, chaque article dans ce numéro sur le patrimoine permet d'approfondir la perception du rôle que joue la dimension numérique dans la démarche scientifique, la documentation, l'acquisition et la modélisation des connaissances, et les possibilités que la numérisation ouvre pour mieux comprendre des problématiques d'usage plus spécifique appliquées au patrimoine matériel ou immatériel.

Zoom sur les recherches du CNRS sur les matériaux anciens : Ipanema



Mathieu Thoury est scientifique au laboratoire IPANEMA (Institut photonique d'analyse non-destructive européen pour les matériaux anciens) (UAR 3461 CNRS/ MCC, UVSQ, MNHN) qu'il dirige depuis septembre 2023. Il est physicien et a obtenu son diplôme de docteur à l'université Paris VI en 2006 sur l'étude de vernis de peinture par spectroscopie de luminescence. Il a réalisé un premier post-doctorat dans le département scientifique de la National Gallery of Art de Washington DC sur l'étude d'œuvres picturales via des approches d'imageries hyperspectrales puis un second sur la conservation de molécules colorantes dans le registre fossile au Centre de recherche sur la conservation des collections. Ses recherches portent sur le développement d'approches d'imagerie et de spectroscopie dans les domaines de l'UV/visible/infrarouge pour l'étude des matériaux anciens aux échelles macro- et microscopique.

HISTORIQUE

La construction du LURE (Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique) en 1971 puis de l'ESRF (European synchrotron research facility) en 1990 ont été suivies au début des années 2000 par l'émergence d'un nouveau projet d'accélérateur, le synchrotron SOLEIL (Source optimisée de lumière d'énergie intermédiaire du LURE), qui a accueilli ses premiers utilisateurs en 2008. Dès sa création, le cas scientifique du projet SOLEIL inclut des thématiques d'enjeu sociétal telles que l'environnement ou l'étude d'objets patrimoniaux. Ainsi dès 2004, sous l'initiative de Jean Doucet et de Loïc Bertrand, l'activité patrimoine culturel puis matériaux anciens est mise en place et est suivie jusqu'en 2006 par une prospective réalisée à partir des premiers travaux utilisant le rayonnement synchrotron pour l'étude des matériaux depuis la fin des années 1990.

En 2006, le projet de construction d'un institut des matériaux anciens sur le site du synchrotron est déposé par Loïc Bertrand au Contrat de projets État-Région Île-de-France 2007-2013 : CPER IPANEMA (Institut photonique d'analyses non-destructives européen pour les matériaux anciens). Le CPER IPANEMA comprend la création d'une nouvelle unité de service et de recherche, la construction d'un bâtiment dédié (Fig. 1), hébergeant l'activité, l'acquisition et la mise en place d'équipements de laboratoires et la mise en place d'une nouvelle ligne de lumière sur SOLEIL. Quatre groupes de travail vont rassembler plus d'une centaine de scientifiques dans le but de préciser les missions du futur laboratoire. L'unité CNRS IPANEMA (UPS 3352) est créée le 1^{er} janvier 2010 et le projet de transformation de cette UPS en unité mixte de service et de recherche (USR) devient

effectif le 1^{er} janvier 2012 (USR 3461). Le bâtiment IPANEMA est inauguré en septembre 2013 par la ministre de la Recherche. Il comprend des espaces de laboratoires, de réserve et deux étages pour accueillir l'équipe et des scientifiques hébergés. Depuis 2016 les tutelles de l'unité sont le CNRS, le ministère de la Culture, l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et le Muséum national d'histoire naturelle.



Fig. 1 : Vue aérienne du synchrotron SOLEIL et du laboratoire IPANEMA localisés à Saint-Aubin (91).

© Synchrotron SOLEIL – Cavok Production/L. Persin.

ARTICULATION DES MISSIONS DE RECHERCHE ET D'APPUI

Les missions de l'unité IPANEMA concourent au développement de méthodes avancées pour l'étude des matériaux anciens. Cette dénomination rassemble les matériaux provenant de l'archéologie, des paléo-environnements, de la paléontologie et du patrimoine culturel. Leur étude par des méthodes photoniques est envisagée dans une approche diachronique et a pour but de sonder leurs propriétés physico-chimiques comme traces de leur

historicité. Sont par exemple étudiées des questions de provenance, d'origine de la vie, de paléo-environnements, de procédés de fabrication, de recettes d'artistes ou de voies d'échanges commerciaux, mais également des processus plus fondamentaux qui régissent l'évolution des matériaux tels que les mécanismes taphonomiques, d'altération ou de préservation exceptionnelle. Bien que la dénomination « matériaux anciens » rassemble des catégories très diversifiées de matériaux, leur étude par des approches photoniques permet d'identifier des propriétés qui leurs sont communes, qui les distinguent des autres matériaux et conditionnent fortement leur caractérisation. Ils sont à la fois hétérogènes à de multiples échelles, ils ont des propriétés physico-chimiques hors d'équilibre, les objets d'étude n'ont souvent pas de « sens », considérés hors d'un *corpus* d'objets, et ce sont des systèmes particulièrement difficiles à modéliser ou à reproduire. Ces propriétés peuvent donc être appréhendées comme des contraintes d'un point de vue analytique, mais sont néanmoins inspirantes du point de vue des développements méthodologiques que sollicite leur étude.

Le rayonnement synchrotron possède des caractéristiques tout à fait spécifiques pour répondre à ces questions. En particulier, la brillance, le spectre « blanc » couvrant des rayons X aux térahertz, la stabilité, et l'accordabilité du rayonnement synchrotron sont particulièrement adaptés à l'étude en imagerie de la composition, de la structure et de l'environnement de composés en teneurs pouvant être extrêmement faibles et à de multiples échelles spatiales [1].

Les activités de l'unité reposent sur une forte hybridation entre les missions d'appui aux communautés et la recherche propre dédiée au développement de méthodes. IPANEMA soutient le développement de projets de recherche dès le montage d'un projet d'expérience, et met à disposition un ensemble de techniques pour préparer les prélèvements, caractériser artefacts et échantillons, analyser statistiquement les jeux de données collectés. Ce rôle d'appui s'exerce notamment en tant que laboratoire d'appui aux expériences synchrotron dédiées à l'étude de matériaux anciens et sélectionnées par le comité du programme « Matériaux anciens - terre en environnement du synchrotron SOLEIL », mais également en formant des étudiants ou des chercheurs aux techniques de préparation, de caractérisation et d'analyse de données. Ces missions d'appui se sont dernièrement déployées à travers l'ouverture d'accès de certains des instruments dans le cadre du projet européen IPE RION-HS (GA n°. 871034). La recherche propre menée dans l'unité est méthodologique. IPANEMA a été créé autour de deux orientations principales de recherche

méthodologique : imagerie et spectroscopie avancée des matériaux anciens et analyse statistique multivariée des données (Fig. 2). Le contexte des projets longs de recherche hébergés, co-construits avec les laboratoires utilisateurs et les lignes de lumières, est propice au développement de sujets interdisciplinaires, hybridant les activités de recherche et d'appui ce qui encourage une fertilisation croisée des développements de méthodes et des thématiques scientifiques et favorise aussi l'élargissement des champs d'applications des méthodes développées. De manière générale, l'utilisation de l'imagerie spectrale est au centre des développements et applications menés dans l'unité. Depuis la préparation des échantillons jusqu'au traitement statistique des données collectées, les développements analytiques visent à préserver la morphologie et la topologie des matériaux pour les utiliser comme sources d'information à corrélérer avec celles des données spectrales.

IMAGERIE DE RAYONS X POUR L'ÉTUDE DE PROCESSUS TAPHONOMIQUES

Dans le cadre d'une collaboration avec des équipes de paléontologues du Muséum national d'histoire naturelle, de nouvelles approches d'imagerie utilisant le rayonnement synchrotron dans la gamme des rayons X ont été développées pour étudier la préservation de fossiles provenant du site du Jbel Oum Tkout Lagerstätte, Crétacé du Maroc. L'imagerie par fluorescence des rayons X synchrotron a permis de collecter des spectres complets des éléments majeurs mineurs et traces [2] (Fig. 2A et 2C). La cartographie des éléments terres rares, a ainsi révélé de nouveaux détails anatomiques pour certains taxons rares, mais également de précieuses informations compositionnelles sur leur environnement d'enfouissement et sur les mécanismes à l'origine de la fossilisation (Fig. 2B). La tomographie de rayons X synchrotron a également été optimisée pour l'étude des volumes de textiles archéologiques provenant du site de Nausharo (vallée de l'Indus, Balochistan, Pakistan) et daté du III^e millénaire av. J.-C. Les données obtenues ont donné accès à la description en volume de ces restes rares, comme le nombre précis de fibres par fil et de caractériser les phases d'altérations du support métallique, en permettant ainsi une interprétation archéologique approfondie et le rôle joué par la corrosion dans la préservation des fibres textiles [3].

TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES D'IMAGERIE SPECTRALE

Depuis la création de l'unité, un des axes de recherche porte sur le développement et la mise à disposition de

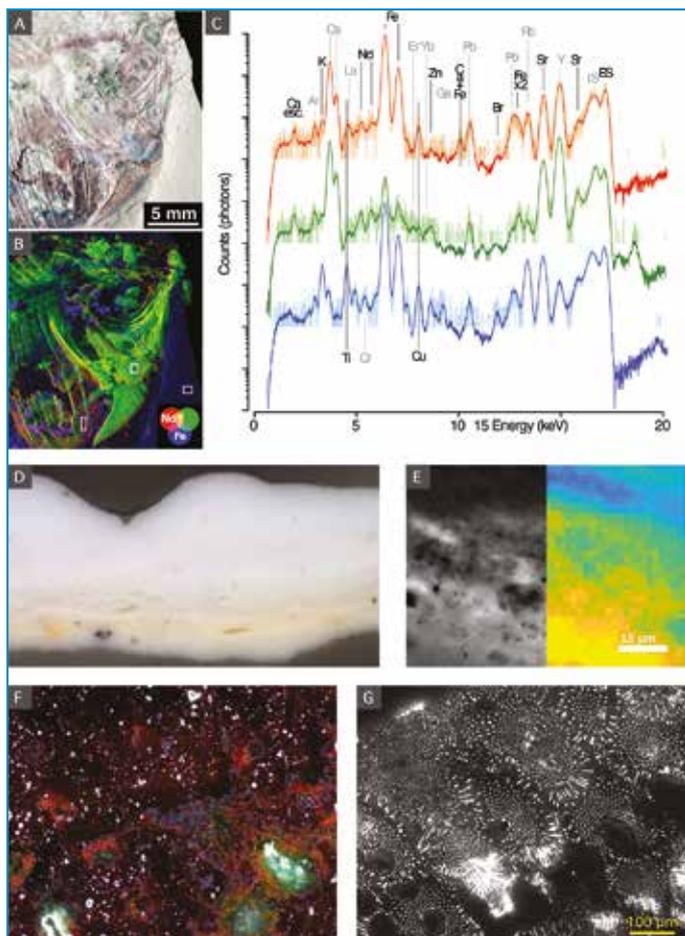


Fig. 2 : Exemples d'applications d'imageries avancées sur synchrotron pour l'analyse des systèmes anciens. (A)-(B) Partie antérieure (crâne à droite) d'un poisson du Jbel Oum Tkout Lagerstätte (Crétacé supérieur, Maroc) : A photographie optique, B superposition en fausses couleurs des distributions de deux éléments de terre rare néodyme (rouge) et l'yttrium (vert), et du fer (bleu), reconstruites à partir d'une décomposition spectrale complète des données obtenues fluorescence X sur synchrotron. (C) Fluorescence des rayons X synchrotron, spectres moyens (90 pixels, couleurs foncées) et individuels (couleur claire), correspondant aux muscles fossilisés (rouge et orange), aux os (vert foncé et clair) et aux sédiments, à l'os (vert foncé et clair) et à la matrice du sédiment (bleu foncé et clair), respectivement. Les spectres sont représentés à l'aide d'une échelle logarithmique et les pics principaux sont étiquetés. Adapté de [4] ; (D) - (E) Coupe stratigraphique provenant d'une peinture de Bart van der Leek contenant de l'oxyde de zinc : D image optique, E comparaison de l'imagerie obtenue dans la gamme 1528-1552 cm^{-1} microscopie infrarouge (couleur) et par imagerie luminescence synchrotron (noir et blanc) illustrant des zones d'altérations riches en savons de zinc. (F) - (G) Amulette provenant du site de Mehrgarh vieille de 6000 ans : F image de microscopie champ sombre d'une zone entièrement corrodée, G image de photoluminescence de la même zone (excitation 420-480 nm et émission à bande passante 850-1020 nm). Microstructure eutectique fossilisée révélée. Le motif régulier en forme de bâtonnets est observé sur plusieurs millimètres dans les espaces interdendritiques. Adapté de [12].

méthodes statistiques adaptées à l'étude de données complexes. Les données d'imageries spectrales collectées dans l'infrarouge ou les rayons X, contiennent une forte diversité de données physico-chimiques et représentent des volumes très conséquents de données, du Go au To. Leur exploitation pose plusieurs défis. Il convient tout d'abord d'optimiser les outils d'analyse permettant, en aval de la collecte, d'extraire les informations les plus exhaustives et robustes. Les travaux ont, par exemple, abouti à des stratégies algorithmiques, prenant en compte le couplage spectral/spatial, permettant d'extraire des informations en minimisant l'exposition des échantillons, limitant le temps de calcul tout en préservant la robustesse des résultats [4]. D'autres développements permettent de révéler et représenter visuellement la structure latente des données et ainsi de distinguer des classes de signatures qui décrivent l'hétérogénéité et l'organisation spatiale des composés au sein des matériaux [5]. Enfin, les stratégies de traitement des données peuvent également permettre d'optimiser la collecte de la mesure, en minimisant par exemple les doses déposées dans les échantillons tout en étendant les zones imagées [6].

IMAGERIES UV VISIBLE POUR L'ÉTUDE DES MATÉRIAUX PATRIMONIAUX

En collaboration avec la ligne de lumière DISCO du synchrotron SOLEIL, IPANEMA a développé l'imagerie spectrale dans l'ultraviolet lointain pour l'étude de matériaux d'objets patrimoniaux. L'utilisation du rayonnement synchrotron entre 200 et 350 nm a permis de sonder les propriétés de défauts cristallins et de phases organiques dans des systèmes anciens tels que des pigments d'artistes comme l'oxyde de zinc (Fig. 2D et 2E), pour en détecter des traces de leur procédés de fabrication ou les marqueurs d'altération lorsque mélangé à un liant organique, mais également pour l'étude de la composition de couches de vernis d'instruments de musiques anciens [7]. En exploitant les propriétés semi-conductrices de phases de corrosion communément observées sur des objets archéologiques à base de cuivre, l'étude d'une amulette vieille de plus de 6000 ans provenant du site de Mehrgarh (Pakistan), a révélé un motif invisible au sein de l'alliage corrodé qui est la signature du procédé métallurgique utilisé par les artisans au Chalcolithique ancien [8] (Fig. 2F et 2G). Les applications de l'imagerie de photoluminescence sur synchrotron se sont depuis étendues à d'autres typologies de matériaux.

ANALYSES EN TOUTE SÉCURITÉ

L'utilisation de rayonnement intense et ionisant peut générer des modifications de l'état de la matière au

niveau atomique ou moléculaire. Ces effets peuvent avoir encore plus d'impact pour des échantillons anciens issus de collections culturelles ou naturelles, sur lesquelles peu d'informations existent *a priori*, qui sont très hétérogènes, et qui sont non reproductibles. Depuis plus de dix ans, IPANEMA a participé à faire émerger une réflexion autour des modifications des matériaux anciens sous faisceau en co-organisant et en participant à plusieurs réunions organisées sous l'égide de l'AIEA, en coordonnant les actions de recherche sur ces thèmes menées dans le cadre du projet européen IPERION-HS et en participant à la publication d'articles scientifiques, dont deux articles de revues, discutant spécifiquement de ces aspects [9].

ÉTUDES REFLEXIVES SUR L'ANALYSE DES MATÉRIAUX ANCIENS

Le premier projet d'unité d'IPANEMA a été l'occasion d'identifier les éléments sous-jacents à la définition des matériaux anciens, à travers des propriétés communes puis à réfléchir à la généralisation d'un certain nombre de notions, comme celles de traces, d'échelle d'hétérogénéité, ou de *corpus* [2]. Notamment la non-réitérabilité des analyses scientifiques qui est associée à la singularité des matériaux étudiés, est une propriété très intéressante pour étudier et s'interroger sur le cadre théorique dans lequel s'inscrivent les pratiques d'analyses reposant sur des études de systèmes singuliers par des techniques d'imagerie. C'est donc à l'aune des travaux menés à IPANEMA en collaboration avec d'autres laboratoires et dans le cadre de contextes très interdisciplinaires, qu'a été développé un travail de réflexion visant à développer un regard épistémologique sur les méthodes d'analyses des matériaux anciens. L'objectif est de contribuer à renforcer les ponts conceptuels entre différentes disciplines, telles que l'histoire, l'archivistique et les sciences expérimentales mais également de nourrir l'émergence de stratégies innovantes combinant la science des matériaux, le développement instrumental, l'histoire et la science des données [10].

CONCLUSION

IPANEMA est une structure unique au niveau international pour l'étude des matériaux anciens ayant pour mission le développement de méthodes avancées de caractérisation de matériaux de l'archéologie, des paléoenvironnements, de la paléontologie et du patrimoine culturel, et l'accompagnement de recherches synchrotron en collaboration avec des scientifiques hébergés. IPANEMA qui est à l'interface entre les communautés des matériaux anciens et les grandes infrastructures de

caractérisation et de recherche tels que les synchrotrons, contribue à faire émerger des projets de recherche et d'appui de nouveaux outils d'analyse et de traitements statistiques optimisés, utiles à la communauté des matériaux anciens. Ce positionnement original et novateur permet également de faire émerger de nouvelles thématiques de recherches associées à la provenance, à la conservation et à la restauration des collections culturelles et naturelles, en s'intéressant aux propriétés de leur matérialité. Par ailleurs, l'activité de recherche méthodologique au croisement de l'étude d'objets culturels, d'artefacts archéologiques et de spécimens paléontologiques favorise une interdisciplinarité forte et contribue à la formation d'étudiants ouverts aux enjeux sociétaux et environnementaux actuels et armés pour y répondre.

RÉFÉRENCES

- (1) Bertrand L, Thoury M, Anheim E (2013) Ancient materials specificities for their synchrotron examination and insights into their epistemological implications. *Journal of Cultural Heritage* 14 : 277-289.
- (2) Gueriau P et al. (2014) Trace elemental imaging of rare earth elements discriminates tissues at microscale in flat fossils. *PLoS One* 9 : e86946.
- (3) Li J et al. (2019) Synchrotron-based phase mapping in corroded metals: Insights from early copper-base artifacts. *Analytical Chemistry* 91 : 1815-1825.
- (4) Celeux G et al. (2022) Hierarchical clustering of spectral images with spatial constraints for the rapid processing of large and heterogeneous data sets. *SN Computer Science* 3 : 194.
- (5) Bertrand L et al. (2011) Identification of the finishing technique of an early eighteenth century musical instrument using FTIR spectromicroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 399 : 3025-3032.
- (6) Cohen SX et al. (2020) Robust framework and software implementation for fast speciation mapping. *Journal of Synchrotron Radiation* 27 : 1049-1058.
- (7) Thoury M et al. (2011) Synchrotron UV-visible multispectral luminescence microimaging of historical samples. *Analytical Chemistry* 83 : 1737-1745.
- (8) Thoury M et al. (2016) High spatial dynamics-photoluminescence imaging reveals the metallurgy of the earliest lost-wax cast object. *Nature Communications* 7 : 1-8.
- (9) Bertrand L et al. (2023) Practical advances towards safer analysis of heritage samples and objects. *Trends in Analytical Chemistry* 164 : 117078.
- (10) Bertrand L et al. (2021) Deciphering the chemistry of cultural heritage: targeting material properties by coupling spectral imaging with image analysis. *Accounts of Chemical Research* : 2823-2832.

La Fondation des sciences du patrimoine fête ses 10 ans !



Anne-Julie Etter, maîtresse de conférences à CY Cergy Paris Université, est ancienne élève de l'École normale supérieure (Ulm) et agrégée d'histoire. Ses travaux de recherche portent sur les pratiques de conservation et de transmission des biens culturels en Asie du Sud aux XVIII^e et XIX^e siècles, les collections d'objets indiens conservées en Europe et les dynamiques patrimoniales dans l'Inde contemporaine. Coordinatrice scientifique de la Fondation des sciences du patrimoine (FSP), elle participe au montage, au suivi et à la valorisation de travaux de recherche interdisciplinaires sur les patrimoines matériels. Elle a co-dirigé l'ouvrage collectif *Les patrimoines en recherche(s) d'avenir (2019)* et le numéro spécial de la revue *Technè* intitulé *Fondation des sciences du patrimoine : recherches interdisciplinaires (2020)*. Elle anime le carnet de recherche de la FSP (<https://fsp.hypotheses.org>), qui fait état des résultats d'une trentaine de projets accompagnés par cette fondation.

La Fondation des sciences du patrimoine (FSP) fête son dixième anniversaire. Cet événement est l'occasion de revenir sur les activités d'une structure qui, en l'espace de quelques années, a acquis une place prépondérante au sein du paysage français de la recherche sur les patrimoines.

La FSP a été fondée en 2013 pour assurer la gouvernance du Laboratoire d'Excellence Patrima et de l'Équipement d'Excellence Patrimex, lauréats du programme Investissements d'avenir (PIA), aujourd'hui appelé France 2030¹. C'est une fondation partenariale, placée sous le haut patronage du ministère de la Culture et du CNRS. Les membres fondateurs sont au nombre de cinq : les universités de Cergy et Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, le musée du Louvre, le château de Versailles et la Bibliothèque nationale de France. Elle compte une quinzaine de membres associés (laboratoires de recherche, établissements d'enseignement supérieur, institutions patrimoniales)². Réunissant l'ensemble de ces partenaires autour de projets de recherche élaborés de façon conjointe, la FSP encourage et structure une recherche de pointe sur le patrimoine culturel matériel.

Au cours des dix dernières années, elle a financé ou cofinancé plus de 200 projets de recherche, dont près de 90 thèses. Ces projets sont marqués par une forte interdisciplinarité, autour d'un dialogue entre sciences humaines et sociales, sciences expérimentales et sciences de l'information et de la communication. Un grand nombre de disciplines sont représentées, de l'histoire de l'art, l'histoire et la littérature à la physique, la chimie, la robotique, en passant par l'informatique, le droit ou encore l'anthropologie. Avec d'autres structures, tel le Labex Les Passés dans le présent, la FSP a œuvré au rapprochement entre le monde universitaire et les institutions

patrimoniales³. Elle donne aux chercheurs académiques et aux professionnels du patrimoine l'opportunité ainsi que les moyens humains et financiers de définir des problématiques de recherche partagées et d'identifier des thématiques innovantes de recherche autour de corpus d'objets patrimoniaux⁴.

PATRIMOINE ET MATÉRIALITÉ

L'un des points communs à l'ensemble des projets accompagnés par la FSP est l'attention portée à la matérialité. Il s'agit d'approfondir les connaissances sur les conditions de production des objets patrimoniaux et leur évolution matérielle au fil du temps : identification des matériaux (nature, lieu d'approvisionnement, altérations, etc.), techniques de fabrication, histoire des restaurations. Cela passe notamment par la mobilisation d'un ensemble de techniques d'imagerie et d'analyse de la matière, aussi non-invasives et non-destructives que possible. La FSP accompagne l'application de ces techniques à des corpus patrimoniaux, souvent conservés au sein des établissements partenaires, et leur adaptation en fonction des caractéristiques des objets concernés et des questions qui leur sont posées. Elle permet également de lancer des projets de recherche centrés sur le développement instrumental ou le couplage de techniques d'analyse. Dans le même temps, des recherches sont menées pour mesurer les effets de ces techniques sur les objets patrimoniaux, notamment l'impact des rayons X sur leurs constituants. Tout un ensemble de projets portent aussi sur la conservation préventive. Des travaux en cours cherchent par exemple à mettre au point un système de contrôle des vibrations susceptibles d'endommager les biens patrimoniaux. Si l'étude matérielle des objets permet de mieux connaître leur histoire et leurs usages, elle a également pour fina-

lité d'améliorer les conditions de leur conservation-restauration, par le perfectionnement des procédés existants ou la mise en place de nouvelles méthodologies. On peut mentionner à cet égard le souci de la FSP de favoriser l'intégration des conservateurs-restaurateurs. Leur implication ne va pas de soi, en raison du statut de la plupart d'entre eux, qui exercent leur profession en tant qu'indépendants. Une structure comme la FSP leur donne les moyens de participer à des projets de recherche.

Les sciences de la conservation sont très présentes au sein des activités de la FSP. Cette orientation est d'ailleurs souvent perçue comme un trait caractéristique de cette institution. Le volet physico-chimique n'est pourtant pas exclusif. Dans nombre de projets, la contribution des historiens et historiens de l'art est essentielle. Il existe des projets résolument ancrés dans les sciences humaines et sociales. Par exemple, des travaux explorent la profession d'archiviste et son évolution, le statut des débris de la charpente et des voûtes effondrées de Notre-Dame de Paris (Fig. 1) ou encore la participation des détenteurs à la sauvegarde de leur patrimoine. Dans ces trois cas, l'angle d'attaque prédominant est respective-



Fig. 1 : Vestiges en plomb de la couverture de Notre-Dame de Paris, montrés dans le cadre de l'exposition « Hommage à Notre-Dame de Paris » (3 août 2022-2 janvier 2023, Cité de l'architecture et du patrimoine). © E. Poirault.

ment sociologique, anthropologique et juridique, même si les équipes impliquées travaillent en collaboration étroite avec des professionnels du patrimoine et des spécialistes d'autres disciplines. D'autres projets sont très intégrateurs en termes d'expertise et croisent de façon équilibrée et complémentaire diverses démarches disciplinaires. Deux exemples peuvent être mis en avant. Les travaux sur les collections royales d'Amérique du Nord, coordonnés par le musée du quai Branly - Jacques Chirac, combinent l'étude historique des objets avec leur analyse matérielle, tout en déployant des interventions de conservation-restauration et une collaboration avec les spécialistes amérindiens issus des communautés d'origine des objets. D'autres chercheurs étudient l'or comme matériau pictural en Europe occidentale (XVI^e-XVII^e siècles) au croisement de l'histoire de l'art, de la physico-chimie des techniques picturales et de l'optique.

DES CORPUS D'ÉTUDE TRÈS VARIÉS

En parallèle des disciplines et des méthodes, l'action de la FSP peut être évoquée via les biens patrimoniaux qui sont au cœur des travaux qu'elle accompagne. Les objets et édifices étudiés sont très divers d'un point de vue tant chronologique que géographique et typologique. La liste suivante, qui rassemble des objets qui ont récemment été étudiés ou sont en cours d'étude, l'illustre bien : sarcophages égyptiens (Fig. 2), vestiges textiles minéralisés de la vallée de l'Indus, vestiges du sanctuaire gallo-romain des Vaux de la Celle (Genainville), production documentaire médiévale de l'abbaye de Saint-Germain-des-Prés, cuirs dorés polychromes en vogue dans l'Europe moderne, violons baroques, œuvres muséales en PVC plastifié. Certains corpus étudiés jouissent d'une reconnaissance

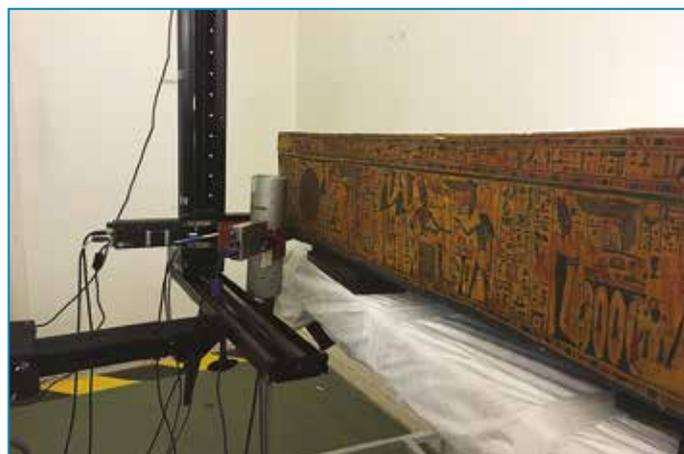


Fig. 2 : Analyse en cartographie XRF de la cuve du cercueil dit à fond jaune de Tanetimen, XXI^e dynastie, inv. N 2562, département des Antiquités égyptiennes, musée du Louvre. © C2RMF/L. Brunel-Duverger.

scientifique et patrimoniale bien établie. D'autres ont un statut patrimonial moins consolidé et sont souvent moins connus du public, qu'ils aient longtemps été considérés comme peu « nobles » par rapport aux chefs-d'œuvre des beaux-arts ou qu'ils soient contemporains voire très contemporains. De tels corpus font désormais l'objet d'études approfondies, qui permettent de mieux les connaître, mais aussi de mieux les conserver et de les présenter au public. On peut mentionner, à titre d'illustration, les objets muséaux en plâtre ou les caoutchoucs naturels et synthétiques. C'est probablement là l'une des forces de la FSP, qui offre aux équipes la possibilité de travailler sur des matériaux ou des objets encore peu ou mal connus, faisant simultanément émerger des problématiques innovantes de recherche. Celles-ci peuvent ensuite être appliquées à d'autres objets patrimoniaux, y compris les plus « canoniques ».

LES ENJEUX DE LA STRUCTURATION ET DU PARTAGE DES DONNÉES

Une évolution notable des activités de la FSP au cours de la dernière décennie concerne l'ensemble du champ académique et du monde de la culture, à savoir l'import-

tance croissante du numérique. Comme beaucoup d'autres projets engagés par la communauté scientifique ces dernières années, les travaux de la FSP font la part belle aux humanités numériques et aux problématiques de fouille et de stockage de données massives. Les équipes portent une attention particulière au devenir et au partage des données issues des actions de conservation-restauration. La FSP est l'institution de référence du projet ESPADON (En sciences du patrimoine, l'analyse dynamique des objets anciens et numériques), lauréat du Programme Investissements d'avenir en 2021. Ce projet (2021-2028) se donne pour objectif de développer de nouveaux moyens instrumentaux de tomographie et d'imagerie, ainsi que des ressources et savoir-faire numériques de traitement, de gestion et de stockage de données massives. Il met en avant la notion d'objet patrimonial augmenté (OPA). Cet outil multidimensionnel, transdisciplinaire et distribué, qui mobilise l'ensemble de la communauté de la science du patrimoine, est conçu comme un système d'information agrégeant toutes les informations produites et en cours de production autour d'un objet patrimonial donné (Fig. 3). Lors du montage du LabEx Patrima, une dizaine d'années plus tôt, l'accent avait été mis sur le

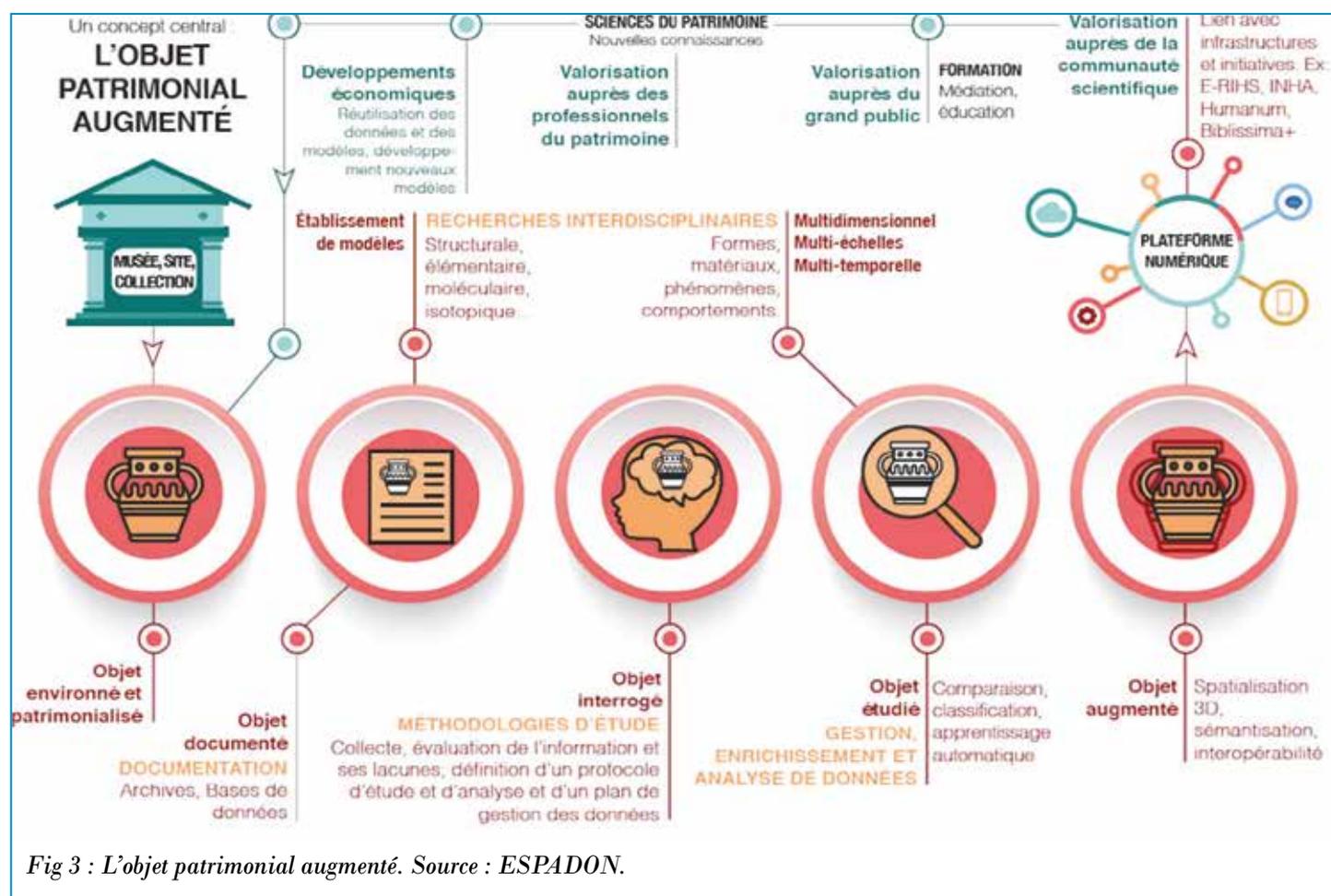


Fig 3 : L'objet patrimonial augmenté. Source : ESPADON.

patrimoine comme objet-frontière, soulignant sa capacité à faire dialoguer des acteurs venant d'horizons institutionnels et disciplinaires variés. Le passage du concept d'objet-frontière à celui d'objet patrimonial augmenté signale la rapidité avec laquelle les recherches ont évolué dans le domaine du patrimoine au cours de la décennie 2010. L'interdisciplinarité est devenue pratique courante, tandis que le stockage, le partage et l'ouverture des données constituent un défi de taille.

UN RAYONNEMENT NATIONAL ET INTERNATIONAL

La réalisation de l'OPA suppose une convergence d'intérêts et de pratiques entre des expertises et des institutions très diversifiées et la définition d'orientations communes, au-delà des spécificités propres à chaque communauté d'acteurs, qu'il ne s'agit pas pour autant de gommer. Cet aspect est central dans la définition des missions de la FSP, qui se pense et agit comme une institution ayant les moyens de fédérer les initiatives nationales dans le domaine patrimonial.

La FSP est de plus en plus identifiée par les organismes de tutelle et les acteurs concernés comme un nœud en matière de recherche dans le domaine du patrimoine. Ce trait est renforcé par son engagement au niveau international, notamment au niveau européen. En fédérant les initiatives d'un nombre important d'institutions françaises, la FSP facilite leur mise en réseau avec des partenaires étrangers et assure la coordination de ces actions. La FSP est devenue en 2019 l'organisme support de la *Joint Programming Initiative on Cultural Heritage* (JPI CH), qui vise à améliorer la coordination de la recherche sur le patrimoine culturel en Europe. Depuis 2022, la FSP porte le nœud national de l'infrastructure européenne E-RIHS (*European Research Infrastructure for Heritage Science*). Elle a obtenu le projet européen d'Action de support et de coordination (CSA) intitulé ARCHE (*Alliance for Research on Cultural Heritage in Europe*), qui rassemble 24 partenaires de 18 pays dans l'objectif de préparer un partenariat pour les sciences

du patrimoine à l'horizon 2025. Le défi pour les années à venir consiste à poursuivre l'approfondissement des synergies entre les acteurs qui œuvrent à la connaissance et la conservation des biens culturels en France, tout en répondant aux attentes et aux ambitions, très fortes, au niveau européen.

NOTES

(1) Depuis 2018, les actions du LabEx Patrima se poursuivent au sein de l'axe « Patrimoines matériels : Savoirs, patrimonialisation, transmission » de l'École universitaire de recherche humanités, création, patrimoine (ANR 17-EURE-0021).

(2) Parmi les membres associés figurent le Centre de recherche et de restauration des musées de France, le Centre de recherche sur la conservation (Laboratoire de recherche des monuments historiques, Centre de recherche sur la conservation des collections, musée de la Musique), l'École du Louvre, l'Institut national d'histoire de l'art, l'École nationale supérieure d'architecture de Versailles, l'École nationale des chartes, l'Institut national du patrimoine, les Archives nationales, le musée du quai Branly - Jacques Chirac, le Centre Pompidou, le Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine, le laboratoire Modélisation de l'architecture et du patrimoine. Un accord cadre a été signé avec le Synchrotron SOLEIL et le projet Patrimalp (Université Grenoble Alpes).

(3) Voir par exemple É Anheim, A-J Etter, G Glasson-Deschaumes et P Liévaux (dir.), *Les patrimoines en recherche(s) d'avenir*, Nanterre, Presses universitaires de Paris Nanterre, collections « Les passés dans le présent », 2019.

(4) Pour une présentation détaillée d'une sélection de projets portés par la FSP : A-J Etter, A-S Le Hô et S Mirabaud (dir.), *Fondation des sciences du patrimoine : recherches interdisciplinaires*, numéro spécial, *Technè*, 50, 2020 (<https://journals.openedition.org/technè/7408>). On peut aussi se reporter au carnet de recherche de la FSP (<https://fsp.hypotheses.org>).

Louis XI, un roi tourangeau



Pierre Audin, professeur d'histoire, diplômé de l'École des hautes études en sciences sociales, auteur d'une thèse sur les survivances du paganisme dans le christianisme, chargé de cours d'histoire romaine durant plusieurs années, a publié trente-cinq livres d'histoire tourangelle et deux-cent vingt études d'histoire locale, essentiellement sur la période médiévale. Secrétaire général de la Société archéologique de Touraine durant dix ans, il est membre de l'Académie des belles-lettres de Touraine.

Certes, le dauphin Louis, futur Louis XI, est né à Bourges en 1423 (nous fêtons donc cette année le 600^e anniversaire de sa naissance) mais ses parents Charles VII et Marie d'Anjou l'ont installé très tôt au château de Loches, à 40 kilomètres au sud de Tours, à l'abri, dans la vieille forteresse tourangelle, des incursions des Anglais ou de leurs mercenaires. Il y fut pris en charge par sa marraine Catherine de l'Île-Bouchard et son parrain Jean d'Alençon.

L'ACHAT DU MANOIR DES MONTILS PRÈS DE TOURS

Dès qu'il eut atteint l'âge de dix ans, le dauphin fut transféré au château d'Amboise, à 20 kilomètres à l'est de Tours, où il retrouva sa mère et ses sœurs. Trois ans plus tard Louis y épousa la fille du roi d'Écosse. Après avoir joué un rôle politique et militaire aux côtés de son père le roi Charles VII puis contre celui-ci, Louis devint roi en juillet 1461, à l'âge de trente-huit ans.

Après son sacre à Reims et son entrée dans Paris, Louis XI se dirigea vers la Touraine où, à Amboise, il retrouva sa famille. Une longue trêve ayant été signée avec les Anglais, le roi éprouva le besoin de s'installer dans un lieu plus plaisant et plus ouvert sur l'extérieur que le vieux château dominant la Loire, un manoir d'où il pourrait facilement partir à la chasse. Contraint de souvent s'absenter de la Touraine pour guerroyer ou négocier des traités, il pensait aux agréables séjours effectués durant sa jeunesse au manoir des Montils, aux portes de Tours (commune de La Riche), résidence proche du confluent de la Loire et du Cher que ses parents louaient à Hardouin de Maillé et où il oubliait, dans la campagne tourangelle, les murailles qui l'enfermaient le reste de l'année. C'est pourquoi il décida de faire des Montils-lès-Tours sa résidence principale. Il l'acheta au sire de

Maillé et y entreprit des travaux de rénovation et d'agrandissement, poursuivant en cela les améliorations apportées par Charles VII, lequel, bien que locataire des lieux, avait aménagé le parc, renforcé les défenses et ajouté un bâtiment pour loger le personnel. Les travaux furent longs, et c'est seulement en février 1468 que Louis XI put y écrire sa première lettre à l'en-tête « Aux Montils-lez-Tours ». Il ne subsiste qu'une petite partie de l'aile principale, accolée à la tourelle d'escalier (Fig. 1).



Fig. 1 : Manoir des Montils. Dessin montrant la cour du Plessis, la galerie à douze arcades et les jardins. Les lucarnes sont postérieures au règne de Louis XI. (Collection R. de Gaignières, 1690). Source : BnF EST VA-37(4).

LES RELAIS DE CHASSE TOURANGEAUX

Le roi, chasseur infatigable, acheta le modeste logis des Forges, au cœur de la forêt de Chinon, dont il décima rapidement le gibier ! C'est là qu'en mars 1481 il subit sa première attaque d'apoplexie. En 1479, il fit l'acquisition de Bonaventure (commune de Huismes), un manoir en ruines, à 4 kilomètres plus à l'ouest, dont il utilisa le terrain pour construire une agréable résidence de chasse, à deux ailes de longueur inégale, en briques, avec tourelle d'escalier dans l'angle rentrant, dont le style architectural influença cinq autres manoirs des environs (Fig. 2). Ce



Fig. 2 : Bonaventure, dessiné par Louis Boudan. Dans le jardin, à droite, on aperçoit les ruines de l'édifice ayant précédé le rendez-vous de chasse de Louis XI (collection R. de Gaignières, 1690). Source : 1690, BnF EST VA-37 (2).

logis étant proche de la Loire, Louis XI s'y rendait souvent en bateau. Il disposait en effet d'une flottille ancrée près de son château des Montils (qui prit progressivement le nom de Plessis-lès-Tours et parfois de Plessis-du-Parc-lez-Tours). Il avait d'ailleurs fait recreuser un bras de la Loire, le ruisseau Sainte-Anne, qui reliait le fleuve au Cher et permettait aux barques de passer de l'un à l'autre. Avec sa « galiote », grand bateau à fond plat doté d'une cabine vitrée, le roi pouvait remonter la Loire vers Amboise, Blois et Orléans, ou descendre le fleuve vers ses rendez-vous de chasse et continuer vers l'Anjou. Un large chaland permettait de faire suivre les chiens de chasse et l'escorte écossaise.

TOURS, AU CENTRE DES PRÉOCCUPATIONS DE LOUIS XI

La faible distance séparant les Montils de Tours permettait à Louis XI de se rendre aisément dans la capitale tourangelle, dont il affirmait être « l'un des anciens citoyens de cette bonne ville ». Il réforma les institutions municipales de Tours, accordant des avantages financiers, choisissant le nom du maire parmi une liste de trois noms, autorisant les édiles à aménager un Tablier de ville et leur offrant même un droit de justice, au grand dam des abbés titulaires de ces droits seigneuriaux.

C'est à Tours que se réunirent en 1468 les états généraux destinés à enlever le duché de Normandie à son frère Charles, qui se rapprochait des ducs de Bretagne et de Bourgogne pour prendre en tenailles le royaume de France. Louis XI avait besoin de l'appui des villes et du clergé pour retirer à son frère la riche Normandie.

Se préoccupant de développer la ville de Tours, le roi décida en 1478 de gagner des terres en repoussant la rive gauche de la Loire. Mais une série de crues le contraignit à abandonner les travaux. Il eut davantage de succès en développant à Tours l'industrie de l'armement, fabrication de cuirasses, de casques, d'arbalètes, de lances et de canons : la ville fut bientôt capable d'équiper une partie des troupes royales, armement souvent transporté par bateaux vers Orléans, d'où il était transbordé vers Paris.

La fabrication de tissus en soie connut moins de succès. En mars 1470, Louis XI avait donné l'ordre aux Lyonnais d'envoyer à Tours les artisans soyeux et leur matériel, afin de reprendre en mains l'industrie de la soie, qui végétait. Les soyeux étant en butte à l'hostilité de la population, il fallut toute l'autorité royale pour créer une sorte de manufacture d'État financée pour moitié par le roi et pour l'autre moitié par la ville, contre son gré. On ne parvint à se procurer de la soie brute qu'en 1472, avec laquelle les soyeux réussirent à produire 240 mètres de tissu de soie, financièrement à perte. Louis XI taxa alors les importations de luxe, donna aux Tourangeaux le monopole de la fourniture de la Cour, et fit planter des mûriers dans le parc de son château du Plessis. Malgré ces efforts, la soierie resta en Touraine, pour ce qui concerne le règne de Louis XI, une activité secondaire, loin derrière la fabrication d'armes.

Le roi, très pieux, fit bénéficier de ses faveurs les églises et abbayes tourangelles : restauration de bâtiments, dons en argent, offrandes de statues, confirmation de privilèges, reconstruction de l'église des Carmes de Tours (devenue Saint-Saturnin) et peut-être de l'église du prieuré Saint-Côme tout près du Plessis, restauration

de Notre-Dame La Riche... Le don le plus onéreux fut celui d'une grille en argent destinée à remplacer celle qui, en fer, entourait la châsse de saint Martin, dans la basilique du même nom (dont le roi de France était de droit l'abbé depuis les souverains carolingiens). Terminé en 1479, ce treillis qui avait nécessité 250 kg d'argent coûta près de 4 millions de nos euros !

UN RENOUVEAU ARCHITECTURAL

Outre ses résidences du Plessis et de Bonaventure, Louis XI améliora les défenses du château de Chinon par l'ajout d'une tour, dite d'Argenton, édifice élevé terminé par une terrasse de plain-pied avec la cour, et aux murs épais de 5 mètres afin de pouvoir résister à l'artillerie de son temps. Il fit bâtir dans la cour de la vieille forteresse de Montrichard (en Loir-et-Cher mais jadis en Touraine) un agréable logis (maintenant en ruines), où il maria ses deux filles, Anne avec Pierre de Beaujeu et Jeanne avec Louis d'Orléans futur Louis XII. Il entreprit surtout la construction de l'imposant château de Langeais, au pied des ruines de celui qui avait été bâti par Foulque Nerra. Commencés dès 1462, un an seulement après le couronnement, les travaux furent arrêtés cinq ans plus tard, laissant le chantier inachevé : deux ailes seulement furent bâties, la construction des deux autres, qui devaient fermer la cour, ne fut pas entreprise, probablement parce que le roi se sentait moins menacé. Si la façade tournée vers le bourg de Langeais est celle d'une forteresse médiévale, le côté cour est percé sur cinq niveaux de larges baies richement sculptées lui conférant l'aspect d'une agréable résidence.

Les seigneurs de l'entourage du roi ont également contribué à l'enrichissement du paysage architectural de la Touraine, comme Étienne Le Loup, le grand écuyer de France Jean Garguesalle à Coulaine (Beaumont-en-Véron) construit avant Langeais par le même architecte, Jean de Bueil, Jean Grelet à La Roche-Bertault (Ciran), Louis bâtard de Bourbon, Jean d'Estouteville, Jean du Fou... Le chambellan Étienne Le Loup a construit le Clos-Lucé, à Amboise, édifice en briques qui contrastent avec les blocs de tuffeau ornant les ouvertures. Le manoir est composé de deux courtes ailes à étage encadrant perpendiculairement le corps de logis principal doté d'une tourelle d'escalier dans l'angle rentrant ; il est complété par une galerie en hourdis de briques, couverte, constituant un pont reliant l'une des ailes à une tour avancée. Jean de Bueil, « le fléau des Anglais », s'est retiré dans la forteresse de Vaujours (Château-la-Vallière) et l'a transformée en un site imprenable en y ajoutant, entre autres, un bastion d'entrée, deux douves successives, deux case-mates (comme l'a fait plus tard Ymbert de Bastarnay à

Bridoré) et trois boulevards, protégeant la cour d'honneur carrée, fermée de murailles renforcées de tours.

Son fils Antoine de Bueil, gendre de Louis XI (il avait épousé Jeanne de Valois, fille d'Agnès Sorel) a construit le château de Pocé-sur-Cisse, doté d'échauguettes aux angles, à deux étages en tuffeau et un troisième niveau en briques. Au Coudray-Montpensier (Seuilly), l'amiral Louis de Bourbon a choisi d'agrandir le château qu'il venait d'acquérir par ajout d'un grand corps de logis à trois étages, au décor médiéval de mâchicoulis ornés d'arcatures flamboyantes...

UN ROI QUI CONNAIT BIEN LA TOURAINE

Dès qu'il revient au Plessis Louis XI, infatigable, en repart aussitôt, pour chasser ou pour parcourir la province. Il consulte les échevins de Tours sur l'état de la ville, rend visite à ses amis, Hardouin de La Touche à Avon-les-Roches, Guy de Laval à Benais, Hardouin de Maillé à Luynes, le médecin Adam Fumée à Saint-Quentin-sur-Indrois, Georges de La Trémoille à L'Île-Bouchard, Jean d'Estouteville à Montbazou, Jean de Bueil à Vaujours... Il est venu plusieurs fois à Saint-Michel-sur-Loire, qu'il qualifia « d'aimable rendez-vous de chasse » ... Le roi en profitait pour prier dans les églises les plus proches de ces châteaux, mais aussi à Notre-Dame de Rigny (à Rigny-Ussé) où il est venu une dizaine de fois, ou à Saint-Martin de Candès, qu'il a visité plus de quinze fois ou encore Sainte-Catherine-de-Fierbois où Jeanne d'Arc avait fait une halte avant d'arriver à Chinon. Il apprécie également l'église Notre-Dame de Nanteuil, qu'il a fait reconstruire et où il s'est rendu en pénitence, « pieds déchaux », depuis son château de Montrichard, jadis en Touraine.

AMBOISE, SECONDE « CAPITALE » DU ROI

Dès 1462, le roi décida, pour mieux loger son épouse Charlotte de Savoie et son fils le dauphin Charles, de modifier le château d'Amboise, après démolition de bâtiments préexistants. Le projet consistait à bâtir deux ailes jointives de longueurs différentes, constituant entre elles un angle de 120 degrés. Le Grand Logis abriterait la reine au rez-de-chaussée et le roi à l'étage, le Petit Logis comprendrait des chambres, des salles de service et les cuisines. Le Grand Logis fut terminé en 1470 : long de cinquante mètres, il fut complété côté cour par une galerie et côté sud par un avant-corps. Le Petit Logis fut allongé dès 1467, pour y aménager une grande salle, et fut doté d'une galerie fermée, éclairée par des baies à croisées de pierre. Ces édifices, disparus, ne sont connus que grâce aux relevés effectués un siècle plus tard par

Androuet du Cerceau (Fig. 3). Une chapelle fut creusée à flanc de coteau, et une tour construite pour renforcer l'enceinte côté Loire.

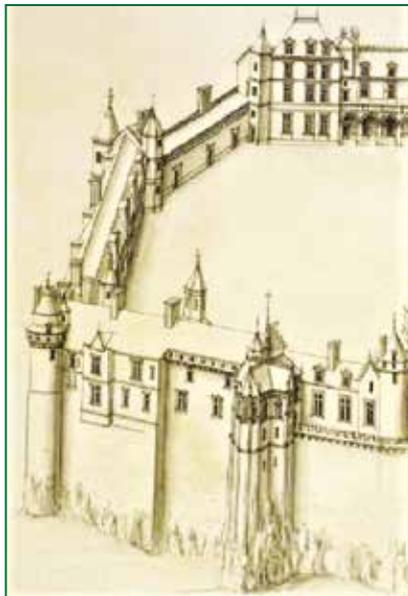


Fig. 3 : Château d'Amboise. L'aile construite par Louis XI, dessinée au XVI^e siècle par Jacques Androuet du Cerceau (détail).
Source : INHA, bibliothèque Jacques Doucet.

Terminée en 1468, cette tour Neuve, ou tour Garçonnet (qui a perdu deux étages) est l'un des deux vestiges, avec la porte des Lions ouvrant à l'est sur le plateau, qui ont été conservés du règne de Louis XI. Enfin le roi ordonna la construction de l'église Saint-Florentin, terminée en 1484, pour remplacer l'église du château, désormais réservée à la famille royale.

Louis XI négocia « au pied du château » avec le duc de Warwick, qui venait

en 1470 défendre les intérêts de la reine Marguerite d'Angleterre, sœur du roi, en lutte pour conserver le trône de son époux, en pleine guerre « des Deux-Roses » entre les York et les Lancastre. C'est également à Amboise que Louis XI fit enregistrer par le Parlement le traité de Péronne que le duc de Bourgogne lui avait imposé, et là également que deux ans plus tard, après avoir réuni à Tours une assemblée il dénonça ce même traité dans ce qui est devenu « la déclaration d'Amboise ».

C'est à Amboise qu'a eu lieu en juin 1483 le mariage du dauphin Charles avec la jeune Marguerite d'Autriche, âgée de 3 ans seulement. Le roi, malade, resta au Plessis, et c'est la reine Charlotte qui présida la cérémonie, en plein air, sur une estrade dressée sur la place principale de la ville. Les seigneurs les plus importants étaient présents, ainsi que les députés de vingt-deux villes (protégés de la foule par un enclos) et les ambassadeurs de l'archiduc d'Autriche, père de la fiancée. Les pauvres avaient été relégués dans l'Aumône, hors de la ville.

Après la mort du roi, le samedi 30 août 1483, puis celui de la reine Charlotte de Savoie le 1^{er} décembre de la même année, le château du Plessis fut peu à peu délaissé, même si Charles VIII y vint à plusieurs reprises. La nouvelle capitale du royaume de France, bien que toujours en Touraine, fut désormais située à Amboise, où les bâtiments construits par Louis XI furent en partie démolis pour laisser la place à des logis bâtis et décorés « à la nouvelle mode ».

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

- Sources manuscrites :
 - Registres de comptes (CC 36 à 46) et de délibérations de Tours (BB 12) et d'Amboise (AA 82, 83, 130,144, BB 12, CC 84, 104...).
- Sources imprimées :
 - Auteurs contemporains de Louis XI : Thomas Bazin (*Histoire de Louis XI*, éd. Ch. Samaran, Belles Lettres, 1963), Philippe de Commines (*Mémoires*, éd. Bd de Mandrot, Paris, Picard, 1903; t. II, p.35-82), Jean de Roye (*Le Journal*, dit *Chronique scandaleuse*, éd. Bd de Mandrot, Soc. de l'hist. de Fr., Paris, 1894-1896).
 - Pastoret Em (1811-1835) *Ordonnances des rois de France de la troisième race, recueillies par ordre chronologique...*, t. XV-XIX, Paris, Imprimerie royale.
- Audin P (2023) *Louis XI en sa Touraine*, Mémoires de la Société archéologique de Touraine, LXXIX, 175 pages.
- Chevalier C (1874) *Inventaire analytique des archives communales d'Amboise...*, imp. Georget-Joubert, Tours, pages 175-193 et 319-357 surtout.
- Collon G (1928) Pierre Bérard et la réforme municipale de Tours en 1462. *Mémoires de la Société archéologique de Touraine*, 359 pages.
- Gandilhon A (1905) Contribution à l'histoire de la vie privée et de la Cour de Louis XI. *Mémoires de la Société littéraire et scientifique du Cher*, Bourges, p. 325-397 et 1906, p. 1-120.
- Gaugain L (2014) *Amboise, un château dans la ville*. Presses universitaires de Tours / Presses universitaires de Rennes, chapitres 4 et 9.
- Livernet S (1983) *Tours au temps du roi Louis XI*, Blois-Tours, 156 pages.
- Vaesen J (1886-1905) *Lettres de Louis XI roi de France, publiées d'après les originaux*. Société de l'histoire de France, Paris, imp. Renouard, tomes II à X.

PATSTEC, 20 ans de sauvegarde du patrimoine de la recherche contemporaine



Marie Laure Baudement (A), responsable de la mission PATSTEC, est directrice du pôle Culture et conservatrice générale du patrimoine à l'université de Bourgogne. Après des études en écologie et muséologie, elle prend en 1999 la direction du musée d'Auxerre pendant une dizaine d'années. Rejoignant ensuite l'université de Bourgogne, elle est en charge des collections scientifiques puis responsable du pôle culturel de l'université de Bourgogne à Dijon. Elle est responsable de la mission nationale PATSTEC depuis 2023.

Anne-Sophie Rozay (B) est depuis 2008 en charge des collections scientifiques pour le réseau Résitech-PATSTEC Normandie, réseau régional porté par l'INSA Rouen Normandie, l'université de Rouen et l'université de Caen. Elle est également doctorante au laboratoire d'Études sur les sciences et les techniques (UR 1610) de l'université Paris-Saclay où elle mène une étude sur le GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) situé à Caen.

La Mission nationale de sauvegarde du PATrimoine Scientifique et Technique Contemporain (PATSTEC) fête en 2023 ses vingt ans d'existence, une occasion pour revenir sur les modalités et les accomplissements de ce programme original.

UN PATRIMOINE EN PÉRIL

Les cinquante dernières années ont connu une évolution des techniques et des pratiques extrêmement rapide aboutissant à une obsolescence accélérée du matériel utilisé en recherche. Pourtant certains instruments, et certaines techniques, constituent un patrimoine scientifique irremplaçable. C'est face à ce constat qu'est né le projet de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain tout d'abord à l'échelle régionale en Pays de la Loire sous l'impulsion de Catherine Cuenca et d'Yves Thomas, puis au niveau national en 2003 par une lettre de mission¹ confiée au musée des Arts et métiers sous la direction alors de Daniel Thoulouze.



Fig. 1 : Le professeur Grolleau effectuant un premier tri à l'IUT en Pays de la Loire. © Catherine Cuenca.

Ce patrimoine récent revêt un grand nombre d'enjeux et de complexité. Pour répondre à ces nouveaux enjeux, la Mission nationale avec l'appui d'un comité scientifique dédié a développé des stratégies de sauvegarde du patrimoine *in-situ*. Cette sauvegarde est pensée en amont de la conservation et de la patrimonialisation. Sa mise en œuvre passe par la mise en place d'un inventaire des instruments et de collecte de mémoire pour documenter les savoir-faire et contextualiser au mieux les objets inventoriés (Fig. 1).

UN RÉSEAU DE PARTENAIRES

Depuis sa création en 2003, la Mission nationale a étendu progressivement un réseau de partenariat à l'échelle nationale qui aboutit à une couverture de l'ensemble du territoire. Le réseau de la Mission est composé de partenaires régionaux et nationaux (Fig. 2). Ce réseau national est communément intitulé « PATSTEC ». Depuis 2019, la Mission nationale est intégrée à la PICST (Patrimoine, information, culture scientifique et technique), dirigée par Pascale Heurtel, adjointe de l'Administratrice générale du CNAM (Conservatoire national des arts et métiers). La PICST comprend le musée, les archives, la bibliothèque et, enfin, le service « réseaux et recherches » sous la responsabilité de Catherine Cuenca et incluant la mission nationale PATSTEC.

Les partenaires « régionaux » sont souvent les universités, les organismes de recherche, les CNAM régionaux, des musées qui rejoignent le Réseau après la signature d'une convention annuelle avec le CNAM. Cela leur donne accès aux méthodes et outils de la Mission nationale. Chaque mission régionale est conseillée par un comité de pilotage et un comité scientifique régional. La

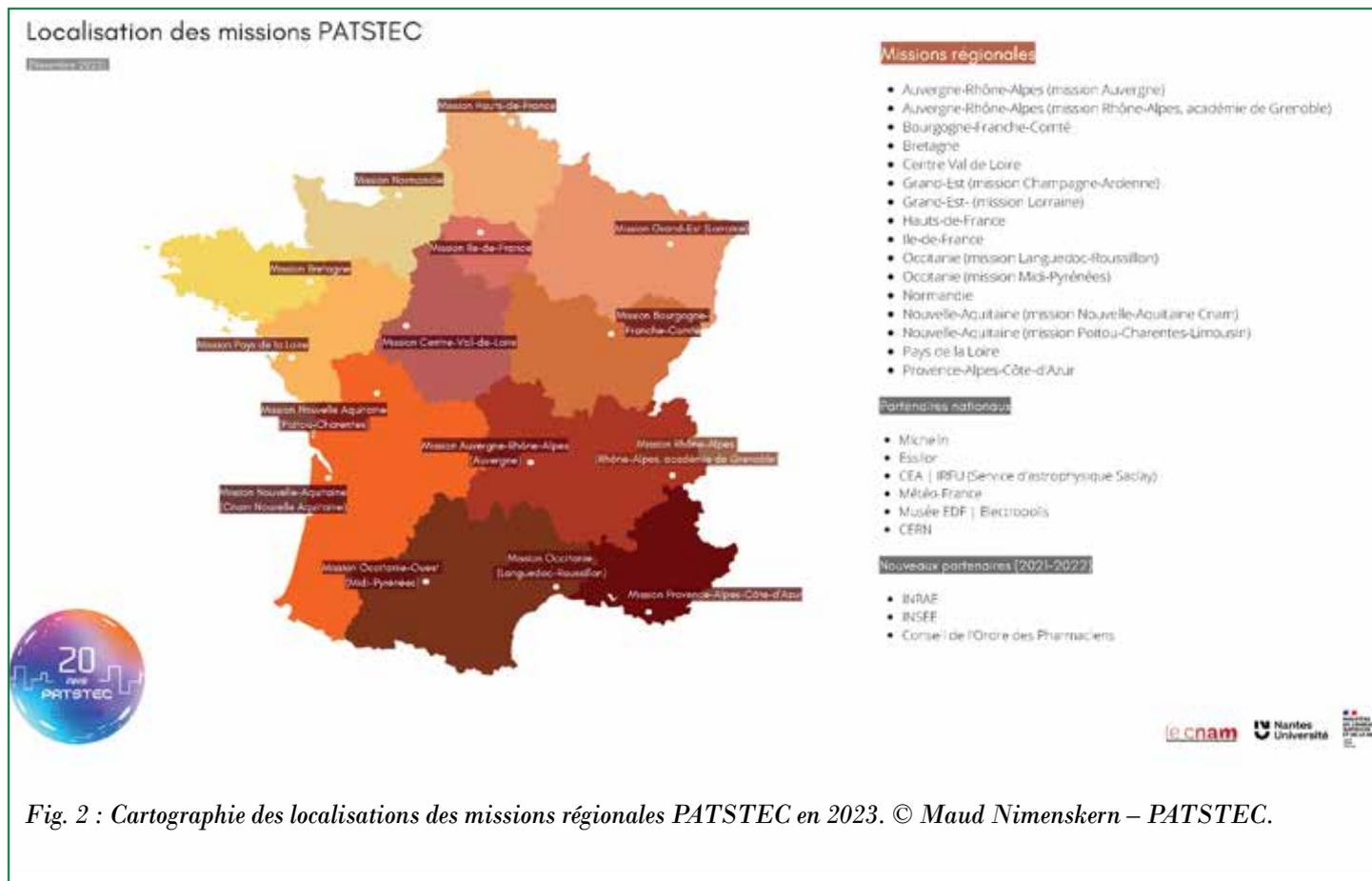


Fig. 2 : Cartographie des localisations des missions régionales PATSTEC en 2023. © Maud Nimenskern – PATSTEC.

mise en œuvre de la sauvegarde et de l'inventaire est en moyenne assurée par deux personnes un(e) chef(fe) de projet et un(e) chargé(e) de mission.

D'autres partenaires dit « nationaux » tels que Météo France, le CEA, la Fondation EDF, Essilor, Inria, Insee, le Conseil de l'ordre des pharmaciens utilisent et sont formés aux méthodes et outils du réseau, mais ils ne reçoivent pas de budget. Par contre, ils participent aux activités du Réseau : journées d'études, colloques, ateliers. Ces partenariats peuvent évoluer au cours du temps, c'est le propre d'un réseau dynamique.

Sur le terrain, les équipes s'appuient sur d'importants réseaux de bénévoles, de chercheurs, ingénieurs, et techniciens de laboratoire ainsi que des personnes retraitées de l'Enseignement supérieur ou de la recherche. Ces réseaux informels sont précieux pour une sauvegarde pertinente, pour la compréhension des contextes propres à chaque laboratoire et chaque thématique de recherche.

DES OUTILS COMMUNS

La Mission nationale met à disposition de ses partenaires une méthodologie d'inventaire et une base de

données. Des ateliers de rencontre entre les membres du réseau sont régulièrement organisés, permettant de fédérer, de mutualiser les bonnes pratiques et de mener des réflexions communes. Les instruments inventoriés ne pouvant pas être systématiquement stockés, l'inventaire numérique constitue une première forme de sauvegarde documentaire, chaque fiche étant renseignée de photographies, de documents pdf ou encore de vidéos.

Parallèlement à la sauvegarde matérielle, des collectes de témoignages sont régulièrement mises en place afin de documenter au plus près les thématiques de recherche étudiées. Ces corpus peuvent ensuite être valorisés sous forme de « Parcours de chercheurs » ou des « Histoires de laboratoire ».

Une partie de la base de données est visible sur le site internet public www.patstec.fr à destination des étudiants et des enseignants (Fig. 3) ; elle comprend en 2023 plus de 24 000 fiches d'inventaires, dont 12 000 en ligne.

DES ACTIONS DE MISE EN VALEUR D'UN PATRIMOINE MÉCONNU

La sauvegarde ne prend son sens que si elle peut être partagée au plus grand nombre, c'est dans cette optique

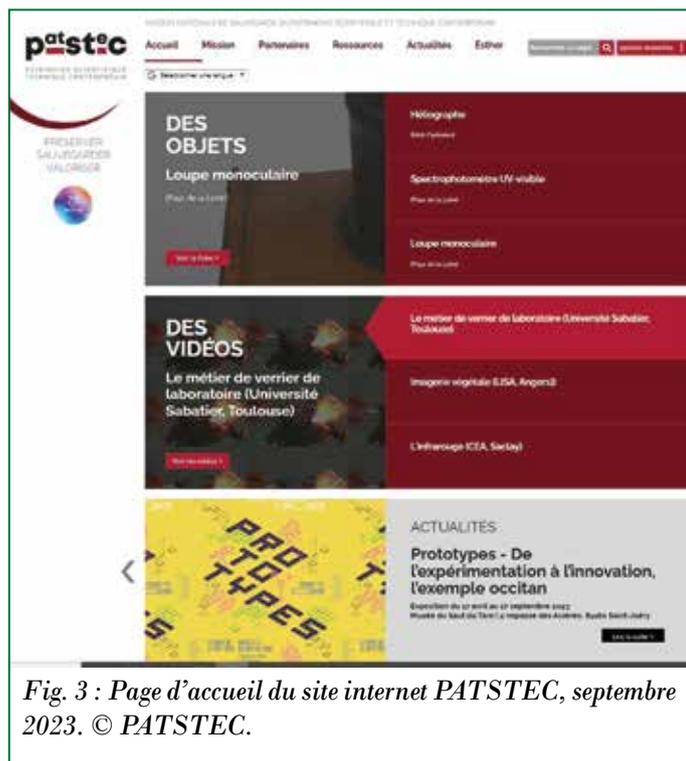


Fig. 3 : Page d'accueil du site internet PATSTEC, septembre 2023. © PATSTEC.

que chaque mission régionale a développé des actions de diffusion pour faire connaître ce patrimoine scientifique souvent méconnu.

Ces actions peuvent prendre des formes très différentes en fonction de la configuration et du portage de chaque mission : la mise en place d'ateliers pédagogique comme l'ont expérimenté les équipes de l'université de Rennes, la production et la diffusion d'expositions thématiques en Région Occitanie, Auvergne Rhône Alpes, Normandie, Haut-De-France, ou encore des projets Art/Sciences notamment en Bourgogne. De manière générale toutes les missions régionales sont actives lors de manifestations nationales : Journées européennes du patrimoine, Fête de la science, Nuit des chercheurs...

En mars 2020, la Mission nationale portait un ambitieux projet d'une exposition commune « Prototypes, de l'expérimentation à l'innovation », créée au musée des Arts et métiers. Fruit d'une collaboration entre tous les chefs de projets du réseau de la Mission nationale, cette manifestation présentait des objets sélectionnés autour d'une thématique transversale. Elle montrait la démarche et les échanges au sein d'une équipe scientifique dans un laboratoire pour créer de nouveaux instruments ou de nouveaux appareils, ceci à des fins d'innovations adaptées à ces travaux de la recherche. Parfois, un prototype de laboratoire peut aboutir à la création de prototypes industriels². Cette exposition itinérante qui a fait l'objet d'une adaptation à l'université de Bourgogne à travers

une exposition intitulée Prototype objet particulier (Pop) a été accueillie de novembre 2021 à février 2022 par l'Atheneum, centre culturel de l'université. Celle-ci inaugurerait alors le cycle des célébrations des 300 ans de l'université de Bourgogne fêté durant 2022. Elle a été l'occasion de présenter à l'ensemble de la communauté universitaire ainsi qu'aux habitants la force d'innovation scientifique des laboratoires de la région Bourgogne Franche-Comté. En 2023 La Région Occitanie a également décliné cette thématique à travers les collections montpelliéraines et toulousaines³.

LE PATRIMOINE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE CONTEMPORAIN, UN NOUVEAU TERRAIN DE RÉFLEXION

Véritable sujet en soi, le patrimoine scientifique et technique contemporain suscite de nouvelles pratiques et de nouvelles réflexions. Afin d'alimenter cette dynamique, la Mission nationale a, depuis les débuts du réseau, mis en place des journées d'études et des séminaires de recherche aboutissant à des publications, notamment deux ouvrages publiés à la Documentation française (1, 2).

En 2022-2023, à l'occasion des « 20 ans de la mission nationale », de nombreuses actions ont été mises en place : un cycle de journées d'étude sur trois ans a débuté en 2021 avec une journée sur le thème : « Comment conserver des grands équipements ou instruments scientifiques d'ampleur ? » en septembre 2021, au CNAM à Paris. Une seconde journée intitulée « La recherche scientifique au quotidien, patrimoine de demain ? », organisée par la mission régionale de l'Université de Bourgogne à Dijon, a inauguré la première version itinérante de l'exposition « Prototypes ». Une troisième journée d'études s'est déroulée à Clermont-Ferrand, organisée par la Mission Auvergne au Muséum Henri-Lecoq, sur le thème : « Du repérage à la patrimonialisation des objets scientifiques et techniques contemporains, quelles protections ? ».

En mars 2023 se déroulait au musée des Arts et métiers un colloque de deux jours⁴, tandis qu'un dossier thématique est prévu dans la Revue d'Histoire de la Recherche Contemporaine du CNRS (3).

DES COLLABORATIONS EUROPÉENNES ET INTERNATIONALES

Le besoin de partager les expériences dans le domaine de la sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain s'est manifesté peu à peu sur le plan international. Le succès du programme français - ses méthodes et ses résultats - a retenu l'attention des institutions muséales et universitaires à l'étranger. En

2008, un « consortium » (ESTHER) constitué sur la sauvegarde du patrimoine scientifique et technique (de 1945 à nos jours) a été créé avec les pays suivants : Belgique, Italie, Grèce, Allemagne, Angleterre, Suisse, Serbie, Hongrie, Bulgarie et Portugal⁵.

Dans le cadre d'ESTHER, plusieurs réunions ont été organisées : à Paris en 2011 au musée des Arts et métiers, à Toulouse en 2012, lors de la conférence de ECSITE, puis à Bruxelles en septembre 2012, à Göteborg en juin 2013 pendant la conférence ECSITE. En mars 2014, le consortium ESTHER s'est inscrit dans un programme commun du 7^e PCRD (Programme cadre de recherche et développement), principal instrument communautaire du financement de la Recherche en Europe, intitulé « Horizon 2020 », et a présenté une réponse commune à un appel de l'Union européenne toujours sur le thème de la sauvegarde du patrimoine scientifique et technique des 60 dernières années des XX^e et XXI^e siècles. Ceci a renforcé encore les relations entre les partenaires au sein du consortium.

Par ailleurs, des liens bilatéraux ont été établis toujours avec le *Deutsches Museum*, le Musée des sciences et des techniques de Milan - Léonard de Vinci - et le *Science Museum*, mais aussi le *National Museum of Scotland*. Simultanément, la région wallonne de Belgique a construit un réseau qui s'appuie sur les universités de Mons, Liège, Namur et Louvain La Neuve et qui s'étend à la Grande Région (Lorraine, Sarre, Luxembourg, Wallonie).

Le dynamisme à l'échelle européenne et internationale se discerne également à travers la participation de nombreux partenaires régionaux à des manifestations hors hexagone. Ainsi plusieurs communications ont été proposées dans le réseau international professionnel des musées, l'ICOM et l'UMAC, ou encore dans le réseau européen des collections universitaires (Universeum), et pour les rencontres de la SIC (*Scientific Instrument Commission*). Ceci illustre à la fois l'implication des partenaires, mais aussi l'attention et l'intérêt portés aux travaux réalisés en région.

Après 20 ans d'existence, la mission nationale a pu s'ancrer en région à travers l'implication des partenaires et la titularisation de chargés de mission. La mise en place de projets communs a des vertus fédératrices, de nombreuses idées et intérêts ouvrent de nouvelles perspectives qui continueront d'évoluer avec des actions communes et interdisciplinaires.

RÉFÉRENCES

- (1) Ballé C, Cuenca C, Thoulouze D (dir.) (2010) *Patrimoine scientifique et technique. Un projet contemporain*. La Documentation Française, Paris.
- (2) Ballé C, Chambaud S, Cuenca C et al. (dir.) (2016) *Patrimoine contemporain des sciences et techniques*. La Documentation Française, Paris.
- (3) Rozay A-S, Cuenca C, Thomas Y et al. (2023) La mission de sauvegarde et de mise en valeur du patrimoine scientifique et technique contemporain (PATSTEC). *Histoire de la recherche contemporaine*, article en pré-publication.
<http://journals.openedition.org/hrc/8339>

NOTES

- (1) Lettre de mission de Claudie Haigneré, ministre déléguée à la Recherche, le 14 avril 2003, adressée à l'Administratrice générale du CNAM à Paris et à Daniel Thoulouze, alors directeur du musée des Arts et métiers.
- (2) Catalogue de l'exposition « Prototypes, De l'expérimentation à l'innovation », Paris, CNAM, 2020.
- (3) Prototypes | De l'expérimentation à l'innovation | L'exemple occitan - Musée du Saut du Tarn (musee-saut-du-tarn.com)
- (4) Les 20 ans de la mission nationale de sauvegarde et de mise en valeur du patrimoine scientifique et technique contemporain (PATSTEC) | Culture | Cnam
- (5) www.patstec.fr, sur la page d'accueil, voir l'onglet ESTHER

La recherche en temps d'épidémie, du SIDA au COVID, histoire de l'ANRS



Patrice Debré, Professeur émérite d'Immunologie à Sorbonne-Université et membre titulaire de l'Académie de médecine, est ancien chef du service d'Immunologie de l'hôpital Pitié-Salpêtrière, ancien directeur d'unités CNRS et Inserm et d'un Institut de recherche sur le cancer immunité et infection. Il a exercé des responsabilités administratives nationales à l'Inserm, CNRS, université Pierre et Marie Curie, Assistance publique hôpitaux de Paris (APHP), Établissement français du sang, ministère de la Recherche et de l'enseignement supérieur. Il a été ambassadeur chargé contre la lutte VIH Sida et les maladies transmissibles au ministère de l'Europe et des affaires étrangères, et a exercé de nombreuses responsabilités internationales dont la présidence du CIRAD et la représentation française à des organisations multilatérales internationales (Fonds mondial, EDCTP, UNITAID, Roll Back Malaria). Il est aujourd'hui conseiller à Aviesan et à la Direction des relations internationales de l'APHP. Il est membre du Comité d'éthique du CNRS et Président du Comité des relations internationales et de la Commission de biologie de l'Académie nationale de médecine.

40 ANS DE LUTTE CONTRE LE VIH

Le prologue des découvertes concernant l'infection par le VIH (virus de l'immunodéficience humaine) se joue en 1970 quand deux scientifiques américains, Howard Temin et David Baltimore, découvrirent l'existence d'une enzyme particulière, la transcriptase inverse, qui permettait à certains virus, appelés de ce fait rétrovirus, un fonctionnement à l'inverse de ce qui se passe dans une cellule normale : leur ARN est transformé en ADN, permettant leur intégration chromosomique. Un nouvel épisode concernant ces virus sera connu début 1981, quand un bulletin américain du Centre pour le contrôle des maladies (CDC), « *Morbidity and Mortality Weekly* », daté du 5 juin, rapportait une forme grave de pneumonies frappant de jeunes homosexuels à Los Angeles. Un mois plus tard, le même bulletin faisait état d'un nombre inhabituel de cas de Kaposi, un cancer de la peau chez les jeunes gays. L'épidémie démarrait et avec elle les premières recherches aboutissant à la découverte du virus VIH.

L'apparition des premiers cas français fut l'occasion de réflexions d'un groupe de jeunes cliniciens qui proposèrent à Françoise Barré Sinoussi qui travaillait alors dans le laboratoire de Luc Montagnier à l'Institut Pasteur, de tenter d'identifier un virus dont on supposait déjà qu'il puisse être un rétrovirus. La détection d'une transcriptase inverse dans la culture d'un ganglion prélevé chez un patient permit de conforter l'hypothèse et

de publier la première détection du VIH par Françoise Barré-Sinoussi et ses collègues, dans la revue *Science* de mai 1983 (Fig. 1).



Fig. 1 : Françoise Barré-Sinoussi avec Luc Montagnier (à droite) et Jean Claude Chermann (à gauche) lors de la découverte du virus. Source : www.radiofrance.fr

Cette découverte allait conduire à d'autres résultats. On comprit que le virus infectait les lymphocytes, particulièrement une sous population, les CD4, dont le rôle était majeur pour les défenses immunitaires. Ces lymphocytes avaient pris le nom de CD4 du fait de l'expression d'un récepteur indispensable au fonctionnement de ces cellules, qui dépassa le monde des immunologistes lorsqu'on sut qu'il était utilisé par le VIH pour faciliter sa pénétration. En même temps, les premières recherches allaient se porter sur l'étude et description des réponses immunitaires contre ce virus, ainsi que sur la création d'outils diagnostics. Il fallut attendre 1988, et de nom-

breux travaux sur la physiopathologie et structure du virus (Fig. 2), pour qu'ils s'inscrivent dans le cadre d'une politique publique scientifique concertée à l'échelle française avec la création de l'Agence nationale de recherche sur le Sida (ANRS). L'ANRS, comme l'ensemble de la recherche mondiale s'orienta rapidement vers différentes modalités de lutte, notamment pour la mise au point et les essais de médicaments contre le VIH, et ceux de vaccins (1).

LUTTER CONTRE LE VIH : LES ESSAIS THÉRAPEUTIQUES

À la fin des années 80, on estimait alors en France à 150 000 le nombre de séropositifs et la survenue annuelle de 5000 à 7000 cas de SIDA. L'épidémie bouleversait la société française. La lutte était limitée aux préservatifs. La seule molécule dont on pouvait disposer pour des études chez l'homme, était la zidovidine ou AZT qui inhibait *in vitro* la transcriptase inverse. Ce produit semblait prometteur, du moins d'après les premières données des études américaines sur les courbes d'évolution des lymphocytes. Ce médicament était un analogue de la thymidine, connu depuis 1964 pour ses potentialités anti-cancéreuses. Un brevet d'exploitation en 1984, et l'Agence fédérale américaine du médicament (FDA), en avaient permis l'utilisation clinique dès 1987. Mais les résultats chez les patients étaient loin d'être concluants. L'ANRS s'associa au *Medical Research Council* (MRC) pour un premier essai thérapeutique commun du nom de code « Concorde ». Il avait pour but d'apprécier l'efficacité précoce de l'AZT afin de retarder la progression de la maladie, prolonger la durée de vie, tout en testant la toxicité de la drogue. Les résultats publiés le 1^{er} avril 1993, furent « un coup dur pour les séropositifs et les médecins engagés dans la lutte contre le SIDA » comme le titraient les médias d'alors. Ils montraient en effet que l'AZT n'avait pas de bénéfice clinique assuré. Le traitement ne permettait pas d'apprécier l'efficacité de l'AZT lorsqu'il était prescrit à des patients asymptomatiques, même s'il entraînait une augmentation nette des CD4 et, par là même, une amélioration du système immunitaire. Une principale critique fut que l'AZT était utilisée sans autre traitement. Or les infectiologues ne prônaient pas la monothérapie, et depuis longtemps préféraient utiliser les drogues en association. L'idée vint alors vite de tenter diverses combinaisons thérapeutiques.

Alors qu'on disposait d'une antibiothérapie anti-bactérienne, ce qui fut utile contre les infections opportunistes favorisées par le déficit immunitaire, il était plus difficile d'envisager une chimiothérapie antivirale virucide avec un produit dénaturant les cycles du virus, parasite intracellulaire. L'AZT avait pour effet de tenter

d'agir contre le reverse transcriptase du virus et ainsi d'inhiber son intégration chromosomique. D'autres stratégies pouvaient être proposées pour contrer les autres étapes du cycle viral : attachement du virus à un récepteur cellulaire, pénétration dans la cellule, réplication du génome viral, assemblage des copies pour former de nouveau virus.

Au début des recherches, peu de médicaments étaient actifs sur les étapes d'attachement et de pénétration du virus, la plupart d'entre eux agissant sur sa réplication. Il fallait pour cela interférer principalement avec les enzymes nécessaires à la réplication des gènes viraux, ou avec celles utilisées lors des étapes finales de la multiplication pour permettre l'assemblage des protéines du virion et la formation des particules infectieuses. L'AZT avait ouvert la voie en ciblant la transcriptase inverse. On découvrit par la suite qu'il pouvait y avoir deux possibilités différentes d'inhiber cet enzyme et ainsi deux types de produits. Les premiers agissaient par action directe sur l'enzyme pour l'inactiver. Les seconds consistaient à présenter des leurres, molécules analogues à celles utilisées par le virus pour sa réplication, mais modifiées, les analogues nucléotidiques. Parce qu'ils intéressaient cependant une seule phase du cycle, l'efficacité de ces produits, même combinés, apparut vite insuffisante. Une révolution thérapeutique survint avec l'introduction des antiprotéases. S'attaquant à une autre étape de la production virale, les protéases sont des molécules actives contre les enzymes qui interviennent dans le clivage et l'assemblage des protéines virales nouvellement synthétisées, processus indispensables pour produire des virus infectieux. Inhiber ce mécanisme, c'est agir directement sur la réplication, empêcher la formation des nouveaux virus. Le rôle des protéases est bien différent de celui de la transcriptase inverse. Par là-même, anti-protéases et inhibiteurs de transcriptase inverses devinrent dès lors des médicaments complémentaires et potentiellement synergétiques ainsi que le montrèrent les essais suivants. Les premiers résultats des anti-protéases furent communiqués dans une atmosphère de grande controverse au cours du congrès international de San Francisco en juin 1990. Un essai après l'autre, en France ou ailleurs, l'effet des anti-protéases devaient se confirmer.

Mais au fur et à mesure, d'autres molécules apparurent sur le marché, testées successivement ou en association : des inhibiteurs d'entrée (2006), ceux du corécepteur du VIH, le CCR5, avec le Maraviroc (2009), les inhibiteurs d'une enzyme favorisant l'intégration du virus dans les chromosomes, l'intégrase (2006), ou encore de nouveaux inhibiteurs de protéases dont l'asso-

ciation de certaines combinaisons favorisait l'absorption et ralentissait l'élimination, un processus très efficace dit de boost (2007). Au fur et à mesure des essais on parvint à agir efficacement sur la réplication virale, à réduire les effets secondaires, à diminuer la fréquence des prises et le nombre de comprimés en combinant plusieurs activités ensemble, et surtout à inhiber la transmission materno-fœtale. Des progrès se poursuivent encore aujourd'hui à travers des traitements de longue durée et l'utilisation possible d'anticorps neutralisants. Si l'on examine leurs effets et leurs succès, portant un regard depuis les premiers essais, les traitements ont ainsi bouleversé le pronostic de la maladie. Correctement administrés, ils parviennent à contrôler le virus, si bien que la durée et le confort de vie des patients convenablement traités ne diffère pas des individus non infectés. L'administration des traitements doit cependant être poursuivie à vie. À leur arrêt, la réplication virale risque de réapparaître. Aucune stratégie thérapeutique ne permet l'éradication, s'agissant de virus intégrés à nos chromosomes.

PRÉVENIR L'INFECTION : LES VACCINS

À côté de l'usage des préservatifs, des traitements pris à titre préventif par un individu sain en risque d'éventuel contact infectieux, la PrEP, ont montré leur efficacité préventive. Mais ces résultats sont individuels et ne saurait remplacer le rôle des protections vaccinales. On comprend que de nombreux efforts furent mis dans un vaccin préventif. Les débuts firent croire à un succès rapide. Avec l'aide de la société Pasteur-Mérieux-Connaught, une série de tentatives semblaient pleine de promesse au début des années 90 : on disposait de protéines d'enveloppes virales (Fig. 2) provenant d'une souche VIH de laboratoire dont on pensait qu'elles entraîneraient la production d'anticorps qui reconnaîtrait l'équivalent à la surface des virus et, pensait-on, pourraient bloquer l'infection. Après quelques essais encourageants chez le chimpanzé, il fut administré à l'homme. La déception fut grande. Leur capacité à neutraliser le VIH apparut si limitée qu'il était impossible d'imaginer les utiliser si l'on voulait arriver à un vaccin universel qui puisse protéger contre les nombreuses espèces VIH dont on s'aperçut qu'elles étaient différentes selon qu'il s'agissait de sous types africains, européens ou nord-américains.

On en revint alors à des méthodes pastoriennes et à les expérimenter chez les macaques. Mais les virus atténués se révélèrent dangereux car susceptibles de pouvoir se réactiver, et les virus tués inefficaces. Il fallut réfléchir à d'autres modalités. Deux stratégies furent alors propo-

sées. Un temps compétitives, elles semblent aujourd'hui complémentaires.

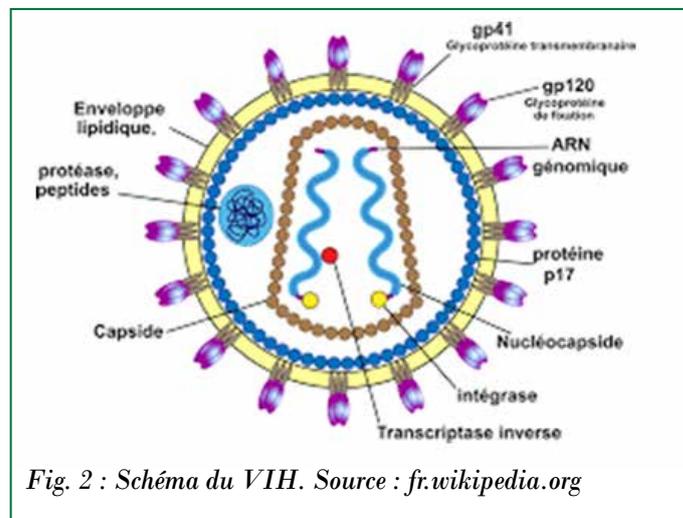


Fig. 2 : Schéma du VIH. Source : fr.wikipedia.org

La première consistait à stimuler, non plus la production d'anticorps, mais celle de cellules tueuses. Considérées comme le second bras de la réponse immunitaire, les cellules cytotoxiques sont dirigées contre les cellules infectées. Elles agissent ainsi directement contre le réservoir viral. Plusieurs méthodes furent alors employées notamment en utilisant des virus de la vaccine ou des adénovirus intégrant certains gènes du VIH. Leurs résultats furent très insuffisants et, au mieux, très transitoires.

La seconde stratégie revint à la réponse humorale, mais ciblant celle-ci de manière à neutraliser le virus. La production d'anticorps neutralisants, notamment à large spectre pour être actif contre les diverses souches virales, apparut vite extrêmement difficile à obtenir. Les nombreux essais réalisés jusqu'à ce jour sont restés en échec. Plusieurs éléments peuvent expliquer ceci. Contrairement à d'autres modèles infectieux, le VIH n'induit pas de protection et l'on ignore encore la nature et modalité des réponses immunitaires qui pourraient être efficaces pour le contrôler, et si même cela est possible. Mais il s'agit aussi de répondre par un vaccin à l'extraordinaire diversité de virus. Cette diversité est bien supérieure à celle générée lors d'une épidémie mondiale de la grippe qui nécessite, faut-il le rappeler, un nouveau vaccin tous les ans. Des vaccins mosaïques, comportant de multiples déterminants viraux sont actuellement à l'étude et offrent de nouveaux espoirs. L'histoire dira leur portée.

CONCLUSIONS

40 ans après la découverte du VIH, des succès considérables ont été obtenus sur le plan thérapeutique et le

dépistage, même si de grands progrès restent à faire pour que les populations infectées, notamment dans les pays à ressources moyennes et limitées, puissent y avoir accès. À faible coût, et par des prises raisonnables ainsi qu'avec l'utilisation future de traitements de longue durée, l'infection virale peut être bien contrôlée. Elle ne peut cependant être éradiquée et le traitement doit se poursuivre à vie. Par ailleurs malgré l'intérêt de traite-

ments préventifs à la demande, la PreP, la mise au point de vaccins, qui semble une des meilleures stratégies pour enrayer l'épidémie, est encore en échec.

RÉFÉRENCE

(1) Debré P (2021) *La recherche en temps d'épidémie*. Édition Odile Jacob, Paris. 320 pages.

Le patrimoine naturel français : centre d'expertise PatriNat

par Vivienne Gianinazzi-Pearson



Créée en 2017 au Muséum national d'Histoire naturelle pour rassembler les compétences sur la biodiversité et la gestion des connaissances sur la nature, PatriNat est un centre d'expertise et de données sur la Nature et plus spécifiquement sur le patrimoine naturel français (www.patrinat.fr). Elle assure des missions nationales d'expertise scientifique et de gestion des connaissances sur la biodiversité et la géodiversité en s'appuyant sur les connaissances, issues notamment de travaux de recherche, à la croisée des sciences de la vie, des sciences de l'informatique, des sciences de la Terre et des sciences humaines et sociales.

PatriNat est une Unité d'Appui à la Recherche composée de 150 scientifiques sous quatre tutelles : le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), l'Office français de la biodiversité (OFB), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et l'Institut pour la recherche et le développement (IRD). Elle est co-dirigée actuellement par Laurent Poncet (MNHN) et Julien Touroult (OFB).

Pour ses activités de centre d'expertise sur la biodiversité, PatriNat s'appuie sur la collecte, la gestion et l'analyse de données sur différents compartiments de la nature : les espèces, les milieux naturels, le patrimoine géologique. Elle apporte une expertise technique et scientifique aux services de l'État, aux collectivités ter-

ritoriales et aux établissements publics chargés de la biodiversité et des espaces naturels, ainsi qu'une expertise scientifique auprès des acteurs socio-économiques.

En tant que centre de données sur la nature, PatriNat coordonne des programmes nationaux d'acquisition de données pour disposer de cartographies des écosystèmes, surveiller la biodiversité terrestre et marine, inventorier les zones clefs de biodiversité, et recenser les aires protégées. Elle contribue par son expertise à la production d'indicateurs, à l'élaboration de listes rouges d'espèces et d'écosystèmes menacés, à l'élaboration d'outils de diagnostic de la biodiversité pour les territoires, Elle fédère aussi les citoyens autour des enjeux de la biodiversité et de la géodiversité à travers des programmes de sciences participatives tels que l'Inventaire National du Patrimoine Naturel et Vigie-Nature.

Au niveau européen, l'UMS PatriNat joue un rôle important en assurant l'Autorité scientifique française au sein du Groupe d'examen scientifique CITES¹ de l'UE, par le biais d'une cellule CITES qui participe aussi aux commissions et conférences internationales organisées par la CITES.

NOTES

(1) Convention sur le commerce international des espèces de faune et flore sauvages menacées d'extinction signée par 182 États.

Apologie de la discrétion. Comment faire partie du monde ? Lionel Naccache, 2022. Éditions Odile Jacob, 323 pages.



Lionel Naccache, neurologue et chercheur en neurosciences, se penche sur l'énigme de la relation entre l'individu et le reste du monde. Il propose une éthique pour l'aborder, avec en fil conducteur, les notions de discrétion et de continuité. La discrétion est considérée d'un point de vue mathématique :

dans l'ensemble discret des nombres entiers naturels chaque élément demeure séparé des autres, alors que dans l'ensemble continu des nombres réels il existe une infinité de nombres entre deux éléments. Il émet l'hypothèse scientifique d'une conscience discrète et non continue, hypothèse qu'il confronte aux concepts de savants et chercheurs, à diverses disciplines et champs de pensée (philosophie, mathématiques, biologie, littérature, politique, religion, questions sociétales), avec méthode, érudition et autodérision. La configuration même de son ouvrage permet une lecture plus ou moins continue, par l'emploi de chapitres, propositions, scolies et exercices numérotés.

L'auteur s'appuie sur le couple fondateur de la philosophie moderne, Descartes et Spinoza, pour illustrer ces deux approches de discrétion et de continuité. Pour Descartes l'exercice de cogitation est l'expression du moi singulier, alors que pour Spinoza il y a humilité à s'extraire de soi. Il fait également appel aux recherches en neurosciences pour démentir notre intuition d'une perception continue du monde. Bien que semblant continue à la manière d'un film, elle est un échantillonnage de fragments séparés, telles les images du film. Il se penche sur la continuité synaptique des neurones, individualisés de manière discrète, contredisant notre impression de continuité subjective. Concernant la psyché, il attribue le principe de discrétion à Freud, et à Jung celui de la continuité avec son concept d'inconscient collectif.

La fiction d'un univers continu est ensuite débusquée en faisant appel à Zénon d'Élée et Euclide ainsi qu'à Einstein, et aux mathématiciens Minkowski et Poincaré et leur espace-temps. L'expérience de pensée du chat de Schrödinger n'est pas oubliée. Pour une vision politique, Karl Marx vient à la rescousse avec sa thèse de philosophie dans laquelle il met au jour deux philosophies atomistes représentées par Épicure avec son principe de liberté hasardeuse et par Démocrite avec son principe de nécessité. Marx qui fait une analogie entre le statut de l'atome, déterminé ou libre, et celui de l'individu conscient, se place du côté d'Épicure, à l'encontre de

Jean Jaurès qui défend un socialisme océanique, inspiré du panthéisme de Spinoza. Après analogies entre atomismes philosophiques, physiques et mentaux, l'auteur suggère un atomisme sans vide dont l'homme pourrait se saisir pour appréhender le monde avec discrétion et simulation d'une continuité, au nom du principe de responsabilité et d'empathie envers autrui et de la préoccupation d'un ensemble dont nous faisons partie, évitant ainsi d'une part un égoïsme auquel conduit une discrétion radicale et d'autre part un panpsychisme avec un abandon de soi au profit du « grand tout » de l'univers, illusion d'une continuité radicale. Chaque moment conscient discret vécu engage alors nécessairement notre responsabilité subjective.

Comment aborde-t-on le passé ? Les autobiographies de Pagnol qui reconstruit ses souvenirs en continuité avec celui qu'il croit avoir été sont opposées aux récits de Proust et Perec qui ont conscience de la multiplicité des moi du narrateur. Au bout de ce cheminement Lionel Naccache préconise de faire partie du monde avec une *discrétion* éclairée, pour vivre au mieux relations aux autres, de soi à soi, de soi à la nature, revendications sociétales (wokisme, questions de genre, écologie...), accès au passé et à la mémoire.

Sylvie Adamo-Raffin

Madame de Néandertal, journal intime, Pascale Leroy et Marylène Patou-Mathis, 2014. NiL. éditions, Paris, 264 pages



Ce roman, que j'ai découvert récemment lors d'une visite de la grotte Cosquer, Villa Méditerranée, Marseille, nous fait entrer par l'intermédiaire d'une conteuse imaginaire et drôle dans la vie quotidienne des Néandertaliens : leurs coutumes, leurs soucis, leurs croyances, et leurs premières rencontres avec un nouveau peuple, nos aïeux *Homo sapiens*. Marylène Patou-Mathis, spécialiste de Préhistoire, (DR CNRS au MNHN), a travaillé sur le comportement des Néandertaliens et co-signe ce livre. Ce conte présente avec fantaisie et rigueur scientifique une image inhabituelle de nos ancêtres (environ 2 % de notre génome est de Néandertal), considérés auparavant comme des êtres violents et socialement peu évolués. En nous faisant participer à la vie d'un petit groupe pendant quelque temps, les auteurs nous font découvrir une société plutôt paisible où hommes et femmes partageaient des tâches et des décisions quotidiennes, connaissaient les vertus curatives des plantes médicinales, respectaient la nature et enterraient leurs morts.

La confrontation inattendue du groupe de Néandertaliens avec des individus venus d'ailleurs, au comportement et au physique différents (qu'ils appellent Zigues, puis *Sapiens*), rappelle les difficiles rencontres d'hier et d'aujourd'hui entre civilisations - entre celles qui envahissent les terres ou continents étrangers, se considérant supérieures aux civilisations rencontrées et imposant leurs mœurs, et celles indigènes, curieuses et presque naïves qui pensent être seules au monde et subissent la domination. Une histoire qui fait passer un bon moment dans un autre monde lointain, dont les préoccupations ressemblent souvent aux nôtres mais dont beaucoup restent encore à élucider, amène aussi à réfléchir à l'histoire qui se répète entre civilisations depuis la nuit des temps.

Vivienne Gianinazzi-Pearson

La surface des choses, *Fabrice Bonardi*, 2023. Éditions L'Harmattan, 198 pages.



Un assassinat qui sort de l'ordinaire, si tant est qu'un assassinat soit une chose ordinaire. Entre Paris, la Corse, et le Berry, notre auteur qui parle à la première personne, narre ses aventures de célibataire forcé, ballotté au fil des rencontres plus ou moins hasardeuses. Son *alter ego*, l'ami Hubert sans qui rien ne se fait, psychanalyste de son métier, l'accompagne de ses conseils judicieux dans ses tribulations. Là-dessus, arrive de nulle part un chinois, qui n'ayant que le chinois et ses mimiques pour se faire comprendre, tape l'incruste dans l'improbable appartement qu'occupe notre narrateur un peu nimbus. D'où vient-il, quels sont ses projets ? C'est un mystère.

Enfilant les bons mots, les drôleries, et les situations cocasses, l'auteur nous emmène d'aventure en aventure jusqu'à la rencontre de la femme de sa vie. Eh oui, la vie de célibataire a une fin. La fin, l'ultime, je vous la laisse découvrir et vous ne regretterez pas votre lecture.

Véronique Machelon

Tout comprendre (ou presque) sur la biodiversité, *Philippe Grandcolas et Claire Marc*, 2023. CNRS Éditions, 140 pages.

Après l'Insu, l'Inee ! CNRS Éditions donne à nouveau la parole aux instituts du CNRS avec ce petit livre de grande vulgarisation scientifique, qui prend la suite de « Tout comprendre (ou presque) sur le climat » (*rapporté dans notre précédent A3 Magazine 80*).



Philippe Grandcolas, directeur de recherche au CNRS et directeur adjoint scientifique de l'Institut écologie et environnement (Inee) du CNRS, est spécialiste de l'évolution des insectes dans les écosystèmes tropicaux. Homme de terrain et responsable du laboratoire mixte ISYEB, il s'est entouré de 23 coauteurs scientifiques. Comme pour le climat, la brillante préface vient de la paléoclimatologue Valérie Masson-Delmotte (CEA Paris-Saclay). Celle-ci revendique deux atouts majeurs permettant encore l'optimisme : notre capacité d'empathie pour la diversité du vivant et la puissance de la biodiversité. De nouveau, Claire Marc, médiatrice scientifique et « facilitatrice graphique », présente et illustre avec pédagogie et humour des concepts savants, statistiques ou politiques. Les sujets biodiversité et climat sont voisins, mais la connaissance du public n'est pas au même niveau. Pour le réchauffement, les rapports du GIEC sont bien diffusés auprès du grand public. L'équivalent pour la biodiversité, la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) est encore peu médiatisée.

L'ouvrage est organisé en 20 « questions » allant des définitions élémentaires (la biodiversité ; un écosystème ; la nature vierge, etc.) à la présentation des problèmes majeurs (la sixième crise d'extinction massive ; la pollution ; les risques, etc.) ainsi qu'aux perspectives essentielles (nourrir le monde ; les services écosystémiques ; une biodiversité durable, etc.). Chaque chapitre est lui-même très structuré : les définitions, l'état des lieux, les options possibles et surtout le synthétique « mot de la fin ».

Par exemple, la question 10 (qu'est-ce qui fait disparaître une espèce ?) constate que l'activité humaine peut déséquilibrer le rapport morts/naissances de certaines espèces. Ensuite sont analysées cinq grandes causes de perte de biodiversité : la destruction des habitats, la surexploitation, les invasions biologiques, la pollution et... le changement climatique. Le mot de la fin est sans appel : la synergie de ces causes augmente les pressions subies par les espèces. En annexe, les remerciements citent par chapitre les 23 contributeurs scientifiques et une liste de références indique 3 à 5 publications majeures par chapitre. Le livre est passionnant et efficace et on ne peut que le recommander vivement comme support de cours ou de boîte à outils lors de la Fête de la science, vis-à-vis d'un public ouvert au savoir.

Paul Gille

Comment les scientifiques savent... ? *Ouvrage collectif, 2023. CNRS Éditions, 72 pages.*



Après le climat et la biodiversité, voici dans l'actualité un troisième petit volume de plaidoyer pour la démarche scientifique. Toujours « mis en scène » par Anne Brès, responsable de la communication de l'Institut national des sciences de l'univers (CNRS-Insu) et « mis en images » par Claire Marc, il présente quelques originalités. Contrairement à son titre très généraliste, l'ouvrage concerne exclusivement les disciplines de la terre et de l'univers, d'où un avant-propos de Nicolas Arnaud, directeur de l'Insu, rappelant sa mission « d'observer, mesurer et modéliser » les galaxies, les trous noirs, les planètes, etc. afin « d'éclairer le monde ». On imagine une déclinaison du même questionnement pour les autres instituts du CNRS.

Dix sujets sont traités dans une même approche. Comment les scientifiques savent... : Que l'Univers est en expansion ? Que les trous noirs existent ? Que la matière sombre existe ? Quel est l'âge du Soleil ? Que nous sommes poussières d'étoiles ? Que les continents dérivent ? Quel est l'âge de la Terre ? Dater les roches et les fossiles ? Ce qui est à l'intérieur de la Terre ? Quelle est l'origine des séismes ?

Cependant chaque question a sa logique propre et balaye toutes les étapes historiques, ainsi que les débats scientifiques ou politiques qui l'ont fait progresser. Par exemple, pour comprendre « quel âge a la terre ? » il est fait référence à Buffon, Charles et Georges Darwin, Fourier, Kelvin, Joly, Röntgen, Becquerel, Marie Curie, Holmes, Wegener, Patterson... pour arriver à la réponse : 4,55 milliards d'années !

Le livre, curieusement, n'a pas d'auteur principal, mais réunit six hauts spécialistes de labos français : Éric Lagadec, Maëlis Arnould, Alexandre Schubnel, Abder El Albani, Nicolas Coltice et Kristel Chanard. Ils

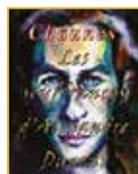
rendent hommage à la démarche scientifique des grands astronomes, géophysiciens ou géologues, de notoriété inégale (tels Harlow Sharpley, Heber Curtis, Vesto Slipher, Fred Hoyle). Un accent particulier est mis sur les femmes scientifiques remarquables, quoique quasi ignorées du public (Henrietta Swan Leavitt, Marie Tharp) ou plus connues sous leur nom d'épouse (Caroline Herschel, Margaret Burbidge).

Toujours agréablement et efficacement illustrés, les chapitres très denses sont de véritables cours magistraux, mais ne se prêtent pas directement à une réutilisation éducative. Cependant le site de l'Insu <https://www.insu.cnrs.fr/fr/demarche-scientifique> complète heureusement cette lacune par des planches, des kakemonos ou des livrets à télécharger et imprimer pour chaque sujet. Ces documents développent bien l'argumentaire (comment la science se construit) et s'adressent à tous.

Si nous ne percevons que 5 % de la masse de l'univers, il reste de quoi attirer de nombreux jeunes scientifiques, futurs savants, s'ils suivent ce « discours de la méthode » théorique et expérimentale...

Paul Gille

Les souffrances d'Alexandre Dupont, *Chaunes, 2023. Aux poètes français, 231 pages.*



Vous avez besoin de passer un bon moment, alors un conseil : ouvrez ce livre et ne le quittez qu'à la dernière page. Pleine d'humour et d'inattendu, cette tendre et drôle méditation autour de l'importance du patronyme dans la vie d'un homme, écrite d'une plume alerte et légère, nous emmène dans une succession d'aventures inattendues et drôles. S'en détache néanmoins une morale : « Bien mal acquis ne profite jamais ». Et tout revient dans l'ordre des choses.

Véronique Machelon

LIRE À VOIX HAUTE

Une de mes premières fonctions au CNRS, il y a bien longtemps, consistait à lire des articles scientifiques, à en faire des résumés et extraire des mots-clés. Lectures, mots, compréhension, médiation y sont toujours et pourtant cela n'a plus rien à voir avec ma pratique actuelle de la lecture à voix haute depuis plusieurs années au sein d'une association. J'ai d'abord aimé éprouver les émotions à l'écoute d'un texte lu par un lecteur ou une lectrice publique : cette attention soutenue, cette concentration extrême, cette impression de temps ralenti où chaque mot d'un auteur a sa place, sa musicalité et dont les combinaisons donnent un sens et ouvrent une voie vers l'envie d'aller plus loin dans la découverte de l'œuvre. Pour passer du plaisir de lire à l'art de dire, j'ai sauté le pas et faisant fi de ma timidité, c'est ainsi que j'ai rejoint « La Compagnie d'Encre et de Voix » créée en 2010 par Diane de Montlivault.

La lecture à voix haute est une expérience enrichissante qui permet de découvrir ses capacités corporelles et vocales, d'élaborer son intériorité et de s'ouvrir sur le monde extérieur grâce au monde des livres. Comme toute activité artistique, l'art de dire nécessite l'apprentissage de la technique au travers d'ateliers souvent ludiques, d'une préparation physique et mentale qui vont de la relaxation à la respiration en passant par des exercices d'improvisation, à la recherche du timbre de la voix. Pour plus d'aisance et de fluidité, il faut aussi se confronter aux défis de la prononciation (qui ne s'est pas un jour essayé à « ton thé t'a-t-il ôté ta toux »...ou aux « chaussettes de l'archiduchesse »...), des liaisons. L'accompagnement bienveillant d'une lectrice publique et formatrice en lecture à



Photo de membres de la Compagnie d'Encre et de Voix prise lors d'une prestation. (photo personnelle de Michele Outters).

voix haute nous est indispensable pour progresser et mettre en voix un texte. La lecture peut être individuelle ou, comme je le préfère, une expression à plusieurs voix.

Le plus souvent à l'invitation de médiathèques, avec passion, nous avons prêté nos voix pour la lecture de *Soie* d'Alessandro Baricco, à une adaptation d'une nouvelle de René Frégny, *Vierge noire*, en la présence de l'auteur et avec un soutien musical d'Oscar et la *Dame rose* d'Éric-Emmanuel Schmitt.

Cette année notre choix s'est porté sur les échanges épistolaires d'Albert Camus. S'ensuit un long et riche travail, tant individuel que collectif, de sélection de textes. Une lecture à plusieurs voix a permis de faire découvrir ou redécouvrir l'enchantement des mots que forme la correspondance du prix Nobel de littérature 1957. Faire écouter toute l'affection et la reconnaissance d'Albert Camus envers son instituteur, Louis Germain, devant lequel malgré la notoriété il demeurera toujours un petit garçon. Et puis les lettres enflammées de Camus à Maria Casarès dont la liaison est restée secrète jusqu'à la parution de la correspondance par Catherine, la fille d'Albert Camus. Quant aux échanges entre Camus et le poète René Char, nous avons choisi des lettres qui témoignent d'une véritable amitié, d'une fraternité profonde entre deux êtres à la fois engagés mais épris de liberté, jamais résignés.

Lire à voix haute impose de longues séances de préparation dans lesquelles le corps et l'esprit sont engagés à chaque instant, c'est entendre sa voix, celle de ses compagnes et compagnons, dire les mots d'un auteur, sans théâtralisation, sans artifice superflu, c'est déposer le texte dans un espace à la rencontre d'un public. Certains utilisent les compétences acquises pour en faire profiter des enfants mais aussi des détenus dans une maison d'arrêt ou mettent en voix des livres pour des personnes malvoyantes.

Dans le cadre du festival « Lignes de Crêtes » à Laye, petit village de montagne, nous finirons l'année avec la lecture de *Neige* de Maxence Ferminé. Découverte et plaisir sont chaque fois différents.

Le succès remporté par le concours national de lecture « Si on lisait à voix haute » initié par François Busnel (La Grande Librairie) en partenariat avec France Télévisions, fruit d'une année de travail entre des élèves et des enseignants de la sixième à la terminale, a contribué à mieux faire connaître cette discipline artistique. Elle permet de s'épanouir en amélio-

rant son expression orale, de prendre confiance en soi pour parler en public, de découvrir la richesse des mots, le sens de la langue, la musique des sons et le plaisir de partager.

Alors pour tous ceux qui aiment lire, écouter, ressentir, s'exprimer, rêver, voyager grâce aux mots...

Michèle Outters-Lafaye

LA NOUVELLE GEORGE SAND



La Nouvelle George Sand, dont Anny Duperey est marraine de l'édition 2023, a reçu 454 nouvelles pour sa 19^e édition (www.concours-georgesand.fr). Les textes s'inscrivent souvent dans la quête d'une liberté salvatrice, s'en allant fouler des rivages interdits, plonger tour à tour aux sources de l'enfance ou du cauchemar, là où les souvenirs et les larmes ont creusé d'invisibles rivières. Qu'elle accompagne un retour vers les terres d'une enfance foudroyée par un ineffable chagrin, l'éclosion d'une liberté trop longtemps cadenassée, ou la renaissance d'une jeune fille éperdue d'angoisse, la nature est souveraine en ces pages, les irriguant de ses eaux bienfaisantes. La houle des regrets, l'appel irrésistible d'un lieu jadis aimé, le clapotis entêtant du passé, libèrent une écriture torrentielle dont la vertu consolatoire n'a jamais trouvé plus belle expression.

C'est avec la parution aux éditions l'Harmattan d'un florilège de retours aux sources puisé dans le vivier de talents des candidates que le rideau tombe sur cette édition. Mais si un rideau tombe, c'est en même temps un voile qui se lève sur ces pages, et sur toutes celles qu'il reste à écrire...

Le palmarès 2023

Le grand prix de la Nouvelle George Sand

Comme un boomerang, Catherine Prouzet, d'Aix-en-Provence

Prix Nouvelle d'ailleurs : Prends soin d'elle d'Hélène Magisson, de Tarragindi -Australie

Prix Jeune Sand : La chaleur des choses. Camille Ravey, de Mulhouse

Nouvelles distinguées pour publication

(par ordre alphabétique) :

- Accords perdus, de Camille Boyer, de Pruillé-l'Eguillé
- Ballade pour un sourcier, de Pascale Corde Fayolle, de Montrond
- Blanc, de Marie-Gabrielle Maistre, de La Ravoire
- Fiat lux, de Christine Chaumartin, de Saint-Pierre Bénouville
- La fiancée du grille-pain (Jeune Sand), de Méline Bonnacarrère-Dumas, d'Exideuil-sur-Vienne
- Les étoiles d' Atacama, d'Elodie Maury, de Lalizolle
- L'enlèvement, de Clotilde Ravel, de Lyon
- Le tapis intérieur (Nouvelle d'ailleurs), d'Assia Ben Otmane, de Tanger -Maroc
- Un rire sous la cascade, de Roselette Lemarchand, de Saint-Cannat

Coup de coeur de l'éditeur : Le trou, de Fanny Mancini, de Marseille.

Nadine Théveny et Fabrice Bonardi

QUE PEUVENT-NOUS RÉVÉLER LES CARBONISATS DES GROTTES PALÉOLITHIQUES ?

Les carbonisats sont les résidus solides du processus de carbonisation. Les plus connus sont les charbons de bois mais les suies et les charbons d'origine animale (os, viande et gras carbonisés) en font aussi partie. Des méthodes de spectrométrie Raman récemment développées permettent d'identifier l'origine animale ou végétale

méthode qui prend en compte les modifications des spectres Raman par l'altération oxydante, permettant de continuer à faire la distinction entre carbonisats d'origines animale et végétale (1). À titre d'exemple, nous avons appliqué cette méthode à des résidus de foyers préhistoriques de la grotte de Bruniquel, vieux de 176 500 ans (2), dont les morphologies ne permettaient pas d'identifier l'origine des précurseurs. Ces foyers sont situés dans la plus ancienne construction humaine

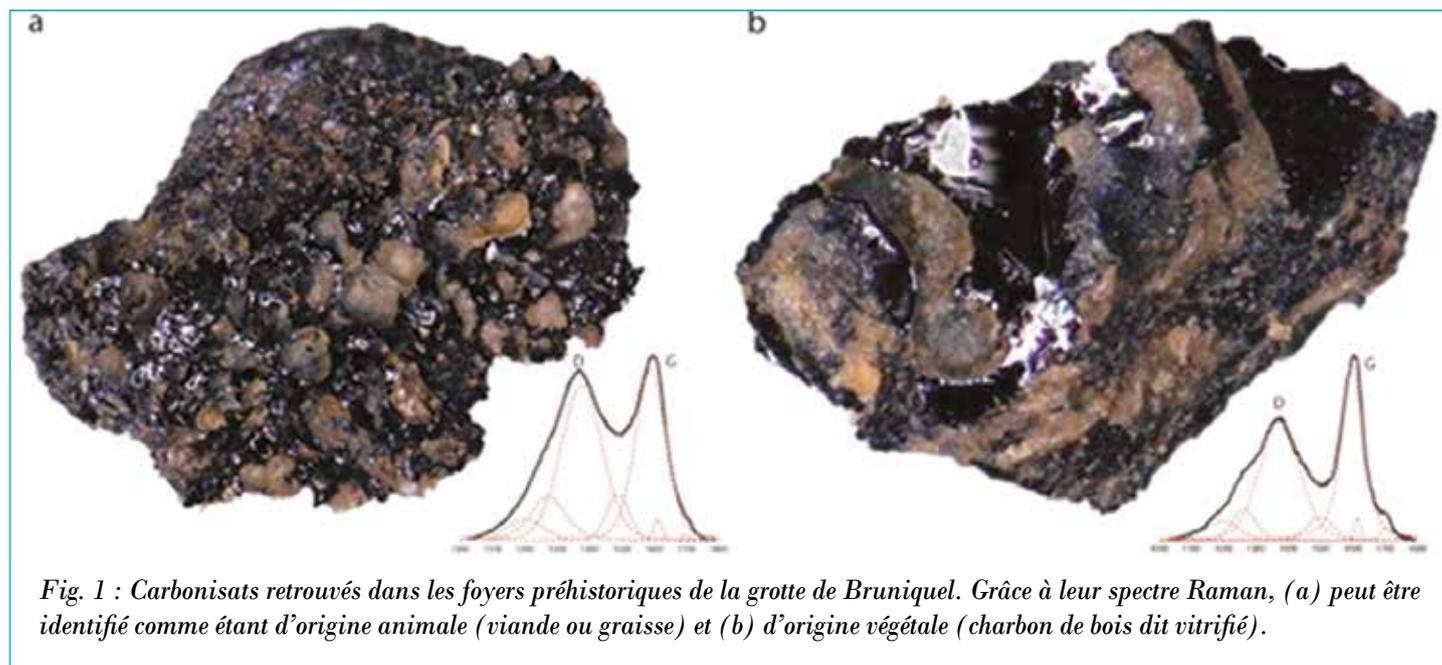


Fig. 1 : Carbonisats retrouvés dans les foyers préhistoriques de la grotte de Bruniquel. Grâce à leur spectre Raman, (a) peut être identifié comme étant d'origine animale (viande ou graisse) et (b) d'origine végétale (charbon de bois dit vitrifié).

tale d'un carbonisat et de retrouver sa température de formation. Ce sont des informations précieuses en archéologie, quand il s'agit d'identifier des résidus de foyer préhistoriques dépourvus de morphologies caractéristiques, ou pour remonter à la température de phénomènes ayant produit des charbons de bois, comme l'exemple de l'incendie de Notre-Dame de Paris (voir A3 Magazine, n°76, pages 56-58).

Cependant, ces méthodes ne prenaient pas en compte l'altération des carbonisats au cours du temps, notamment sous l'action de l'oxygène. En effet, nous montrons qu'après avoir passé plusieurs millénaires dans les grottes ou dans les sédiments, les carbonisats sont systématiquement oxydés et que leurs spectres Raman sont modifiés. En conséquence, les méthodes de thermométrie et de détermination de l'origine des précurseurs ne sont plus applicables directement.

Nous avons récemment montré qu'il était possible d'outrepasser cette limite. Nous avons élaboré une nouvelle

connue à ce jour. L'Homme de Néandertal y a édifié des structures circulaires formées de soigneux arrangements de tronçons stalagmites et stalactites. Nous avons ainsi pu discriminer des carbonisats issus de végétaux de ceux d'origine animale (Fig. 1) et montrer l'utilisation d'os comme combustibles dans la grotte de Bruniquel (1).

RÉFÉRENCES

- (1) Deldicque D et al. (2023) Effects of oxidative weathering on Raman spectra of charcoal and bone chars: consequence in archaeology and paleothermometry. *CR Géoscience* 355, 1-22.
- (2) Jaubert et al. (2016) Early Neanderthal constructions deep in Bruniquel Cave in southwestern France. *Nature* 534, 111-114.

Damien Deldicque et Jean-Noël Rouzaud,
Laboratoire de géologie de l'ENS

CLAUDE LORIUS, PORTRAIT D'UN GLACIOLOGUE FRANÇAIS

Le glaciologue Claude Lorius, qui a effectué toute sa carrière de chercheur au CNRS, s'est éteint le 21 mars dernier à l'âge de 91 ans. Il a notamment été l'un des premiers à avoir démontré le rôle du CO₂ dans le réchauffement climatique et a participé à la reconstitution des climats du passé grâce à des études menées en Antarctique.

Jeune diplômé de l'université de Besançon, Claude Lorius répond en 1955 à une petite annonce : on recherche jeunes chercheurs pour participer aux campagnes organisées pour l'Année géophysique internationale (AGI). Et en juillet 1957 le voici avec deux collègues français « enterré volontaire » pour une année entière à la station Charcot. Cette année marque le début d'une carrière exceptionnelle au cours de laquelle il partira 22 fois en expédition, totalisant 6 ans de campagnes sur le terrain. Mais c'est surtout, pour notre pays, le point de départ du développement d'une discipline, la glaciologie polaire. Claude Lorius en sera le pionnier et le grand artisan.

En 1963, il soutient sa thèse dans laquelle il explore le lien existant entre la composition isotopique des précipitations (isotopes lourds de l'hydrogène et de l'oxygène) et leur température de formation. Il développe la notion de « thermomètre isotopique » sur laquelle s'appuiera la reconstruction des variations passées de notre climat à partir de forages profonds qui vont donner accès à des glaces de plus en plus anciennes. En 1965, il dirige l'hivernage à la base côtière Dumont d'Urville en terre Adélie. De cette campagne date l'anecdote du glaçon et du verre de whisky : « en regardant dans mon verre éclater les bulles d'air libérées de leur pression, j'ai la brusque intuition que la glace pourrait contenir les archives de l'atmosphère ».

A la fin des années 60, le CNRS décide de regrouper son laboratoire parisien avec celui créé à Grenoble par Louis Liboutry. L'objectif est de réaliser un forage profond au site du Dôme C, en plein cœur du continent Antarctique. Le soutien logistique est assuré par les avions C130 de la *National Science Foundation*, dont deux d'entre eux sont accidentés en 1975. Malgré ces déboires, trois ans plus tard, une profondeur légèrement supérieure à 900 mètres est atteinte et ce sont plus de 40 000 ans d'archives d'excellente qualité qu'offre ce premier forage du Dôme C.

Grâce à des contacts personnels et des amitiés nouées durant l'AGI, Claude Lorius initie une collaboration

avec les équipes soviétiques qui forent à Vostok le point le plus froid de l'Antarctique. En 1984 - en pleine guerre froide - Lorius et deux collègues y échantillonnent plus

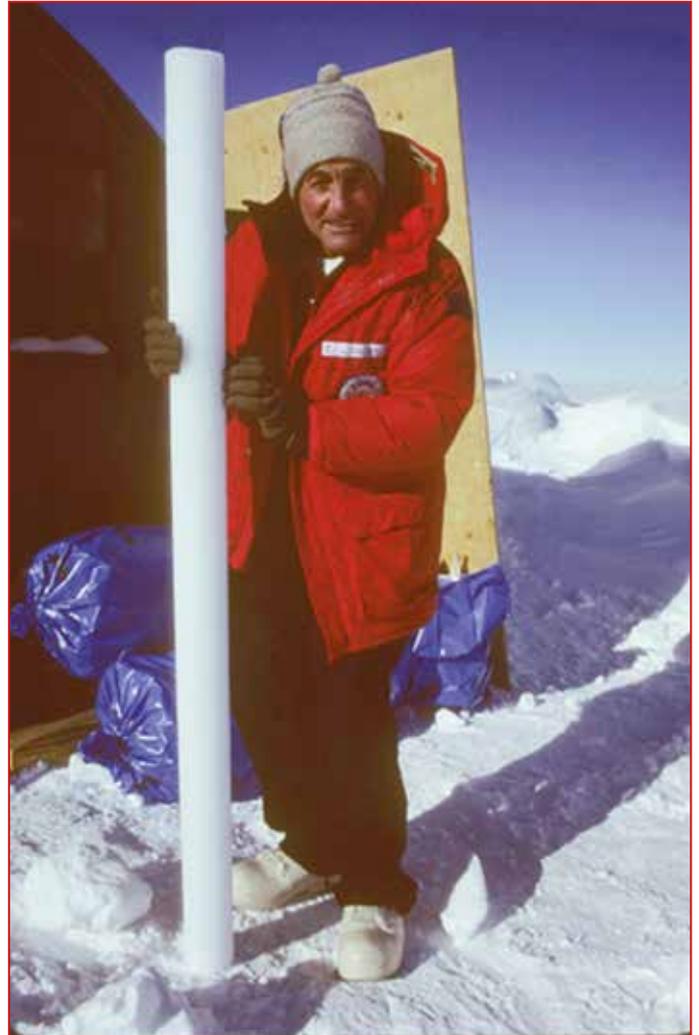


Fig. 1 : Claude Lorius au Pôle Sud en 1984.
© Jean-Robert Petit, CNRS.

de deux kilomètres de carottes (Fig. 1) Celles-ci couvrent 150 000 ans soit un cycle climatique complet (Fig. 2). Leur analyse isotopique conduite à Saclay confirme la théorie astronomique en mettant en évidence un lien avec les variations d'insolation liées à celles de l'orbite terrestre.

Cette confirmation est importante mais les résultats les plus nouveaux, les plus marquants, viennent de l'analyse des bulles d'air réalisée par les équipes mises en place à Grenoble par Claude Lorius. Sur l'ensemble du carottage, concentrations en CO₂ et en CH₄ sont, en général, fidèlement corrélées avec variations climatiques ; plus il fait froid plus leurs concentrations dans l'atmosphère sont faibles et inversement (Fig. 2).

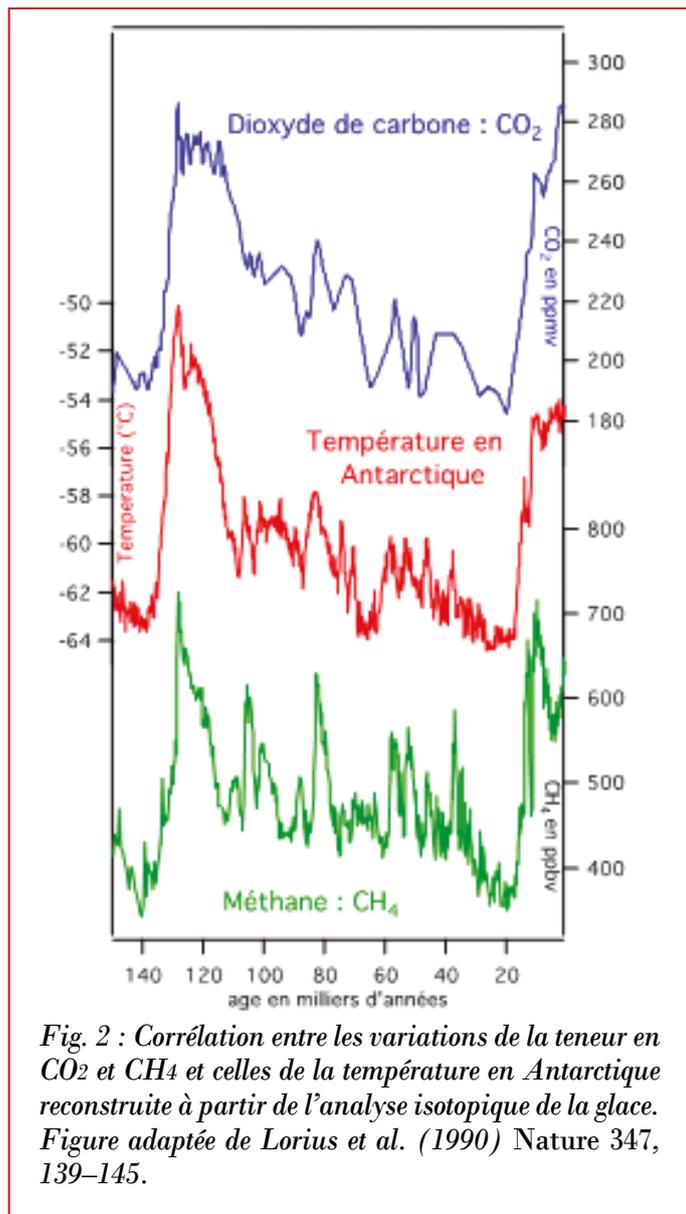


Fig. 2 : Corrélation entre les variations de la teneur en CO₂ et CH₄ et celles de la température en Antarctique reconstruite à partir de l'analyse isotopique de la glace. Figure adaptée de Lorius et al. (1990) Nature 347, 139–145.

Trois articles, mettant en avant l'idée – désormais très largement acceptée - d'un climat dont les paramètres astronomiques seraient le métronome et où les gaz à effet de serre joueraient le rôle d'amplificateur vis à vis des changements d'insolation, sont publiés dans la revue Nature le 1^{er} octobre 1987. Ces résultats font le tour du monde, y compris dans les sphères politiques et Claude Lorius en est l'ambassadeur. Une douzaine d'années

plus tard, le forage de Vostok couvre 420 000 ans ; cette découverte est pleinement confirmée sur une période caractérisée par la succession de 4 cycles glaciaires interglaciaires très marqués. Cette extension des enregistrements met aussi en perspective le rôle des activités humaines. Jamais sur cette période les quantités de CO₂ et de CH₄ n'ont été aussi élevées qu'aujourd'hui.

Claude Lorius poursuit un objectif précis en Antarctique : atteindre le socle rocheux au Dôme C, site à priori plus favorable que ne l'est celui de Vostok. La proposition *European project for ice coring in Antarctica* (EPICA) établie sous l'égide de l'*European Science Foundation* doit beaucoup à l'engagement et à l'aura de Claude Lorius. Le socle rocheux est atteint à 3260 m en janvier 2005. C'est une énorme satisfaction. Ce carottage va au-delà de 800 000 ans et permet de doubler la mise par rapport à Vostok. Ce succès doit beaucoup à la conviction de Claude Lorius qui mettait systématiquement en avant le Dôme C comme le site idéal pour remonter loin dans le temps.

Claude Lorius avait une véritable vision de ce que les glaces polaires sont susceptibles d'apporter à la connaissance de notre climat et de notre environnement. C'était un véritable leader, exigeant, et dont l'indéniable charisme a permis qu'il entraîne dans son sillage toute une génération de chercheurs qui a donné à notre pays une place de tout premier plan dans ce domaine dédié à l'étude des glaces polaires. Membre de l'Académie des sciences, Claude Lorius a reçu la médaille d'Or du CNRS en 2002. Au niveau international, il avait une stature très largement reconnue avec de nombreuses distinctions prestigieuses dont les prix Tyler, Balzan, Bower et Blue Planet. En 2021, il avait été fait grand officier dans l'Ordre national de la Légion d'honneur, une juste reconnaissance de la nation envers une œuvre scientifique hors du commun.

Jean Jouzel, CEA Saclay ;
 Jérôme Chappellaz, CNRS et EPFL, Sion ;
 Jean-Robert Petit
 et Dominique Raynaud, IGE, Grenoble

L'Association des Anciens et des Amis du CNRS (A3)

Fondée en 1990 par les regrettés Pierre Bauchet, Jean-Baptiste Donnet, Claude Fréjacques, Charles Gabriel et Pierre Jacquinot

Présidente : Elisabeth Giacobino

Vice-présidente : Liliane Gorrichon

Vice-président adjoint : Jean-Claude Lehmann

Secrétaire général : Gilles Sentise

Trésorière : Anne Jouve

Vérificateur aux comptes : Jean-Pierre Schwaab

Conseil d'administration

Membre de droit : Antoine Petit, Président-directeur général du CNRS

Membres élus : Françoise Balestié • Fabrice Bonardi • Mireille Bruschi • Daniel Charnay • Gérard Coutin • Laurent Degos • Alain Foucault

• Elisabeth Giacobino • Vivienne Gianinazzi-Pearson • Liliane Gomet • Liliane Gorrichon • Dominique Grouselle • Évelyne Jautrou

• Anne Jouve • Hélène Kérec • Jean-Claude Lehmann • Denis Linglin • Véronique Machelon • Michel Mortier • Jean-Pierre Régnauld

• Patrick Saubost • Gilles Sentise • Dominique Simon • Abderrhamane Tadjeddine.

Invités : Jean-Pierre Schwaab - Vérificateur aux comptes

Bureau

Elisabeth Giacobino, Liliane Gorrichon, , Jean-Claude Lehmann, Gilles Sentise, Anne Jouve

Chargé(e)s d'activités

Administratrice de la base de données : Anne Jouve

Communication : Dominique Simon

Informatique : Daniel Charnay

Voyages : Annick Périllat

Relations avec l'industrie : N...

A3 Magazine : Véronique Machelon et Vivienne Gianinazzi-Pearson

Représentants régionaux

• Alpes Dauphiné : Christiane Bourguignon • Alsace : Jean-Pierre Schwaab et Jean-Yves Hangouët • Aquitaine : André Calas

• Bretagne et Pays de la Loire : André Perrin • Centre-Est : N..... • Centre - Poitiers : Serge Sapin

• Centre-Val de Loire : Paul Gille et Jean-Pierre Regnauld • Hauts de France : N.... • Ile de France : Dominique Grouselle, Dominique Ballutaud

• Limousin - Auvergne : Gérard Montarou • Normandie : Laurent Beauvais • Occitanie Est : Serge Rambal • Occitanie Ouest : Yvan Segui

• Provence-Côte d'Azur-Corse : Mireille Bruschi • Rhône : Bernard Ille et Liliane Gomet.

Membres d'honneur

• Alain Aspect (médaille d'Or CNRS, prix Nobel) • Guy Aubert • Geneviève Berger • Catherine Bréchnignac • Edouard Brézin

• Claude Cohen-Tannoudji (médaille d'Or CNRS, prix Nobel) • Jacques Ducaing • Cléopâtre El Guindy • Serge Feneuille

• Albert Fert (médaille d'Or CNRS, prix Nobel) • Andrew Hamilton (Vice-chancelier de l'université d'Oxford) • Nicole Le Douarin (médaille d'Or CNRS)

• Jean-Marie Lehn (médaille d'Or CNRS, prix Nobel) • Henry de Lumley • Bernard Meunier • Arnold Migus • Pierre Papon • Jean-Jacques Payan

• Jean Tirole (médaille d'Or CNRS, prix Nobel).

Rayonnement du CNRS a également eu parmi ses membres d'honneur les grands scientifiques suivants, aujourd'hui disparus :

• Maurice Allais (médaille d'Or CNRS, prix Nobel) • Baruj Benacerraf (prix Nobel) • Robert Chabbal • Yves Coppens

• Christiane Desroche-Noblecourt (médaille d'Or CNRS) • Jacques Friedel (médaille d'Or CNRS) • François Jacob (prix Nobel)

• François Kourilsky • Edmond Lisle • Rudolph Mössbauer (prix Nobel) • Michel Petit • Norman Ramsey (prix Nobel) • Charles Townes (prix Nobel).

DERNIÈRES PARUTIONS

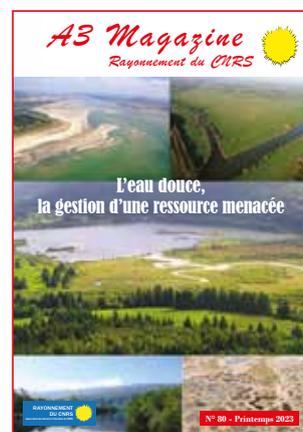
Magazine n° 79 - Printemps 2022

- « La science » dans l'Occident médiéval.
En quoi cela nous interpelle-t-il aujourd'hui ?



Magazine n° 80 - Printemps 2023

- « L'eau douce, la gestion d'une ressource menacée.



Portail BibCNRS

Les adhérent(e)s de notre association A3 bénéficient d'un accès au portail des ressources documentaires de BibCNRS, opéré par Inist, qui met à la disposition des unités et des chercheurs du CNRS des millions de ressources électroniques d'articles, de revues et d'ouvrages, ainsi que des bases de données. Multidisciplinaire. BibCNRS propose dix espaces thématiques correspondant à chacun des dix instituts scientifiques du CNRS. Une nouvelle version du portail, avec une interface simplifiée, a été mise en place en 2020.

Si vous êtes adhérent(e) de notre association A3 et vous souhaitez accéder au portail de BibCNRS, veuillez prendre contact avec daniel.charnay@gmail.com afin que vous soient communiqués l'identifiant et le mot de passe du portail. Les informations de connexion sont réservées aux adhérents et ne devront pas être communiquées.

Association des Anciens et des Amis du CNRS

Siège social : 3, rue Michel-Ange 75794 Paris cedex 16
Siège administratif : 1, place Aristide-Briand - 92190 Meudon
Site web : <http://www.a3cnrs.org>

Les bulletins d'adhésion et de cotisation sont disponibles en activant le lien ci-dessous :

<https://www.a3cnrs.org/page/32180-adherer-ou-renouveler-sa-cotisation>

Votre inscription vous permet de recevoir A3 Magazine et le Journal du CNRS.

Pour toutes les questions relatives à la base de données et aux cotisations :

Anne Jouve, trésorière de l'A3 - a3.tresoriere@gmail.com

Impression : Clumic Arts graphiques - 70 bis, rue de Romainville - 75019 Paris