CONSTRUIRE
ET TRANSMETTRE
LA MÉMOIRE

Programme de l'Andra sur la mémoire des centres de stockage de déchets radioactifs

> Les matériaux de la mémoire

Les supports de l'information à l'épreuve des siècles



ÉTUDES SCIENTIFIQUES

CONSTRUIRE ET TRANSMETTRE LA MÉMOIRE

Programme de l'Andra sur la mémoire des centres de stockage de déchets radioactifs

Cette collection d'ouvrages de référence a pour objet de rendre compte des avancées du programme Mémoire de l'Andra. Elle se fonde en particulier sur des études scientifiques dans différents domaines, qui nourrissent une réflexion pluridisciplinaire sur les mécanismes en jeu dans les processus de construction et de transmission de la mémoire.

Dans cette collection :

Le Canal du Midi, 2020

Cécile Massart, 2021

Les appels à projets artistiques, 2023

Les matériaux de la mémoire

Les supports de l'information à l'épreuve des siècles



ISBN 2-916162-15-1

Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
1-7, rue Jean Monnet 92298 Châtenay-Malabry cedex

CONSTRUIRE ET TRANSMETTRE LA MÉMOIRE

Programme de l'Andra sur la mémoire des centres de stockage de déchets radioactifs

Les matériaux de la mémoire

Les supports de l'information à l'épreuve des siècles

Introduction

« L'archéologue hésite
Car les siècles effacent
Et les traces des Scythes
Et les sites des Thraces[1] »

Et pourtant, l'usure du temps n'a pas toujours raison des traces. Parmi celles qu'Homo sapiens a laissées en 300 000 ans d'existence, certaines nous sont parvenues. Intentionnelles ou fortuites, concrètes ou immatérielles, elles témoignent de l'époque qui les a vues naître, et occasionnellement de celles qu'elles ont traversées.

L'inscription dans la matière n'est ni nécessaire ni suffisante à leur survie : certains récits et coutumes ont mieux résisté que bien des écrits gravés dans le marbre ; « *verba volant, scripta manent* » ne se vérifie pas systématiquement, ou du moins pas dans n'importe quelles conditions. Toutefois, elle offre à l'être humain la possibilité d'externaliser sa mémoire, de temporiser et prolonger l'accès à ses émotions et connaissances, d'en diffuser plusieurs versions identiques. Elle favorise une diversité de formats et de contenus, ainsi qu'une approche polysensorielle.

[1] Improvisation rimée de Gilbert Lazard, linguiste, iranologue, membre de l'Académie des inscriptions et belles-lettres

Le *papyrus Ebers*, le *portrait dit de Sappho* à Pompéi, le *Codex Villarensis* d'Hildegarde de Bingen, la *Sortie de l'usine Lumière* à Lyon, ont un point commun : leur support s'est préservé, il était adapté aux œuvres et connaissances que nos ancêtres voulaient y consigner, et il nous est accessible, par vision directe, ou par une technique que nous maîtrisons toujours.

Connaître les propriétés des matériaux aptes à recueillir des informations, comprendre les phénomènes qui régissent leur conservation et leur accessibilité, ou a contrario leur vulnérabilité et leur obsolescence ; ces questions prennent un relief particulier pour le programme Mémoire[2] de l'Andra, qui s'attache à développer des dispositifs propices à la transmission aux générations futures d'informations de diverse nature, sous des formes variées (corpus documentaires, images, récits, œuvres d'art, objets servant de marqueurs, etc.), pendant des périodes pouvant atteindre plusieurs siècles, et dans un environnement, par essence partiellement inconnu, susceptible de mettre en péril leur intégrité.
Aussi le présent ouvrage esquisse-t-il un panorama de certains supports utilisés au fil de l'Histoire : plus ou moins bruts ou manufacturés, ancestraux ou révolutionnaires, ils sont étudiés à l'aune des enjeux de pérennité et de résistance à des agressions tant naturelles qu'anthropiques. Leur compatibilité avec différents types de données, les procédés techniques employés pour y fixer celles-ci, et ceux nécessaires pour les restituer sont également examinés.

[2] Pour la description du programme Mémoire de l'Andra, se référer au chapitre suivant.

PRÉSENTATION 10

POURQUOI TRANSMETTRE LA MÉMOIRE ? 13
COMMENT TRANSMETTRE LA MÉMOIRE ? 15

ÉTUDE 20

LES SUPPORTS NATURELS 23
DE L'ARTISANAT AUX DÉBUTS DE L'ÈRE INDUSTRIELLE 41
DE L'ANALOGIQUE AU NUMÉRIQUE 61

CONCLUSIONS 88

Références bibliographiques 93
Crédits photographiques 95

PRÉSENTATION

ÉTUDE

CONCLUSIONS

Le programme Mémoire

Dans le cadre de ses activités, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) s'est dotée d'un dispositif visant l'élaboration et la transmission sur le long terme de la mémoire de ses installations de stockage. Ce programme *Mémoire des stockages de déchets radioactifs pour les générations futures*, appelé plus simplement *programme Mémoire*, s'appuie notamment sur des recherches pluridisciplinaires.

POURQUOI TRANSMETTRE LA MÉMOIRE ?

Les déchets radioactifs, dangereux pour l'humain et l'environnement, doivent en être isolés jusqu'à ce que leur activité radiologique ait suffisamment diminué pour ne pas engendrer de conséquences inacceptables. La grande majorité de ces déchets, dont la durée de vie et la radioactivité sont les plus faibles, peut être stockée en surface, dans des installations telles que le Centre de stockage de l'Aube (CSA), le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires), situé également dans l'Aube, et le Centre de stockage de la Manche[1] (CSM), tous gérés par l'Andra. Pour les déchets les plus radioactifs et dont la durée de vie est la plus longue, la solution envisagée est le stockage géologique à grande profondeur : c'est le projet Cigéo[2], développé par l'Andra.

Tous ces centres de stockage sont conçus pour assurer leur fonction de protection à long terme sans intervention humaine après leur fermeture : on parle de sûreté passive. Toutefois, leur mémoire doit être préservée pour trois raisons :

- **éviter le plus longtemps possible le risque que des humains y pénètrent involontairement**, ce qui pourrait représenter un danger pour les personnes exposées et dégrader les performances du dispositif

[1] Le CSM est le plus ancien centre de stockage de déchets radioactifs français. Il ne reçoit plus de déchets depuis 1994 et est actuellement en phase de fermeture.
[2] Le projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) prévoit de stocker les déchets les plus radioactifs, et dotés de la plus longue durée de vie, à 500 m de profondeur, à la lisière de la Meuse et de la Haute-Marne, dans la couche du Callovo-Oxfordien constituée d'argilites. Stable depuis plusieurs millions d'années et très faiblement perméable, celle-ci offre d'excellentes capacités de confinement.

de sûreté. Dans le cas des centres de surface, la proximité des déchets oblige à exclure toute activité conventionnelle sur le site pendant les premiers siècles après sa fermeture. A contrario, il n'est pas nécessaire de restreindre les activités humaines à l'aplomb de Cigéo. En revanche, une intrusion en profondeur, bien que peu probable, car supposant le déploiement de moyens techniques relativement sophistiqués, doit être évitée pendant cinq siècles au moins ;

- **éclairer et faciliter les décisions des générations futures** à l'égard des centres, afin qu'elles puissent, si elles le souhaitent, les entretenir, les modifier, les améliorer ou encore comprendre et réévaluer les solutions mises en œuvre ;

- **transmettre un héritage culturel, scientifique et historique :** les informations sur la conception des centres de stockage, ainsi que sur la nature et l'origine des déchets radioactifs, constituent une source précieuse de connaissances sur les sciences et techniques relatives à l'utilisation de la radioactivité, développées aux XX^e^ et XXI^e^ siècles. Il est d'autant plus important de les transmettre que ces centres, étant donné leur conception et leur fonction, ont vocation à traverser les siècles et constitueront un témoignage de notre époque.

Et l'oubli ?
- organiser un oubli absolu est hasardeux, or, toute initiative imparfaite en ce sens serait contreproductive, ne faisant qu'aiguiser la curiosité des générations futures ;
- imposer l'oubli est éthiquement discutable : nous ne pouvons priver les générations futures de leur histoire, des connaissances que nous avons accumulées, ou de leur liberté de choisir.

Par conséquent, l'Andra s'attache à développer des dispositifs aptes à transmettre la mémoire le plus longtemps possible, et pendant cinq siècles au minimum.

COMMENT TRANSMETTRE LA MÉMOIRE ?

L'objectif est que les générations futures aient, au minimum, conscience de l'existence des centres de stockage et des dangers qu'ils peuvent comporter, et, si possible, une connaissance détaillée de leurs caractéristiques et du contexte technico-scientifique dans lequel ils s'inscrivent.

Préserver et transmettre la mémoire des centres consiste à laisser ou créer des traces pérennes et accessibles, dénuées d'ambiguïté, et pertinentes, ce qui implique d'explorer les thématiques suivantes :

- les supports de l'information : matériaux et incarnation ;
- la forme et la formulation des messages et informations ;
- le choix des informations.

Aussi le programme Mémoire de l'Andra est-il pluridisciplinaire, transverse et prospectif. Il s'articule selon quatre axes.

LA DOCUMENTATION RÉGLEMENTAIRE ET LES ARCHIVES

➔ La documentation réglementaire

Le Code de l'environnement requiert la production de deux types de dossier se rapportant au CSM, au CSA et à Cigéo, d'ici la fermeture respective de ces centres :

Un dossier synthétique de mémoire

Destiné au grand public, il comporte les principales informations relatives à l'histoire du centre de stockage depuis sa création, à la nature des déchets présents et aux risques qui leur sont associés. Celui dédié au CSM a été réalisé en 2019, distribué en version papier à diverses institutions, et est disponible sur le site internet de l'Andra[3] .

[3] https://www.andra.fr/sites/default/files/2023-06/Andra-DSM_CSM-BD.pdf

Un dossier détaillé de mémoire

Destiné en priorité aux exploitants successifs du centre de stockage, c'est une compilation de documents techniques qui en donne une connaissance la plus exhaustive possible. Chaque dossier détaillé de mémoire sera conservé en deux exemplaires : un sur le centre qu'il décrit et un autre aux Archives nationales, ce qui intégrera ainsi la mémoire de l'Andra dans un dispositif institutionnel pérenne.

Une mise à jour de ces dossiers est réalisée en continu, alimentée notamment par des expertises et des exercices de recherche d'informations qui font intervenir des participants internes et externes à l'Andra.

➔ Des archives

Comme tout établissement public, l'Andra est soumise au Code du patrimoine, qui impose qu'elle assure la gestion de ses archives courantes et intermédiaires, et verse aux Archives nationales ses archives historiques, ce qui contribue aussi à la préservation de la mémoire.

➔ Des servitudes publiques

Il s'agit de contraintes administratives qui doivent être annexées au plan local d'urbanisme ou à la carte communale pour conserver la mémoire des centres de stockage au cadastre, après leur fermeture et en parallèle de leur surveillance.

LES INTERACTIONS SOCIALES

Leur vocation est d'ancrer la mémoire dans le présent pour mieux la déployer : en mobilisant largement diverses composantes de la société contemporaine, elles établissent la future conscience collective de l'existence des centres et des informations associées.

Par ailleurs, elles permettent d'ores et déjà d'éprouver certains des dispositifs mémoriels auprès de la société civile, qui peut de surcroît être source de propositions.

La transmission de la mémoire s'envisage alors comme un passage de relais spatial et temporel.

Les principales actions menées sont les suivantes :

➔ Groupes mémoire
Depuis 2012, chaque centre de stockage anime un groupe de réflexion local exclusivement tourné vers la mémoire. Ces groupes de mémoire sont composés de riverains dont des élus locaux, acteurs de la vie associative et anciens salariés des centres de stockage, tous bénévoles. Ils se réunissent régulièrement pour imaginer et expérimenter des outils mémoriels : bande dessinée, collecte d'articles de presse, *escape box*, recueil de témoignages d'anciens salariés et d'acteurs locaux, installation d'œuvres d'art, pièces de théâtre, etc.

➔ Communication avec les publics
En informant ou sollicitant le public via différents supports (papier, Internet, réseaux sociaux, relations médias, concours de courts-métrages, etc.) et en créant des occasions d'interaction et de dialogue telles que des journées portes ouvertes sur les sites de l'Andra ou des concertations sur Cigéo, l'Andra souhaite étendre la mémoire des centres de stockage au périmètre le plus large possible : les riverains, bien sûr, mais également tous les citoyens. Outre l'Andra, d'autres acteurs jouent un rôle dans l'information au niveau local, comme les Commissions locales d'information.

➔ Appels à projets et résidences artistiques
L'art, en raison de sa force d'évocation et de son caractère universel, renforce la sensibilisation du public contemporain et crée des traces dans la culture, dont une part pourrait être transmise sur de longues échelles de temps. L'appel à projets *Art et mémoire*, qui a fait l'objet du 3e opus de la collection *Construire et transmettre la Mémoire*, a permis à des artistes de toutes disciplines de contribuer à la réflexion collective. Les deux résidences artistiques *Prospectives graphiques*, menées en partenariat avec le Signe, centre national du graphisme à Chaumont, ont respectivement permis d'explorer les questions de signalétique et de transmission via le récit[4].

➔ Exposition itinérante « Mémoire pour le futur[5] »
Cette exposition, qui met en lumière les problématiques relatives à la transmission de la mémoire et les pistes proposées par les groupes Mémoire, parcourt toute la France.

---

[4] Au cours de la 2e résidence, l'autrice et artiste Juliette Nier a créé un récit, *Une technogonie*, qu'elle fait vivre dans une pièce de théâtre d'ombres dont voici le teaser : https://www.youtube.com/watch?v=bs6sziiTKG4
[5] https://www.andra.fr/evenements/memoire-pour-le-futur

LES ÉTUDES ET RECHERCHES

L'Andra s'intéresse tant à l'intelligibilité des messages et à la forme qu'ils peuvent emprunter qu'à leur pérennité et aux caractéristiques des matériaux les plus aptes à les préserver. Elle confronte ses analyses aux héritages des siècles passés : comment ont-ils été conservés et ont-ils traversé le temps ? Quelle compréhension en avons-nous ? Ces recherches, menées avec divers partenaires universitaires et entreprises innovantes, s'articulent autour des sciences de la nature, de la technologie, et des sciences humaines et sociales.

Les principaux domaines explorés sont :

➔ Les matériaux
Il s'agit d'étudier la pérennité de différents matériaux et leur capacité à servir de support à une information ou de marqueur anthropique. Ces réflexions sont relatées dans le présent ouvrage.

➔ L'archéologie des paysages et l'étude de l'Anthropocène
L'objectif est de déterminer la façon dont le paysage garde la trace d'ouvrages de grande ampleur comme les centres de stockage et de faire en sorte que ces traces ne puissent pas être confondues avec des phénomènes naturels. Un premier partenariat de recherche a été engagé sur le marquage archéologique qui pourrait être mis en œuvre sur le site de Cigéo.

➔ Les conservateurs institutionnels
L'enjeu est de comprendre comment certains conservateurs (musées, bibliothèques, archives, monuments) perdurent dans un monde en perpétuelle évolution. Une première étude a mis en évidence le rôle des communautés accompagnant les conservateurs institutionnels.

➔ Sémiotique et socio-anthropologie
Il s'agit d'identifier les signes ou les facteurs culturels, anthropologiques et linguistiques susceptibles de favoriser la mémoire, ou au contraire l'oubli, sur plusieurs générations. Une étude bibliographique internationale a été menée sur la pérennité des langues et de la symbolique. Le potentiel de la signalétique sonore est également exploré.

➔ Les analogues mémoriels
Le but est d'analyser les processus de transmission mémorielle dans d'autres domaines que les stockages de déchets radioactifs, pour pouvoir s'en inspirer. Ce fil conducteur a sous-tendu l'étude menée sur le canal du Midi[6], ouvrage de génie civil dont la mémoire a été entretenue depuis sa création à la fin du XVII[e] siècle jusqu'à nos jours.

LA COLLABORATION INTERNATIONALE

L'Andra participe également à des actions à l'échelon international, afin d'élaborer une vision partagée avec ses homologues, autorités de sûreté, organismes de recherche, et plus largement résidents d'autres pays. Ces actions transnationales réciproques renforcent les réseaux mémoriels initiés au niveau local. En outre, l'éclairage de personnes appartenant à des cultures et des espaces linguistiques différents accroît la compatibilité des outils mémoriels avec les divers changements sociaux, politiques et culturels qui pourraient advenir au cours des siècles futurs.

De 2011 à 2019, l'Andra a participé au groupe de travail international RK&M (*Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations*), qui a notamment élaboré une boîte à outils sur la mémoire. L'Andra contribue aujourd'hui à IDKM (*Information, Data and Knowledge Management*), plateforme internationale de recherche et de travail sur les connaissances et la mémoire des déchets radioactifs. Ces projets internationaux sont placés sous l'égide de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE.

CONCLUSION

Les déchets radioactifs constituent un legs, pour partie issu des générations qui nous ont précédés, que nous transmettrons aux générations futures. Pour que cet héritage ne devienne pas une charge, l'Andra propose des solutions de gestion qui protègent les êtres vivants et l'environnement sur le très long terme, tout en élaborant un programme Mémoire qui s'inscrit dans une réflexion éthique et intergénérationnelle, au confluent des enjeux de sûreté, de libre-arbitre et de transmission.

---

[6] Cette étude a fait l'objet du premier opus de la collection *Construire et transmettre la Mémoire*

PRÉSENTATION

ÉTUDE

CONCLUSIONS

De la pierre à l'ADN : comment l'information traverse-t-elle le temps ?

La recherche des supports les plus aptes à transmettre aux générations futures des informations jugées capitales est une démarche prospective. Elle invite à une mise en perspective historique de ce domaine intimement lié au développement des sociétés humaines. De la plus haute Préhistoire à nos jours, des matériaux naturels aux dernières productions de la technologie, cette partie est consacrée aux matériaux et procédés utilisés pour écrire, lire, et conserver de l'information, dont ceux actuellement étudiés par l'Andra.



« L'Arbre de Vie » de Gua Tewet, quintessence de l'art rupestre de Bornéo, datant d'il y a environ 10 000 ans. Douze mains gauches et une droite, de grande taille, sont reliées par un lien végétal. Toutes sont décorées de motifs internes symboliques, qui rappellent les tatouages d'appartenance clanique. Combinées, appariées, décorées, reliées, en associant un ou plusieurs de ces critères, les mains négatives de Bornéo présentent un niveau de complexité inégalé à ce jour.

LES SUPPORTS NATURELS

Laisser des traces est une aspiration qui se manifeste depuis la nuit des temps par différents types d'expressions. Durant la Préhistoire, les représentations sont souvent figuratives, ce qui n'exclut pas un caractère symbolique. Avec l'apparition de l'écriture, les sujets abordés, d'abord pratiques, se diversifient progressivement. Pour véhiculer ces messages, les humains utilisent principalement des supports provenant de leur environnement proche. Organiques ou minéraux, plus ou moins durs et pérennes, ils sont gravés ou peints, après avoir été éventuellement façonnés.

Les premières formes de communication non orale sont produites par nos ancêtres préhistoriques soit directement sur la roche, soit sur des objets utilitaires ou des objets d'art en os, ivoire, bois de renne, etc. L'utilisation de ces supports naturels implique l'emploi d'outils et de procédés techniques qui se sont perfectionnés au fil du temps. Ainsi, les procédés très anciens adoptés pour laisser une empreinte durable à la surface d'un matériau, tels que la gravure et la peinture – ou plus généralement l'application d'une couche de matière plus ou moins colorée sur une surface – restent fondamentalement actuels, sous différentes formes.

Les procédés très anciens adoptés pour laisser une empreinte durable à la surface d'un matériau restent fondamentalement actuels, sous différentes formes.

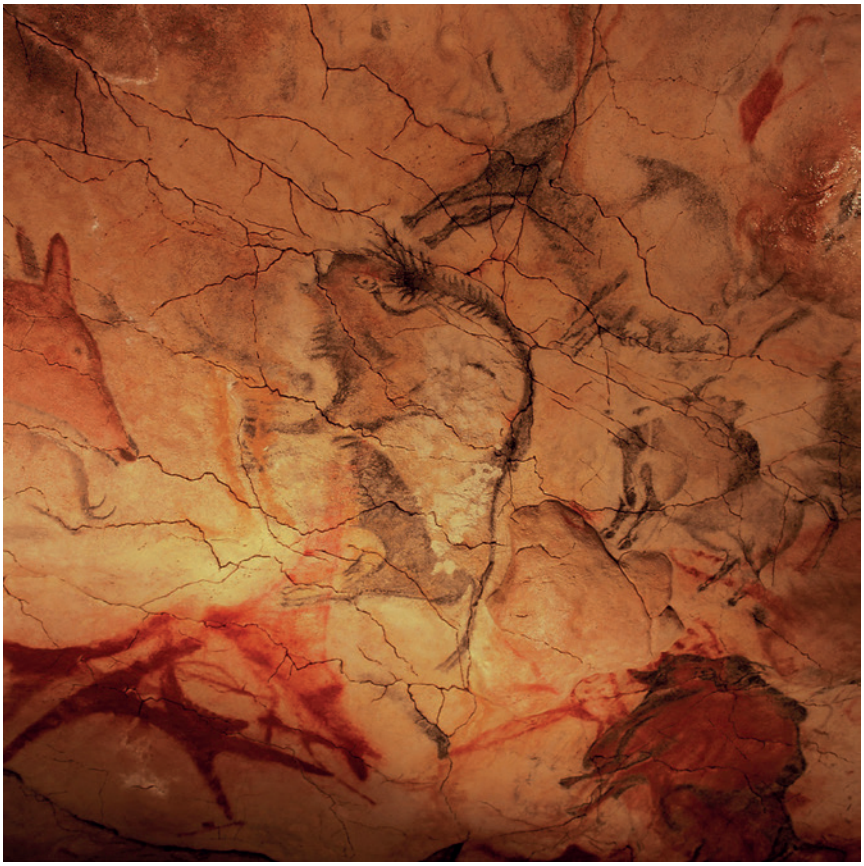
LA PIERRE

Peinte ou gravée, la pierre porte les empreintes humaines les plus anciennes qui nous soient parvenues : des mains en négatif, des représentations d'animaux, des scènes de chasse, des êtres humains et figures anthropomorphes, ainsi que des événements de la vie quotidienne, mais aussi des motifs géométriques. Des dessins et des fresques ont ainsi été trouvés dans le monde entier, sur la roche à l'air libre (gravures rupestres) ou sur les parois des grottes (art pariétal, généralement peint).
Avec leur caractère figuratif plus ou moins stylisé, ces traces possèdent une dimension esthétique et une puissance évocatrice indéniables, mais elles « *nous parlent sans rien nous dire* »[1]. Leur interprétation restant incertaine, ces signes sont réputés relever de l'art.

La résistance mécanique et chimique de la pierre, ainsi que sa présence dans la plupart des régions du monde, en font le support d'expression par excellence. Depuis la Préhistoire, elle est taillée puis gravée à l'aide de matériaux plus durs qu'elle. Des gravures rupestres ou pétroglyphes (des mots grecs « *petra* » signifiant « pierre » et « *glyphein* » signifiant « graver ») sont répandues dans toutes les parties du monde préhistorique, avec une densité plus élevée dans certaines zones du Sahara, de l'Afrique du Sud, de la Scandinavie, de la Sibérie et de l'Australie.

Le développement de la métallurgie au Néolithique, vers la fin du Ve millénaire av. J.-C., permet la fabrication d'outils façonnant et travaillant plus efficacement la pierre, ce qui facilite la réalisation d'inscriptions sur des supports « mobiles », et non plus uniquement *in situ*. La pierre est employée notamment pour rendre hommage aux défunts, cette pratique des stèles funéraires et pierres tombales ayant traversé les époques jusqu'à la nôtre.
D'autres usages se font jour. Ainsi, à partir du IIIe millénaire av. J.-C., en Mésopotamie, les contrats de vente de biens immobiliers ou de marchandises s'inscrivent sur des tablettes en argile ou sur des stèles en pierre, lesquelles confèrent une forme de pérennité et de prestige à la transaction.

[1] Pascal Picq, *Manifeste intemporel des arts de la préhistoire*, Flammarion, 2022.



Bisons dans le plafond de la grotte d'Altamira (Espagne), réalisés entre 15 500 et 13 500 ans av. J.-C., d'après les datations effectuées grâce à la méthode du carbone 14 sur des échantillons du charbon de bois. Extrêmement bien conservées dans des galeries profondes, à l'abri des influences climatiques extérieures, ces peintures rupestres sont considérées comme l'apogée d'un art qui s'est développé à travers l'Europe, de l'Oural à la péninsule Ibérique, de 35 000 à 11 000 ans av. J.-C.







Pétroglyphes de Tamgaly, site du patrimoine mondial de l'Unesco, Kazakhstan. Le groupe de 5000 pétroglyphes, dont les images les plus anciennes remontent à l'âge du Bronze, aux environs de 1400 à 1300 av. J.-C., présente des figures taillées avec netteté et d'une grande qualité artistique.

DES TECHNIQUES IMMÉMORIALES : GRAVER ET PEINDRE

Graver

Diverses méthodes permettent de marquer un matériau plus ou moins dur (os, ivoire, roche) en ôtant de la matière à sa surface. On peut procéder par exemple par piquetage, en appliquant des percussions ponctuelles avec un objet dur (en silex ou en métal), ou en utilisant un outil tranchant (burin, poinçon) permettant de faire une entaille (incision). Ces procédés perdurent jusqu'à nos jours sur des supports traditionnels tels que la pierre. Des gestes analogues sont employés dans les procédés de reproduction comme la gravure, qui se développe au XIVe siècle en utilisant le bois comme support intermédiaire. Au XXe siècle, les progrès de l'optique et en particulier le laser permettent de graver la matière non seulement en surface, mais aussi en profondeur.

Peindre

Le noir de charbon est utilisé depuis les temps préhistoriques, tout comme les ocres naturelles, des argiles aux teintes brun et rouge dues à des oxydes de fer. L'oxydation et la réduction des substances minérales sur un foyer enrichissent la palette de couleur des pigments minéraux. Depuis au moins 10000 ans, des pigments organiques sont également utilisés : la garance extraite de feuilles ou de racines, le pourpre phénicien issu du mollusque *Murex brandaris*, le rouge carmin extrait de la cochenille (*Kermes vermilio*), etc.





Gravure de la première pierre du bâtiment du Collège théologique Saint-Georges – Jérusalem, avril 1962 (à gauche). Fragment de pigment du Nouvel Empire (à droite).



La stèle des Vautours, qui date d'environ 3100 av. J.-C., est généralement considérée comme la plus ancienne stèle connue portant des inscriptions cunéiformes, l'une des premières écritures. Découverte dans la ville sumérienne de Tello, située en Mésopotamie (dans l'actuel Irak), elle relate une victoire du roi sumérien Eanatum de Lagash sur la ville voisine d'Umma. Elle est ornée de bas-reliefs montrant des vautours dévorant les cadavres des soldats ennemis.



Kudurru de Gula-eresh. Datant de 1125-1100 av. J.-C., ce bloc de pierre enregistre le don d'une terre de la part du gouverneur du pays de la mer à Gula-eresh, et comprend des malédictions à l'encontre de ceux qui porteraient atteinte à la stèle.



Parmi les minéraux, les pierres précieuses se distinguent par leur dureté, gage de longévité. En Mésopotamie, elles sont taillées pour réaliser des sceaux-cylindres : sculptées en creux (intaille) ou en relief (camée). L'art de la gravure de ces pierres fines, prisées en particulier pour la bijouterie, est la glyptique (du grec ancien « glyptós », signifiant « objet gravé »). Depuis la fin du XIX^e^ siècle, on obtient par ailleurs des pierres synthétiques comme le strass à l'aide du four électrique.

Les pierres, et plus généralement les minéraux, fournissent des supports souvent durs et extrêmement résistants, mais parfois cassants et friables. Les conditions atmosphériques sont susceptibles d'entraîner une érosion des objets en pierre, et d'effacer ainsi les inscriptions tracées à leur surface. En outre, la gravure et la sculpture de la pierre sont des procédés lents, qui n'offrent pas toujours une grande précision, et ne sont pas compatibles avec une grande densité d'informations.

Sceau-cylindre. Mésopotamie, vers 2450 av. J.-C. Sceau royal d'Ishma-Ilum, prince de Kisik : héros nu maîtrisant deux lions ; sous l'inscription, l'aigle léontocéphale attaquant le taureau léontocéphale.

LE DISQUE DE SAPHIR

On sait désormais synthétiser certains matériaux autrefois prélevés dans notre environnement, ce qui améliore la maîtrise de leurs propriétés. Un procédé d'archivage sur disque de saphir artificiel pourrait ainsi permettre de conserver des données pendant plusieurs millénaires au moins, jusqu'à un million d'années dans des conditions optimales. Grâce à sa dureté, ce support résiste aux rayures. Il est également insensible aux attaques chimiques, tout comme à une température de 1600 °C. En revanche, il est presque aussi cassant que le verre, exige un emballage spécifique, et reste très coûteux.

Synthèse du saphir

Le saphir synthétique est obtenu par fusion du corindon (Al_2O_3) et cristallisation goutte à goutte au contact d'un germe monocristallin. On obtient ainsi un « monocristal », c'est-à-dire un réseau cristallin quasi parfait.

Principe de fonctionnement

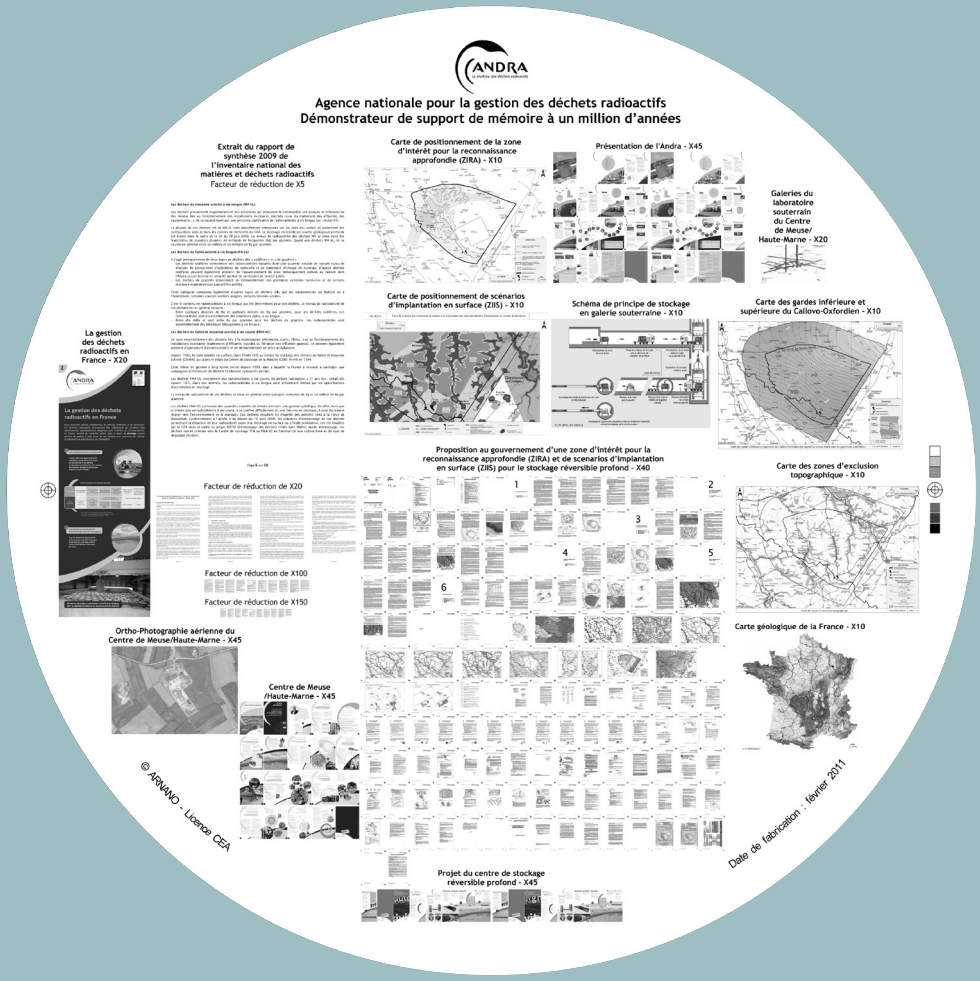
Une couche de nitrure de titane, qui fait office d'encre, est déposée à la surface d'un disque de saphir synthétique de 200 mm de diamètre. Les informations y sont inscrites grâce à un procédé de photolithographie, avec une résolution d'un micromètre, suivi d'une gravure par plasma du nitrure de titane. Un second disque de saphir est ensuite assemblé à cette surface par collage moléculaire. Les deux faces forment alors un support transparent qui protège la couche de nitrure porteuse de l'information.

Les images ou textes étant reproduits sous leur forme originelle, en mode analogique, la lecture s'effectue à l'aide d'une loupe, d'un microscope ou d'un scanner. Un disque de saphir peut contenir l'équivalent de 10000 feuilles de texte au format A4 ou d'un DVD de 4,7 Go (gigaoctets).

Maturité

Ce support est développé par la société Arnano, qui a réalisé pour l'Andra trois exemplaires d'un disque en saphir sur lequel sont gravées des informations relatives au projet Cigéo. Cette technologie d'archivage a également séduit la NASA, dans le cadre du projet *Sanctuary on the moon*[2]. Conçu par un Français, le projet consiste à déposer à la surface de la Lune 24 disques de saphir fabriqués par Arnano. Emportés par les futures missions Artemis, ces disques, dotés de 7 milliards de pixels chacun, témoigneront de l'héritage scientifique et culturel de l'humanité.

[2] https://sanctuaryonthemoon.com/fr/

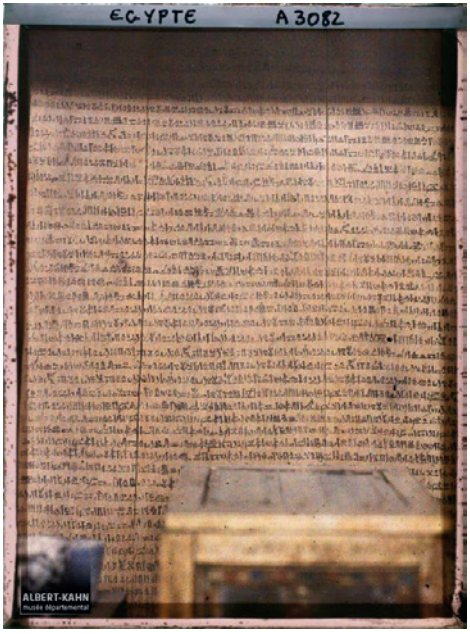


Prototype d'un disque en saphir réalisé pour l'Andra.

LE BOIS

Sauf s'il est imputrescible, ce qui est le cas de rares essences comme le teck, ou conservé dans des conditions particulières (dans les milieux très secs, ou, au contraire, dans des eaux pauvres en oxygène et en mollusques, telles que celles des tourbières acides), le bois, en tant que matière organique, est soumis à une dégradation naturelle : assauts des moisissures, insectes et rongeurs. C'est pourquoi ses vestiges anciens sont rares.

Néanmoins, nous savons que les Égyptiens, les Grecs et les Romains utilisaient des tablettes de bois sur lesquelles ils gravaient des inscriptions ou des textes. Ces tablettes, souvent en bois de tilleul ou de cèdre, servaient couramment pour des écrits éphémères ou temporaires, à l'école par exemple.



Plaque en bois, écriture hiératique, décrets rendus par le Dieu Amon-Rê à la dame Nichonsou.

Au Moyen Âge, les peintures étaient principalement réalisées sur des panneaux de bois, souvent de chêne, de peuplier ou de tilleul, préparés avec plusieurs couches d'un mélange de colle animale et de plâtre, pour créer une surface lisse.

Au VIII^e^ siècle en Chine, et au XIV^e^ siècle en Occident, se développe la gravure sur bois ou xylographie, qui consiste à reproduire un motif en creux dans du bois pour le reporter une fois encré sur un support du type parchemin ou papier. Ce procédé préfigure l'imprimerie (voir page 56).

L'INFORMATION DANS TOUS SES ÉTATS : DU SIGNE AU CODE

Traits, lignes de points, bâtonnets, puis signes géométriques plus complexes, les traces préhistoriques non figuratives sont difficiles à interpréter avec certitude, faute d'en maîtriser les codes. Sont-elles de simples ornementations, ou des messages porteurs de sens ?

Avec l'émergence de l'écriture, un cap décisif est franchi, même si la vision actuelle tend de plus en plus à considérer les graphismes évoqués ci-dessus comme des formes d'écriture. Des informations peuvent être non seulement transmises à travers le temps et l'espace, mais également interprétées, y compris pour des textes écrits dans des langues disparues. Cette révolution ne se fait pas en une fois. Certaines pratiques ont un caractère précurseur, tels les *calculi* accompagnant les marchandises durant leur transport (voir le chapitre sur l'argile).

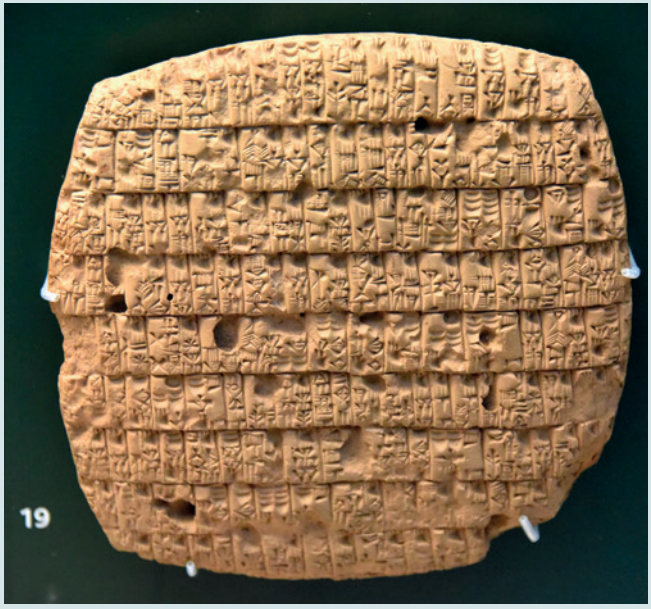
Il existe quatre foyers distincts d'apparition de l'écriture: la Mésopotamie, qui couvre des régions des actuels Irak, Iran, Syrie et Turquie (3400 av. J.-C.), l'Égypte (3200 av. J.-C.), la Chine (1300 av. J.-C.) et la Méso-Amérique (Olmèques, 900 av. J.-C.). Les autres systèmes d'écriture découlent de ceux-ci.

En Égypte, le suivi administratif des nombreuses opérations requises chaque année par les crues du Nil joue un rôle moteur dans l'émergence de systèmes graphiques de nature comptable. Au-delà de ces aspects pratiques, l'écriture démultiplie la transmission et la conservation des connaissances, des histoires et des traditions, permet l'essor de la littérature, etc. Cela se traduit par une augmentation considérable des supports de l'écrit, dont il nous reste de très nombreux témoignages, découverts notamment en Mésopotamie.

Les premiers systèmes d'écriture emploient des symboles ou des pictogrammes, c'est-à-dire des signes représentant de manière schématisée des objets matériels. C'est globalement le cas des hiéroglyphes égyptiens, et de l'écriture mésopotamienne dite cunéiforme, car imprimée à l'aide d'un stylet en forme de coin sur l'argile.

Les pictogrammes ont tendance à se simplifier au cours du temps, ne serait-ce que pour faciliter leur inscription sur les différents supports. Le processus de stylisation peut s'accompagner d'une abstraction, qui conduit à ce que les pictogrammes représentent également des idées. On parle alors d'idéogrammes, comme dans l'écriture chinoise. Certains signes servent d'ailleurs à préciser le sens d'autres idéogrammes. L'évolution des systèmes d'écriture conduit dans certains cas à ce que des idéogrammes correspondent aussi à des sons, ces phonogrammes pouvant exprimer un mot homonyme ou une syllabe d'un mot. Cela entraîne l'émergence des premiers alphabets, qui permettent d'écrire un plus grand nombre de mots et de concepts en utilisant un ensemble limité de symboles.

Qu'il s'agisse d'idéogrammes ou d'alphabets, l'écriture s'appuie sur un nombre déterminé de signes. L'imprimerie contribue à uniformiser leur représentation. À l'ère de l'informatique, la standardisation devient indispensable. Un exemple clé de cette évolution est le système Unicode, qui assigne un code numérique unique à chaque caractère. Les symboles mathématiques, la musique et, sous différents formats, les images n'échappent pas à cette numérisation universelle.



Tablette d'argile comportant une liste de rations sur cinq jours. Chaque ligne de texte cunéiforme mentionne les rations pour une journée. Probablement de Jemdet-Nasr, Irak. Vers 3000 avant notre ère.

CORNES, OS ET CARAPACES

Les cornes de bovidés sont utilisées dès le Néolithique, comme l'indiquent des traces d'extraction de l'étui corné adhérant au noyau osseux, ce qui constitue une opération délicate. Les cornes sont soumises à une dégradation biogéochimique, et il existe peu d'artefacts archéologiques réalisés à partir des cornes des antilopes ou buffles qui cohabitaient avec les humains dans la Haute-Égypte.

Ce sont surtout l'os ou l'ivoire, plus durables que le bois, qui ont servi de supports, dès le Paléolithique, avec des inscriptions attestées au Magdalénien, il y a 15000 ans. En Mésopotamie, ils remplaçaient parfois l'argile pour la fabrication des tablettes destinées aux inscriptions en écriture cunéiforme.

En Chine, dans les pratiques divinatoires sous la dynastie Shang (v. 1600-1050 av. J.-C.), les demandes d'oracle étaient gravées sur des os de bœuf ou des carapaces de tortue. Ces inscriptions oraculaires font partie des plus anciens témoignages de l'écriture chinoise.



Fragment de carapace de tortue servant de tablette divinatoire – dynastie Shang.



PAROLE D'EXPERTE

Ina Reiche

Directrice du Lab-BC
CNRS – C2RMF – Chimie ParisTech-PSL

Os, bois, défenses: durabilité des artefacts

L'os est un biominéral composé d'une phase organique, le collagène, et d'une phase minérale, l'hydroxyapatite carbonate, étroitement imbriquées à l'échelle du nanomètre. C'est ce qui lui confère ses propriétés mécaniques, combinant dureté et élasticité. Dans le sol, l'os subit une altération, appelée diagenèse, qui dépend des conditions d'enfouissement, telles que l'hydrométrie des sols et le caractère oxydant ou réducteur du milieu. Par exemple, en milieu acide, la phase minérale cristallise et tend à se dissoudre, tandis que la phase organique ramollit. En général, c'est le collagène qui se dégrade en premier et qui se raréfie progressivement. La recristallisation de la phase minérale ne modifie pas ou peu la morphologie de l'os, ce qui permet de conserver les objets sur le long terme. L'os archéologique est donc beaucoup plus minéralisé que l'os vivant, mais il est durable. Cette aptitude à se conserver vaut également pour les défenses d'éléphant et de mammouth et pour les bois d'animaux, dont les structures chimiques sont voisines. L'apatite qui les constitue étant compatible avec de nombreux éléments chimiques, elle est susceptible de piéger des éléments présents dans le sol, et joue le rôle d'une barrière.

La pousse rapide et annuelle des bois de rennes les rend particulièrement disponibles, ce qui a permis aux humains de s'en servir pour différents usages (réalisation d'outils, de projectiles, d'ustensiles et accessoires). Sur les objets les plus anciens, il est difficile de distinguer les traces faites par les humains de celles dues à l'usure. C'est pourquoi les artefacts en os les plus anciens connus sont des sculptures en ivoire, trouvées notamment dans le Jura souabe en Allemagne et datant de l'Aurignacien, vers 35000 ans av. J.-C. Elles représentent des Vénus, des chevaux, des oiseaux. Le volume important d'éléphants et de mammouths, et donc de défenses disponibles, offre une quantité de matière propice à diverses productions. Les plus anciennes inscriptions gravées sur l'os proviennent du Magdalénien, période qui doit son nom au site de la Madeleine en Dordogne, il y a 15000 ans. Des mammouths et des rennes y sont gravés. Sur le plan symbolique, l'ivoire, issu d'animaux imposants et difficiles à chasser, a toujours été considéré comme un matériau précieux.



L'ARGILE

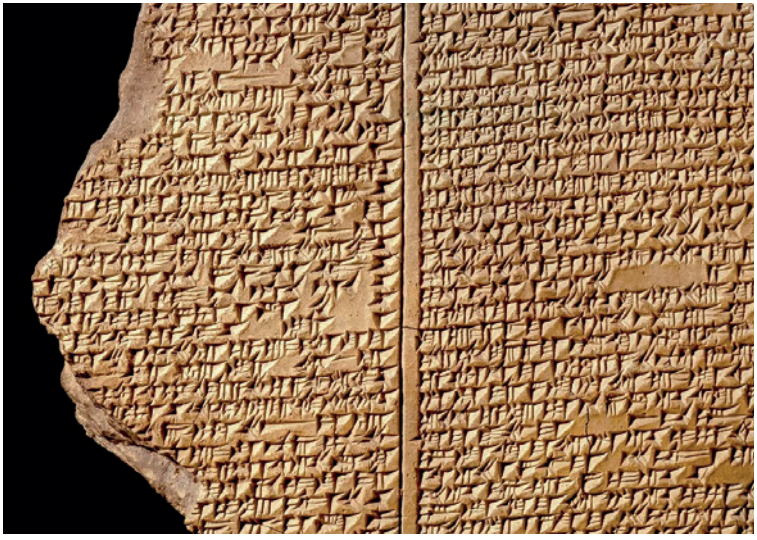
L'argile est un matériau naturel très répandu, extrait notamment du sol, ou des sédiments fluviaux ou lacustres. Molle lorsqu'elle est humide, elle se prête au traçage d'inscriptions précises à l'aide d'un stylet en bois ou en os. Elle durcit en séchant.

En Mésopotamie, dès la période d'Uruk (IVe millénaire av. J.-C.), des artefacts d'argile (petits cailloux, bâtonnets, billes, cônes, imitations de coquillages) étaient employés pour dénombrer des marchandises, grâce à des conventions dont certaines nous sont connues: la pastille ronde marquée d'une croix pour les ovins, par exemple. Ces artefacts, appelés *calculi*, étaient insérés dans des bulles-enveloppes ou bulles-comptables, sortes de sphères d'argile creuses sur lesquelles on rappelait le décompte sous forme de pictogrammes obtenus par pression d'un stylet. Marquées du sceau du propriétaire de la cargaison, ces bulles en argile étaient utilisées lors du transport de marchandises. L'exactitude des informations pouvait être vérifiée en cassant la boule d'argile pour accéder aux *calculi* qu'elle renfermait.
Les tablettes plates ont fini par remplacer les bulles d'argile. Les plus anciennes à avoir résisté à l'épreuve du temps datent d'environ 3500 à 3200 av. J.-C. Leur utilisation ne se cantonne plus au commerce, mais

Morceau d'ocre gravé d'un motif abstrait découvert dans la grotte de Blombos (Afrique du Sud) dans une couche archéologique datée de 73 000 ans avant notre ère.

s'étend à de nombreux domaines livrant de précieux témoignages de cette époque: des tables arithmétiques, des registres comptables, puis des lois, des textes religieux ou littéraires, etc.
Ces supports étaient très courants, au point que des particuliers pouvaient en détenir plusieurs milliers, souvent rangés dans des récipients (jarres, coffres en bois ou sacs), et parfois posés sur des étagères en bois.
Les premières bibliothèques de l'humanité apparaissent ainsi au cours du IIe millénaire av. J.-C. dans les temples, dans les palais, ou dans les maisons des prêtres et savants.
Chez les Grecs, l'argile a été utilisée pour réaliser des tablettes dont se servaient les écoliers pour écrire. Elle était parfois remplacée par la cire.

Sous forme non cuite, l'argile est non seulement cassante, mais aussi friable et poreuse. Ses principaux avantages résident dans sa disponibilité, sa facilité d'utilisation, ainsi que son faible coût. Il est même possible de la recycler en la trempant dans l'eau.



Détail d'une tablette d'argile provenant de la bibliothèque d'Assurbanipal à Ninive, datée du VIIe siècle av. J.-C. Elle comprend des extraits de L'Épopée de Gilgamesh, *considérée comme « le plus ancien poème épique de l'histoire ». Ce récit narre les mésaventures du légendaire et cruel roi de la ville d'Uruk.*



PAROLE D'EXPERTE

Cécile Michel

Directrice de recherche CNRS
Laboratoire Archéologies et Sciences de l'Antiquité

L'argile crue et les débuts de l'écriture

L'écriture est née il y a environ 3400 ans. Les supports les plus anciens de ces textes écrits en caractères cunéiformes sont des tablettes en argile. Contrairement au cas de l'Antiquité gréco-romaine pour laquelle les textes sont connus par des copies tardives, en Mésopotamie, il s'agit d'originaux. Au début, des symboles divers étaient tracés dans l'argile fraîche à des fins économiques ou non. Puis les signes ont pris une forme anguleuse, combinant des clous imprimés en négatif sur l'argile modelée en forme de tablette. La plupart des tablettes cunéiformes sont en argile crue, sauf quand elles ont été accidentellement exposées à des incendies, après leur réalisation. Cette argile crue peut être préparée, nettoyée de ses impuretés. Elle se prête sous cette forme malléable à une écriture dont les signes en négatif en trois dimensions sont obtenus par l'impression de l'angle d'un stylet. Des tablettes en bois recouvertes de cire sont aussi employées depuis la fin du troisième millénaire; ces artefacts ont disparu avec le temps, tout comme les autres objets faits de matières organiques.

À partir de la seconde moitié du deuxième millénaire, quelques tablettes littéraires et savantes sont volontairement cuites pour être préservées dans les bibliothèques. Par ailleurs, des inscriptions à l'encre en araméen figurent sur des tablettes du premier millénaire. Au total, il existe des centaines de milliers de tablettes d'argile écrites en cunéiformes. Elles constituent un immense patrimoine archéologique, qui reste largement à déchiffrer.



Calculi et tablettes d'argile.



Argilite excavée puis broyée avant d'être calcinée et transformée en géopolymère.

DE L'ARTISANAT AUX DÉBUTS DE L'ÈRE INDUSTRIELLE

La maîtrise du feu permet d'améliorer les propriétés des matériaux extraits du sol, les rendant plus durs, plus résistants. La céramique et les métaux servent ainsi de supports plus ou moins précieux dans de nombreuses cultures. L'ingéniosité humaine tire également profit de la souplesse des fibres végétales, grâce à un procédé voisin du tissage qui conduit au papyrus, ancêtre du papier. Les peaux de bête trouvent elles aussi leur place, pendant la longue période durant laquelle le parchemin a été utilisé.

L'argile ou terre glaise est la matière première de l'un des premiers matériaux artificiels, la terre cuite. L'argile est une roche meuble composée de minéraux silicatés et d'impuretés qui lui donnent sa couleur. Soumise à l'action du feu et de l'air chaud au cours de la cuisson, elle devient moins poreuse, plus imperméable et plus dure. Si le feu est maîtrisé depuis environ 450000 ans, les premières terres cuites connues datent d'il y a environ 30000 ans. Au fil du temps, les procédés évoluent. Grâce à des fours de plus en plus efficaces, ils conduisent à une grande variété de matériaux appelés céramiques (grès, porcelaine, faïence, etc.), qui diffèrent par leur composition et par leur processus de cuisson à plus ou moins haute température.

Au fil du temps, les procédés évoluent et conduisent à une grande variété de matériaux.

LA TERRE CUITE

Même si la terre cuite est cassante, sa fragilité est compensée par une dureté et une imperméabilité supérieures à celles de l'argile crue. Grâce à ces propriétés, ce matériau facile à produire a servi très tôt à réaliser des poteries, notamment pour des usages alimentaires. Ces objets, dont les plus anciens datent d'il y a 20 000 ans et ont été retrouvés en Asie, peuvent porter des inscriptions décoratives, tracées avant ou après la cuisson. Si elle fait perdre à l'argile sa recyclabilité, la cuisson la rend plus durable.

Moins coûteux que les tablettes d'argile ou le papyrus, des fragments de poterie appelés *ostraca* étaient couramment utilisés dans l'Antiquité comme supports d'écriture bon marché. Les textes, généralement tracés à l'encre, sont de longueur variable, d'un seul mot à plusieurs dizaines de lignes ou de colonnes. Par exemple, en Égypte ancienne, les *ostraca* servaient à enregistrer des comptes, et même à voter. Dans la démocratie athénienne, ils portaient le vote d'ostracisme : les citoyens écrivaient sur un éclat de poterie le nom des personnes qu'ils jugeaient devoir être exilées de la cité, avant de glisser ces bulletins en terre cuite dans une urne.



Bon marché et facile à produire, la terre cuite se prête à la dissémination d'artefacts identiques, nombreux et peu susceptibles d'attiser la convoitise des pillards. Cela augmente la probabilité de retrouver au moins une version d'un document plusieurs générations après son abandon.

Tablette en terre cuite dite « de Yozgat », copie d'un modèle ancien contenant les rituels d'évocation pour le dieu solaire et pour le dieu de la végétation Telebinu. Hittite impérial (XIVe siècle av. J.-C.)

GÉOPOLYMÈRES EN ARGILITE

Les géopolymères

Les géopolymères sont des polymères[3] inorganiques[4] formés à partir d'aluminosilicates activés par des solutions alcalines (hydroxyde et silicate de sodium). Ils sont produits à partir de matières premières telles que les cendres de sidérurgie, l'argile, le sable, les déchets de briques, etc. Leurs liaisons moléculaires solides conduisent à un matériau facile à mettre en œuvre, durable, et résistant sur les plans mécanique et thermique (jusqu'à 1000 °C).

Les applications sont nombreuses, les géopolymères étant notamment considérés comme une alternative prometteuse aux ciments traditionnels (ciments Portland), car leur synthèse se déroule à basse température, ce qui conduit à une réduction de 75 % des émissions de CO_2.

Des géopolymères pour Cigéo

Cigéo, le projet français de centre de stockage géologique des déchets les plus radioactifs, est prévu pour être implanté à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne, sur un site qui exploite les propriétés des argilites du Callovo-Oxfordien. Cette couche géologique, qui abritera le stockage à 500 mètres de profondeur, a en effet des caractéristiques lui permettant de confiner les radioéléments de manière passive, sur une très longue durée.

La réalisation de Cigéo implique la construction de galeries et d'ouvrages souterrains. Dans une perspective d'économie circulaire, l'Andra envisage d'utiliser les matériaux excavés pour la construction des infrastructures de stockage, mais aussi pour produire des marqueurs qui contribueraient à la préservation de la mémoire du site.

Des expérimentations pilotées par l'Andra ont démontré qu'il était possible de fabriquer industriellement divers matériaux à partir de l'argilite : verres, céramiques et géopolymères. Ce sont les géopolymères qui utilisent la plus grande proportion d'argilite (jusqu'à 100 % de la masse sèche). En combinant différentes méthodes de calcination de l'argilite, il est envisageable d'obtenir un matériau résistant aussi bien à l'érosion qu'à l'abrasion.

1900 marqueurs en géopolymère de dimensions centimétriques ont d'ores et déjà été fabriqués en partenariat avec l'université de Limoges, pour être utilisés dans le cadre d'une étude sur l'archéologie des paysages menée en collaboration avec l'université de Lorraine. Ils ont été dispersés à proximité du futur emplacement de Cigéo, sur des versants mis en culture, et la mesure de l'amplitude de leurs déplacements sur une période de deux ans a permis d'évaluer leur mobilité à des échelles séculaires et millénaires.



[3] Les polymères sont des macromolécules constituées d'un enchaînement de molécules identiques, unies par des liaisons covalentes.
[4] Qui ne comportent pas de carbone.

LES CÉRAMIQUES

Moins poreuse que la terre cuite et quasiment étanche à l'eau, résistant à des températures élevées et inerte chimiquement, la céramique traditionnelle résulte de la cuisson à haute température d'un mélange d'argile et de sable.

Elle a été employée très tôt pour réaliser des objets décoratifs ou des ustensiles domestiques. Les plus anciennes céramiques connues sont celles de la période Jōmon au Japon, qui remontent à plus de 14000 ans avant notre ère et qui, à partir de 3000 ans, sont décorées de motifs et de scènes élaborées.

La porcelaine, qui date du VII^e^ siècle av. J.-C. en Chine, est obtenue à partir d'une argile très pure et blanche, le kaolin, qui est mélangée avec une silice quartzeuse et des feldspaths, l'ensemble étant cuit à des températures comprises entre 1250 et 1420°C. Des phases vitreuses (c'est-à-dire de structure proche de celle du verre) sont obtenues grâce à l'ajout de fondants, des additifs permettant de baisser le point de fusion du mélange.



Deux bols profonds, 11000-7000 av. J.-C., Jomon initial. Site de Hinamiyama à Yokohama-shi, préfecture de Kanagawa.

Apparue au IIIe siècle avant notre ère, la faïence est un produit céramique à pâte poreuse recouverte d'une composition vitrifiable (émail stannifère, composé principalement d'oxyde d'étain SnO_2) destinée à remédier à la porosité de la terre cuite.

Les céramiques funéraires sont toujours utilisées aujourd'hui pour marquer les tombes.

La famille des céramiques regroupe des matériaux très variés, confectionnés à partir de matières premières accessibles. Ils peuvent être très anciens et peu sophistiqués ou beaucoup plus techniques et dotés de propriétés spécifiques, dont une durabilité accrue. Leur point commun, et principal défaut, réside dans leur sensibilité aux chocs.



LA MÉMOIRE DE L'HUMANITÉ SUR CÉRAMIQUE

Le projet *Memory of Mankind* (Mémoire de l'humanité) est une initiative visant à créer une archive à long terme de l'histoire humaine dans une des plus anciennes mines de sel au monde, située à 2 kilomètres à l'intérieur de la montagne Plassen, à Hallstatt (Autriche). Berceau de la culture celte éponyme (1200 à 450 av. J.-C.), marqueur du premier âge du fer, le site est classé au patrimoine mondial de l'Unesco.

Conçu par l'artiste autrichien Martin Kunze, *Memory of Mankind* consiste à conserver, sur des plaques en céramique, des informations représentant différents aspects de la vie humaine, de la culture et de la technologie de notre époque.

Le projet se présente comme une réponse au caractère non durable et extrêmement énergivore des données stockées sur les supports informatiques. Sorte d'immense capsule temporelle composite qui a pour ambition de préserver ses archives pendant un million d'années, il mêle des informations institutionnelles à des archives privées, toutes fournies volontairement par leurs détenteurs, seulement tenus de justifier leur volonté d'archiver ces documents. On y trouve notamment la description de Cigéo, le futur centre de stockage géologique profond français de déchets radioactifs.

Tablettes en céramique représentant Cigéo, tenues par Martin Kunze, au cœur du Memory of Mankind.

Principe

Les informations sont imprimées sous forme de texte ou d'image sur des supports en céramique, un matériau durable, résistant à l'eau et aux attaques acides, ainsi qu'à une température de 1500 °C.

Deux techniques sont utilisées. La première repose sur des microfilms en céramique de 20 cm de large ; elle permet d'inscrire, par gravage laser, cinq lignes de texte par millimètre, lisibles avec une loupe grossissant dix fois. La seconde permet d'intégrer de la couleur, grâce au transfert d'une image préparée sur une imprimante classique.

Des indications pictographiques contenues dans *Memory of Mankind* permettront aux futurs découvreurs de ces tablettes de les déchiffrer.

Stade de développement

La société Cerabyte a amélioré le principe du microfilm céramique en utilisant une feuille de verre enrobée dans de la céramique. Les inscriptions sont réalisées grâce à un laser femtoseconde[5] à haute précision, ce qui augmente encore la densité d'information. Cerabyte développe actuellement le prototype d'une application commerciale, avec une vitesse d'écriture et de lecture de 10 Go (gigaoctets) par seconde.



Des jetons en céramique, comportant sur leurs deux faces des indications sur la localisation du Memory of Mankind, *sont remis aux personnes y ayant fait archiver des informations. Charge à elles de les préserver et de les transmettre, afin de sauvegarder, pour nos lointains descendants, ce témoignage de notre époque.*

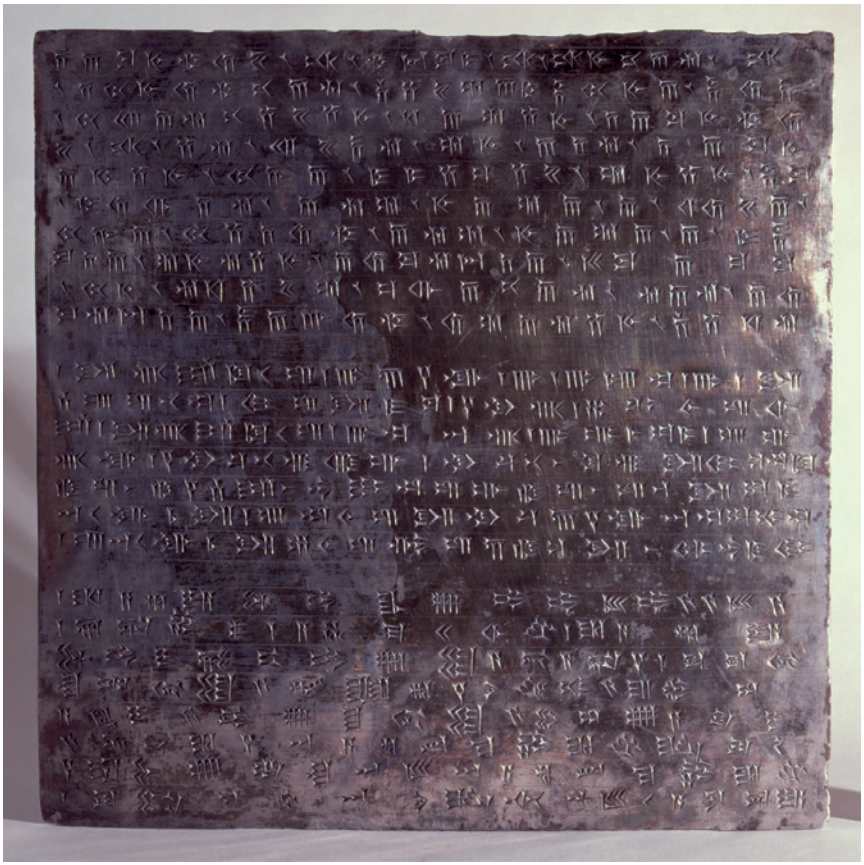
[5] Laser à impulsions très courtes (10-15 s) fournissant des puissances de pointe très élevées.

LES MÉTAUX

L'existence d'objets réalisés en cuivre natif, travaillé à froid ou à faible température, est attestée dès le VIIIe millénaire av. J.-C., au Proche-Orient. Le travail de l'or natif suit, dès le VIe millénaire. De même, le fer issu des météorites est utilisé au IVe millénaire en Égypte.
L'obtention de métaux par réduction du minerai à l'aide du charbon de bois bénéficie de l'art du feu, développé avec la cuisson de la céramique. Cette métallurgie avec fonte du minerai se développe dès le Ve millénaire av. J.-C., avec le cuivre dans l'actuelle Bulgarie, puis l'or et le plomb au Proche-Orient. Le bronze, alliage de cuivre et d'étain, apparaît au début du IIIe millénaire av. J.-C. au nord-ouest de l'Anatolie, et se développe surtout au cours du IIe millénaire, suivi par le travail du fer non météoritique.

Ces matériaux ont souvent été utilisés comme supports de gravures ou d'inscriptions diverses: pièces de monnaie, plaques de métal, en bronze ou en plomb. Des événements historiques, des mythes, des scènes artistiques et des épitaphes funéraires ont été ainsi gravés sur des surfaces métalliques. Des rouleaux de plomb inscrits ont notamment été découverts lors de fouilles archéologiques comme celles de Pech Maho, au sud de Narbonne. Ils étaient souvent utilisés à des fins religieuses ou symboliques.
Les métaux nobles étant onéreux en raison de leur rareté, un compromis économique a été trouvé avec le plaquage de matériaux nobles sur des supports moins coûteux comme l'acier.

Appréciés pour leur solidité à l'épreuve des chocs, les métaux présentent néanmoins deux défauts. D'abord, la plupart d'entre eux se dégradent quasi inexorablement sous l'effet de la corrosion (réaction d'oxydation). Certains métaux y sont cependant moins sujets: c'est le cas du cuivre, dont l'oxydation conduit à la formation d'une couche protectrice, et de l'or, qui ne s'oxyde pas. Par ailleurs, les objets métalliques sont susceptibles d'être refondus pour servir de matière première pour la fabrication de nouveaux objets, par exemple des canons en temps de guerre. Cette possibilité de recyclage fait peser un risque sur la longévité du métal en tant que support d'information.



Plaques de fondation de l'Apadana (Persépolis) gravées en caractères trilingues : vieux persan, élamite et babylonien, fin du VI^e siècle av. J.-C. (argent).



PAROLE D'EXPERT

Philippe Dillmann

Chercheur en archéomatériaux
Laboratoire archéomatériaux
et prévision de l'altération, CEA

Métal du passé et du futur

Les métaux nobles, tels que l'or, le platine et l'argent, ne s'altèrent pas, ou de manière négligeable. Ils sont thermodynamiquement stables dans des conditions d'enfouissement, et ne se corrodent quasiment pas. Ainsi, certains anciens artefacts en argent portant des inscriptions et datant de plus de 2000 ans avant notre ère nous sont parvenus.
Pour les aciers, les alliages ferreux et cuivreux, l'eau est une ennemie ; la corrosion dépend de la composition du milieu (acidité, teneur en oxygène), qui n'est généralement pas contrôlée dans les contextes archéologiques. Pour ces métaux et d'autres comme le plomb, il se forme une pellicule d'altération à leur surface. Dans de « bonnes » conditions, si cette couche est stable et reste intacte, les matériaux ne vont pas s'oxyder (ou de manière très lente). C'est le cas des aciers inox actuels. En revanche, pour certains d'entre eux, la présence d'un peu de chlore génère des piqûres, qui amorcent une corrosion locale plus poussée.

Grâce aux méthodes d'analyse physico-chimique et statistique que nous avons développées, nous avons étudié des matériaux archéologiques corrodés depuis leur abandon. Nous avons pu ainsi dater les métaux ferreux, et comprendre les réseaux d'échanges des objets dans les sociétés anciennes, de même que l'évolution des techniques de production. Les mécanismes de corrosion des objets archéologiques ont également été compris, et servent même à prédire le comportement des matériaux qui seront utilisés dans les siècles futurs.

LE VERRE

Le verre est produit dès le IIIe millénaire avant notre ère, en Mésopotamie et en Égypte, par fusion de la silice avec des cendres végétales ou du natron (soude minérale, carbonate de sodium) et de la chaux (oxyde de calcium). C'est un solide amorphe: sa structure n'est pas ordonnée, à la différence de celle des solides cristallins. En effet, au cours de son élaboration, le mélange qui le compose subit une trempe: il est refroidi rapidement, ce qui empêche sa cristallisation. En théorie, le verre est donc un «liquide surfondu métastable», mais sa vitesse de transformation extrêmement réduite le rend pérenne.



Christ de Wissembourg, *vitrail provenant probablement de l'abbatiale de Wissembourg (Bas-Rhin). Daté du XIe ou XIIe siècle, c'est le plus ancien vitrail figuratif intact au monde.*

Les Égyptiens et les Romains excellaient déjà dans la fabrication de petits objets en verre coloré. Mais c'est avec l'art du vitrail que le verre dépasse le statut de simple matériau ou d'élément décoratif, devenant un support riche en informations historiques, religieuses et sociales. Les plus anciens fragments de vitraux remontent au IXe siècle, comme une tête de Christ de l'abbaye de Lorsch, dans le Land de Hesse (Allemagne). Cette forme d'art religieux, typique de la chrétienté occidentale, perdure jusqu'à nos jours.

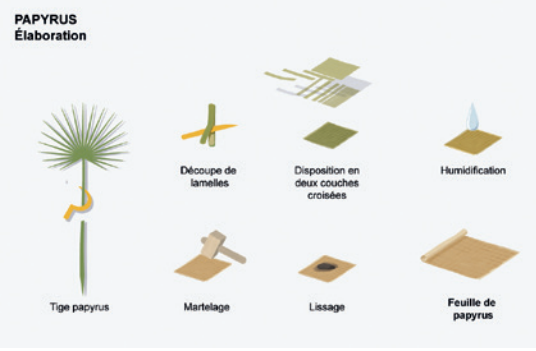
Le verre est fragile, cassant, et il s'altère avec le temps, selon sa composition et les conditions physico-chimiques de son environnement. Il a tendance à perdre sa transparence sous l'effet de diverses «pathologies»; par exemple, en ce qui concerne les vitraux calco-potassiques, le brunissement lié à l'oxydation du manganèse qu'ils contiennent. Des fouilles ayant exhumé des vitraux restés enterrés pendant plusieurs siècles ont également révélé la formation de fissures à leur surface.

LE PAPYRUS

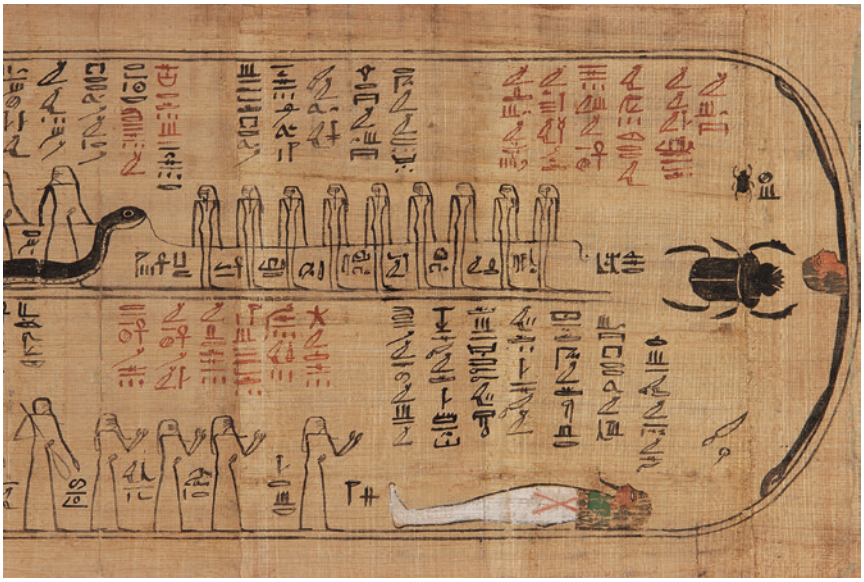
Le papyrus était couramment utilisé dans l'Égypte antique, les plus anciens exemples connus datant d'environ 2500 av. J.-C. Ce support de l'écriture hiéroglyphique était obtenu à partir de la plante aquatique éponyme, abondante dans la vallée et le delta du Nil, dont les feuilles servaient également à faire des cordes, des sandales ou des voiles.
En Chine et en Inde, des supports analogues ont été produits à partir d'autres fibres végétales.

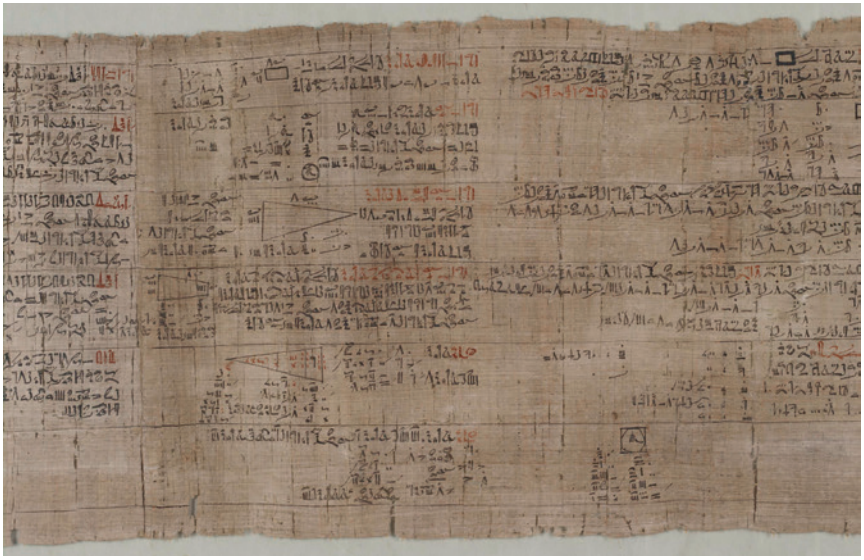
Pour peindre ou pour écrire des registres comptables, des inventaires et des textes littéraires ou religieux, les scribes utilisent des calames, baguettes de roseau d'une vingtaine de centimètres, taillées en pointe. L'encre est composée d'un mélange de suie, d'eau et soit de gomme arabique, une résine naturelle issue de l'acacia, pour le noir ; soit de poudre de cinabre (sulfate de mercure) ou de minium (oxyde de plomb), pour le rouge. Cette dernière couleur est réservée aux titres et annotations.

Le cas du papyrus illustre l'influence du support sur la forme du message. En effet, le papyrus a permis l'apparition de l'écriture hiératique, une forme d'écriture plus cursive que celle utilisée sur d'autres supports plus durs tels que la pierre, qui nécessitait l'écriture hiéroglyphique.



À partir de tiges de papyrus, on obtient des feuilles, qui sont ensuite liées ensemble pour former des rouleaux de plusieurs mètres de longueur, appelés volumen.





Livre des demeures secrètes sur papyrus, 1069-664 av. J.-C. Ce texte funéraire égyptien du Moyen Empire décrit, sous la forme d'une carte initiatique, le voyage du défunt à travers les régions secrètes de l'au-delà.

Le « Papyrus mathématique de Rhind », daté de 1550 av. J.-C., est probablement un manuel de mathématiques. Il comprend 84 problèmes avec des divisions, des multiplications et des calculs de fractions, ainsi que des exercices de géométrie, notamment sur les volumes et les aires.



Dans l'Antiquité et tout au long du Moyen Âge, la rareté des supports d'écriture conduit à la production de nombreux ouvrages palimpsestes : des manuscrits dont on a effacé les inscriptions antérieures afin de les réutiliser. Ici, le palimpseste d'Archimède, l'une des plus anciennes copies d'une œuvre du savant grec, réalisée vers le IXe ou Xe siècle à Constantinople. Au XIIe siècle, un moine racle le parchemin et remplace le texte originel par un recueil de prières. En 1906, l'historien danois Johan Heiberg découvre les textes d'Archimède sous le texte médiéval. Au XXIe siècle, l'imagerie multispectrale révèle complètement le texte originel, qui comprend des œuvres inédites.

LE PARCHEMIN

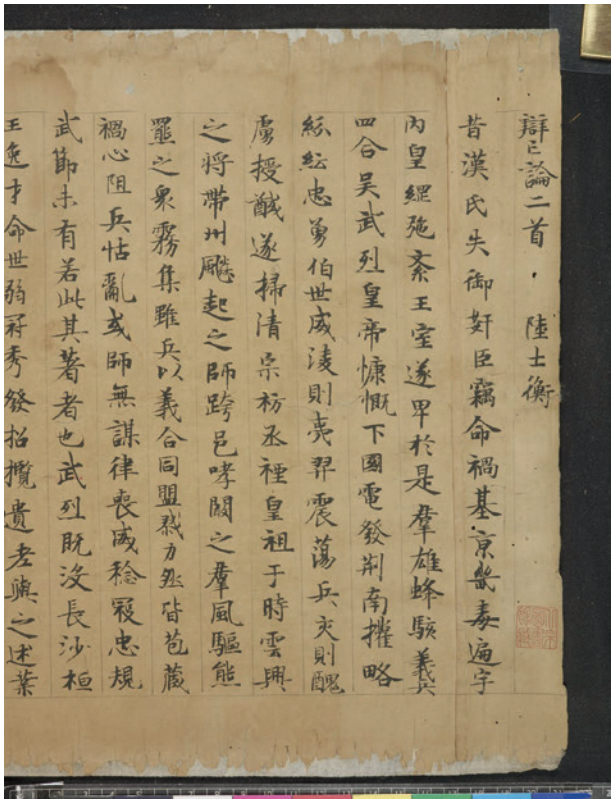
Produit à partir de peaux d'animaux, principalement de moutons, chèvres et veaux, le parchemin apparaît en Asie Mineure vers le IIe siècle av. J.-C. Sa fabrication implique un long processus : tendue sur un cadre de bois, la peau est décapée, polie, puis traitée à la chaux avant d'être découpée en feuilles. Plus solide et durable que le papyrus, le parchemin permet également des inscriptions sur les deux faces.
Les feuilles ont d'abord été cousues et enroulées. Plus tard, elles ont été réunies en volumes, appelés *codex*, qui préfigurent la forme moderne du livre. On écrivait à l'aide d'une plume d'oie taillée et d'encre. Il était possible d'effacer les écrits en grattant la surface pour réutiliser le parchemin.

L'utilisation du parchemin s'est répandue dans l'Empire romain et au Moyen Âge, en Europe et au Moyen-Orient, pour la copie de textes religieux, littéraires et juridiques, ainsi que pour la création de manuscrits enluminés. Son coût élevé et son volume relativement conséquent ont néanmoins fait obstacle à sa banalisation.

Magnifié notamment par les enluminures réalisées par les copistes, le parchemin est détrôné par le papier, plus facile et moins coûteux à mettre en œuvre.

LE PAPIER

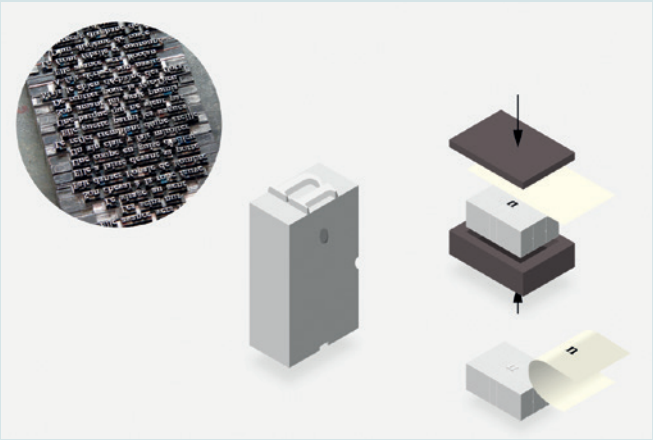
Fabriqué initialement à partir de fibres végétales, de chanvre, de bambou et d'écorces d'arbre, trempées et transformées en une pâte ensuite séchée, le papier a été inventé en Chine au IIe siècle avant notre ère. Il s'est répandu par la suite en Asie, avant d'être introduit au Moyen-Orient par les Arabes au VIIIe siècle. Après son introduction au XIIe siècle en Europe, les moulins à papier se sont multipliés. Le papier a en effet remplacé progressivement le parchemin, notamment grâce à Johannes Gutenberg, qui réinvente l'imprimerie en 1440. Produit en quantités de plus en plus importantes, c'est le support idéal du premier procédé de reproduction à grande échelle de l'écrit.



Ce manuscrit de la dynastie Tang (618-907) est écrit à l'encre sur du papier jaunâtre. Le rouleau contient une œuvre intitulée Sur la chute des États, *de Lu Ji (261-303), un écrivain de la dynastie Jin occidentale (265-419). Il fait partie d'une collection de manuscrits datant du IVe au XIe siècle qui a été découverte en 1900 dans la salle des sutras de la grotte de Mogao (Chine).*

L'IMPRIMERIE

Inventée en Chine, l'imprimerie a longtemps consisté à graver un texte en relief sur un support en bois, qui, une fois encré, servait à reporter ce texte sur du papier.
Vers 1455, l'inventeur allemand Johannes Gutenberg réunit les différents éléments qui vont conduire à une véritable révolution de la diffusion de l'écrit[6], permettant en particulier un gain de temps considérable par rapport au travail des copistes.
Ce procédé d'impression comprend des caractères mobiles, un pour chaque lettre, disposés sur des cadres adaptés pour composer le texte, ligne par ligne. Une fois encrés, ces caractères en métal sont soumis à la pression d'une presse à bras, qui permet la fixation de l'encre sur le support d'impression. Le succès fulgurant de ce procédé d'impression typographique doit beaucoup au papier, à la fois léger et résistant.
Par la suite, différents procédés d'impression sont mis au point. La lithographie, inventée par Aloys Senefelder en 1797, démocratise la reproduction de dessins à partir des années 1810. Elle utilise des pierres calcaires, sur lesquelles on applique un colorant gras, avant de les soumettre à l'action d'un acide. Les parties recouvertes par le colorant sont protégées de l'attaque par l'acide et apparaissent ainsi en relief, tandis que les parties non colorées ressortent en creux. L'encrage des zones en relief permet ensuite l'impression du papier. Des plaques métalliques fines se substitueront à la pierre dans la presse cylindrique (1811), invention qui conduit à l'apparition des rotatives (impression cylindre contre cylindre). La linotypie automatise la composition des lettres d'imprimerie (1844). Dans un premier temps, les caractères et les instructions de mise en page sont codés sous forme de perforations dans une carte. Celle-ci est ensuite lue par une machine qui fabrique des lignes-blocs en plomb. D'autres innovations sont issues d'applications de la photographie.



Les caractères mobiles sont fabriqués en métal, généralement en alliage de plomb, d'antimoine et d'étain, et coulés dans des moules appelés matrices. Ils sont assemblés dans un cadre pour former des mots, des lignes et des pages de texte. Cette étape est appelée la composition typographique. Les caractères assemblés sont ensuite encrés uniformément. Une feuille de papier est pressée contre les caractères encrés, ce qui transfère l'encre et imprime le texte sur la feuille. Ce processus peut être répété de nombreuses fois pour produire plusieurs copies de la même page. Une fois l'impression terminée, les caractères peuvent être nettoyés, réarrangés, et réutilisés pour imprimer d'autres pages ou documents.

[6] Ce procédé typographique à caractères mobiles en métal semble avoir été inventé en Corée au XIII[e] siècle.

Aux XVII^e^ et XVIII^e^ siècles, le développement des machines à papier industrielles a permis une production plus rapide et à grande échelle. Au XIX^e^ siècle, des progrès techniques ont conduit à la production de pâte à papier à partir de bois plutôt que de chiffons. Le bois est devenu ainsi la principale matière première de la fabrication du papier à travers le monde, et il le reste encore aujourd'hui. Peu onéreux et standardisé, notamment dans ses dimensions et son grammage, le papier continue d'être à ce jour un support essentiel, même s'il est concurrencé par les technologies numériques et les écrans.

La conservation des ouvrages en papier doit faire face à différents périls, tels que l'humidité, le feu, le rayonnement ultraviolet, ou encore les assauts de champignons, d'insectes ou de rongeurs. C'est pourquoi les archives papier sont fréquemment conservées à l'abri de la lumière, et parfois manipulées avec des gants qui évitent la contamination par la sueur. Le risque le plus insidieux provient de la dégradation des pages (jaunissement, effritement) due à l'utilisation de composés acides dans les procédés de fabrication, principalement à partir du XIX^e^ siècle. Cette situation a conduit à l'établissement d'une norme encadrant la composition d'une gamme de papier, dit permanent.

LE PAPIER PERMANENT

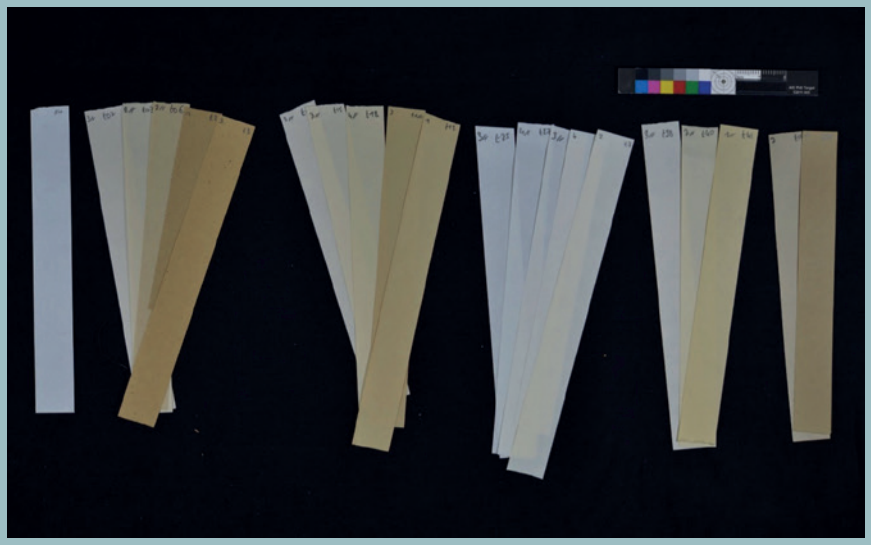
Le papier ordinaire est sujet à une détérioration causée notamment par l'acidification, qui peut conduire au jaunissement et à la fragilisation des pages. Il en résulte une durée de vie allant de quelques décennies à quelques centaines d'années dans des conditions standard d'archivage (contrôle de l'hygrométrie et de la température, obscurité).
Défini par la norme internationale ISO 9706, le « papier permanent » est au contraire conçu pour durer dans le temps sans se dégrader. Il doit être fabriqué à partir de cellulose pure, être exempt de lignine pour résister à l'oxydation, comporter une réserve alcaline (telle que des grains de carbonate de calcium), et avoir une bonne résistance à la déchirure. Cette propriété lui est conférée par ses fibres de haute qualité, plus longues que celles employées pour le papier classique. Son pH est basique (de 7,5 à 10), alors que les papiers courants affichent une acidité destructrice à long terme.

Durabilité du papier permanent

L'Andra, le Muséum national d'Histoire naturelle et l'École nationale supérieure des arts et métiers ont encadré une thèse destinée à estimer la durabilité du papier permanent, durabilité qui n'est pas précisée dans la norme ISO 9706.



La docteure Caroline Vibert livre son témoignage sur ses travaux: « L'étude de la durabilité du papier permanent est complexe, car elle nécessite d'accélérer artificiellement les phénomènes de vieillissement, en soumettant les échantillons de papier à des températures supérieures à celle de l'air ambiant. En effet, d'après la loi d'Arrhenius, plus la température est élevée, plus la vitesse d'une réaction chimique augmente. Quelques précautions doivent toutefois être respectées: une trop forte augmentation de la température pourrait provoquer des réactions qui ne peuvent pas se produire à température ambiante (comme, dans des cas extrêmes, une combustion spontanée). Les températures choisies pour cette étude se situaient donc entre 50 et 90 °C. Le papier permanent a été placé dans des étuves contrôlées en température, en humidité, et en atmosphère (car l'oxygène de l'air joue également un rôle dans la dégradation). On a ainsi obtenu une large base de données de papiers vieillis pendant différentes durées et sous différentes conditions d'exposition.
Les échantillons de papier permanent vieillis artificiellement ont alors été analysés afin de déterminer l'état de dégradation de la cellulose (principal composant des fibres végétales du papier), le degré d'acidification, le taux de consommation de la réserve alcaline, la fragilisation du papier. Toutes ces données ont permis de paramétrer un modèle chimique du vieillissement, et, par résolution numérique, d'évaluer les vitesses, à différentes températures, des réactions chimiques contribuant à la dégradation du papier. En extrapolant leur



Bandes de papier permanent vieillies à 90 °C.
De gauche à droite : papier témoin ; exposition sous air à 50 % d'humidité relative pendant 2, 4, 10, 25 et 50 semaines ; exposition sous azote à 50 % d'h.r. pendant 2, 4, 10, 25 et 50 sem. ; exposition sous air à 0 % d'h.r. pendant 2, 4, 10, 25 et 50 sem. ; exposition sous azote à 0 % d'h.r. pendant 10, 25 et 50 sem. ; exposition sous air à 90 % d'h.r. pendant 10 et 25 sem.

cinétique à température ambiante, la vitesse de dégradation totale du papier en conditions d'archivage a pu être calculée.
Les résultats de cette étude permettent d'ores et déjà d'affirmer que le papier permanent se dégrade dix fois moins vite qu'un papier basique de coton sans additifs lorsque les deux sont soumis à une température de 90 °C, et que sa durabilité, en conditions standard d'archivage, est de plus de 5000 ans. »

Le papier permanent, qui constitue à ce jour la solution de référence adoptée par l'Andra pour l'impression de ses dossiers de mémoire réglementaires, apparaît ainsi comme une solution aussi prometteuse que facile à mettre en œuvre. Des études complémentaires sont néanmoins envisagées, notamment pour estimer la durabilité du couple papier permanent – encre.



En cuivre plaqué or, les disques Sounds of Earth *ont été emportés par les sondes Voyager 1 et 2, lancées en août et septembre 1977.* *Voir page 66.*

DE L'ANALOGIQUE AU NUMÉRIQUE

Au XIX^e siècle, des inventions remarquables permettent, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, de fixer directement les images « réelles », puis le son. Parallèlement, l'informatique émerge, d'abord sous forme mécanique, puis elle triomphe au XX^e siècle grâce à l'électronique. Ces domaines requièrent de nouveaux matériaux, tels que les matières plastiques et les semi-conducteurs, qui s'imposent aux côtés des matériaux traditionnels. De plus, des procédés complexes deviennent nécessaires non seulement pour enregistrer les données, mais aussi pour y accéder.

Les procédés dits « analogiques » représentent les phénomènes physiques tels que le son ou la lumière par des grandeurs continues.

L'ère inaugurée par l'avènement de la photographie et de l'enregistrement sonore est marquée par de nouveaux procédés qui permettent de capter le son et l'image, de les fixer sur un support, et de les reproduire. Qu'ils soient optiques, chimiques, mécaniques ou électriques, ces procédés sont dits « analogiques », car ils représentent les phénomènes physiques, tels que le son ou la lumière, par des grandeurs continues qui sont en correspondance directe avec ces phénomènes. Par exemple, dans l'enregistrement phonographique, la largeur du sillon gravé sur le disque varie en fonction des propriétés des vibrations sonores enregistrées (amplitude, fréquence). Dans le domaine de la photographie, l'obscurcissement du film est lié à l'éclairement du support photosensible. Pour les supports magnétiques, la grandeur physique mise en jeu est l'aimantation de la surface du support.

Une autre approche est également en germe au XIXe siècle. En effet, depuis la pascaline, calculatrice inventée par Pascal en 1645, des dispositifs mécaniques sont d'abord utilisés pour faire des additions, puis des opérations arithmétiques de plus en plus complexes. Les procédés mécanographiques tirent parti du principe de l'automatisation du métier à tisser Jacquard pour traiter des informations statistiques saisies sur des cartes perforées. Ces systèmes sont cependant lourds et complexes. Par ailleurs, le concept de machine analytique, imaginé par Charles Babbage dans les années 1830-1840, préfigure l'ordinateur. Ada Lovelace, qui s'y intéresse, produit en 1843 ce qui est considéré comme le premier programme informatique de l'histoire.

L'électronique, qui utilise d'abord des tubes à vide avant de passer au transistor, apporte beaucoup de souplesse à cette discipline naissante, et permet de dépasser les limites des cartes perforées. Elle est secondée par d'autres technologies, notamment optiques, pour le stockage de données de plus en plus volumineuses. Avec l'avènement de cette ère numérique, texte, son, image fixe et animée sont traités à la même enseigne : l'information et ses supports deviennent « multimédia ».



LES CARTES PERFORÉES

Dérivé du papier, le carton est, sous forme de cartes perforées, le support utilisé aux débuts de l'automatisation mécanique et du traitement de l'information. Les premières cartes perforées ont en effet été inventées au début du XIXe siècle pour automatiser le fonctionnement du métier à tisser Jacquard. La présence ou l'absence de trous sur la carte, ainsi que leurs positions, représentent des instructions que la machine exécute à l'aide de systèmes mécaniques. Les cartes perforées trouvent des applications à la fin du XIXe siècle pour le traitement mécanographique de l'information : recensements, statistiques, etc. Les premiers ordinateurs fonctionnent ainsi avec des cartes perforées, qui codent aussi bien les données que les programmes. Les cartes perforées sont utilisées en informatique jusque dans les années 1970, et dans d'autres domaines, tels que la correction d'examens, jusqu'aux années 1990, avant d'être remplacées par des supports plus performants, à la fois en termes de densité de stockage et de rapidité d'accès.

Carte perforée à 80 colonnes.

LE SON : DU CYLINDRE AU DISQUE

On doit à l'inventeur français Édouard-Léon Scott de Martinville d'avoir créé, en 1857, le *phonautographe*, un appareil capable d'effectuer, à l'aide d'une pointe métallique, des tracés représentant la modulation des ondes sonores sur du papier noir. Même si ce dispositif ne permettait pas initialement de reproduire le son enregistré, il fascinait en matérialisant en particulier les inflexions de la voix humaine. En outre, il a été récemment possible, grâce aux technologies modernes, de retranscrire des enregistrements d'époque à partir de ces tracés, lesquels constituent ainsi la première trace du son d'une voix humaine.

En 1877, Charles Cros redécouvre que les vibrations sonores peuvent s'inscrire dans la matière, et décrit le principe du phonographe. Mais c'est l'inventeur américain Thomas Edison qui réalise, la même année, le premier appareil capable d'enregistrer et de reproduire le son, à l'aide d'un diaphragme et d'un stylet gravant des rainures sur un cylindre de cire. La lecture s'effectue grâce à un stylet transmettant ses mouvements à une membrane vibrante et à un cornet amplificateur.

Le cylindre est remplacé par un disque plat comportant des sillons en spirale dans le gramophone, imaginé en 1887 par Émile Berliner, un inventeur germano-américain. Ce format a fini par devenir la norme pour les enregistrements musicaux. Les premiers disques étaient en zinc recouvert de cire. D'autres matériaux sont utilisés par la suite, tels le shellac – aussi appelé gomme-laque, issu de la sécrétion d'une cochenille asiatique – et, plus tard encore, le polychlorure de vinyle, qui est devenu le matériau standard pour les disques jusqu'à l'ère numérique. Dans les années 1920, l'utilisation de transducteurs électriques lors de l'enregistrement améliore nettement la qualité sonore. L'apparition du microsillon allonge la durée d'enregistrement à 20 minutes, au lieu de 3 minutes pour les 78 tours.
Le procédé du disque microsillon, s'il retrouve aujourd'hui un public de nostalgiques du son analogique, est victime de sa lecture mécanique : les frottements de la pointe de lecture entraînent inévitablement une usure du support.



PAROLE D'EXPERT

Jalal Aro

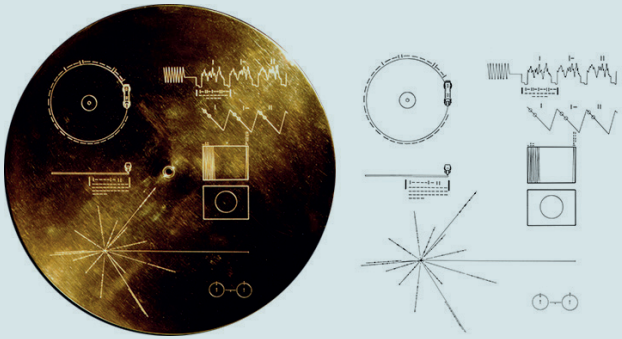
Directeur du PHONO Museum Paris

Les premiers enregistrements sonores ont été réalisés à des fins scientifiques. L'ère commerciale démarre avec le phonographe d'Edison, qui ouvre la voie à l'industrie du disque, inventé par Berliner en 1887.
Les marchés étaient très limités à cette époque, d'autant que les appareils d'écoute étaient mus par l'électricité plutôt que par des ressorts, lesquels sont apparus en 1894. Le principal secteur utilisateur était la bureautique. Il faut se souvenir qu'au moment de l'apparition des premières radio-tourne-disques, la plupart des foyers étant dépourvus de prise, l'électricité était obtenue par branchement sur les douilles des lampes. Toutefois, dès 1910, il existait déjà pléthore de marques pour vendre des disques, telles que Parlophone, Odéon, Aérophone, 20nophone, Fonotipia, Agfa, etc.
Les évolutions successives sont bien connues : après le disque, le compact-disque, puis la dématérialisation, et enfin le retour du disque vinyle, désormais en tant que simple « objet ».
Curieusement, dans toute cette évolution, un inventeur est souvent oublié alors qu'il a réalisé quelque chose d'extraordinaire ; il s'agit du danois Valdemar Poulsen. En 1888, il mit au point le télégraphone, un dispositif comportant un fil métallique qui enregistre et restitue le son par électromagnétisme. La qualité était superbe. Valdemar Poulsen a notamment enregistré la voix de l'empereur François-Joseph d'Autriche, qu'il est toujours possible d'entendre.

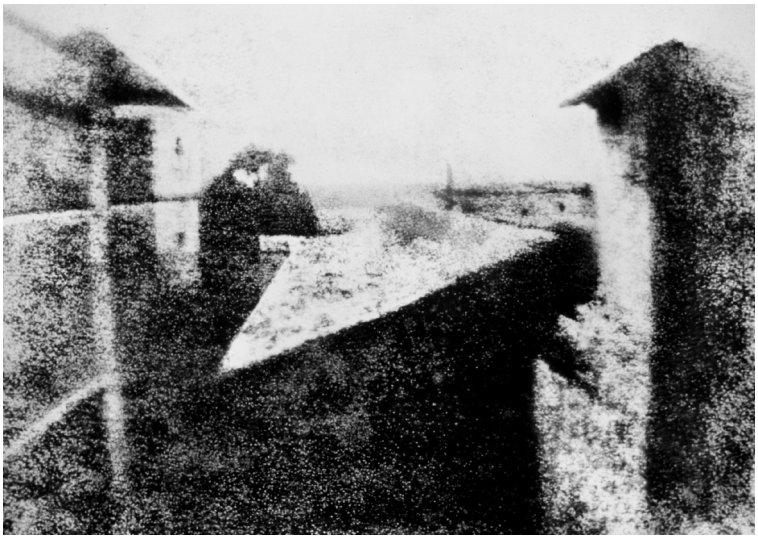
LE GOLDEN RECORD

Chacune des sondes spatiales Voyager 1 et 2 contient un «message» gravé sur un disque de cuivre plaqué or de 30 cm de diamètre, destiné à d'éventuelles intelligences extraterrestres.

Le disque comprend des images et des sons encodés de manière analogique – comme sur un disque vinyle, mais avec une gravure et une précision bien supérieures: des salutations en 55 langues, 35 sons de la vie sur Terre (comme les chants de baleines, les rires, etc.), 90 minutes de musique, principalement occidentale, allant de Mozart et Bach à Chuck Berry et Blind Willie Johnson, 115 images de la vie sur Terre, et des salutations enregistrées par le président américain de l'époque, Jimmy Carter (1924-2024), et le secrétaire général de l'ONU de l'époque, Kurt Waldheim (1918-2007).
Ce disque est capable de durer des centaines de millions d'années dans l'espace interstellaire. La fine couche d'or qui le recouvre le protège des radiations et de la corrosion.
La pochette du disque est en aluminium anodisé, un revêtement en uréthane protégeant l'ensemble.
Elle comporte un échantillon d'uranium 238 permettant de dater le lancement de la sonde. Des informations sont gravées sur ses faces interne et externe, en prévision de l'érosion de la face externe. Il s'agit de symboles qui indiquent la position de la Terre par rapport à plusieurs pulsars servant de repères astronomiques, ainsi que d'instructions expliquant comment lire le disque à l'aide d'une cartouche et d'une aiguille (qui sont fournies). Le but est de permettre à n'importe quelle intelligence avancée de décoder le message.



Enveloppe en aluminium doré, conçue pour protéger les disques Sounds of Earth *des sondes Voyager 1 et 2, lancées en août et septembre 1977.*



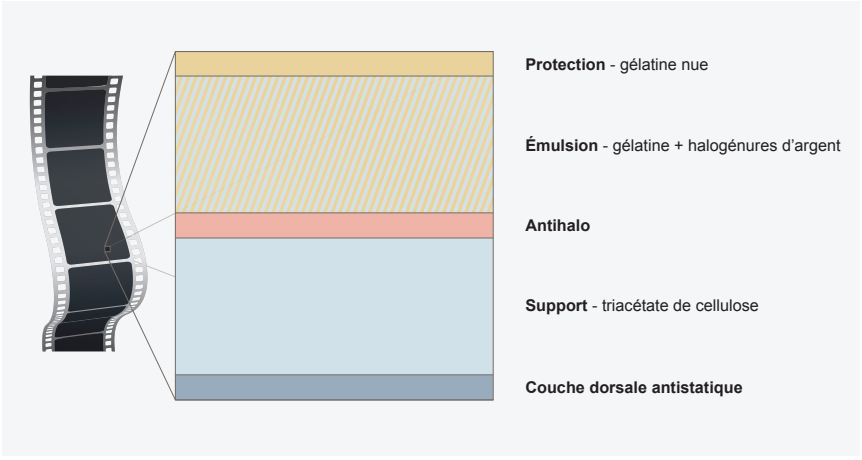
Vue de la fenêtre du domaine du Gras, *à Saint-Loup-de-Varennes (Saône-et-Loire), Nicéphore Niépce (1827). Première photographie permanente jamais réalisée.*

LA PHOTOGRAPHIE

La possibilité de noircir un support recouvert de nitrate d'argent en l'exposant à la lumière était connue depuis la fin du XVIII[e] siècle. La difficulté était alors d'interrompre ce processus pour fixer l'image obtenue. Après de nombreuses expérimentations, Nicéphore Niépce réussit à obtenir, dès 1816, un négatif sur papier recouvert de nitrate d'argent. Finalement, c'est sur une plaque d'étain recouverte de bitume de Judée qu'il réalise, vers 1822, la première photographie, qui reproduit une nature morte. En 1838, Louis Daguerre réduit le temps de pose à quinze minutes en utilisant comme support des plaques de cuivre argentées traitées avec de l'iode, du sel marin et du mercure. Ce daguerréotype connaît un tel succès que l'invention est acquise par le gouvernement français, qui en fait don à l'humanité via un brevet versé dans le domaine public. En réalité, le procédé argentique d'impression sur papier sensible à partir d'un négatif semble devoir plus au *calotype* de William Henry Fox Talbot. Son avantage de taille sur le daguerréotype est de permettre des tirages à l'infini. Le procédé est ensuite amélioré pour arriver au papier fin recouvert d'une émulsion à la gélatine, technique plus ou moins conservée jusqu'à nos jours.

Ainsi, les matériaux utilisés sont successivement des plaques de verre enduites de collodion humide et des pellicules en nitrate de cellulose (années 1880-1950) ou en triacétate de cellulose (années 1920-1950) recouvertes d'une émulsion de gélatine et d'halogénures d'argent. Du fait de son instabilité, le triacétate de cellulose est finalement supplanté par le polyester (PET).

La stabilité chimique intrinsèque de ce matériau confère aux supports l'utilisant une durée de vie théorique de 500 à 1000 ans en stockage froid (température inférieure à 15°C). En noir et blanc, l'image, constituée d'argent métallique dans une matrice de gélatine, est extrêmement stable. Les films restent toutefois sensibles à l'humidité élevée, aux polluants acides et à la lumière. Une humidité relative comprise entre 20 et 30% est requise, ainsi qu'une atmosphère filtrée. Le stockage s'effectue dans des boîtes inertes.



Coupe d'une pellicule. Le film argentique est essentiellement composé d'un support, typiquement du polyester, sur lequel est déposée une couche de gélatine contenant en suspension des halogénures d'argent sensibles à la lumière. Une couche anti-abrasion protège l'émulsion de l'agression mécanique des poussières. Après développement, l'image est formée par des dépôts d'argent métallique.

Avec la photogravure (1852), puis l'héliogravure (1890-1895), qui mêlent photographie et lithographie, les procédés photographiques se marient à l'imprimerie et conduisent à une véritable révolution.

Le principe de la photogravure est analogue à celui de la lithographie. Tout d'abord, on applique le document transparent servant de « matrice » sur un support recouvert d'un colloïde[7] (à l'origine de l'albumine et de la gélatine, puis des résines synthétiques telles que l'alcool polyvinylique). Celui-ci est bichromaté, ce qui le rend photosensible. L'insolation de ce « sandwich » provoque le durcissement du colloïde sous les zones transparentes du document, alors que, sous les zones sombres, le colloïde reste en solution et peut donc être éliminé. On crée ainsi des zones dont la surface dépend du document source, ce qui permet ensuite de reproduire ce dernier en encrant les motifs en relief, avant de le reporter sur du papier. La spécificité de l'héliogravure est d'utiliser des plaques métalliques cylindriques, gravées à partir de films transparents comme dans le procédé de photogravure.

[7] Mélange homogène dans lequel des substances minuscules restent uniformément en suspension dans une autre substance.

LE STOCKAGE LONGUE DURÉE SUR PELLICULES

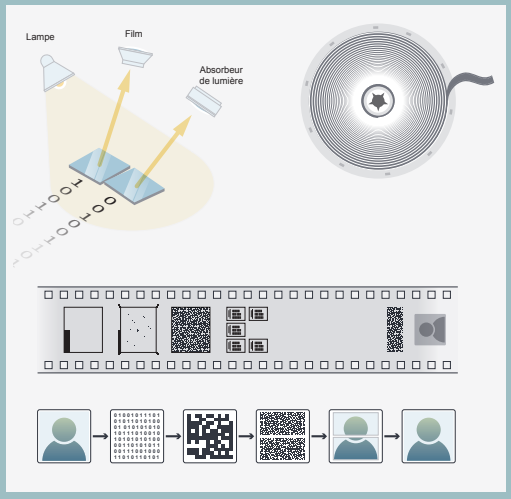
Une solution innovante d'archivage consiste à intégrer une application numérique sur pellicule photographique.

Principe

Le support est un film en polyester enduit d'une émulsion gélatineuse contenant de microscopiques cristaux d'halogénure d'argent. La photosensibilité de l'halogénure d'argent permet de fixer des images avec une définition de 4096 x 2160 pixels. Dans des conditions adéquates (température peu élevée, air sec, obscurité), les pellicules peuvent se conserver pendant au moins 500 ans, en résistant aux rayonnements ionisants et aux impulsions électromagnétiques.
L'information est encodée sous forme d'images, par exemple des QR codes, sur quatre niveaux de gris. Cela conduit, pour une pellicule de 35 mm, à une capacité de stockage de 120 Go (gigaoctets). Des contenus analogiques peuvent être fixés, dont des instructions pour le décodage, qui peuvent être vues à la loupe ou au microscope optique.
La technologie de décodage étant *open-source*, toute personne disposant d'un scanner d'images peut récupérer les données. Ce procédé n'engendre aucune perte d'information, ni pendant la durée de stockage, ni lors de la récupération des données.
Des machines dédiées permettent de fixer les données sur le film avec une vitesse d'écriture élevée, environ 40 Mo (mégaoctets) par seconde. Le cœur du système est un dispositif qui impressionne des pixels sur le film, en fonction de la valeur des données élémentaires (0 ou 1), créant ainsi un code-barres bidimensionnel représentant les données à archiver. Des machines de lecture restituent les données sources.

Maturité de la technologie

Cette technologie proposée par la société norvégienne PIQL est d'ores et déjà employée par des institutions telles que le *Norwegian Defence Research Establishment* ou encore l'*Arctic World Archive*, un stockage destiné à accueillir la mémoire du monde enfoui à 300 m sous terre, dans une mine située sur l'archipel du Svalbard (Norvège).

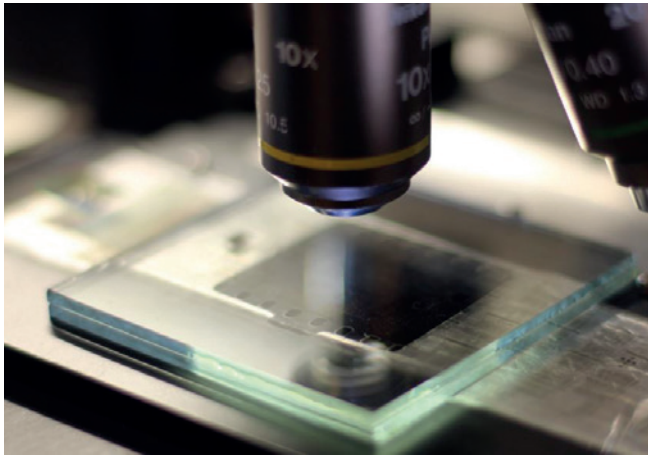


L'information numérique est codée sur le support photosensible sous forme visuelle, par exemple sous forme de code-barres bidimensionnel.

LE MICROFILM

Le film photographique argentique trouve une application pour l'enregistrement de l'information sous forme d'images : c'est le microfilm. Son invention est attribuée au photographe britannique John Benjamin Dancer. Il est l'un des premiers à créer des microphotographies dans les années 1850.

Le document original est photographié de sorte que les images soient réduites à une échelle microscopique. Elles sont ensuite enregistrées sur un film photosensible. Les documents, appelés microformes, peuvent être consultés grâce à des appareils de lecture qui agrandissent les images. Le film peut également être développé pour produire des copies positives ou négatives.
Au XX^{e} siècle, le microfilm est devenu un support courant pour la conservation des archives. La Bibliothèque nationale de France (BnF) a ainsi longtemps opté pour ce type de support pour donner accès à ses collections. Toutefois, depuis 2010, elle a mis en place un programme de numérisation et d'archivage numérique.



Lecture de microfilms grâce à une optique permettant d'agrandir les documents archivés pour les consulter. Cette technique a longtemps été utilisée pour les journaux, manuscrits et archives historiques.

Le microfilm est une technologie encadrée par un grand nombre de normes, qui régissent les caractéristiques physiques des supports, la taille et la disposition des images, la qualité d'enregistrement et de duplication, le conditionnement, ainsi que les matériels de production et d'exploitation. S'ils sont fabriqués conformément à ces normes et conservés dans de bonnes conditions, les microfilms perdurent au-delà d'un siècle, voire de plusieurs siècles. Le polyester, qui s'est imposé comme support des émulsions gélatino-argentiques, a contribué à allonger la durée de vie des pellicules photographiques, et donc des microfilms. Les conditions de stockage doivent respecter une température inférieure à 20 °C et une hygrométrie de l'ordre de 50 %. Des variations trop rapides ou fréquentes de la température et de l'humidité relative peuvent générer des craquelures et un décollement de la gélatine. La manipulation des microfilms requiert également des précautions: l'acidité de la peau et l'apport de poussières sont susceptibles d'endommager les supports. C'est pourquoi il est recommandé de manipuler les microfilms avec des gants de coton.

Les microfilms, tout comme les pellicules photographiques développées (négatifs), ont une durée de vie potentielle de plusieurs centaines d'années, s'ils sont conservés dans des conditions favorables.



PAROLE D'EXPERT

Christophe Massié

Directeur général de Netgem France

La vidéo et ses formats d'archivage

Jusque dans les années 60, les pellicules de film, qui contenaient de la nitrocellulose, étaient très inflammables. C'est pourquoi les archives de ces époques sont actuellement conservées par le Centre national de la cinématographie (CNC) à l'intérieur d'anciens forts.

Depuis, le constituant principal des pellicules est devenu, après l'acétate de cellulose, le polyester, un matériau nettement plus stable que la nitrocellulose. Néanmoins, sa conservation exige des conditions contrôlées : une température d'environ 15 °C et une hygrométrie de 35 % ± 5 %.

Le cinéma argentique est un domaine dans lequel les originaux (négatifs) sont déclinés en différents formats permettant la diffusion des œuvres. Ainsi, dans les années 90, on trouvait le négatif monté, un internégatif, un interpositif, des copies positives, qui allaient dans les salles de cinéma, des masters vidéo pour les chaînes de télévision, des DVD *glassmaster* destinés à la production de DVD ou de cassettes VHS, etc. L'évolution du domaine n'a donc pas été dans le sens de la simplification, avec au contraire une obsolescence de plus en plus rapide des différentes technologies.

Du matériel professionnel est nécessaire pour traiter ces différents formats, pour les lire et pour les restaurer. Il faut également veiller au phénomène d'obsolescence technologique pour anticiper les migrations inévitables vers le standard actuel, c'est-à-dire le numérique.

Afin de ne conserver que ce qui doit l'être, un tri s'impose. Les fichiers originaux des films numériques représentent environ 15 To (téraoctets), soit bien plus que ce qui est nécessaire pour les projeter dans une salle de cinéma en 4K, et 100 fois plus que ce qui est requis pour les plateformes VOD. Les fichiers qui circulent ne sont donc pas les mêmes que les originaux. Il faut noter que la BnF est chargée, dans le cadre du dépôt légal, de recueillir et de conserver les vidéogrammes autres que ceux fixés sur un support photochimique, c'est-à-dire les supports vidéo, DVD, et numériques ; le CNC étant chargé de recueillir et de conserver les films cinématographiques exploités en salles.

Actuellement, le CNC impose aux producteurs une durée de conservation de cinq ans pour les œuvres audiovisuelles dématérialisées. Toutefois, ne serait-ce que pour garantir les intérêts des ayants droit, cette durée est souvent prolongée. Cette conservation fait l'objet de contrats entre les producteurs et des sociétés spécialisées dans la préservation des œuvres.



Service des bandes magnétiques du Centre national de données océanographiques (NODC), États-Unis.

LES SUPPORTS MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRONIQUES

L'invention des bandes magnétiques dans les années 1930 a permis l'enregistrement et la reproduction de haute qualité du son. Les vibrations sonores y sont enregistrées via l'aimantation du matériau support. Dès les années 1940, les bandes magnétiques sont utilisées comme supports de stockage des données dans les premiers systèmes informatiques. D'abord en acier, elles utilisent rapidement du plastique souple recouvert d'une mince couche magnétique, constituée en général de cristaux d'oxyde de fer ou d'oxyde de chrome enrobés dans un liant, à la manière des pigments dans une peinture.

Ce type de support sert encore aujourd'hui à l'archivage et à la sauvegarde informatiques : ce sont les bandes LTO (*Linear Tape-Open*) dont sont équipés les centres de données. Les données – jusqu'à 90 To (téraoctets) par cartouche en compressé, 30 To en non compressé – y sont inscrites en une piste continue en accordéon, des têtes de lecture/écriture déplaçant la bande pour accéder aux différentes pistes. La durée de vie de ces supports pourrait dépasser les 50 ans, selon certains constructeurs[8] , avec des coûts d'exploitation limités, et l'avantage d'être plus difficiles à pirater que les disques durs.

[8] https://www.fujifilm.com/fr/fr/business/data-management/datastorage/ltotape

Les disques durs sont des supports magnétiques qui ont été introduits dans les années 1950-1960. Ils utilisent des plateaux magnétiques rotatifs pour stocker des données auxquelles on accède grâce à des têtes de lecture/écriture. Autre type de disque magnétique, la disquette (autrefois aussi appelée disque souple) est un support amovible inventé en 1971, couramment utilisé jusque dans les années 1990 pour le stockage et le transfert de données, avant d'être rendu obsolète par sa faible capacité.

Les semi-conducteurs ont révolutionné l'électronique, et en particulier le domaine des mémoires électroniques, dans lequel ils ont supplanté les tubes à vide, notamment grâce à leur miniaturisation. Grâce au niveau d'intégration toujours croissant de leurs composants élémentaires, les transistors, les performances de ces mémoires n'ont cessé de s'améliorer jusqu'à nos jours. Ces composants fournissent des mémoires volatiles dont le contenu est effacé en l'absence d'alimentation, et des mémoires permanentes qui conservent leurs données hors tension.
Les mémoires à accès aléatoire sont des mémoires volatiles utilisées par les ordinateurs : les DRAM (*Digital Random Access Memory*) et SRAM (*Static Random Access Memory*), caractérisées par un temps d'accès très réduit, autrement dit un débit élevé, de l'ordre de 10 Go (gigaoctets) par seconde. Elles sont utilisées pour le traitement de l'information par les programmes, et non pour sauvegarder des données à long terme. Par ailleurs, il existe des mémoires dites mortes, qui peuvent être seulement lues, à l'instar des EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), programmables et effaçables électriquement, utilisées aujourd'hui dans divers appareils comme les cartes à puce, les microcontrôleurs et les systèmes d'amorçage des ordinateurs.

Les mémoires permanentes sur semi-conducteur sont les mémoires flash ou SSD (*Solid State Drive*), dans lesquelles les données sont représentées sous forme de charges électriques statiques. Leurs débits sont de l'ordre de 600 Mo/s. Par rapport aux disques durs, l'absence de pièces mécaniques réduit le risque de défaillance et l'échauffement. Les SSD présentent plusieurs autres avantages : une vitesse de lecture/écriture plus élevée, une résistance aux chocs accrue, une consommation d'énergie réduite, et une durée de vie plus longue. En revanche, elles sont limitées en termes de cycles d'écriture/lecture (avec une limite indicative, pour un téraoctet de capacité, de l'ordre de 600 à plusieurs milliers de téraoctets écrits avant usure).

Depuis les années 1990, les chercheurs travaillent sur des mémoires magnétorésistives rapides et non volatiles, les MRAM (*Magnetic Random Access Memory*), capables de stocker de l'information en utilisant la direction du spin, une propriété quantique de la matière. Si cette technique pèche actuellement par sa lenteur, elle pourrait finir par s'imposer, grâce aux progrès actifs de la recherche dans ce domaine.
Les mémoires électroniques ont rendu l'information reproductible à l'infini, tout en permettant d'atteindre une densité d'information inédite. De plus, avec le développement des réseaux, l'information semble de plus en plus « dématérialisée ». En réalité, elle est hébergée dans des centres de données (*data centers*), dont les capacités globales de stockage augmentent de manière exponentielle à l'échelle du monde. Par exemple, en 2025, le volume de données créées ou répliquées devrait atteindre un record de 175 zettaoctets (milliards de téraoctets), contre 0,1 zettaoctet en 2005[9] .
Ce développement colossal s'accompagne d'une consommation énergétique effrénée, de l'ordre de 400 TWh par an, qui soulève l'enjeu de la disponibilité des ressources.
Un autre aspect rédhibitoire dans une perspective de préservation d'informations sur le long terme est l'obsolescence technique de ces supports électroniques. En effet, leur fonctionnement requiert un environnement technique – logiciel et appareils – de même génération, ou des technologies compatibles. Or, cette compatibilité n'est pas assurée d'une génération à une autre, y compris pour des appareils du même constructeur.
Pour un stockage sur le long terme, il faut également noter que les mémoires électroniques sont sensibles aux rayonnements cosmiques dont la surface terrestre est en permanence inondée. Les supports magnétiques sont par ailleurs intrinsèquement instables. Ils subissent en effet l'influence des champs magnétiques externes, tels que ceux créés par le magnétisme terrestre ou ceux des moteurs électriques. Par ailleurs, il est recommandé de les maintenir dans des conditions optimales de température (de 18 à 25 °C) et d'humidité, surtout pour une utilisation courante.

Ces constats révèlent un risque, celui de l'« âge sombre du numérique » (*digital dark age*) : si nous nous reposons uniquement sur ces technologies, une grande partie de l'information produite au XXIe siècle pourrait être perdue.

[9] Source : IDC

LES SUPPORTS HYBRIDES : LA SOLUTION MICR'OLONYS

Principe

Même si les solutions disponibles commercialement pour la sauvegarde de données informatiques ne correspondent pas aux exigences de conservation d'informations sur le long terme, le numérique conserve un intérêt évident. Il présente des avantages en termes de compacité et de densité de stockage. Il permet également de structurer les données de manière bien plus souple qu'un contenu purement séquentiel.
La combinaison de l'analogique et du numérique offre alors une voie hybride de stockage des données. Il s'agit de transcrire des données numériques sur des supports physiques classiques (papier, céramique, etc.), plus durables et moins sensibles à l'obsolescence.
Reste à fournir aux utilisateurs du futur la recette pour reconstituer l'ensemble des informations. C'est la voie choisie par la société Eupalia, promotrice de la solution Micr'Olonys.

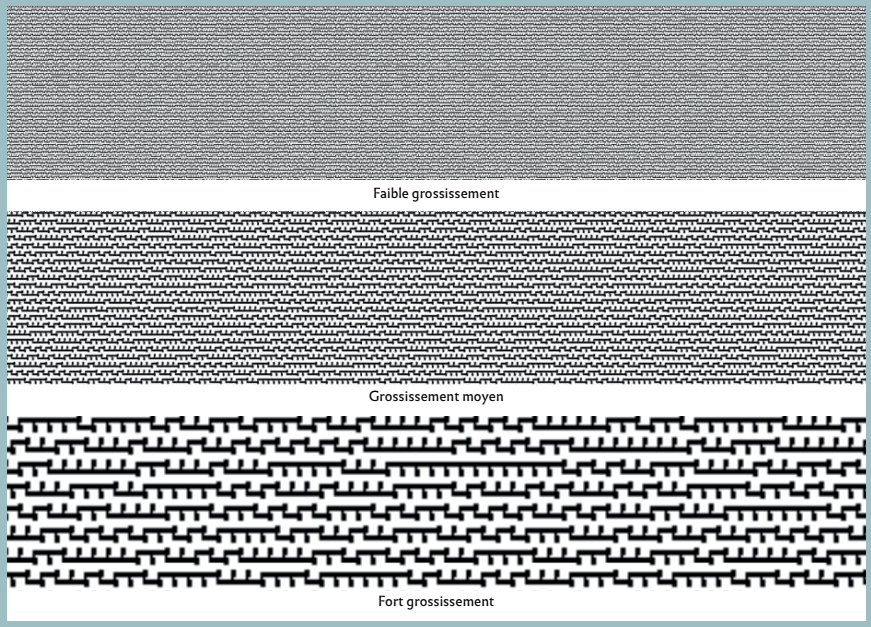
Mise en œuvre

La solution Micr'Olonys consiste à :

- transcrire des données numériques (textes, base de données, etc.) sur un support pérenne (papier, papier permanent, microfilm et éventuellement céramique) sous forme d'emblèmes (sortes de code-barres bidimensionnels en noir et blanc), après avoir compressé ces données et y avoir intégré des redondances pour pallier d'éventuelles pertes partielles d'information ;
- permettre à l'utilisateur du futur de reconstituer ces données, grâce à une amorce, imprimée sur le même support que les emblèmes : cette amorce fournit, en langage clair, les indications pour reconstituer, via un algorithme simple, l'environnement informatique (machine virtuelle) permettant de lire les données stockées sous forme d'emblèmes.

La problématique de l'obsolescence des environnements informatiques est ainsi contournée, puisque c'est l'utilisateur du futur qui reconstitue, au sein de son environnement informatique du moment, une machine virtuelle rigoureusement identique à celle mise en œuvre lors de la transcription. La seule condition est de disposer d'un système informatique généraliste doté de suffisamment de mémoire (environ 70 Mo), ainsi que d'un équipement de numérisation d'images, de type scanner A4 (la transcription reste théoriquement possible « à la main », mais serait alors extrêmement laborieuse).

La durabilité des informations ainsi transcrites est donc exclusivement liée à celle du support physique choisi. De plus, la forme optique des emblèmes et leur aspect répétitif, au sein d'un même emblème comme d'un emblème à l'autre, autorise leur restauration en cas de détérioration légère (petites taches, zones devenues trop sombres ou trop claires physiquement ou après numérisation, déformations du papier, etc.).



Exemple d'emblème après impression puis numérisation en format TIF, à des grossissements croissants.

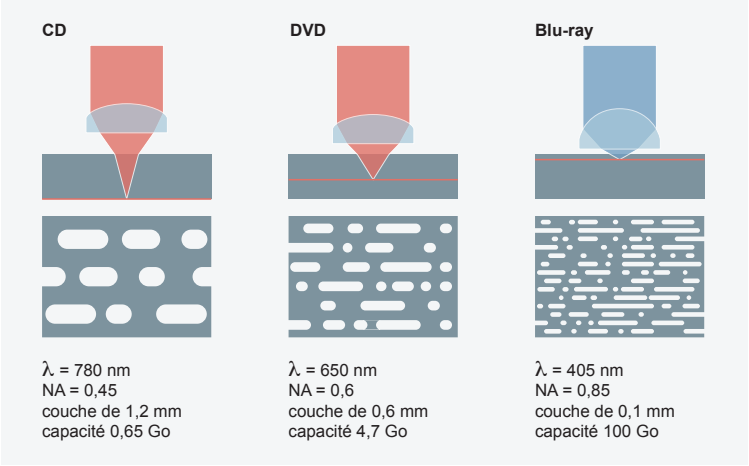
Maturité

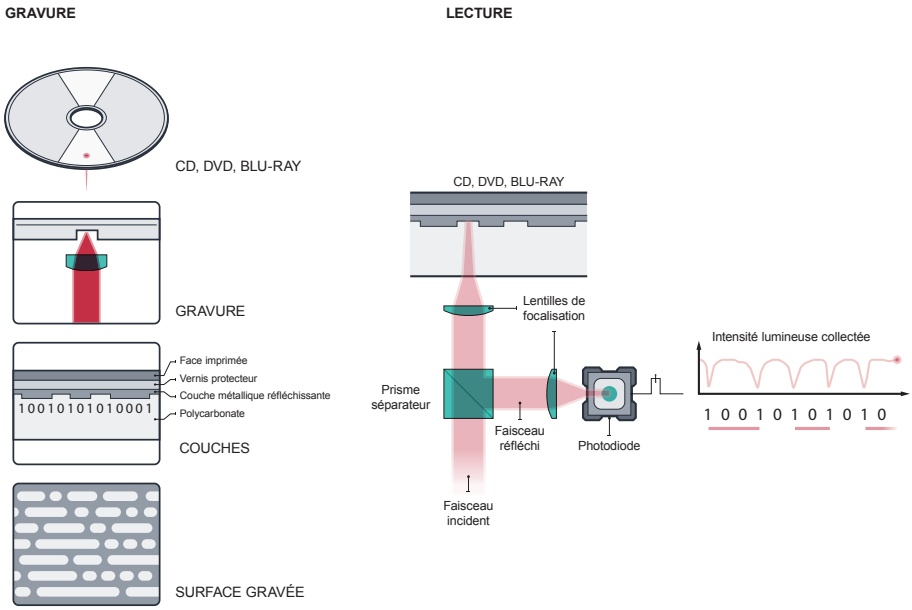
Développée par la société Eupalia, la solution Micr'Olonys a fait l'objet d'essais à l'Andra. Les données radiologiques des colis du Centre de stockage de la Manche ont été transcrites par Micr'Olonys et imprimées sur papier permanent, produisant un document de 464 pages, au lieu du million de pages qu'aurait nécessité l'impression sous forme de texte en clair. Le test de reconstitution des données, mené à l'aveugle par un stagiaire et une ingénieure en informatique n'ayant aucune connaissance préalable de Micr'Olonys, s'est avéré concluant. Par ailleurs, des tests menés par Eupalia et l'Andra, avec le soutien de la BnF, de Progeima, de Studia Solutions et du Centre des Archives d'EDF de Bure, ont permis d'adapter Micr'Olonys à une impression sur microfilm.

LES SUPPORTS « OPTIQUES »

Le laser (acronyme de « *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ») a ouvert la voie à diverses applications de stockage de l'information, du fait de la précision et de la puissance du faisceau lumineux qu'il émet. L'avantage de ces procédés de gravage et de lecture est d'être sans contact, ce qui élimine les frottements et leurs inconvénients (usure, échauffement, etc.). Les mémoires à lecture laser sont les supports dits optiques, tels que les disques compacts (CD), CD-ROM, DVD, Blu-ray, etc.
Ce sont généralement des mémoires mortes, même s'il existe des supports réinscriptibles.

L'enregistrement optique repose sur la gravure et la lecture de motifs, réalisées à l'aide d'un laser, au sein des matériaux constituant les supports optiques : une succession de couches de polymères (polycarbonate), de métaux réfléchissants et de couches de protection. Le faisceau laser crée des zones avec des changements physiques (des creux ou des bosses par exemple), qui représentent les données sous forme de bits (0 ou 1). Lors de la lecture, un laser balaie la surface du disque et détecte ces changements par réflexion de la lumière. Ces informations lumineuses sont converties par une photodiode en signaux électriques, interprétés comme des données numériques. Ce processus permet de stocker et de récupérer des données numériques de manière fiable et efficace.





Ces supports optiques ne sont pas exempts de facteurs limitant leur durée de vie. Ils sont sensibles à l'humidité, en raison de la superposition de couches de matériaux et de la possibilité d'infiltration d'eau entre celles-ci. Par ailleurs, les supports optiques enregistrables sont sensibles à la lumière. Il reste toutefois la possibilité d'appliquer les techniques de gravage optique sur des supports plus résistants.

LE CRISTAL MÉMOIRE DE SUPERMAN

La technologie *Superman Memory Crystal* ou « stockage optique 5D » permet d'archiver des informations sur un disque de quartz, plus précisément de « verre de silice ». La haute stabilité mécanique, thermique et chimique de cette forme vitreuse du quartz permet d'envisager des durées de conservation extrêmement longues pour l'information stockée : de l'ordre de la dizaine à la centaine de milliers d'années.

Principe de fonctionnement

Les données sont gravées au sein du matériau par un laser « femtoseconde », qui émet des impulsions extrêmement brèves d'un millionième de milliardième de seconde, puissantes grâce à la concentration de l'énergie lumineuse, et dont la précision permet de jouer à la fois sur la taille des motifs nanométriques gravés et sur leur orientation.

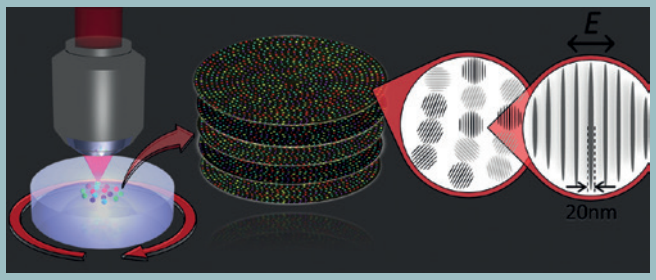
Le support élémentaire de l'information est un petit volume appelé voxel, capable de contenir une quantité d'informations équivalente à un octet, en stockant les données sur cinq dimensions : trois spatiales et deux « optiques » (taille de gravure et orientation du motif gravé).

Compte tenu du nombre de voxels disponibles dans le disque, la capacité de stockage pourrait être de 360 téraoctets par disque. La lecture s'effectue à l'aide d'un microscope associé à un filtre polariseur. Les vitesses de lecture et d'écriture des premiers prototypes, de l'ordre d'une vingtaine de kilooctets par seconde, restent très faibles en comparaison avec les vitesses courantes actuelles, d'environ 2 à 3 gigaoctets par seconde.

Maturité de la technologie

Imaginée par des chercheurs de l'université de Southampton et expérimentée pour la première fois en 2013, la technologie Superman Memory Crystal a permis l'enregistrement de la *Déclaration universelle des droits de l'homme*, de l'*Optiks* d'Isaac Newton, de la *Magna Carta* et de la *Bible*.

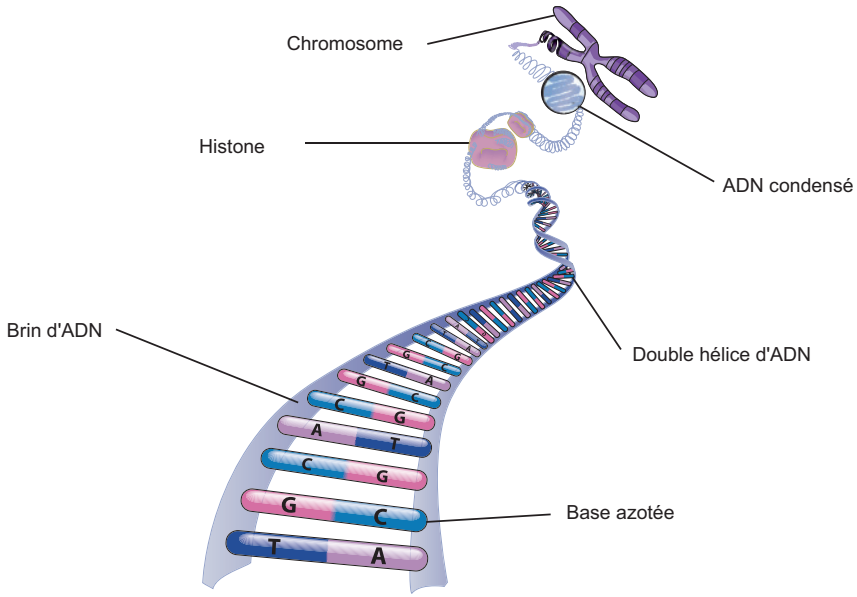
Avec son projet Silica[10], Microsoft développe un système d'archivage reposant sur le même principe. Le débit de lecture atteint en 2023 est compris entre 30 et 210 mégaoctets par seconde, ce qui pourrait être compatible avec une fonction d'archivage, l'intérêt de cette technologie résidant dans sa robustesse, sa durabilité et sa densité de stockage élevée : 1,59 gigaoctets par mm^3 (2026).



Le stockage optique est effectué dans des volumes élémentaires en faisant jouer la taille de la gravure et l'orientation du motif gravé.

[10] https://www.microsoft.com/en-us/research/project/project-silica/

ADN ET PATRIMOINE GÉNÉTIQUE

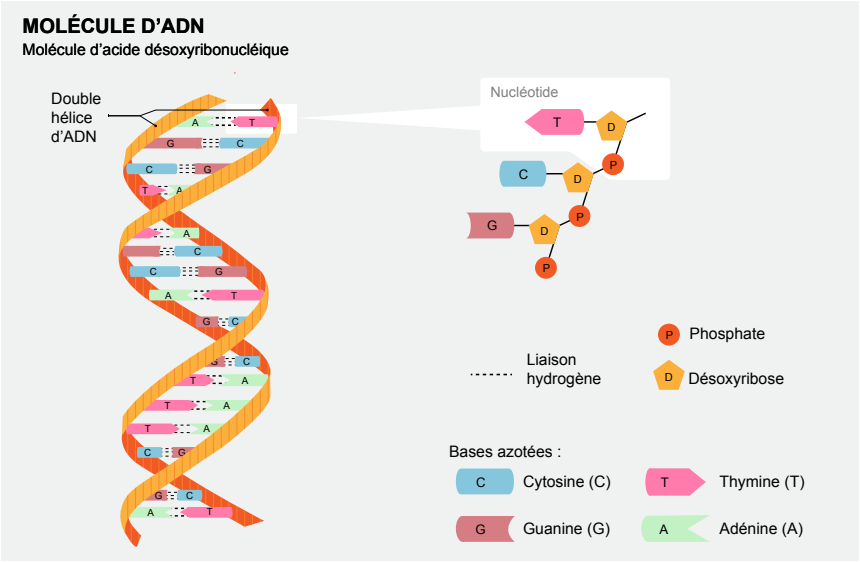


Le chromosome est une structure en forme de bâtonnet située dans le noyau des cellules. Il est composé de longues molécules d'ADN étroitement enroulées autour de protéines appelées histones. L'ADN, ou acide désoxyribonucléique, est la molécule qui contient le code génétique de l'organisme. Il est constitué de deux brins enroulés en une double hélice.

LES SUPPORTS BIOLOGIQUES

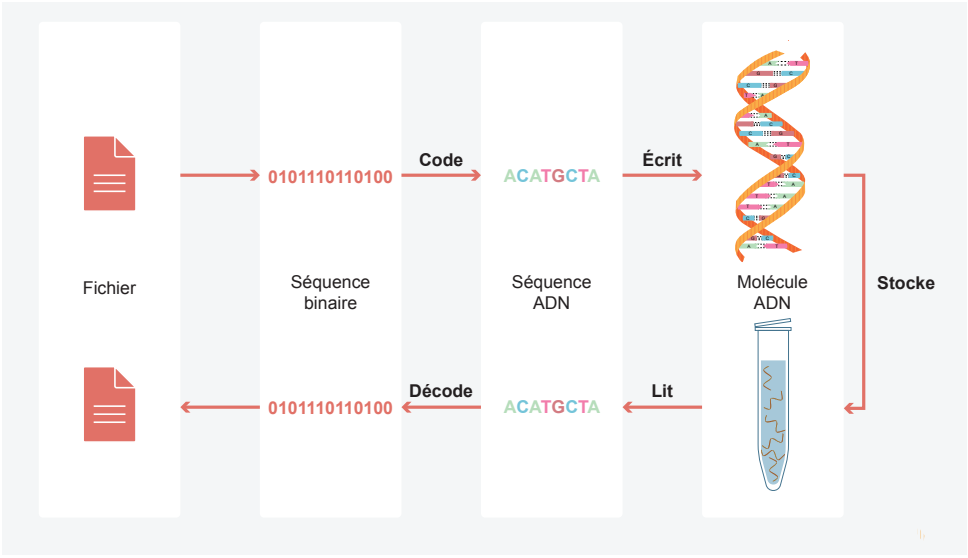
Le stockage de données sur l'ADN *in vitro* exploite la structure et les propriétés de cette macromolécule servant de support universel à l'information génétique.

Le principe consiste à coder des données numériques via la synthèse artificielle de molécules d'ADN. Une séquence déterminée de ses constituants élémentaires, les bases A, C, G et T, représente une information numérique donnée (voir illustration). Les données numériques à conserver (textes, images, etc.) sont constituées de suites de 0 et de 1 aisément transposables en A, C, G ou T.



Avec sa structure en double hélice, l'ADN est un support de l'information génétique. Les nucléotides sont les unités de base qui composent l'ADN. Chaque nucléotide est constitué de trois composants :
- un sucre, le désoxyribose ;
- un groupe phosphate, qui forme le squelette de l'ADN en se liant au sucre du nucléotide suivant ;
- une base azotée, partie variable du nucléotide.
Il existe quatre types de bases azotées dans l'ADN : l'adénine (A), la thymine (T), la cytosine (C) et la guanine (G). Les bases azotées s'associent par paires pour former les « échelons » de l'échelle de la double hélice, selon des règles de complémentarité strictes : l'adénine s'apparie toujours avec la thymine (A-T) ; la cytosine s'apparie toujours avec la guanine (C-G). Les deux brins de la double hélice sont maintenus ensemble par des liaisons hydrogène entre les bases azotées appariées :
- deux liaisons hydrogène entre l'adénine et la thymine ;
- trois liaisons hydrogène entre la cytosine et la guanine.

Concrètement, des appareils dédiés assemblent successivement les nucléotides portant les bases souhaitées pour former des brins d'ADN, le plus souvent longs de quelques dizaines à deux cents paires de bases, appelés oligonucléotides. L'information est répartie sur plusieurs brins d'ADN. Elle est reconstituée à la lecture, la restitution de l'information se faisant par séquençage de l'ADN et interprétation des séquences obtenues.



Le codage en binaire des fichiers numériques est converti en suite de bases ADN (A, T, C, G) selon des règles précises. Cette séquence est synthétisée et stockée sous forme moléculaire. Pour lire les données, la première étape est le séquençage de l'ADN, suivi de la conversion de séquence des bases en binaire, avant de reconstituer le fichier original grâce à des algorithmes de correction d'erreurs.

La technologie DNA DRIVE de la société Biomemory, issue du CNRS, utilise non pas des oligonucléotides (brins d'ADN relativement courts), mais des très grandes molécules d'ADN double brin, biocompatibles, ce qui leur permet d'être copiées et multipliées par génie génétique. De plus, elles sont biosécurisées, afin de ne porter aucune information génétique potentiellement dangereuse pour l'être humain ou pour l'environnement. Les molécules d'ADN peuvent être stockées de différentes manières, notamment par voie sèche sur du papier, ou en solution dans un tube plastique ou une capsule métallique. L'ADN est une molécule très stable, capable de garder son intégrité pendant des milliers d'années, lorsqu'elle est à l'abri de l'air, de la lumière et de l'eau. Ainsi, le génome d'un mammouth vieux de 1,6 million d'années a été suffisamment conservé dans le pergélisol pour être décrypté.

L'immense avantage de l'ADN est la densité de stockage d'information inédite de 200 pétaoctets par gramme qu'il permet d'envisager, environ dix millions de fois supérieure aux mémoires disponibles actuellement. Toutefois, la technique de synthèse de l'ADN reste aujourd'hui très coûteuse et lente : l'encodage d'un document peut nécessiter plusieurs jours, et sa lecture plusieurs heures.



PAROLE D'EXPERT

Marc Antonini

Directeur de recherche CNRS,
directeur de programme du PEPR MoleculArXiv

L'ADN a fait la preuve de sa longévité, à condition d'être conservé dans des conditions adéquates à l'abri de la lumière, de l'eau et de l'oxygène. C'est donc un support d'information à la fois pérenne et compact.

Même si la technologie ADN permet de stocker de grandes quantités de données, elle est actuellement limitée par sa faible vitesse d'écriture (de 5 à 10 kbit par seconde). L'objectif de la recherche et développement est d'accélérer l'écriture d'un facteur 100 d'ici trois à quatre ans (1 Mbit/s), et encore d'un facteur 100 dans la décennie suivante, ce qui permettra au stockage sur ADN de concurrencer les disques durs et les bandes magnétiques.

Un autre enjeu est de pérenniser les standards de formatage et de codage/décodage pour que, dans cent ans, voire plus, on soit capable de les réimplémenter et de décoder des informations. En effet, une fois lues à l'aide de séquenceurs, les données numériques doivent être décodées grâce à des algorithmes appelés codeurs/décodeurs ou codec. Le codage est indispensable, ne serait-ce que pour passer de l'information numérique binaire à l'information quaternaire correspondant aux quatre types de bases de l'ADN. Il permet également de limiter le bruit lié au processus biochimique de synthèse et à son amplification par PCR (*Polymerase Chain Reaction*), qui consiste à cloner les molécules avant la lecture.
En outre, l'ADN synthétique ne comprenant que de 200 à 300 nucléotides, les fichiers numériques doivent être répartis sur plusieurs molécules d'ADN. Le support ADN est donc composé d'une « soupe » d'une centaine de milliers, voire de millions de molécules. Un autre type de redondance est ajouté à l'information par les indispensables codes de correction d'erreur. Par ailleurs, à l'instar de ce qui est utilisé pour les supports informatiques binaires, un adressage moléculaire est mis en œuvre afin d'éviter de séquencer tout un centre de données pour retrouver un fichier.
La compression est aussi très importante, car il est indispensable, sur un plan technico-économique, de prendre en compte l'augmentation continue des quantités de données produites et échangées dans nos sociétés.

Toutes ces méta-informations peuvent être intégrées sur des mémoires informatiques, mais, au-delà d'une période de 20 ans de stockage, pour des raisons de pérennité, ces informations seraient elles aussi stockées sur des molécules. Un autre type d'information doit être associé aux données stockées : il s'agit d'indiquer que l'on a affaire à de l'ADN synthétique. La réglementation qui se met en place prévoit un marquage. Elle se penche également sur les questions liées au formatage et au processus de synthèse, pour éviter de produire des séquences qui pourraient coder par inadvertance du matériel génétique dangereux, notamment viral.

En cours de développement pour atteindre des performances économiques compatibles avec un déploiement à grande échelle, le stockage sur ADN promet une densité de stockage extrêmement importante, ce qui en fait une technologie de rupture. Il suppose toutefois que les utilisateurs du futur disposent d'une technologie de séquençage.

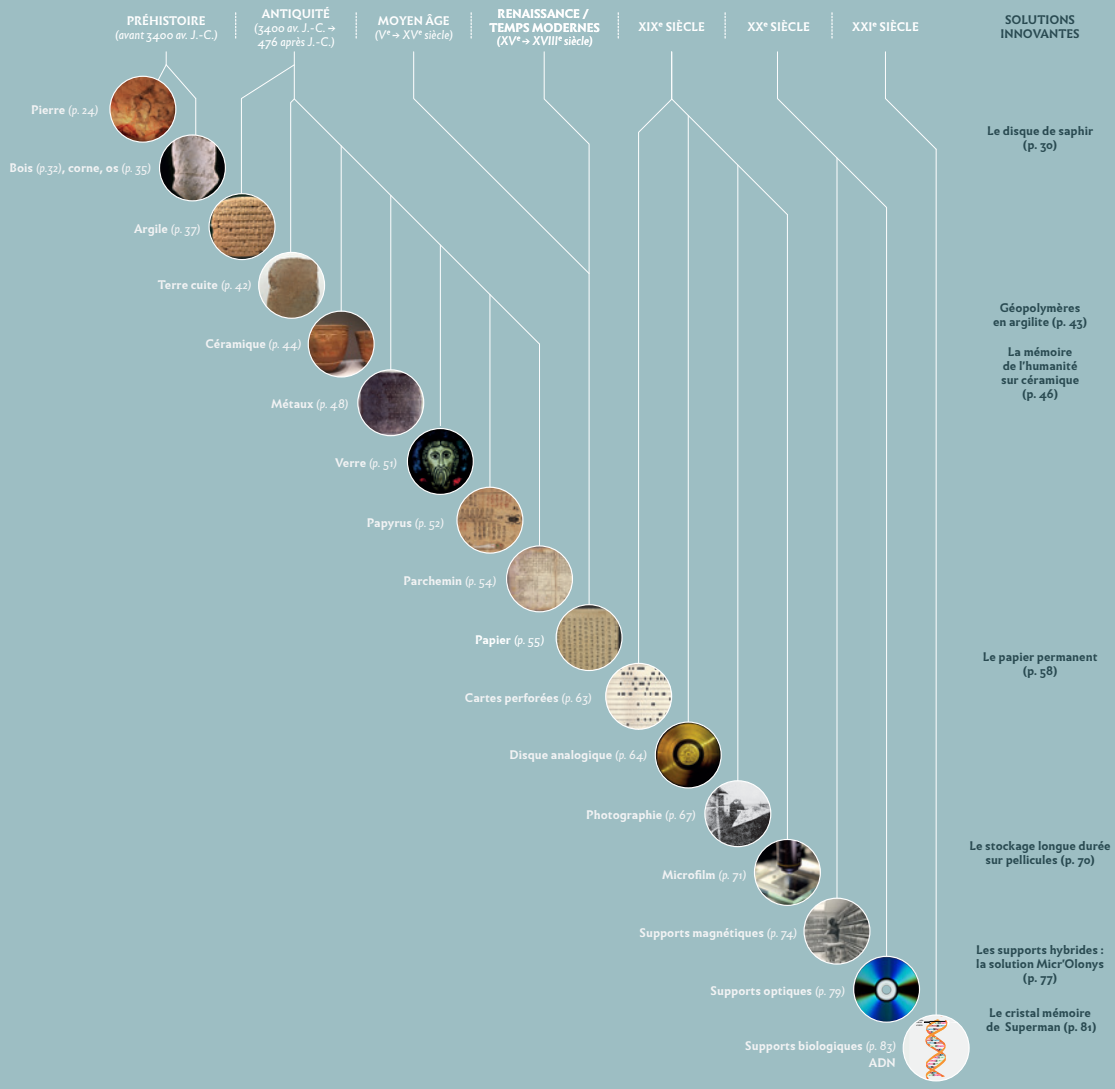


Ces capsules d'aluminium contiennent de l'ADN de synthèse sur lequel ont été encodées la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen (1789) et la Déclaration des droits de la femme et de la citoyenne (1791). Elles sont conservées aux Archives nationales.

PRÉSENTATION

ÉTUDE

CONCLUSIONS



Chronologie du déploiement des différents supports.

CONCLUSIONS

L'être humain n'a cessé de façonner et de perfectionner les matériaux susceptibles d'accueillir des messages, et de développer des techniques permettant d'inscrire et de restituer ces derniers. De la pierre aux supports numériques, en passant par les métaux, les céramiques ou le papier, la diversité des innovations offre un large éventail de caractéristiques : durabilité, résistance aux agressions de tout ordre, densité d'information, facilité d'accès.

Si tous les matériaux ne combinent pas tous ces atouts, les exemples présentés dans cet ouvrage attestent néanmoins que la recherche de supports durables, y compris sur de très longues périodes, ne constitue pas un obstacle insurmontable. L'alliance de matériaux a priori rudimentaires et de technologies contemporaines ouvre des perspectives inédites en matière de densité de stockage, ainsi que de résistance aux altérations sur des durées dépassant amplement plusieurs siècles ou millénaires. Une durabilité qui fait écho aux enjeux de préservation à long terme de la mémoire des centres de stockage de déchets radioactifs.

Pour autant, la pérennité des supports de l'information ne saurait garantir à elle seule la transmission de cette mémoire. Car ces supports, aussi robustes soient-ils, n'assurent ni la diffusion active d'un message ni sa compréhension. Les vestiges du passé, tout comme les techniques contemporaines, soulignent la fragilité de l'accès à l'information : dépendance à des outils de lecture, à des formats, à des ressources extérieures, à des langages, ou encore à des contextes culturels qui évoluent rapidement.

Pour l'Andra, ces constats conduisent à déplacer le regard. Le principal défi ne réside pas dans le choix de supports pérennes, mais dans la capacité à concevoir des messages qui pourront être transmis, compris et interprétés sur le temps long, par un destinataire inconnu, évoluant dans un futur incertain.

Dans cette perspective, les travaux de l'Andra explorent divers mécanismes de transmission : redondance des informations ; diversité des modes d'expression, des langues aux symboles ; articulation entre dispositifs matériels et médiation humaine. Il ne s'agit pas seulement de conserver une information, mais de créer les conditions de sa réactivation.

Références bibliographiques

ABITEBOUL, Serge ; DOWEK, Gilles, *Le temps des algorithmes*, Paris, Le Pommier, 2017.
BARBIER, Frédéric, *Histoire du livre*, Paris, Armand Colin, 2012.
BERRY, Gérard, *Petite histoire de l'informatique*, Paris, Le Pommier, 2019.
CHARPIN, Dominique, *Lire et écrire à Babylone*, Paris, Presses universitaires de France, 2008.
CHAIX, Louis. La corne, du néolithique à l'âge du bronze. In: *Des ivoires et des cornes dans les mondes anciens* (Orient - Occident). Béal, Jean Claude & Goyon, Jean-Claude (Ed.). Paris: De Boccard, 2000. p. 29–31. (Collection de l'Institut d'archéologie et d'histoire de l'Antiquité Université Lumière Lyon 2).
CHAMUSSY, Clothilde, PACOTTE, Lucas, *Archéologie*. Paris: Hachette Livre ; 2024.
DOWEK, Gilles, *Informatique et sciences du numérique*, Paris, Eyrolles, 2011.
GERVEREAU, Laurent, *L'aventure des images*, Paris, Gallimard, 2000.
GROSJEAN, Benoît, *Les procédés de cristallogenèse, piliers méconnus de la technologie moderne*. Culture Sciences Chimie https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-des-materiaux/solides-cristallins/les-procedes-de-cristallogenese-piliers
KURLANSKY, Mark, *Le papier : une aventure au fil des pages*, Paris, Denoël, 2017.
PENA, María José. Quelques réflexions sur les plombs inscrits d'Emporion et de Pech Maho. Pech Maho était-il un « comptoir du sel », Revue des études anciennes n°116, Presses universitaires de Bordeaux 2014.
TUFFREAU, Alain, « Maîtrise du feu », *Encyclopaedia Universalis*. Paris.

Crédits photographiques

Couverture *Portrait du boulanger Terentius Neo et de sa femme.* Fresque retrouvée dans la casa di Pansa lors des fouilles archéologiques de Pompéi, domaine public ; **p. 22** CC0, Luc-Henri Fage, 1999, parue dans *Borneo, Memory of the Caves* ; **p. 25** La grotte d'Altamira et l'art rupestre paléolithique du nord de l'Espagne ©Unesco, Yvon Fruneau ; **p. 26** Les pétroglyphes du site archéologique de Tanbaly ©Unesco, Ko Hon Chiu Vincent ; **p. 27** à gauche : John Donald Wilkinson gravant la pierre angulaire du bâtiment du St George's Theological College, Jérusalem, avril 1962. DR ; à droite : fragment de pigment rouge (ocre), Nouvel Empire, Museo Egizio, Turin, CCo Museo Egizio ; **p. 28** Stèle des vautours, Kudurru de Gula-eresh, CC-BY-3.0 musée du Louvre ; **p. 29** Sceau-cylindre de Ishma-ilum ©musée du Louvre, Christian Larrieu ; **p. 31** Prototype d'un disque en saphir réalisé par Arnano ©Andra ; **p. 32** Plaque en bois, écriture hiératique, CC-BY-4.0 Archives de la planète - collection Albert Kahn ; **p. 34** Tablettes d'argile provenant de Djemdet-Nasr, CC-BY-4.0 British Museum ; **p. 35** Fragment de carapace de tortue servant de tablette divinatoire ©musée Guimet, Paris, Thierry Ollivier ; **p. 37** Ocre gravé de la grotte de Blombos ©D'Errico, Henshilwood, Nature ; **p. 38** Tablette d'argile provenant de la bibliothèque d'Assurbanipal à Ninive, DR ; **p. 39** Calculi et jetons illustrant l'évolution de l'écriture cunéiforme CC0 musée de l'Institut oriental, Université de Chicago ; **p. 40** Argile excavée ©Andra ; **p. 42** Tablette dite « de Yozgat » ©musée du Louvre, Stéphane Maréchalle ; **p. 44** Deux bols profonds CC BY-SA 4.0 musée national de Tokyo ; **p. 47** Jetons en céramique © Memory of Mankind ; **p. 49** Plaques de fondation de l'Apadana © musée national achéménide d'Iran, Téhéran, Iran ; **p. 51** Christ de Wissembourg CC BY-SA 4.0 musée de l'Œuvre Notre-Dame de Strasbourg ; **p. 52** Papyrus ©Sciences & Co ; **p. 53** Livre des demeures secrètes sur papyrus, 1069 - 664 avant J.-C. Paris ©musée du Louvre, Dist. GrandPalaisRmn / Christian Décamps ; Extrait du Papyrus Rhind ©The Trustees of the British Museum (CC BY-NC-SA 4.0) ; **p. 54** Extrait du Palimpseste d'Archimède, DR ; **p. 55** Sur la chute des États, World Digital Library, domaine public ; **p. 56** Caractères mobiles ©Sciences & Co ; **p. 59** Bandes de papier permanent vieillies à 90°C ©Andra ; **p. 63** Carte perforée à 80 colonnes, DR ; **p. 66** Enveloppe des disques *Sounds of Earth* de Voyager 1 et 2, © NASA ; **p. 67** Nicéphore Niépce, Vue de la fenêtre du domaine du Gras, domaine public ; **p. 68** Coupe d'une pellicule ©Sciences & Co ; **p. 71** Lecture de microfilms, DR ; **p. 74** Service des bandes magnétiques du Centre national de données océanographiques (NODC), DR ; **p. 78** Exemple d'emblème ©Eupalia ; **p. 79** Gravure sur supports optiques ©Sciences & Co ; **p. 80** Supports optiques ©Sciences & Co ; **p. 81** Schéma de principe ©Microsoft ; **p. 82** ADN et patrimoine génétique ©Sciences & Co ; **p. 83** Molécule d'ADN ©Sciences & Co ; **p. 84** Support ADN et codage ©Sciences & Co ; **p. 87** Capsules renfermant de l'ADN ©Stéphane Lemaire / CNRS - Sorbonne Université.

© Andra - octobre 2026
Conseil éditorial et réalisation graphique : Sciences & Co
Rédaction : Antoine Billat, Florence Poidevin et Jérôme Robert
Conception graphique : Florine Synoradzki
Typographie : Infini, Sandrine Nugue / CNAP

Cet ouvrage a été imprimé sur un papier Munken Pure qui répond à la norme ISO 9706, dit « papier permanent ». La norme spécifie des critères de composition d'acidité, de résistance à l'oxydation, de réserve alcaline et de propriétés mécaniques qui confèrent à ce type de papier des propriétés de conservation à long terme élevées en conditions d'archivage. Le papier permanent est notamment utilisé pour imprimer les dossiers de mémoire de l'Andra.

Achevé d'imprimer par RGI
6 Rue Paul Henri Spaak
77400 Saint-Thibault-des-Vignes (France)

Les matériaux de la mémoire

De la pierre à l'ADN, les supports sur lesquels les humains ont tracé des signes, puis écrit des messages, ont évolué au fil du temps. Fruit d'un dialogue constant entre les matériaux et les techniques, ils offrent un large éventail de caractéristiques, mais sont-ils tous aussi pérennes ? Font-ils preuve de la même résilience face aux vicissitudes qu'ils ont subies ou pourraient rencontrer à l'avenir ? Sont-ils tous propices à l'enregistrement d'informations nombreuses ? Cet ouvrage brosse un panorama de ces enjeux, et les confronte aux travaux menés par l'Andra dans le cadre de son programme Mémoire : quels supports élire pour conserver des informations pendant des siècles et favoriser leur future accessibilité ?

ANDRA

CONSTRUIRE ET TRANSMETTRE LA MÉMOIRE