

Échantillonnage compressé et parcimonie

Pour comprendre le principe de l'échantillonnage compressé, commençons par une analogie simple : le jeu de la Bataille navale, que nous allons encore simplifier en considérant que les cinq bateaux n'occupent qu'une seule case chacun, dans une grille de 10 x 10.

Le but du jeu est de retrouver la position de tous les bateaux ennemis en posant le minimum de questions, chacune testant une case à la fois : A7 ? F4 ? On s'aperçoit vite que cette façon de sonder l'ensemble de la grille n'est pas très efficace : presque tous les coups « tombent à l'eau » et, en fin de compte, il ne faudra pas beaucoup moins de

renseigne, certes de façon imparfaite, sur l'ensemble de la grille. Nous utilisons alors des méthodes liées aux nombres aléatoires. Par exemple, construisons un « masque binaire », de même taille 10 x 10 que la grille, avec autant de cases opaques que de cases transparentes, réparties aléatoirement (voir ci-dessous). Les nouvelles questions

rapport à la taille de la grille : seules 5 % des cases sont occupées. En mathématiques, cette propriété est nommée la parcimonie : un objet complexe (telle une grille de Bataille navale) peut être décrit comme la somme d'un très petit nombre d'objets élémentaires.

D'une façon générale, la théorie de l'échantillonnage compressé, développée il y a une dizaine d'années, décrit comment acquérir le plus efficacement possible des données complexes, sachant qu'elles vérifient la propriété de parcimonie. Dans le cas de l'holographie

sous-échantillonné. Cependant, on peut compenser cette lacune en apportant une connaissance *a priori* de la vibration de la structure. C'est ici que la conjonction de compétences en physique, mathématiques et informatique se révèle décisive.

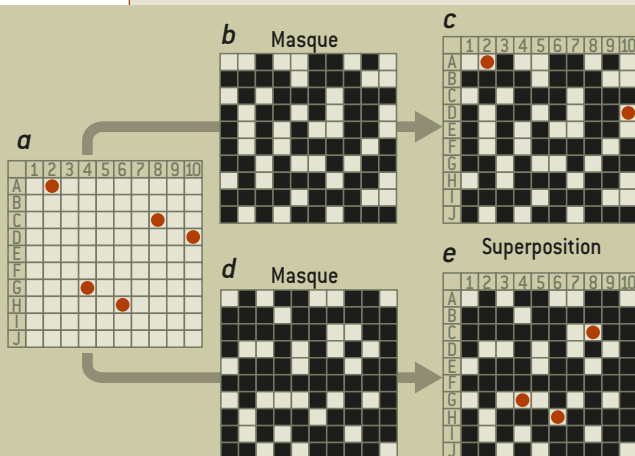
Il nous faut revenir ici à la notion de modes propres. La vibration, au premier abord complexe, peut s'expliquer comme la superposition de ces modes, chacun d'eux se manifestant à une fréquence dite de résonance et chacun ayant un coefficient de pondération. Ce premier niveau de décomposition est d'ailleurs utilisé dans les techniques d'imagerie classique précédemment évoquées. Le résultat qu'elles produisent n'est pas une image unique de la vibration, mais une série d'images de chacun de ses modes propres, dont la superposition constitue la vibration totale.

Compléter l'information avec des ondes planes

Un mode propre peut, à son tour, être décomposé en formes plus simples : des ondes planes. L'onde plane est une onde « théorique », associée à une seule fréquence et se propageant dans une seule direction ; elle ne peut exister que dans un milieu infini. Mathématiquement parlant, c'est une solution élémentaire de l'équation des ondes – équation qui régit l'évolution de la pression acoustique dans l'espace et le temps. Il existe une infinité d'ondes planes, qui diffèrent par leur longueur d'onde et leur direction de propagation. Or on montre mathématiquement que la combinaison de quelques éléments seulement de cet ensemble infini suffit pour reconstituer un mode propre avec précision. Identifier un mode propre revient donc à déterminer les quelques ondes planes principales qui le composent.

Finalement, il y a deux niveaux de décomposition. Au niveau mécanique, la vibration est d'abord considérée comme la superposition de certains modes propres. Puis, au niveau mathématique, chaque mode propre est lui-même modélisé comme la somme « parcimonieuse », c'est-à-dire d'un nombre réduit, d'ondes planes. Dans le cas de la table d'harmonie d'une guitare, une dizaine d'ondes planes suffisent.

La stratégie adoptée consiste à déterminer les ondes planes qui, d'après cette double décomposition, participent à la vibration de la table d'harmonie, uniquement à



DANS UNE BATAILLE NAVALE simplifiée avec cinq bateaux noirs sur une grille (a), tester chaque case l'une après l'autre n'est pas la meilleure stratégie. On gagne en efficacité si on teste par ligne ou par colonne la présence d'un bateau et on recoupe les informations. On est d'autant plus performant en utilisant des masques non réguliers (b et d). Chacun fournit un certain nombre d'informations (c et e). On retrouve la position de tous les navires avec quelques masques.

100 questions pour finir la partie (en moyenne, il faut 84 questions).

Pour être plus efficace – en faisant abstraction des règles du jeu ! –, il faut que chaque question nous renseigne simultanément sur plusieurs positions spatiales : par exemple, « y a-t-il au moins un bateau sur la colonne D ? Sur la ligne 7 ? » C'est mieux, car on a ainsi des chances d'éliminer toute une série de cases en une seule question. L'étape suivante est de poser une question qui nous

seraient : « À travers ce masque, combien peut-on voir de bateaux ? Et à travers cet autre masque ? » Avec une vingtaine de ces masques et les réponses correspondantes, un petit programme numérique ne met que quelques secondes pour retrouver entièrement la grille de l'adversaire. Le nombre de « questions » a été divisé par quatre ! La performance n'est cependant pas toujours au rendez-vous. Cela ne fonctionne ici que parce que le nombre de bateaux est faible par

acoustique compressée, on sait *a priori* que notre donnée inconnue (un mode propre) se décompose comme une somme d'un petit nombre de formes élémentaires (des ondes planes) parmi une infinité – ou au moins un catalogue important – d'ondes planes. Le but est de retrouver cette combinaison : on ne sait pas ce qu'elle est, on sait juste qu'elle existe et qu'un petit nombre d'observations judicieusement placées peut la révéler.

– N. B., L. D., R. G. et F. O.

partir de ce que mesurent en une fois les 120 microphones de l'antenne. La théorie du traitement du signal nous assure qu'il est possible de reconstruire le champ vibratoire avec une précision comparable à celle de la vibrométrie laser et de l'holographie acoustique classique. Cela est faisable grâce au caractère parcimonieux en ondes planes des modes propres de vibration. Si les ondes planes pertinentes avaient été nombreuses, 120 mesures auraient été insuffisantes pour contraindre correctement les combinaisons possibles. Ainsi, la combinaison la plus parcimonieuse d'ondes planes nous donne accès au champ vibratoire de la table d'harmonie, et par suite aux modes propres. Cette approche est nommée «holographie acoustique compressée», en référence à une technique mathématique récente également appliquée en imagerie médicale ou en radioastronomie : l'échantillonnage compressé (voir l'encadré page 42). Le calcul de la combinaison optimale (la plus parcimonieuse) d'ondes planes repose sur des algorithmes d'optimisation numérique qui, bien que complexes, sont à la portée des ordinateurs de bureau actuels.

Figures de Chladni

Le physicien allemand Ernst Chladni (1756-1827) a étudié les vibrations de plaques en les frottant avec un archet. Dans une version moderne de l'expérience, un haut-parleur crée les vibrations. Une poudre fine dispersée sur la plaque permet de les visualiser : elle se déplace et forme des motifs (ci-dessous) en se concentrant aux nœuds de vibration (les régions où l'amplitude de vibration est nulle). Le motif dépend du mode de vibration.



Elmar Bergler

Comment détermine-t-on les ondes planes qui composent la vibration de l'instrument de musique ? En théorie, le nombre d'ondes planes possibles est infini, la direction et la longueur d'onde pouvant prendre n'importe quelles valeurs. Comme cela n'est pas gérable dans un programme numérique, nous utilisons un catalogue fini d'ondes planes, avec des valeurs discrètes de direction et de longueur d'onde (de l'ordre d'une centaine d'ondes planes). L'échantillonnage compressé permet de sélectionner rapidement un certain nombre d'ondes planes dont la combinaison reproduit correctement les 120 mesures.

Le principe de parcimonie est crucial dans l'algorithme utilisé. Le programme cherche à minimiser le nombre d'ondes nécessaires pour reproduire le signal enregistré. La combinaison la plus parcimonieuse d'ondes planes nous donne accès au champ vibratoire de la table d'harmonie. À partir de là, nous pouvons calculer les modes propres.

Reste une question : comment disposer les 120 microphones de l'antenne ? De façon un peu contre-intuitive, les algorithmes





les conférences

au Palais de la découverte

Entrée libre dans la limite des places disponibles

La lumière dévoile l'Univers

> les mercredis à 19h

Cycle de 4 conférences

6 mai **La première lueur de l'Univers**
avec Karim Benabed

20 mai **Aux sources de la lumière**
avec David Elbaz

27 mai **La tapisserie lumineuse**
avec Valérie de Lapparent

3 juin **Les noirceurs de l'Univers**
avec Daniel Kunth

THÈME
La science en voyage

programme complet sur

palais-decouverte.fr

Avec soutien de

SCIENCE

CIEL ESPACE

culture plus

© Pour la Science - n° 451 - Mai 2015

Physique **[43]**

compressés fonctionnent mieux lorsque la répartition des microphones de l'antenne est irrégulière, ou bien lorsque la forme de la structure vibrante est elle-même complexe, comme c'est le cas de la table d'harmonie d'une guitare (voir la figure page 39). Pour quelle raison ?

Quelques dizaines de micros, dans le désordre

Les ondes ont une structure périodique. Ainsi, si nous répartissons les microphones de façon régulière, nous risquons d'avoir une redondance dans l'information et ne pas en avoir assez pour reconstruire correctement la carte des vibrations. Il faut répartir de façon aléatoire les microphones pour maximiser l'information de l'hologramme. Lorsque la surface est régulière, nous plaçons en pratique les microphones de façon irrégulière, mais raisonnable par rapport aux contraintes physiques de la structure de l'antenne et nous vérifions que l'information enregistrée sera suffisante. En revanche, si la surface vibrante est de forme irrégulière, l'information est maximisée

■ BIBLIOGRAPHIE

G. Chardon *et al.*, *Nearfield acoustic holography using sparsity and compressive sampling principles*, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132, 1521, 2012.

C. Bardos, *Les ondes, entre physique et mathématiques*, *Pour la Science*, n° 409, novembre 2011.

■ SUR LE WEB

J. Espiau de Lamaestre *et al.*, *Écouter pour voir*, sur le site de la revue numérique *Interstices* : https://interstices.info/jcms/nl_77453/ecouter-pour-voir

même avec un placement régulier de micros. Ce principe, dit d'incohérence, est crucial pour que l'algorithme de reconstruction parcimonieuse fonctionne bien ; il impose donc des contraintes lors de l'enregistrement du son. Il explique également pourquoi les grilles de sélection de la Bataille navale sont complexes et aléatoires (voir l'encadré page 42).

Dans le cas d'une table d'harmonie de guitare, le résultat de l'holographie compressée est excellent : avec une antenne de quelques dizaines de micros et une seule mesure, les modes de vibration sont parfaitement identifiés. Ainsi, en « transférant » une partie de la complexité depuis le matériel vers le logiciel, nous obtenons une technique rapide (deux secondes pour l'acquisition, quelques minutes de calcul), peu onéreuse (moins de micros, possibilité dans un futur très proche d'utiliser des micros numériques similaires à ceux des téléphones portables, très peu coûteux) et simple à mettre en place.

Reste à savoir si la technique sera adoptée dans le monde de la lutherie, et plus largement par celui de l'imagerie acoustique...



LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

{ Partagez les savoirs }

Entrée gratuite

UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 11 mai - 18h : Le Secret de l'Archéobélodon
(J.-G. Michard, A. Mille, P. Tassy, Belin-MNHN, 144p.).

Lundi 18 mai - 18h : À la découverte des araignées
(A. Canard, C. Rollard, Dunod-MNHN, 192p.).

Sur la piste des mammifères sauvages
(P. Haffner, A. Savouré-Soubelet, Dunod-MNHN, 208p.).

FILMS

Samedi 16 mai - 15h30 : Monsieur Fabre
Réal. : H. Diamant-Berger (1951, 88').

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 31 mai - 15h : Mammalogiste
Spécialiste des petits mammifères carnivores, G. Vernon.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

BAR DES SCIENCES

Dimanche 24 mai - 17h30
Où peut-on découvrir des bords de mer préservés en France ?
Des dunes du Nord aux mangroves
Animé par M.-O. Monchicourt, journaliste.
Avec A. Konitz, commissaire de l'exposition « Littoral : 40 ans de merveilles préservées en France », Conservatoire du littoral, F. Larrey, photographe, Regard du vivant et T. Méziane, spécialiste des mangroves, Muséum.

Café-restaurant La Baleine — 47 rue Cuvier, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, dans "l'agenda du jardin"

POUR LA SCIENCE



NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

..... histoire des sciences



Collection **Archives**, tome 19
170 x 240 mm broché
texte en français
614 p., 165 figures coul.
ISBN 978-2-85653-755-8
Prix 42€ TTC (39,81 HT)
Décembre 2014

LA RÉPUBLIQUE NATURALISTE
COLLECTIONS D'HISTOIRE NATURELLE
& RÉVOLUTION FRANÇAISE (1789-1804)

Pierre-Yves **Lacour**

La République naturaliste examine la rencontre entre un petit objet d'histoire de la culture et des sciences, les collections d'histoire naturelle, et un événement colossal, la Révolution. Les années 1789-1804 sont en effet un moment exceptionnel dans la constitution des collections naturalistes françaises. Récoltés, échangés, achetés ou confisqués dans les cabinets aristocratiques et ecclésiastiques, une multitude de spécimens convergent vers le Muséum d'histoire naturelle, tandis qu'une partie des doubles de ces collections nationales est envoyée en province dans les cabinets des Écoles centrales. Le Muséum apparaît alors comme le centre autour duquel s'organisent le rassemblement, puis la dispersion des spécimens et Paris prétend, pour un temps, incarner la capitale universelle de l'histoire naturelle.

En suivant le parcours de ces objets, le livre analyse aussi ce qui se joue au moment où, dans la capitale comme en province, l'histoire naturelle s'institutionnalise, se professionnalise et se spécialise autour de collections refondées ou entièrement nouvelles. Au sein de ces collections, les relations entre objets scientifiques, artistiques et ethnographiques ne sont jamais exactement les mêmes tout comme les pratiques savantes qui fixent la valeur et l'usage des spécimens. C'est ainsi que dans les relations complexes, et parfois tendues, qui se tissent alors entre le Paris naturaliste, l'Europe savante et la province des professeurs, une hiérarchie des positions intellectuelles et des institutions scientifiques s'élabore progressivement.

Une carte inédite du savoir à l'époque révolutionnaire.

ouvrage disponible
à la librairie des Publications scientifiques
face à la Grande Galerie de l'Évolution

Commandes et renseignements

Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier
75 231 Paris cedex 05
Tél. 01 40 79 48 05 • Fax 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr

MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

**PUBLICATIONS
SCIENTIFIQUES**

MNHN.FR

Fouilles virtuelles au quai Branly

Entre scanner et imprimante 3D, le musée du quai Branly, à Paris, présente jusqu'au 17 mai les « entrailles » secrètes d'une dizaine de ses chefs-d'œuvre. Du jamais vu.

Cécile Lestienne

Examiner les trésors patrimoniaux aux rayons X, l'idée n'est pas nouvelle: dès 1886, un an après la découverte de Wilhelm Röntgen, le muséum de Vienne radiographiait le genou d'une momie égyptienne. L'arrivée du scanner dans les années 1970 a certes permis d'affiner les analyses, mais aujourd'hui, les récents développements des technologies d'imagerie sont si spectaculaires et si performants qu'ils révolutionnent le regard des chercheurs sur les objets archéologiques et ethnologiques. Car ces outils numériques, couplés à l'impression 3D, ouvrent des champs d'investigation jusqu'alors inaccessibles en permettant d'effectuer une véritable autopsie virtuelle des œuvres. Et de percer leurs secrets en les manipulant, les démontant, les analysant... sans contact ni intrusion physique. Démonstration en images, tirées de l'exposition *Anatomie des chefs-d'œuvre* proposée par le musée du quai Branly, pionnier dans l'utilisation de ces technologies novatrices.

STRIP-TEASE NUMÉRIQUE

L'aventure a commencé il y a cinq ans, lorsque le musée s'est équipé d'une plateforme de visualisation 3D fondée sur un logiciel développé par Vizua, une start-up qui collabore avec l'École de médecine Paris-Descartes. «Auparavant, analyser une œuvre exigeait de l'immobiliser pendant des semaines», explique Christophe Moulherat, chargé d'analyses des collections et commissaire de l'exposition. «Aujourd'hui, nous sortons une pièce pour la faire scanner dans un hôpital, le soir, après les horaires de consultations. Nous récupérons les données numériques en quelques secondes et nous les transférons sur un ordinateur puissant situé au musée. Le lendemain matin, l'objet a retrouvé sa place dans les collections.» Entre-temps, les chercheurs analysent les images et, en jouant sur les fausses couleurs, observent la différence de densité des matériaux, comme ici où se dévoilent bois, coquillage textile, verre, céramique... qui composent cette sculpture magique nkisi.



© Musée du quai Branly, photo Christophe Moulherat

© Musée du quai Branly, photo Patrick Gries



© Musée du quai Branly, photo Christophe Moulherat

Statuette magique nkisi «Bumba mazi» (celui qui procure la richesse) originaire de Cabinda (Angola) et datant d'avant 1933. Bois, coton, coquillage, corne, métal, miroir, coquille d'escargot, graines, noix, fruits, pigments. 38,7 x 27,2 x 30 cm. 2 569 g.

SOUS TOUTES LES COUTURES

Consultables depuis n'importe quel ordinateur connecté à Internet, ces images permettent un véritable travail collaboratif. Conservateur, anthropologue, médecin légiste... se sont ainsi virtuellement penchés sur cet émouvant *Fardo*, un paquet funéraire péruvien appartenant à la culture Chanca (1100-1450). À l'intérieur : en position fœtale, la tête en bas, la momie d'un enfant d'environ six ans au crâne étiré vers l'arrière, une déformation traditionnelle due à l'apposition de plaquettes en bois sur le front et les tempes depuis la naissance. Le bassin écrasé n'a pas livré son sexe et aucune lésion traumatique n'a donné d'indice sur les causes de sa mort. Mais l'on aperçoit des épis de maïs, des outils de filage, des graines de coton, des feuilles de coca... disposés de part et d'autre de la momie pour l'accompagner dans son ultime voyage. Et dans chacune de ses mains, un curieux objet composite que les chercheurs n'ont pas encore identifié.

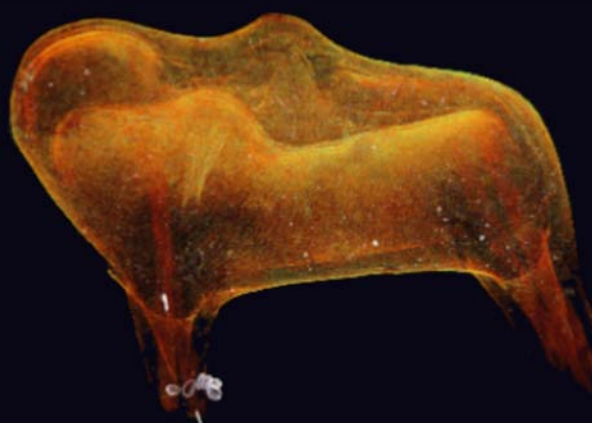


© Musée du quai Branly, photo Christophe Moutonnet avec la collaboration de Chloé Vaniet de la société Xremiz

© Musée du quai Branly, photo Claude Germain



Boli, objet culturel de la société masculine du Kono (Mali) datant probablement du début du XX^e siècle. 37 x 16 x 57 cm. 9441g.





Fardo, paquet funéraire péruvien, culture Chancay (1100-1450). 87,5 x 40 x 30,5 cm. 10 500 g.

© Musée du quai Branly, photo Patrick Gries, Bruno Descorings



© Musée du quai Branly, photo Christophe Moulherat avec la collaboration de Chloé Vaniet de la 4^e Xtremiz



SECRETS DE FABRICATION

Les Boli sont parmi les objets les plus sacrés des populations bambaras du Mali. Capables de faire pleuvoir, de soigner de multiples maux, de lire l'avenir, d'envoûter un individu ou de le tuer. Fabriqués par les initiés selon un rituel complexe, toujours loin du regard des profanes, ce sont des amalgames de bois, écorces, feuilles, terre, cuir, os, poils, griffes ... voire de phalanges et de placenta humain. Pour les activer, il faut les flatter par des paroles, les entretenir par divers saupoudrages et les alimenter par des sacrifices sanglants. D'où la patine croûteuse de cet objet, faite de bouillie de mil, de sang séché, de poudres végétales et de noix de cola mâchées puis crachées lors des prières et sacrifices. Les couches s'accumulent au fil du temps comme on le voit sur l'image du milieu. L'image de droite révèle la structure en bois [les « pattes » du Boli], avec le tube central horizontal qui permet de « nourrir » l'objet ; et surtout les six petites cornes d'antilope disposées verticalement (*dans le cercle*), la « charge » magique qui donne vie au Boli et lui confère son *nyama*, sa puissance surnaturelle.

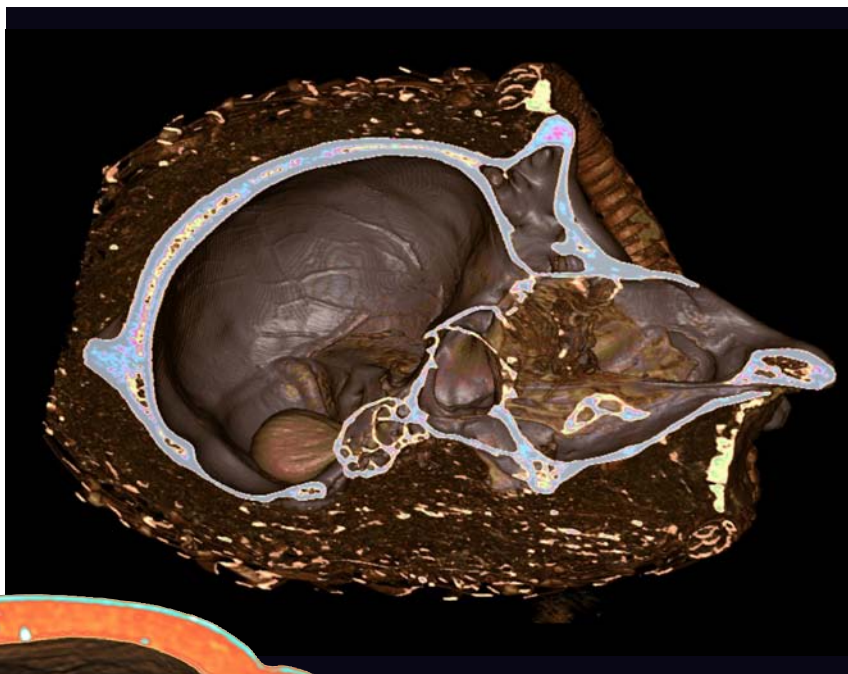
© Musée du quai Branly, photo Ch. Moulherat avec la collaboration de Chloé Vaniet de la 4^e Xtremiz

LE FRUIT INATTENDU

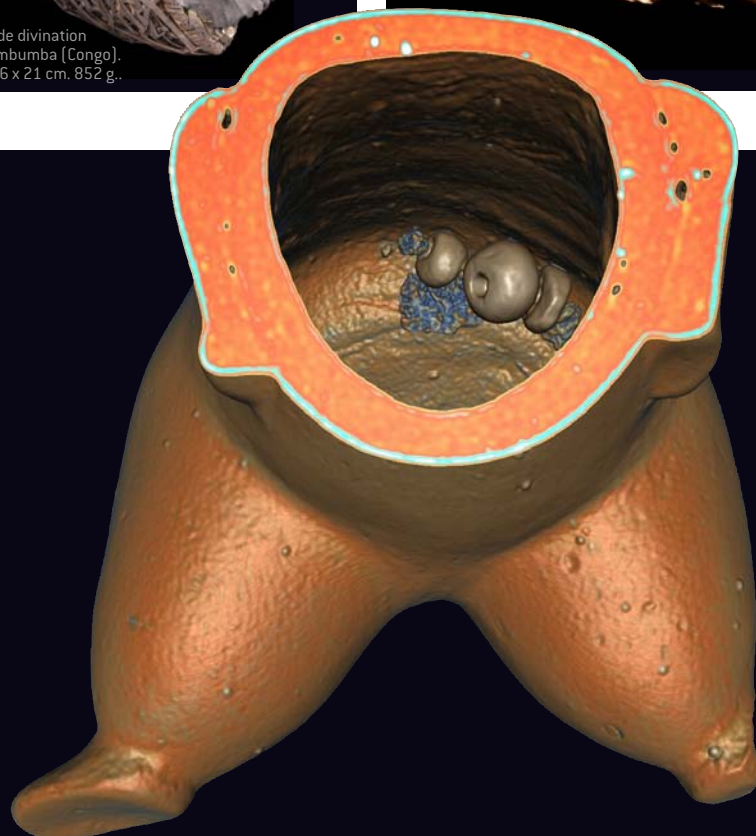
Cet objet de divination nkisi-mbumba intriguait beaucoup les conservateurs : quand on le manipulait, on entendait rouler comme une bille à l'intérieur. L'imagerie a révélé qu'il s'agissait d'une sorte de graine de la grosseur d'une figue, enfermée dans un crâne de gorille femelle dont on ne voyait jusqu'alors que la face émergée de la résille végétale. Consulté, un botaniste du Muséum national d'histoire naturelle ne put se prononcer. Jusqu'à ce que la « graine » soit imprimée en 3D : il identifia alors le fruit du palmier à huile, un arbre à haute valeur symbolique, à l'origine du monde vivant, dans l'aire culturelle Kongo.



Objet de divination
nkisi-mbumba (Congo).
20 x 16 x 21 cm. 852 g.



© Musée du quai Branly, photo Christophe Moulherat avec la collaboration de Chloé Vanier de la société Xtramiz



LES RÉVÉLATIONS DE L'AVATAR

La tête appartient-elle au corps ?, se demandaient les conservateurs du musée en regardant la mauvaise restauration sur le cou de cette statuette guatémaltèque (800-300 av. J.-C.). En pénétrant au cœur même de la terre cuite, les images numériques ont montré qu'effectivement, la pâte céramique de la tête est bien plus épaisse et d'une autre facture que celle du corps. Ce qui plaide pour une origine distincte des deux éléments. Pour observer de plus près les trois perles de pierre dure apparues à l'intérieur de la sculpture, le musée a réalisé une impression 3D de l'objet... qu'il a coupé en deux ! « On a bien vu alors, commente Christophe Moulherat, que les perles, vraisemblablement du jade, ont été perforées en deux temps, probablement avant l'arrivée des outils en métal. »



Personnage assis.
Préclassique moyen,
800 - 300 av. J.-C., terre cuite
brune. Culture Maya des Hautes
terres (Guatemala).
17 x 12,5 x 12,3 cm. 519 g.

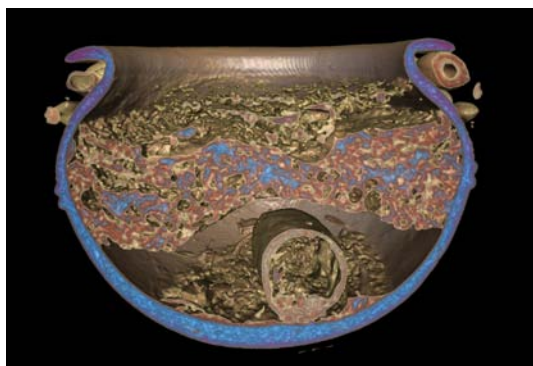
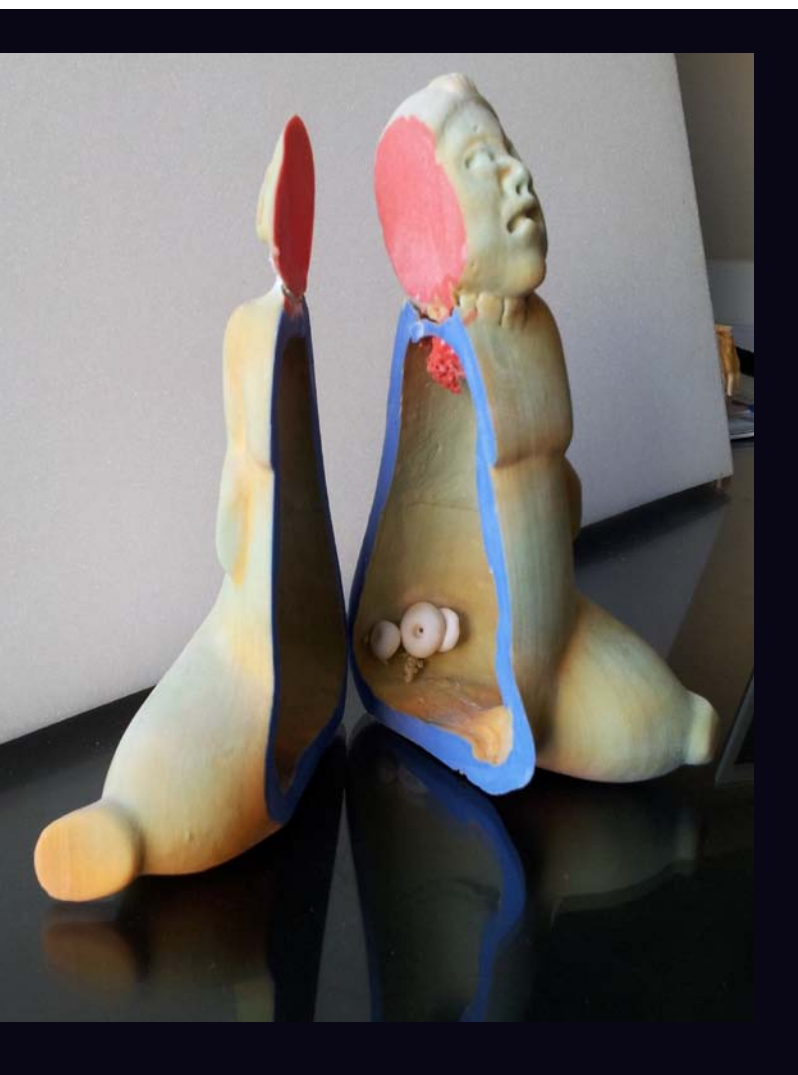
© Musée du quai Branly, photo Christophe Moulherat avec la collaboration de Chloé Vanier de la société Xtramiz (à gauche et à droite), © musée du quai Branly, photo XXX (au centre)

UN OBJET PEUT EN CACHER UN AUTRE

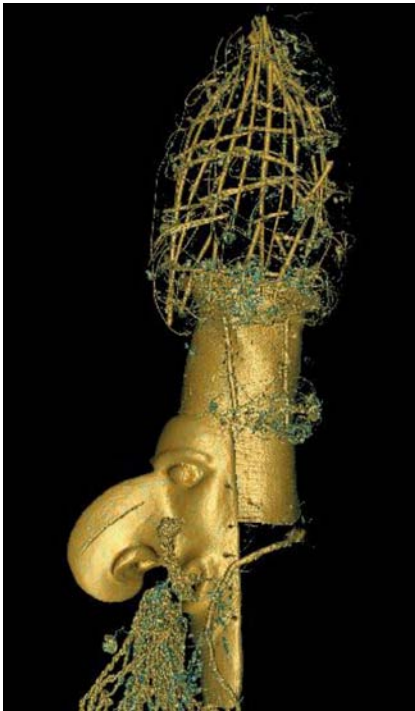
Que cache ce tressage de fibres végétales et la croûte de terre noirâtre, probablement de la terre des ancêtres récupérée dans un sanctuaire, qui en obstrue l'ouverture ? L'étude de ce récipient magique nkisi a révélé bien des surprises. D'abord, deux rangs de fruits du palmier à huile, arbre sacré le long du fleuve Kongo, posés comme un collier sur le col du vase. Ensuite, un magnifique décor géométrique fait de lignes et de chevrons sur toute la partie supérieure du récipient. Enfin, à l'intérieur, un sachet de tissu rempli de perles en pierre, de griffes et d'os d'animaux qu'il reste à identifier. Des éléments que l'on n'aurait jamais pu observer autrement, sauf en ouvrant l'objet, donc en le détruisant.



Récipient magique, fétiche de guerre, originaire de Loango (république du Congo) et datant d'avant 1892. Terre, kaolin, fibres végétales. 20,6 x 33 x 34 cm. 4175g.



© Musée du quai Branly, photo Thierry Olivier, Michel Utrado ci-dessus.
© Musée du quai Branly, photo Christophe Mouliheret avec la collaboration de Chloé Vanet de la société xremviz pour les images de scanner.



Masque de deuil kanak
(Nouvelle-Calédonie) datant
du milieu du XIX^e siècle. Bois,
enduit, fibres végétales, plumes,
cheveux, poils de roussette
chauve-souris, pigments.
143 x 37 x 35 cm. 4 245 g.



© Musée du quai Branly, photo Christophe Moullherat avec la collaboration de Chloé Vaniet de la société Xtrémiz (en haut à gauche), © Musée du quai Branly, photo Patrick Gries, Bruno Descouings. Restauré grâce au soutien de la Fondation BNP Paribas (ci-contre)

CHEVELURE MAISON

Pour la grande exposition *Kanak, l'Art est une parole* que le musée du quai Branly a organisée en 2013, restaurer les 12 masques kanaks de la collection était impératif : leurs hautes chevelures branlaient dangereusement du chef. Les images prises pour cette campagne ont dévoilé la structure en bois qui sous-tend les cheveux et les poils de l'énorme perruque.

« Les personnalités kanakes, venues en observation, ont été très étonnées d'y reconnaître l'architecture de leurs maisons de cérémonie, raconte Olivia Bourrat, co-commissaire de l'exposition. Ils ignoraient qu'un symbole de leur structure sociale se cachait dans ces chevelures. Il faut dire qu'après l'arrivée des premiers missionnaires en Nouvelle-Calédonie au milieu du XIX^e siècle, la production de ces masques de deuil s'est très vite arrêtée et la tradition s'est perdue. » Par ailleurs, ces mêmes images ont permis aux restaurateurs de visualiser tous les points de faiblesse et les brisures, et de les réparer sans démonter l'assemblage. Un vrai travail de microchirurgie.



L'HOMME SANS VISAGE

Se protéger, se venger, prédire l'avenir... autant de fonctions pour cet objet magique nkisi kula. Y planter un clou permet de l'activer et on en perçoit plusieurs sur cette image numérisée qui divulgue les dessous de la statuette anthropomorphe, entièrement recouverte de tissu, de coton, de vanneries, le tout soigneusement ficelé par des liens de fibres végétales. L'image révèle également que le personnage au corps sculpté avec soin, mais au visage simplement ébauché, a vu ses pieds et ses mains coupés avant d'être enveloppé. Et elle dévoile, sans ambiguïté, qu'il s'agit d'un homme.



Statuette anthropomorphe originaire de la région du Moyen-Congo. Bois, textile, fibres végétales.
42 x 12,8 x 8,9 cm. 1 347 g.



L'Anatomie des chefs d'œuvre

Musée du quai Branly

mar., mer., dim. : 11 h à 19 h
jeu., vend., sam. : 11 h à 21 h
Jusqu'au 17 mai 2015

www.quaibranly.fr

Est-il possible d'exploiter un trou noir ?

L'environnement immédiat d'un trou noir contient une importante quantité d'énergie. Mais pour en extraire, une civilisation future devra construire un ascenseur spatial qui défie les lois de la physique.

Adam Brown

Imaginons le pire scénario de science-fiction possible. Le Soleil s'est arrêté de briller, le combustible qui alimentait la fusion nucléaire s'étant épuisé. La Terre – si elle survit à la mort de l'étoile – est alors plongée dans un hiver perpétuel. Et s'il en est encore là, l'homme doit trouver des sources d'énergie ailleurs, dans d'autres étoiles pour commencer. Néanmoins, une fois que toutes les étoiles se seront éteintes, que restera-t-il comme source d'énergie ? Les trous noirs. Mais sera-t-il possible de récupérer cette énergie et de sauver la civilisation ?

Certes, ce scénario est « tiré par les cheveux ». Mais nous pouvons tout de même



L'ESSENTIEL

- Les trous noirs regorgent d'énergie juste au-dessus de leur horizon des événements.
- Une expérience de pensée suggère d'utiliser un ascenseur spatial pour exploiter cette énergie.
- L'ascenseur spatial devra utiliser une corde assez solide pour s'opposer à l'attraction gravitationnelle du trou noir. L'existence d'un matériau adéquat semble illusoire.

Kenn Brown, Monolithis Studios

nous demander s'il est possible d'exploiter l'énergie d'un trou noir. Ces questions sont un bon prétexte pour se pencher sur la physique d'un trou noir, en particulier celle de son horizon des événements, et d'étudier la possibilité de construire une structure gigantesque et popularisée par la science-fiction : l'ascenseur spatial.

Une frontière sans retour possible... ou presque

À première vue, extraire de l'énergie (ou quoi que ce soit) d'un trou noir semble impossible. En effet, on définit l'horizon des événements d'un trou noir comme la frontière qui délimite la région sphérique où le champ gravitationnel du trou noir devient si intense que tout ce qui y pénètre ne peut plus s'en échapper : ni les météorites, ni les fusées, ni même la lumière (voir la figure a, page 56). Tout ce qui s'aventure à l'intérieur de cette sphère est voué à disparaître. De la même façon, une bombe larguée sur le trou noir, loin de le détruire, ne servirait qu'à le faire grossir d'une quantité égale à la masse de la bombe.

C'est en tout cas ce que l'on pensait. Mais dans un article publié en 1974, Stephen Hawking montrait que nous nous trompions. En développant des idées de Jacob Bekenstein, maintenant à l'Université hébraïque de Jérusalem, Stephen Hawking expliquait que les trous noirs laissent fuir de petites quantités de rayonnement. Vous mourrez quand même si vous tombez dedans, mais, bien que vous ne puissiez jamais refaire surface en tant que personne, votre énergie finira par ressortir. Et c'est une bonne nouvelle pour ceux qui voudraient exploiter les trous noirs : de l'énergie s'en échappe.

La raison pour laquelle cette énergie s'échappe est liée aux lois de la mécanique quantique. Un des phénomènes caractéristiques de la physique quantique est qu'elle permet aux particules de passer par effet tunnel à travers des obstacles qui, classiquement, devraient être infranchissables. N'essayez pas de le faire chez vous : si vous vous jetez sur un mur, vous avez peu de chances de réapparaître intact

LES ASCENSEURS SPATIAUX transporteront peut-être un jour des objets de la Terre vers l'espace. Un tel dispositif permettrait-il d'extraire de l'énergie d'un trou noir ?