



Innovation au Muséum : inauguration du scanner le plus performant dans le monde des sciences naturelles

Accès scientifique
à la tomographie à rayons X

Dossier de presse
12 septembre 2011

© P. Lafaité / MNHN

ACCÈS SCIENTIFIQUE À LA
TOMOGRAPHIE À RAYONS X



CONTACTS PRESSE

Muséum national d'Histoire naturelle

Estelle Merceron : 01 40 79 54 40

Sophie Rio : 01 40 79 81 36

presse@mnhn.fr

Région Île-de-France

Emmanuel Georges-Picot : 01 53 85 57 33

emmanuel.georges-picot@iledefrance.fr

CNRS

Priscilla Dacher : 01 44 96 46 06

priscilla.dacher@cnrs-dir.fr



Muséum
national
d'Histoire
naturelle

AST-RX : arrivée d'un nouveau scanner de pointe pour l'exploration 3D des échantillons de sciences naturelles

Le Muséum national d'Histoire naturelle, le Conseil Régional d'Ile-de-France, la Fondation Simone et Cino del Duca - Institut de France et le CNRS s'associent pour inaugurer aujourd'hui un tout nouvel équipement d'imagerie : la plate-forme d'Accès Scientifique à la Tomographie à Rayons X¹.

Installé dans les laboratoires de recherche du Muséum national d'Histoire naturelle et du CNRS, sur le site du Jardin des Plantes, ce scanner haute performance, dont le coût global s'élève à 876 000 €, permettra notamment de reconstituer en 3D des échantillons de sciences naturelles, de visualiser des fossiles inclus dans leur roche, de réaliser des dissections virtuelles... pour ainsi œuvrer à la valorisation et à la conservation des collections du Muséum et à l'excellence de la recherche. Grâce à cette nouvelle acquisition, le Muséum national d'Histoire naturelle, l'un des plus anciens organismes scientifiques français, et le CNRS démontrent leur dynamisme et se positionnent au centre d'un réseau de partenaires nationaux et internationaux.

Un équipement de pointe pour la recherche et la valorisation des collections

Baptisée « AST-RX », la plate-forme d'Accès Scientifique à la Tomographie à Rayons X hébergée au sein de l'UMS² CNRS / MNHN 2700 « Outils et méthodes de la systématique intégrative » a pour principal objectif de permettre la numérisation par microtomographie et nanotomographie de spécimens des sciences naturelles. En termes de recherche scientifique, les intérêts sont nombreux : reconstitutions en 3D aisément manipulables, études d'échantillons au grossissement souhaité, dissections virtuelles, accès à l'anatomie interne sans destruction, etc. Cet appareillage va donc contribuer de façon importante à la valorisation et à la conservation des collections du Muséum (parmi les plus importantes au monde). Les enjeux en termes de diffusion des connaissances sont tout aussi importants, que ce soit vis-à-vis des chercheurs, des enseignants ou même du grand public.

Un accès aux structures internes sans aucun dommage pour les échantillons

La microtomographie axiale à rayons X (ou en anglais CT Scan : Computerized Tomography Scanning) permet la numérisation, l'exploration et la modélisation 3D d'objets d'étude. L'intérêt principal de cet équipement est de visualiser à haute résolution l'ensemble des structures des échantillons, autorisant ainsi l'exploration de structures internes auparavant inaccessibles. De plus, la technologie utilisée est non destructive et non invasive, une caractéristique capitale pour l'étude des collections des sciences naturelles.

Un nouveau regard sur les collections historiques et diverses

Avec 68 millions de spécimens dans ses collections, le Muséum s'intéresse depuis plus de 300 ans à la diversité des matériaux terrestres et des êtres vivants, y compris celle des Hommes et de leur culture. Les activités de recherche consistent à s'investir dans une triple démarche :

- 1• effectuer l'inventaire et la description de la biodiversité,
- 2• comprendre cette diversité (évolution, développement et biologie des populations),
- 3• analyser les relations complexes entre les Hommes et cette diversité.

Ce nouvel équipement permettra de développer l'ensemble de ces thématiques de recherche, en s'appuyant sur le matériel d'étude présent dans les collections du Muséum. Les spécimens scientifiquement importants, historiques, décrits et supposés bien connus, seront susceptibles de révéler de nouvelles informations lors de réexamens détaillés via ces nouvelles technologies d'imagerie.

¹ La tomographie par absorption de rayons X est une technique non destructive permettant la visualisation d'images « en coupe » d'un objet en trois dimensions

² Unité mixte de service

Le Muséum, au cœur de la recherche internationale

Pour tous les domaines des sciences naturelles, les modèles digitaux pourront être exportés pour réaliser des modélisations scientifiques complexes qui seront étudiés et analysés simultanément par la communauté internationale via les réseaux informatiques, ou encore pour être physiquement reproduits, à volonté et à toute échelle de taille, par prototypage rapide sur imprimante 3D pour des finalités de recherche, de diffusion des connaissances, d'exposition ou d'enseignement.

Accessible aux personnels des laboratoires mixtes Muséum/CNRS, la plate-forme sera également ouverte aux scientifiques et conservateurs externes désirant numériser des spécimens des collections du Muséum, ou extérieures, dans un but de recherche scientifique, de conservation, d'expertise, de formation et de diffusion des connaissances.

Les capacités techniques et la largeur des champs d'applications font de **cet équipement d'imagerie le plus performant dans le monde des sciences naturelles**. Fort de l'expérience et des compétences de plusieurs chercheurs utilisant déjà les méthodes d'imagerie, le Muséum national d'Histoire naturelle et ses partenaires se placent désormais, grâce à cette acquisition, dans une situation privilégiée pour devenir incontournables **dans l'utilisation et l'exploitation des technologies de l'imagerie 3D**.

Les projets de recherche

Les projets de recherche des différentes équipes du Muséum et du CNRS concernées par l'utilisation d'un CT Scan conventionnel sont nombreux et de thématiques diverses. Les riches et vastes collections d'invertébrés, de vertébrés, de végétaux (actuels et fossiles), d'anthropologie (collections du Musée de l'Homme), de géologie, et de météorites sont parmi les plus sollicitées pour des études par microtomographie. Récemment, grâce à cette technique d'exploration et à la lumière synchrotron, un cerveau de 300 millions d'années, appartenant à un poisson proche des requins et des raies, a été mis en évidence par des scientifiques du Muséum et du CNRS (Pradel et al. 2009). C'est la première fois qu'un cerveau fossilisé si ancien est découvert. Ce cas de conservation exceptionnelle ouvre la voie à de futurs travaux de recherche en particulier pour visualiser des structures fines auparavant non révélées par les techniques optiques classiques.

Les champs d'investigation sont immenses. Les chercheurs ont aujourd'hui accès aux structures internes de leur matériel d'étude de manière totalement non invasive. Les exemples de recherche nécessitant un accès à la tomographie sont donc multiples : étude de la structure endocrânienne des mammifères fossiles, étude de la morphologie interne et de l'évolution des crânes d'homininés, études d'insectes fossiles inclus dans l'ambre et des gangues rocheuses, étude de l'anatomie et de la morphologie des tissus biominéralisés, études des structures squelettiques en mouvement,...

Ce scanner haute performance a été acquis grâce aux efforts conjoints du Muséum, du Conseil Régional d'Ile-de-France, de la Fondation Simone et Cino del Duca - Institut de France et du CNRS. Son coût global s'élève à 876 000 €.



Le microtomographe v|tome|x L240 de la plate-forme AST-RX (© P. Lafaité / MNHN)

Présentation de la plate-forme AST-RX

Baptisée « AST-RX », la plate-forme d'Accès Scientifique à la Tomographie à Rayons X du Muséum national d'Histoire naturelle est équipée d'un microtomographe axial à rayons X conventionnel (CT Scan : Computerized Tomography scanning). **Actuellement l'outil d'imagerie, avec la lumière synchrotron, le plus performant pour la numérisation, l'exploration et la modélisation 3D d'échantillons de sciences naturelles**, ce scanner a pour principal atout d'utiliser une **technologie non destructive et non invasive**. L'étude de la structure interne et externe des échantillons et l'exploration de certaines structures cachées sont ainsi possibles, sans aucune altération ou destruction des échantillons.

Les **structures fines d'organismes actuels** (exemples : canaux de l'oreille interne, vascularisations osseuses, fibres du xylème, genitalia d'arthropodes, lignes d'arrêts de croissance d'otolithes, nerfs, muscles), d'organismes fossiles (exemples : stries de croissance dentaire, cavités endocrâniennes, paléohistologie osseuse) ou de composés minéraux (exemples : inclusions des gemmes, répartitions minérales au sein des matériaux extraterrestres) peuvent être sélectionnées sur les coupes issues du scanner et extraites sous la forme de **modèles virtuels en 3D**. Ces modèles peuvent alors être présentés de manière isolée ou bien au sein de structures adjacentes, et ainsi être manipulés en temps réel. De plus, un large panel de données métriques (volumes, surfaces, distances, angles...) peut être calculé avec précision et objectivité. Par exemple, en paléontologie, un des domaines de sciences naturelles particulièrement étudié au Muséum, **la matrice rocheuse qui emprisonne les fossiles pourra être virtuellement éliminée**, révélant ainsi, et sans risque pour ceux-ci, les fossiles dans leur intégralité. Les reconstructions 3D obtenues à partir de ce scanner permettent ainsi de replacer les éléments du squelette en position anatomique à partir d'un spécimen dont les restes sont dissociés (ce qui représente la majorité des cas). Les scientifiques pourront alors proposer et tester des hypothèses de complétion des parties manquantes. Les modèles 3D sont également la base d'un grand nombre de méthodologies telles que les analyses de forme (ex : morphométrie géométrique) et de contraintes de mouvement (ex : analyse par éléments finis). **Les champs d'applications sont nombreux, et font déjà l'objet de nombreux travaux de recherche.**



Mise en place et numérisation d'un spécimen à la plate-forme AST-RX par B. Mora (© P. Lafaute / MNHN)

Au sein du Muséum, la tomographie par rayons X suscite donc un **très grand intérêt** en raison de sa polyvalence, **notamment dans le cadre de la recherche scientifique, de la conservation et de la valorisation des collections** (préservation des originaux et reproductibilité des observations), **de la présentation interactive** (facilité de la mise à disposition de duplicatas virtuels) ou encore **de la sauvegarde numérique du patrimoine** (préservation des échantillons rares, fragiles et précieux).

La plate-forme « AST-RX » est rattachée à l'UMS CNRS / MNHN 2700 « Outils et méthodes de la systématique intégrative » dirigée par Eric Pasquet. Elle a deux responsables scientifiques, Antoine Balzeau, paléoanthropologue au CNRS, et Gaël Clément, paléontologue au Muséum, ainsi que deux responsables techniques, les ingénieurs Benjamin Mora et Florent Goussard, respectivement opérateurs principal et secondaire. Son fonctionnement est coordonné par un comité scientifique.

FICHE TECHNIQUE DE LA PLATE-FORME AST-RX :

L'équipement de la plate-forme comprend un tomographe permettant des analyses en microfoyer et en nanofoyer.

- Modèle : « v|tomelx L 240 » de la société GE Sensing & Inspection Technologies Phoenix X|ray
- Comprend deux tubes interchangeables (tube RX microfoyer 240kV/320W avec une détectabilité jusqu'à 1 μm et tube RX nanofoyer 180 kV/15W avec une détectabilité jusqu'à 0,5 μm)
- Dimensions : la cabine de radio-protection mesure 4,3 m sur 2,4 m
- Taille du détecteur : 400 x 400 mm avec une matrice de 2024 pixels (taille de pixel : 200 x 200 μm)
- Taille maximale des objets à scanner : 40 cm dans la plus grande longueur (multi-scans possibles pour des dimensions atteignant 60 cm sur 60 cm).
- Durée d'acquisition d'un objet : entre 30 minutes et plusieurs heures
- Temps de reconstruction des données (passage du volume radiographique à l'ensemble des coupes en 2D définissant tout l'objet) : environ 15 minutes

Le fonctionnement d'AST-RX et ses applications en sciences naturelles

La tomographie axiale assistée par ordinateur est une méthode d'imagerie qui consiste à calculer une reconstruction 3D à partir du **balayage d'un objet par des rayons X**. Cette technique repose sur les propriétés d'absorption des rayons X par les matériaux, différentes suivant leur nature : les matériaux très denses (l'os, le métal) absorbent les rayons X en grande quantité tandis que les matériaux moins denses (les muscles, l'eau) n'en retiennent qu'une infime partie. **C'est le principe de la radiographie médicale** : l'os apparaît nettement sur le cliché, tandis que les « matières molles » (la peau, les muscles) sont peu visibles.

Mais alors qu'en radiographie conventionnelle les clichés sont réalisés dans un plan unique, les scanners tomographiques acquièrent **des images sur plusieurs plans** : l'échantillon est positionné sur un plateau rotatif, au centre d'une chaîne instrumentale fixe composée d'un côté d'une source de rayons X et de l'autre d'un détecteur à très haute résolution (Fig.1A). **C'est la rotation de l'objet par rapport à ce dispositif qui permet d'obtenir un ensemble de clichés, ou projections radiographiques, sur 360°**. Dans le cas des scanners médicaux, le principe d'absorption à 360° reste identique mais avec une rotation de la chaîne instrumentale autour du patient, qui, lui, reste fixe. Un nombre important de radiographies (généralement 3000) sont ainsi acquises lors d'un tour complet du spécimen. Ces projections sont ensuite compilées pour réaliser le volume radiographique du spécimen. A partir de ce volume radiographique définissant l'ensemble de l'objet numérisé, des coupes bidimensionnelles sont recalculées dans toutes les directions, permettant l'accès aux structures internes des spécimens. Contrairement à un scanner surfacique qui permet uniquement d'enregistrer les informations de surface d'un spécimen, **l'intérêt principal de ces coupes est en effet de pouvoir observer les structures internes**.

Enfin, le traitement informatique de ces coupes virtuelles avec des logiciels spécialisés permet de **reconstituer l'objet ou une partie de l'objet (interne ou externe) en trois dimensions**. Les capacités techniques de l'équipement disponible au Muséum national d'Histoire naturelle autorisent la **numérisation à très haute résolution de spécimens de dimensions variables** (de l'infra-millimétrique à plusieurs dizaines de centimètres) et de différentes densités (organes, insectes, ambre, ossements et dents actuels ou fossiles, minéraux...) offrant ainsi un très large panel d'applications.

Les applications de cette technologie en sciences naturelles sont multiples et reposent principalement sur son caractère non destructif et non-invasif pour l'échantillon étudié : **études morphologiques d'échantillons submillimétriques au grossissement souhaité** (Fig.1B), **dissection virtuelle de spécimens biologiques rares ou protégés, extraction virtuelle de fossiles d'insectes conservés dans l'ambre** (Fig.1C), **accès aux caractères anatomiques internes sans destruction de l'échantillon, rétroprototypage de spécimens originaux sous forme de répliques physiques aisément manipulables**, etc.

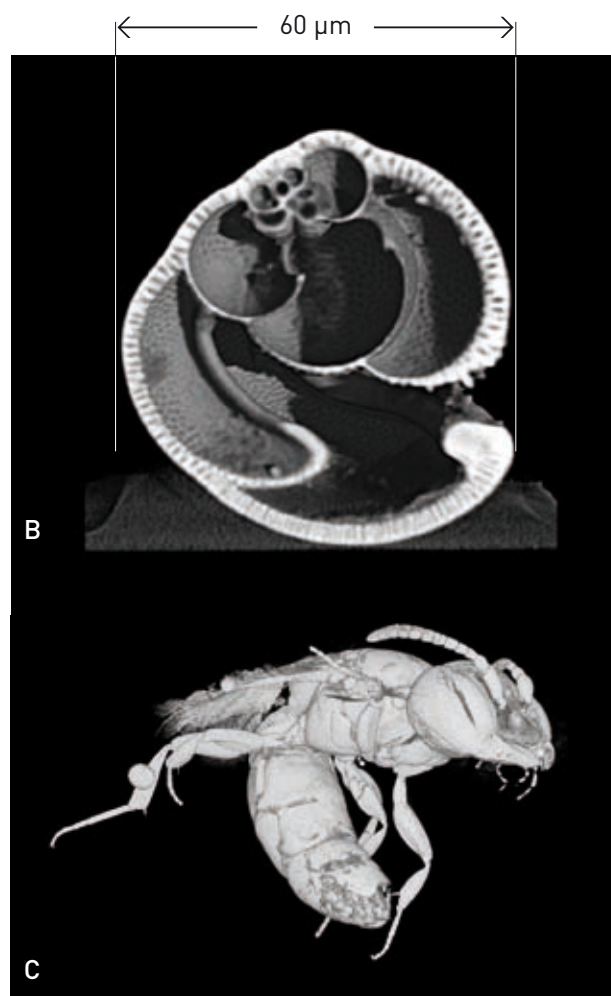
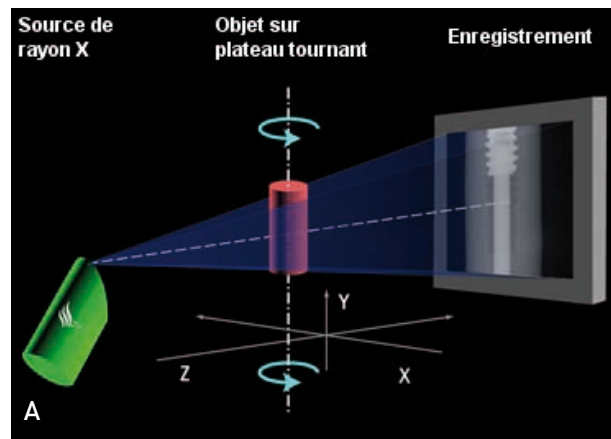


Fig.1
Principe de la tomographie assistée par ordinateur et exemples d'applications en sciences naturelles.

A - Détail d'une chaîne instrumentale classique (source de rayons X, porte-échantillon rotatif, détecteur) en tomographie assistée par ordinateur (phoenix | x-ray) ;

B - Test de foraminifère, vue en coupe virtuelle (MNHN, A.-C. Bartolini) ;

C - Extraction virtuelle d'une guêpe fossile conservée en ambre (MNHN, A. Nel).

Le contexte national et international

Le Muséum national d'Histoire naturelle, l'un des plus anciens organismes scientifiques français, et le CNRS démontrent leur dynamisme et se positionnent aujourd'hui au centre d'un réseau de partenaires nationaux et internationaux, tels que les établissements universitaires, l'Inserm, l'UNESCO, les commissions européennes, ou le Conseil de l'Europe.

Le Muséum et ses partenaires ont la volonté de devenir incontournables dans l'utilisation et l'exploitation des technologies de l'imagerie 3D. Dans cet objectif, la mise en place d'une plate-forme d'imagerie 3D avec un équipement de tomographie, en plein cœur de Paris, sur le site du Jardin des Plantes, est un pré-requis indispensable.

Quelques centres de recherche travaillant sur différentes disciplines des sciences naturelles ont déjà acquis un microtomographe ou envisagent de le faire : des structures françaises (par exemple l'Institut international de paléoprimateologie, paléontologie humaine : évolution et paléoenvironnements (CNRS/Université de Poitiers), l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier (CNRS/Université de Montpellier 2/IRD), le synchrotron SOLEIL (CNRS/CEA) dans le cadre de l'unité propre de service (CNRS/ministère de la Culture et de la communication/MNH) IPANEMA) et étrangères de niveaux d'excellence équivalents à celui du Muséum (Natural History Museum, Londres ; American Museum of Natural History, New York) sont déjà équipés ; le Museum für Naturkunde (Berlin) va bientôt l'être.

Une compétitivité internationale

La communauté scientifique internationale utilise de plus en plus, et ce dans tous les domaines des sciences naturelles, les techniques d'investigation par imagerie 3D. La croissance exponentielle du nombre de publications (ainsi que de communications au cours de congrès internationaux) présentant des résultats scientifiques issus de la microtomographie en témoigne. Pour le moment, la compétitivité internationale se joue, en ce domaine, principalement entre les pays européens, et avec les pays anglophones (États-Unis et Australie).

La recherche française, malgré un accès relativement limité aux équipements technologiques nécessaires, n'accuse pas de retard flagrant. Les capacités techniques et la largeur des champs d'applications font de **cet équipement d'imagerie le plus performant dans le monde des sciences naturelles.** Fort de l'expérience et des compétences de plusieurs chercheurs utilisant déjà les méthodes d'imagerie, le Muséum national d'Histoire naturelle se place désormais, grâce à cette acquisition, dans une situation privilégiée **ayant des conséquences hautement significatives en termes de relations internationales avec les communautés scientifiques.**

Quelques résultats de programmes de recherche obtenus par équipements tomographiques extérieurs

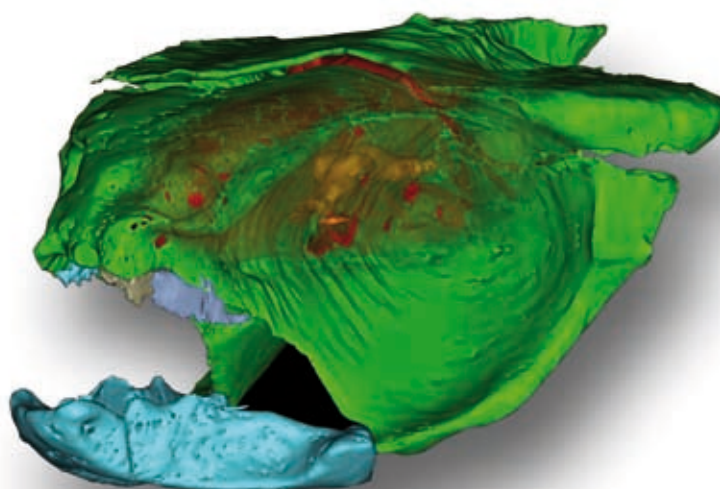
Les projets de recherche des différentes équipes du Muséum et du CNRS concernées par l'utilisation d'un CT Scan conventionnel sont **nombreux et diversifiés**. Ils s'appuient sur des **échantillons d'étude issus des collections du Muséum**. Les riches et vastes collections d'invertébrés actuels (arthropodes, mollusques) et fossiles (insectes dans l'ambre, ammonites), de vertébrés actuels (poissons, amphibiens, reptiles, oiseaux, mammifères) et fossiles (poissons, dinosaures, mammifères), de végétaux actuels et fossiles, d'anthropologie (collections du Musée de l'Homme), et de météorites sont parmi les plus sollicitées pour des études par microtomographie.

Quelques exemples de recherches ayant nécessité un accès CT Scan auprès de prestataires extérieurs (centres hospitaliers, prestataires privés, etc.) :

Paléontologie

Étude des structures anatomiques des crânes et endocrânes des premiers gnathostomes (UMR CNRS 7207¹)

Des spécimens fossiles de vertébrés du Paléozoïque ont été sélectionnés (rareté, intérêt phylogénétique, absence de déformation, etc.) pour des acquisitions par CT Scans conventionnels auprès de prestataires de service. Les différentes structures anatomiques de crânes, et particulièrement d'endocrânes, ont ainsi pu être décrites pour la première fois en très grand détail avec un grand nombre d'informations nouvelles. Parmi les résultats récemment acquis, l'étude d'endocrânes de chondrichtyens carbonifères (requins de 300 millions d'années) a permis de mettre en évidence (par CT Scan puis par lumière synchrotron à l'ESRF, Grenoble), dans un de ces endocrânes, un cas de conservation exceptionnelle de cerveau ouvrant la voie à de futurs travaux paléo-neuroanatomiques (Pradel et al. 2009).

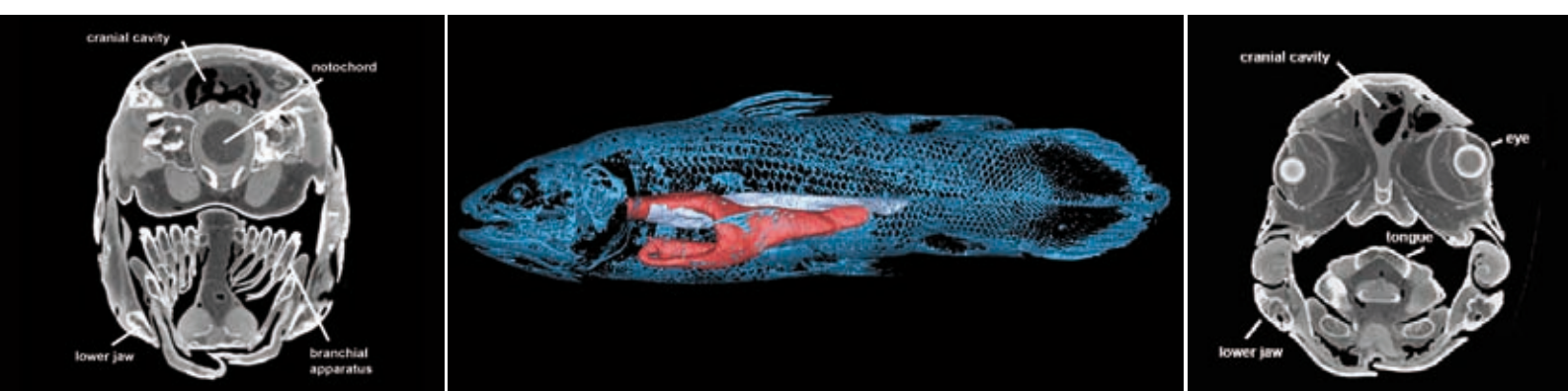


Crâne (vert), endocrâne (rouge) et cerveau (orange) d'un chiméroïde du Carbonifère (- 300 Ma) du Kansas (MNHN, A. Pradel).

¹ Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements, Département Histoire de la Terre

Anatomie des sarcoptérygiens non-tétrapodes actuels (UMR CNRS 7207²)

Les coelacanthes et les dipneustes, bien que très faiblement représentés aujourd'hui, ont été des groupes florissants depuis le Dévonien. Il est primordial de comprendre les relations entre coelacanthes, dipneustes et tétrapodes, mais également les relations phylogénétiques au sein de chaque groupe. En ce sens, l'anatomie du coelacanth actuel *Latimeria* se doit d'être réétudiée en détail en utilisant les nouvelles technologies non invasives et non destructives. Dans cette optique, une tomographie aux rayons X d'un des rares spécimens intacts (non disséqué) de *Latimeria chalumnae* du Muséum a été réalisée à partir d'un CT Scan médical. Les modélisations 3D obtenues permettent d'isoler virtuellement les structures anatomiques de ce coelacanth. Les résultats concernant le poumon vestigial, l'organe rostral et la cavité endocrânienne sont très prometteurs et la préparation d'un atlas anatomique 3D de *Latimeria* est prévue sur le moyen terme.



Le coelacanth actuel *Latimeria chalumnae*. Coupe transversale au niveau de l'extrémité postérieure de la mâchoire inférieure (à gauche). Vue latérale de la modélisation 3D du spécimen, avec système digestif et poumon vestigial en position antérieure (au milieu). Coupe transversale au niveau des globes oculaires (à droite). (MNHN, G. Clément)

Paléontologie

Un autre domaine de recherche nécessitant un accès à un CT Scan conventionnel est la paléontologie. En effet, cet outil de capture et d'analyse d'images permet, par exemple, de découvrir la présence d'arthropodes terrestres inclus dans des morceaux d'ambre complètement opaques datant du Crétacé. Contrairement aux résines fossiles cénozoïques, plus de la moitié des morceaux d'ambres mésozoïques sont opaques et donc inutilisables, ce qui constitue une perte importante de fossiles. Les collectes de terrain stockées actuellement au Muséum comprennent de nombreux morceaux d'ambres opaques potentiellement très fossilifères. Les analyses et recherches réalisées à l'ESRF de Grenoble ont démontré l'efficacité de la tomographie pour la recherche de ces inclusions et surtout pour leur étude fine³. Les récentes acquisitions par CT Scan conventionnel sont de très hautes qualités (cf. figure). Les données CT Scan peuvent ainsi se révéler suffisantes pour déterminer et décrire des spécimens d'arthropodes inclus dans l'ambre.

Reconstitution virtuelle d'un hyménoptère Sphecidae (4 mm) inclus dans l'ambre éocène de Creil, France (-50 Ma). Acquisitions obtenues par CT Scan (MNHN, A. Nel).



² Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements, Département Histoire de la Terre

³ Ces travaux ont notamment impliqué les Laboratoire Géosciences Rennes (CNRS/Université de Rennes) et Laboratoire de Paléontologie du Muséum national d'Histoire naturelle de Paris (CNRS/MNHN), ainsi que l'ESRF

Modèle en plomb historique et modélisation du diamant bleu. (MNHN, F. Farges)



Gemmologie

La récente reconstitution du diamant bleu de la Couronne à partir de son moulage identifié en 2007 dans les réserves du Muséum a permis de recréer le chef d'œuvre du 17^{ème} siècle, taillé à partir d'un brut de diamant bleu ramené des Indes en 1668 par le célèbre explorateur Jean- Baptiste Tavernier. Les acquisitions par CT Scan des modèles en plomb de diamants célèbres, impliquant certaines équipes du Laboratoire de minéralogie et cosmochimie (MNHN/CNRS) permettent de les recréer et de comprendre les anciennes techniques de taille de diamants aujourd'hui disparus (car retaillés suivant des formes plus modernes ou perdus ou volés) (Farges et al. 2008).

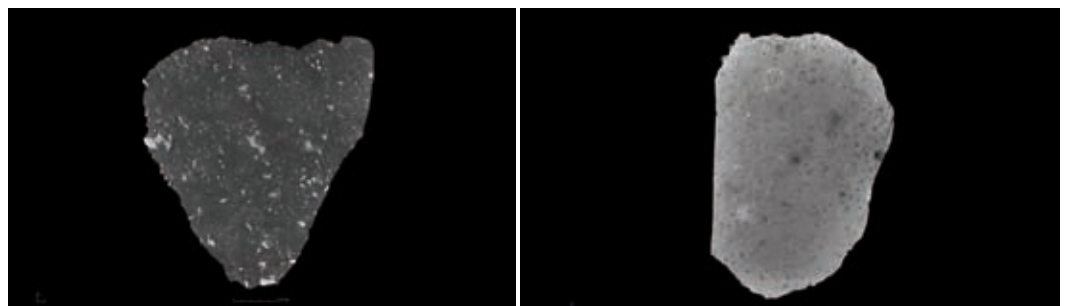
Cosmochimie

L'application de la microtomographie par CT Scan à l'étude des météorites est nouvelle et prometteuse (quelques travaux réalisés aux Etats-Unis et au Japon : Tsuchiyama et al. 2002, Ebel et al. 2008). En effet, les météorites sont des échantillons rares, scientifiquement précieux, et souvent très hétérogènes. Il est fréquent que certains chercheurs soient à la recherche d'un composant ou d'une phase spécifiques ; une vision 3D des échantillons guiderait ainsi les prélèvements. Les chondrites sont les roches les plus primitives de notre système solaire. Une communauté active les étudie afin de comprendre les conditions de formation du Soleil et de la Terre. Les intérêts se portent notamment sur la distribution en 3D et la composition de leur fraction métallifère, pour une meilleure compréhension de l'origine du noyau de la Terre.

Coupes virtuelles et modèles 3D de météorites du Niger et du Mexique (MNHN AST-RX, B. Mora, B. Zanda)



Chondrite du Niger et chute avec inclusions réfractaires du Mexique (Allende), avec coupes virtuelles de celles-ci. (MNHN AST-RX, B. Mora, B. Zanda)



Paléoanthropologie

Le laboratoire « Histoire naturelle de l'Homme préhistorique » (MNHN/CNRS) a réalisé des travaux conséquents sur les structures endocrâniennes, la croissance des tissus dentaires ainsi que sur la paléohistologie osseuse des hommes fossiles. Voici un exemple de réalisation récente : le 6 décembre 1927, le Musée Royal de l'Afrique Central (MRCA) reçoit le crâne et la peau d'un chimpanzé adulte femelle récolté dans le bassin du fleuve Congo, dans l'actuelle République démocratique du Congo. En 1933, Coolidge désigne le crâne du chimpanzé femelle comme type de *Pan paniscus*, nouvelle espèce de chimpanzé. Il s'agissait là de la première étude majeure consacrée au chimpanzé pygmée, mieux connu sous le nom de bonobo. Ce spécimen, de même que le matériel crânien d'autres spécimens de bonobos et de chimpanzés que contiennent les collections du Muséum, fait actuellement l'objet d'études anatomiques utilisant les technologies les plus modernes d'imagerie telles que le CT Scan. Cette approche permet aux scientifiques d'étudier les aspects anatomiques externes et internes du spécimen sans dommage aucun, portant ainsi ce matériel centenaire dans un nouvel âge de la recherche scientifique.

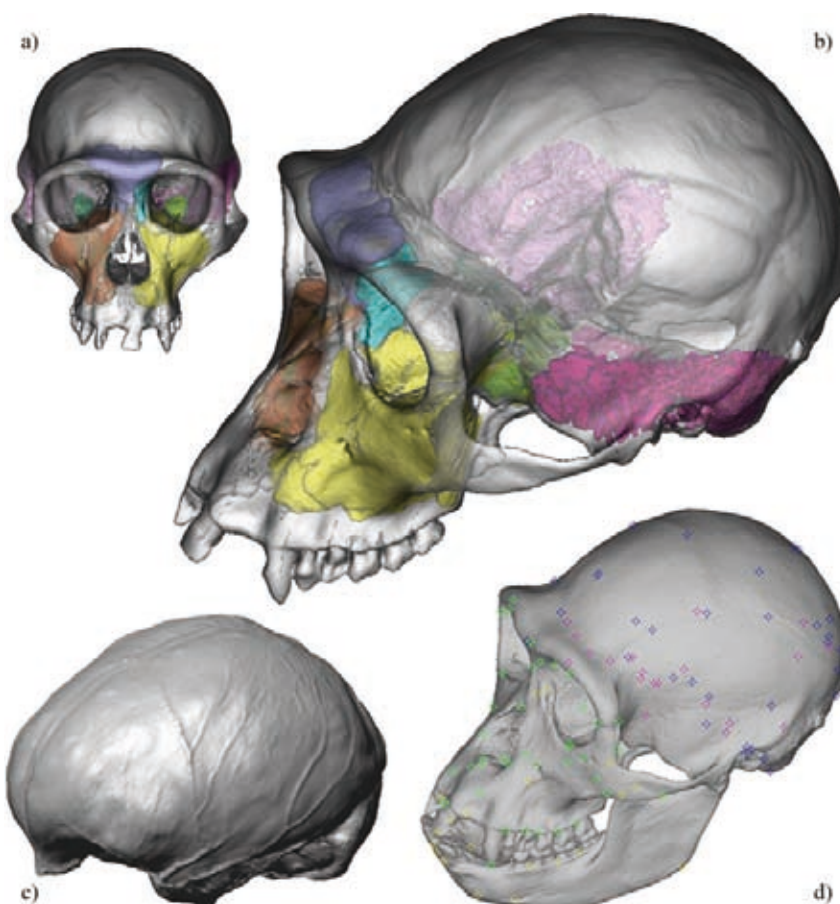


Illustration de l'anatomie crânienne interne du spécimen type de *Pan paniscus* : reconstructions 3D du crâne en vue antérieure (a) du crâne en vue supéro-latérale (b) de l'endocrâne en vue supéro-latérale (c) et du crâne et de la mandibule montrant la position des points remarquables (d) (MNHN, Balzeau et al. 2009).

Les projets de recherche en cours nécessitant un accès à la tomographie haute résolution

Malgré la difficulté d'accès et le coût des acquisitions tomographiques auprès de prestataires extérieurs, les résultats obtenus et présentés ci-avant ne sont pour le moment que des jalons innovants et très encourageants pour le futur. Les champs d'investigation sont immenses, les chercheurs ayant aujourd'hui accès aux structures internes de leur matériel d'étude de manière totalement non invasive avec la possibilité de traiter les volumes virtuels avec des logiciels d'analyse performants.

Voici ci-après la présentation de quelques projets de recherche, choisis en fonction de l'accès au matériel d'étude (en grande majorité présent dans les collections du Muséum), de l'intérêt scientifique sur le plan national et international, et selon leur faisabilité, c'est-à-dire la certitude d'obtention de données issues de la microtomographie par CT Scan qui puissent, en aval, être analysées par des logiciels de post-traitement.

Paléontologie

Pour l'UMR 7207 « Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements », (MNHN/CNRS/UPMC), la microtomographie par rayons X conventionnelle est un outil remarquable, souvent seul capable de mettre en évidence les structures internes les plus fines. Une sélection, non exhaustive, de projets de recherche qui illustrent un vaste panel d'applications au sein des thématiques de l'unité peut être présentée :

- Comparaisons anatomiques des cavités endocrâniennes des premiers gnathostomes du Paléozoïque (placodermes, chondrichthyens, actinoptérygiens, sarcoptérygiens non-tétrapodes). Ces données anatomiques permettront d'affiner la phylogénie des gnathostomes, encore controversée, par la mise en évidence de morphotypes ancestraux et de spécialisations précoces.
- Étude du matériel unique de la plus ancienne grenouille connue, *Triadobatrachus* du Trias (-240 Ma) de Madagascar, afin d'y observer de nouveaux caractères morpho-anatomiques jusque là ignorés.
- Modélisation de la structure interne de la coquille (étude des processus de biominéralisation et de destruction pendant l'ontogenèse) des gastéropodes cénozoïques et mésozoïques.
- Mise en évidence de structures internes des ammonoïdes : l'utilisation de ce type de technique est inédite chez les céphalopodes fossiles, des résultats concernant l'anatomie de l'animal comme la découverte de bras ou encore du nombre de paires de branchies sont très attendus par la communauté scientifique.
- Étude du matériel crânien des mammifères paléocènes (-60 Ma) d'Ouled Abdoun (Maroc) : apport à la connaissance anatomique et à la reconstitution du crâne des plus anciens ongulés africains (paenongulés), et en particulier des premiers proboscidiens (« éléphants »).
- Étude de la structure endocrânienne de mammifères ongulés fossiles d'Amérique du Sud de l'Éocène-Oligocène (-35 Ma). Apports phylogénétiques et implications fonctionnelles.

Paléoanthropologie

Trois thématiques scientifiques principales sont abordées par le laboratoire « Histoire Naturelle de l'Homme préhistorique » (MNHN/CNRS) : variation de la morphologie interne crânienne dans l'évolution des hominidés, analyse quantitative des tissus dentaires, charges biomécaniques et agencement osseux. Les apports de la mise en place au Muséum d'une plate-forme de microtomographie sont multiples et d'importance : facilité d'accès, amélioration et homogénéisation de la qualité des données (facteurs importants pour des analyses comparatives), nouveaux développements méthodologiques et analytiques, nécessité d'« immortalisation » du patrimoine paléoanthropologique (par essence rare, fragile et très étudié).

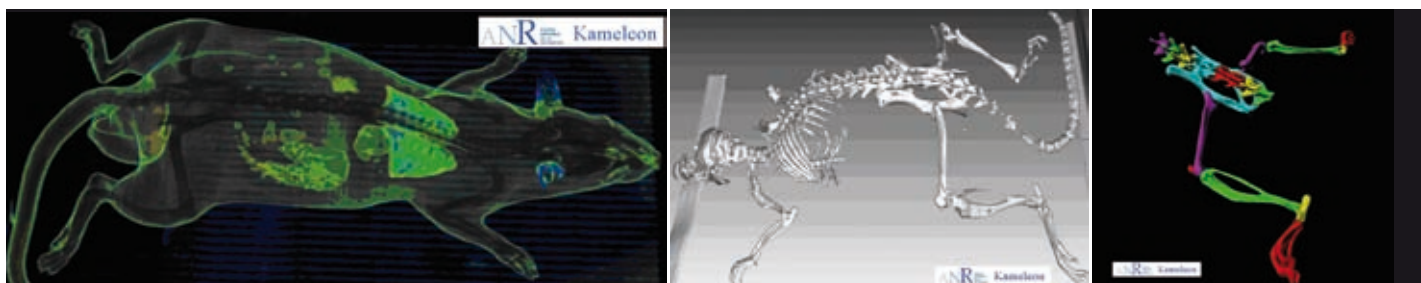
Archéozoologie

Le laboratoire « Archéozoologie, archéobotanique : société, pratiques et environnements » (MNHN/CNRS) concentre ses efforts de recherche sur l'histoire tardiglaciaire⁴ et holocène⁵ des interactions naturelles et culturelles entre les sociétés humaines et les populations et peuplements animaux et végétaux, principalement à partir des restes issus des fouilles archéologiques. Les nombreuses investigations non destructives qu'autorise un CT Scan sont particulièrement appréciables lorsqu'il s'agit de restes archéologiques à valeur patrimoniale.

Morphologie et locomotion

L'équipe « MorphoMotion : adaptations morphologiques et régulation de la locomotion » du laboratoire « Mécanismes adaptatifs : des organismes aux communautés » (CNRS/MNHN) utilise la microtomographie conventionnelle afin d'exploiter les données anatomiques internes et externes de vertébrés actuels pour l'étude des structures squelettiques en mouvement.

Spécimen de rat imagé par CT Scan, laissant apparaître les viscères et le squelette. Modélisation 3D des membres postérieurs afin d'étudier les contraintes liées à la locomotion (MNHN, M. Herbin).



Phylogénie

Le laboratoire « Systématique, adaptation, évolution » (MNHN/CNRS/UPMC/IRD) étudie la taxonomie fine, la phylogénie à plusieurs échelles, les concepts de l'espèce, de la spéciation et ceux de la reconstruction phylogénétique. Les études anatomiques y ont toute leur place. Les difficultés à obtenir des spécimens (frais ou de collections) de certaines espèces pour dissections ont amené certains scientifiques à s'intéresser aux techniques d'imagerie médicale sur ces spécimens. L'absence de destruction des spécimens par ces techniques (CT Scan, IRM, échographie, etc.) constitue un des atouts et intérêts majeurs.

Biologie des organismes aquatiques

Le laboratoire « Biologie des organismes et écosystèmes aquatiques » (MNHN/CNRS/UPMC/IRD) a de nombreux projets scientifiques concernant l'étude de l'anatomie et de la morphologie structurales des tissus biominéralisés chez les poissons (otolithes), les échinodermes (squelettes), les coraux (cf. ci-contre), les mollusques (coquilles), et les vers tubicoles. Il s'agit d'une part de mieux comprendre les interactions entre le minéral et la partie organique et, d'autre part, de définir des structures qui peuvent éventuellement être utilisées comme critères de classification. L'utilisation d'un microtomographe permettra de passer des séries d'échantillons, de visualiser l'état de développement des structures et de cibler ainsi les stades et les zones d'intérêts.

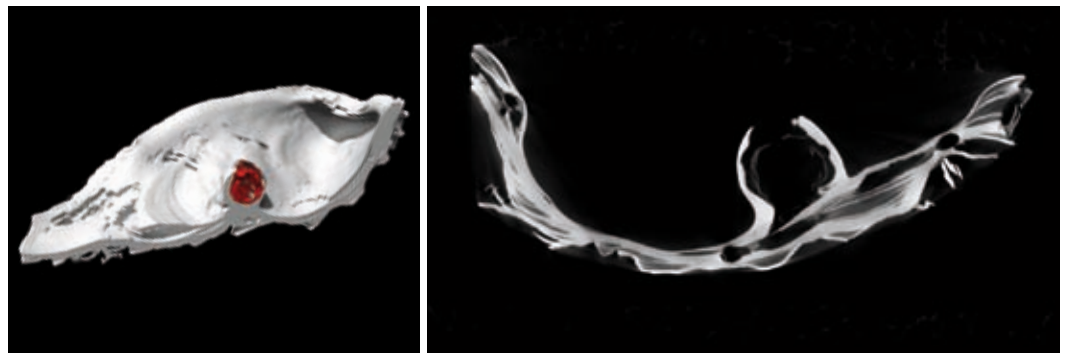
⁴ Dernière phase du Pléistocène, précédant l'époque actuelle de l'Holocène. Le Tardiglaciaire correspond à l'ultime subdivision de la dernière glaciation (glaciation de Würm dans les Alpes), durant laquelle le climat se réchauffe globalement même s'il est marqué par des oscillations froides.

⁵ Époque interglaciaire s'étendant sur les 10 000 dernières années

Section virtuelle d'une coquille de nautilus (MNHN AST-RX, B. Mora, F. Goussard)



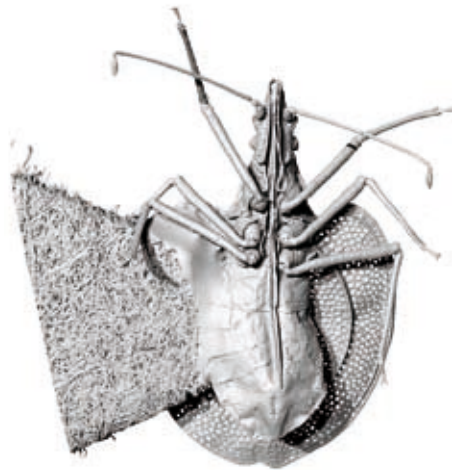
Coupe virtuelle et section du modèle 3D au niveau d'une excroissance biominérale d'une coquille d'huitre (MNHN AST-RX, B. Mora, F. Goussard, C. Milet).



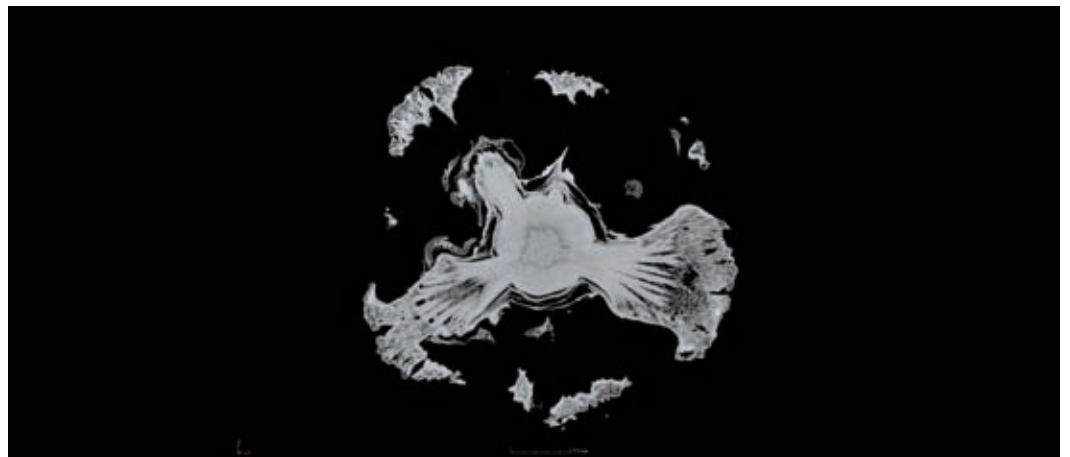
Entomologie, paléontologie, botanique et paléobotanique

Les équipes du laboratoire « Origine, structure et évolution de la biodiversité » (MNHN/CNRS) s'intéressent à l'origine, la structure et l'évolution de la biodiversité. Dans le domaine de l'entomologie, un intérêt nouveau est la capture d'images 3D de structures internes de petits invertébrés, jusqu'à l'échelle micrométrique, auparavant inaccessibles, structures très importantes pour les analyses phylogénétiques. Ce type de recherche pourra aussi être mené sur les fossiles inclus dans des nodules ou encore partiellement engagés dans des gangues rocheuses. Il est souvent impossible d'éliminer la gangue rocheuse sans dégrader ou détruire le fossile. Ceci est particulièrement vrai pour les nodules du Permien inférieur de Montceau-les-Mines (plus de 60 000 nodules attendent dans les collections du Muséum).

Le matériel présent dans les collections de botanique nécessite également l'apport de la microtomographie pour mettre en évidence les structures internes de végétaux, tels que les fruits, les graines, les tissus des appareils végétatifs, etc. Des tests ont été réalisés sur des graines de petites tailles et sur des stipes de palmiers. Les résultats sont prometteurs et ouvrent des champs d'investigation pour la recherche en systématique, phylogénie, physiologie, et processus évolutifs. Les résultats obtenus sur du matériel fossile (paléobotanique) sont également scientifiquement très pertinents.



Modélisations 3D d'insectes actuels millimétriques et d'une pomme de pin actuelle (modèle 3D, section virtuelle et coupe transversale) (MNHN AST-RX, E. Guilbert, F. Goussard, B. Mora).



Les collections du Muséum : conservation, préservation et valorisation

La conservation préventive des collections

L'imagerie 3D est un apport indiscutable pour la conservation préventive des collections. Les modélisations tridimensionnelles de spécimens rares ou de types fragiles sont réalisées sans aucun dommage pour les spécimens.

Toute manipulation des spécimens entraîne des dégradations, parfois irréversibles et la réalisation de moulages est, malgré toutes les précautions prises, toujours dangereuse pour l'intégrité des spécimens. L'acquisition de données microtomographiques est sans dommage pour le spécimen, sur le court comme sur le long terme.

Les images (coupes virtuelles) obtenues par tomographie sont utiles pour plusieurs raisons :

- C'est une mémoire du spécimen. Toutes les données morphologiques, anatomiques, dimensionnelles du spécimen sont conservées au sein des différentes coupes obtenues. Cette pile d'images est enregistrée sur support numérique. L'éventuelle perte ou destruction d'un spécimen scanné serait pour partie compensée par l'existence de sa mémoire virtuelle.
- Ces coupes permettent de révéler l'histoire de la conservation du spécimen (les précédentes préparations, les renforcements, les points de fractures, etc.). Ces informations sont une aide précieuse avant toute nouvelle restauration.
- Les coupes virtuelles obtenues peuvent être traitées aisément sous différents logiciels de modélisation 3D afin d'obtenir une modélisation 3D du spécimen. Le spécimen peut alors être manipulé virtuellement sur écran (zoom, mouvements, mesures, etc.). Par ailleurs, des animations 3D de structures complexes (système nerveux d'un organisme actuel, cavité endocrânienne de dinosaure, réseau métallifère d'une météorite, morphologie d'un insecte fossile inclus dans l'ambre, structure de l'oreille interne d'un Homme de Néandertal, etc.) sont des supports pédagogiques d'une extrême clarté pour le grand public.
- La forme virtuelle de ces spécimens, ou parties de ces spécimens, peut faire l'objet d'une reproduction matérielle. Des répliques des spécimens peuvent être produites à volonté et à toutes les échelles de taille, à partir de la forme numérique d'objets 3D. Des spécimens fréquemment demandés pour des expositions temporaires ou permanentes (musées nationaux et internationaux), mais trop fragiles pour être prêtés ou moulés, pourront ainsi être répliqués et envoyés aux demandeurs.

L'intérêt pour la valorisation scientifique des collections

Régulièrement, des chercheurs étrangers à l'institution demandent à consulter les collections du Muséum pour leur recherche. Ces demandes régulières pourront être fortement valorisées si, en plus des spécimens réels, les données tomographiques de ces mêmes spécimens sont mises à la disposition des visiteurs (à titre d'exemple environ 200 chercheurs-visiteurs par an sont reçus en Anatomie Comparée et autant dans les collections de Paléontologie, une centaine en Anthropologie). Les acquisitions tomographiques de certains spécimens pourront être réalisées avant la visite du chercheur, et selon ses requêtes.

En diminuant les fréquentes manipulations des objets de collections, la sauvegarde de ceux-ci est la meilleure réponse aujourd'hui pour une conservation optimale dans le temps.

Les partenaires financiers

Le coût global de l'acquisition de cet équipement s'élève à 876 000 €.



Conseil régional d'Île-de-France

L'enseignement supérieur et la recherche au cœur des priorités régionales
La Région Île-de-France est fière d'être le premier financeur du CT Scan, un équipement de pointe qui entretiendra le dynamisme scientifique du Muséum national d'Histoire naturelle et de ses nombreuses institutions partenaires en Île-de-France. La Région a pris en charge le nouvel équipement à hauteur de 360.000 euros dans le cadre de son dispositif SESAME. Depuis 1993, ce dispositif permet l'acquisition par les laboratoires d'équipement de recherche « semi-lourds ». Plus de cent projets ont ainsi été financés entre 2004 et 2010 pour un montant total de 48,1 millions d'euros. Particulièrement attaché à ce dispositif, le Conseil régional a récemment décidé de porter le montant maximal de la subvention de 3 à 5 millions d'euros, afin de cofinancer de plus grands équipements.

Depuis 2004, la recherche et l'enseignement supérieur ont fait l'objet d'un engagement sans précédent de la part de la Région Île-de-France, qui y consacre chaque année 5% de son budget. La Région finance des politiques classiques d'investissement en faveur de l'immobilier universitaire ainsi que des dispositifs expérimentaux ou innovants pour accompagner au quotidien étudiants, enseignants-chercheurs et chercheurs.

Suite aux « Assises régionales de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation », le Conseil régional a confirmé en novembre 2010 son engagement aux côtés des acteurs de la Recherche et de l'Enseignement supérieur.

La Région a annoncé un plan d'investissement immobilier de 900 millions d'euros et voté une nouvelle politique cadre qui fixe ses quatre grandes priorités pour la période 2011-2016 : l'amélioration des conditions de vie et d'études des étudiants franciliens, le soutien à l'emploi scientifique, le renforcement de la recherche et la promotion du dialogue science et société.

Avec un budget 2011 de 66,5 millions d'euros pour l'enseignement supérieur et 148,3 millions d'euros pour la recherche, la Région confirme cet engagement sans faille aux côtés des chercheurs et des étudiants.

www.iledefrance.fr

Participation financière pour l'acquisition de cet équipement : 360 000 euros



Muséum
national
d'Histoire
naturelle

Muséum national d'Histoire naturelle

Établissement scientifique de renom depuis plus de 300 ans, unique en son genre, le Muséum national d'Histoire naturelle est un acteur essentiel de la conservation de la nature. Il est l'une des rares institutions en France et dans le monde à être un spécialiste de la biodiversité et, s'appuyant sur ses 5 missions - recherche, collections, enseignement, expertise, diffusion - à appréhender les problématiques naturalistes et environnementales de manière à la fois transdisciplinaire et très spécialisée.

Fort de son histoire, le Muséum est devenu un grand établissement de recherche et est aujourd'hui, à travers sa mission d'expertise, un centre de référence concernant l'étude et la protection de la biodiversité. Missions, coopérations avec des laboratoires français et étrangers, collaborations variées, le Muséum est en constante interaction avec l'extérieur. Impliqué dans de nombreux programmes et réseaux de recherche mondiaux (Centre thématique européen sur la Diversité Biologique (CTE/DB), Global Biodiversity Information Facility (GBIF), le Muséum assure également pour le gouvernement français la fonction de coordinateur scientifique et d'expert sur de nombreux projets, nationaux et internationaux (Système

d'Information sur la Nature et les Paysages (SINP), Natura 2000...). Enfin, les diverses actions de diffusion sont aussi l'occasion d'informer et de sensibiliser un auditoire varié à la protection de notre planète : expositions, ateliers pédagogiques pour les scolaires, cours publics, diffusions de films scientifiques.

Aujourd'hui, le Muséum national d'Histoire naturelle compte 1900 personnes, dont 450 chercheurs et 350 étudiants (master et école doctorale). Déployé sur plus de 12 sites à Paris, en Ile-de-France et en régions, l'Institution accueille en moyenne 2 millions de visiteurs par an.

www.mnhn.fr

Participation financière pour l'acquisition de cet équipement : 200 000 euros



Fondation Simone et Cino del Duca - Institut de France

La Fondation Simone et Cino del Duca créée en 1975 - et abritée à l'Institut de France depuis 2005 - a pour but de favoriser la recherche dans les domaines scientifique, culturel et artistique, en France et à l'étranger. Le grand prix scientifique, dont le thème est défini chaque année par l'Académie des sciences, est destiné à récompenser une équipe de chercheurs français ou européens de notoriété internationale. En 2008, le jury du Grand Prix Scientifique a désigné comme lauréat de ce prix, doté de 300.000 euros, M. Philippe Janvier, Directeur de recherche au Laboratoire « Paléodiversité : Histoire et Dynamique » du Muséum national d'Histoire naturelle.

L'Institut de France et le jury du prix Simone et Cino del Duca ont été heureux et fiers de reconnaître un des plus grands paléontologues de notre temps et de contribuer à l'achat de cet équipement de premier ordre, utile à tout le Muséum national d'Histoire naturelle.

www.institut-de-france.fr

Participation financière pour l'acquisition de cet équipement : 200 000 euros



CNRS

Créé en 1939, le Centre national de la recherche scientifique est un organisme public de recherche (Etablissement public à caractère scientifique et technologique, placé sous la tutelle du Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche). Il produit du savoir et met ce savoir au service de la société. Avec plus de 34 000 personnes (dont 25 630 statutaires - 11 450 chercheurs et 14 180 ingénieurs, techniciens et administratifs), un budget primitif pour 2011 de 3,204 milliards d'euros dont 677 millions d'euros de ressources propres, une implantation sur l'ensemble du territoire national, le CNRS exerce son activité dans tous les champs de la connaissance, en s'appuyant sur plus de 1100 unités de recherche et de service. Des chercheurs éminents ont travaillé, à un moment ou à un autre de leur carrière, dans des laboratoires du CNRS. Avec 16 lauréats du prix Nobel et 11 de la Médaille Fields, le CNRS a une longue tradition d'excellence. Il marque également sa volonté d'être ouvert aux partenariats, notamment industriels. En témoignent 4382 brevets principaux fin 2010 dont 495 nouveaux brevets déposés en 2010, 864 licences actives et 593 entreprises innovantes créées depuis 1999.

www.cnrs.fr

Participation financière pour l'acquisition de cet équipement : 116 000 euros