



3D imaging applied to palaeontology and palaeoanthropology: The new “pass walls”

*L'imagerie 3D appliquée à la paléontologie et à la paléoanthropologie :
les nouveaux passe-murailles*

Préface

« Il y avait à Montmartre un excellent homme nommé Dutilleul qui possédait le don singulier de passer à travers les murs sans en être incommodé », tel est le début de la charmante nouvelle intitulée *Le Passe-Muraille* de l'écrivain Marcel Aymé ; dans cette fiction pleine d'humour, écrite en 1943, l'auteur peut, au gré de sa fantaisie, transporter son héros dans les lieux les plus insolites en l'affranchissant des lois de la physique.

Les anatomistes et plus particulièrement les paléoanatomistes ont longtemps rêvé de pouvoir, tout comme Monsieur Dutilleul, percer les mystères de l'architecture et la disposition des organes internes des formes vivantes qu'ils étudient.

Dès les débuts de l'anatomie comparée, les naturalistes éprouvèrent le besoin d'examiner dans les moindres détails les particularités des organismes. C'est ainsi que le célèbre Georges Cuvier prépara avec beaucoup de soin le squelette de nombreux poissons en désarticulant les os du crâne et en les disposant dans des boîtes pour mieux connaître et comprendre leur structure. Ce travail préliminaire lui permit, en collaboration avec son collègue Achille Valenciennes, de proposer une description et une classification raisonnée de tous les poissons connus au début du XIX^e siècle.

Dans le cas des organismes fossiles, dont les restes squelettiques sont enchâssés dans une gangue de pierre, le travail s'avère beaucoup plus difficile, voire impossible. S'il est relativement aisé de préparer, par des moyens mécaniques, la surface externe d'un crâne de poisson ou de reptile à l'aide d'aiguilles ou de petits marteaux piqueurs, il est beaucoup plus difficile, voire impossible de dégager des parties internes, plus profondes, comme l'endocrâne ; il faut renoncer très souvent à l'examen des relations intimes entre certains os, à suivre le trajet des canaux des nerfs et des vaisseaux et à accéder à la cavité cérébrale.

Preface

“There was, in Montmartre, a very nice man called Dutilleul who had the strange gift of going through walls without being incommodated”, thus begins the lovely short story titled *Le Passe-Muraille* from the novelist Marcel Aymé. According to this fiction full of humour, written in 1943, the author has his hero travel according to his fantasy, which leads him in the most unexpected places, freed from the laws of physics.

Anatomists, and particularly palaeoanatomists, have long dreamed, just as Mr Dutilleul, of being able to break through the mysteries of the architecture and the disposition of the internal organs of the living forms they study.

At the very beginning of comparative anatomy, naturalists felt the necessity of studying in every detail the particularity of organisms. This is how the famous Georges Cuvier prepared, with much care, the skeletons of many fishes, disarticulating the bones of skulls and setting them in boxes to study and understand better their structures. This preliminary work allowed him, in collaboration with his colleague Achille Valenciennes, to propose a description and rational classification of all the fishes known at the beginning of the 19th century.

In the case of fossil organisms whose skeletons are set in a matrix of stone, the work is much more difficult, if not impossible. If it is rather easy to prepare with mechanical means the external surface of the skull of a fish or of a reptile, with needles or small drilling hammers; it is sometimes much more difficult, even impossible, to prepare the internal parts which are deeper, like the endocranium. It is often necessary to restrain from studying the relations between some bones and to follow the course of the nervous and vessel canals to have some access to the cerebral cavity.

Plusieurs méthodes ont été initiées dans le passé pour résoudre ces difficultés : on sacrifia quelques crânes fossiles entourés de leur gangue, en les sectionnant longitudinalement ou transversalement. C'est ainsi que fut étudiée l'anatomie interne des crânes des premiers ichtyosaures découverts dans le Lias de Grande-Bretagne. On fit de même avec des crânes de crocodiles fossiles ou de mastodontes. Mais les informations fournies par cette méthode restaient fragmentaires.

On utilisa alors des acides pour dissoudre les fossiles enchâssés dans des sédiments calcaires. On put ainsi dégager en douceur les os fragiles des poissons du Crétacé inférieur de Ceara au Brésil ou préparer chacun des os du crâne de poissons cuirassés du Dévonien d'Australie ou du Maroc, pour reconstituer ensuite en trois dimensions la tête de ces animaux, en plaçant chacune des pièces dans leur position anatomique.

Dans le cas d'organismes de petites dimensions, il fut possible de préparer sous la loupe binoculaire, à l'aide de fines aiguilles, les endocrânes des premiers vertébrés fossiles. L'école suédoise de paléontologie, sous la houlette d'Éric Stensiö, se rendit célèbre par la qualité des préparations de ces fossiles et par la nouveauté des informations scientifiques qui furent ainsi apportées pour comprendre l'évolution du crâne des vertébrés. La méthode fut appliquée avec succès sur les endocrânes des placodermes du Dévonien d'Australie par Gavin Young et Roger Miles, et du Spitzberg par Daniel Goujet (MNHN, Paris). Au début du xx^e siècle, les Suédois perfectionnèrent encore leurs études en utilisant la méthode des sections sériées de l'Anglais William Johnson Sollas, qui consiste à effectuer dans un endocrâne une série de coupes parallèles sous forme de lames minces dont l'examen permet de reconstituer les structures anatomiques dans les trois dimensions. Cette méthode fut utilisée également pour l'étude d'autres organismes comme les coraux fossiles. Avec une technique encore plus élaborée, il fut possible aux chercheurs suédois d'obtenir des informations plus fines et plus nombreuses, en usant simplement le plan de section de quelques fractions de millimètres par simple polissage ; après chaque opération, chaque surface d'usure était photographiée, chaque prise de vue était agrandie et utilisée pour découper, dans des plaques de cire, les contours des structures osseuses ; on pouvait ainsi bâtir un modèle en cire très agrandi qui permettait de visualiser plus facilement les trajets des nerfs et des vaisseaux et la forme de la cavité cérébrale. Cette méthode fut introduite en France, au Muséum national d'histoire naturelle, par Jean-Pierre Lehman et appliquée à l'étude des endocrânes des poissons paléoniscides du Carbonifère du Kansas par Cécile Poplin et des endocrânes de poissons sans mâchoires du Silurien-Dévonien par Philippe Janvier.

Une autre manière de connaître les détails anatomiques d'un organisme fut d'utiliser l'extraordinaire découverte de l'Allemand Wilhelm Röntgen. Celui-ci en découvrant l'existence de rayons électromagnétiques à haute fréquence, qu'il nomma rayons X, a permis, à partir de 1895, l'examen des structures invisibles sur le vivant. Les radiographies si précieuses et si utiles aujourd'hui en médecine lui valurent l'obtention du premier prix Nobel de physique

In the past several methods have been initiated to solve these difficulties. Some fossil skulls were sacrificed and cut with their matrix into pieces, lengthwise or crosswise. This is how the internal anatomy of the first ichtyosaur skulls found in the Liassic of Great Britain was studied. The same procedure was followed with fossil crocodile or mastodon skulls. However, the information obtained in this way stayed fragmentary.

Then acid was used to dissolve the fossils embedded in calcareous sediments. The fragile bones of the Lower Cretaceous fossil fishes of Ceara in Brazil were softly released by this method, and also each one of the skull bones of the Placoderm fishes from Australia or from Morocco were thus prepared, to reconstruct in 3D the head of these animals by placing each piece in its anatomical position.

In the case of organisms of small dimensions, it was possible to prepare under a binocular microscope, with the help of fine needles, the endocranium of the first fossil vertebrates. The Swedish school of palaeontology under the head of Eric Stensiö became famous for the quality of its fossil preparations and for the novelty of the scientific information they obtained by this method for the understanding of the evolution of the vertebrate skull. This method was applied with success on the endocranium of the Placoderms from the Australian Devonian by Gavin Young and Roger Miles, and from Spitzberg by Daniel Goujet (MNHN, Paris). At the beginning of the 20th century, the Swedish improved even better their studies by using the method of thin sections of the Britain William Johnson Sollas, which consists of the preparation in an endocranium of a series of parallel slices, these thin slices allowing the reconstruction in three dimensions of the anatomical structures. This method was also employed for the study of other organisms such as fossil corals. With an even more elaborate technique, it became possible for the Swedish researchers to obtain more and better information by simply polishing each section a fraction of a millimetre, one after the other. After each operation, every wearing surface was photographed; each photograph was enlarged and used to cut out in wax slates the outline of the bony structures. An enlarged wax model could be made this way, which allowed one to visualize more easily the course of the nerves and the vessels and the shape of the brain cavity. This method introduced, in France at the *Muséum national d'histoire naturelle* by Jean-Pierre Lehman, was applied to the study of the endocranium of Paleoniscid fishes from the Carboniferous of Kansas (USA) by Cécile Poplin, and of jawless fishes from the Siluro-Devonian by Philippe Janvier.

Another way of knowing anatomical details of an organism was to use the extraordinary innovation of the German Wilhelm Röntgen. Röntgen by the discovery of the existence of high frequency electromagnetic rays he called X-rays, allowed, from 1895, the examination of the invisible structures of life. X-ray photographs, so precious and so useful today in medicine, have allowed him to get the first Nobel Prize for Physics in 1901. X-rays have naturally been used to break through the secrets of living beings and to realize considerable progress in the knowledge of their anatomy.

en 1901. Les rayons X ont tout naturellement été utilisés pour percer les secrets des organismes vivants et ont permis de réaliser des progrès considérables dans la connaissance de leur anatomie.

Mais cette technique ne pouvait cependant pas résoudre tous les problèmes posés. Le rayonnement X étant diffusé dans les trois dimensions, la lecture des détails reste difficile et l'interprétation des structures parfois délicate. C'est pourquoi, la mise au point par l'Anglais Godfrey Neubold Hounsfield en 1972, grâce à l'utilisation des travaux théoriques de l'Américain Alan Cormack, de la Computed Tomography (CT), c'est-à-dire de l'utilisation couplée des rayons X et de l'ordinateur, a permis une véritable révolution dans l'examen du vivant. L'ordinateur est capable de restituer l'ensemble d'un organisme qui a été balayé plan après plan par les faisceaux de rayons X et d'en proposer une image virtuelle en trois dimensions. Ce nouvel outil a ouvert un domaine d'applications extraordinaires en médecine et en chirurgie et a valu à ces deux scientifiques le prix Nobel de physique en 1979.

Mais cette technique fait aujourd'hui le bonheur des anatomistes et des paléoanatomistes. L'efficacité de la tomographie est telle, que l'on ne peut qu'être émerveillé en voyant sur un écran d'ordinateur les images extraordinaires d'un crâne de dinosaure ou de mammifère fossile dont les moindres détails apparaissent avec une visibilité parfaite et sans qu'il n'ait été besoin d'ôter la gangue qui les entoure. Le tracé des nerfs et des vaisseaux, la position des canaux semi-circulaires, la forme de la cavité cérébrale, les contours et les limites de chaque os, tout est devenu visible, tout est devenu accessible à l'étude. Grâce à la tomographie à haute résolution, grâce au rayonnement X synchrotron en contraste de phase, grâce aussi à la numérisation surfacique avec contact ou sans contact, les paléontologues peuvent pénétrer dans un monde inédit. Avec la tomodensitométrie et ses applications, chacun de nous peut s'identifier à Monsieur Dutilleul, le passe-muraille.

Philippe Taquet
*Laboratoire de paléontologie,
 Muséum national d'histoire naturelle,
 8, rue Buffon, 75005 Paris, France
 Adresse e-mail : taquet@mnhn.fr*

Disponible sur internet le 5 novembre
 2010

However, this technology could not solve all the problems. X-rays being spread in three dimensions, the reading of details is difficult and the interpretation of the structures is sometimes impossible. This is why the focusing by the Britain Godfrey Neubold Hounsfield in 1972 with the help of the theoretical works of the American Alan Cormack, of the Computed Tomography (CT), that is to say, the use of both X-rays and computer processing, has allowed a complete revolution in the study of life. The computer is able to visualise the whole image of an organism, which has been swept, plane-by-plane, by the beams of the X-rays, and to propose a virtual image in three dimensions. This new tool has opened an extraordinary field of applications in medicine and surgery, and has won the Nobel Prize in Physics in 1979 for these two scientists.

However, this technology has also made today anatomists and palaeoanatomists very satisfied. The efficiency of tomography is such that one can only be amazed at the sight of the extraordinary images of the skull of a dinosaur or of a fossil mammal skull on the screen, with the smallest details showing with perfect visibility, and without the necessity to free the fossil from its matrix. The nerves and the vessel trajectories, the position of the semi-circular canals, the outline and the limits of each bone, everything is visible; everything has become accessible for study. Thanks to high resolution tomography, thanks to synchrotron X-rays, thanks also to the surface digitisation, with or without contact, palaeontologists and palaeoanthropologists can penetrate into a new world. With the tomodensitometry and its applications, everyone of us can identify with Mr Dutilleul, the man who goes through walls.