



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Palevol 4 (2005) 265–274



<http://france.elsevier.com/direct/PALEVO/>

Paléontologie humaine et préhistoire

Proposition de reconstitution du deuxième crâne d'*Homo erectus* de Yunxian (Chine)

Amélie Vialet ^{a,*}, Tianyuan Li ^b, Dominique Grimaud-Hervé ^a,
Marie-Antoinette de Lumley ^a, Meiyan Liao ^c, Xiaobo Feng ^b

^a Département de préhistoire, Muséum national d'histoire naturelle, Institut de paléontologie humaine,
1, rue René-Panhard, 75013 Paris, France

^b Institute of Archaeology of Hubei, Wuhan 430077, Chine

^c Zhonghan Hospital, Wuhan University, Wuhan 430077, Chine

Reçu le 7 juin 2004 ; accepté après révision le 29 novembre 2004

Présenté par Henry de Lumley

Résumé

En 1989 et 1990, deux crânes d'*Homo erectus* ont été mis au jour à Yunxian (province du Hubei), dans des niveaux datés de plus de 780 000 ans. Considérés avec Lantian comme les plus anciens restes découverts à ce jour en Chine, ils constituent des jalons paléontologiques importants. Pourtant, ils ont été très altérés au cours de leur fossilisation. C'est pourquoi une proposition de reconstitution crânienne a été formulée sur la base d'arguments taphonomiques et morphométriques. Bénéficiant du concours de techniques sophistiquées récemment appliquées à la paléontologie humaine, telle la scanographie et le prototypage rapide, la compensation des déformations a été traitée entièrement virtuellement et le spécimen, tel qu'il a été reconstitué selon notre hypothèse, a été produit en frittage de poudre polyamide. **Pour citer cet article : A. Vialet et al., C. R. Palevol 4 (2005).**
© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

A proposal of reconstruction of the second *Homo erectus* skull from Yunxian (China). In 1989 and 1990, two *Homo erectus* crania were recovered from Yunxian (Hubei province) in archaeological levels dated to more than 780 000 years. Considered along with Lantian, these skulls represent the oldest human remains discovered in China to date, constituting important palaeontological finds. Nevertheless, the crania were badly deformed during the course of fossilization, necessitating extensive cranial reconstruction. Of the two crania, only Yunxian II was in sufficient condition to carry out this reconstruction. Using sophisticated techniques only recently applied in human palaeontology, including computed tomography and rapid prototyping, and incorporating taphonomic and morphometrically-based hypotheses, we were able to correct virtually the deformation and to produce a 3D prototype of Yunxian II. **To cite this article: A. Vialet et al., C. R. Palevol 4 (2005).**
© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : vialet@mnhn.fr (A. Vialet).

Mots clés : Scanographie ; Anthropologie virtuelle ; Taphonomie ; Plaque mince

Keywords: Computed tomography; Virtual anthropology; Taphonomy; Thin plate spline

Abridged English version

Introduction

The Yunxian site (Hubei province, China) is located on the highest alluvial formation (219 m) of the Han River, a tributary of the Blue River. The archaeological layer No. 3 contained faunal remains and lithics, as well as two fossil hominid skulls [10,11] with calcareous encrusting. There are biostratigraphical relations between the Yunxian and the Lantian-Gongwangling site. The latter was dated by means of magnetostratigraphy and lithostratigraphy and gave an estimated age of 1.15 Myr [21]. ESR dating of associated faunal teeth from Yunxian yielded a mean age of $581\,000 \pm 93\,000$ yr [6]. Magnetostratigraphy dates the archaeological layer to more than 780 kyr [11]. Due to their antiquity, the Yunxian skulls are key specimens in the understanding of the first settlements outside of Africa [15] and have much to contribute to the issue of defining the *Homo erectus* species [1,2,9,16,18,19]. Unfortunately, the skulls were crushed by strong postdepositional processes, making them difficult to study. In the interest of rendering these important specimens usable, we chose to reconstruct the least damaged of the Yunxian skulls, skull No. 2 (Fig. 1). Following extensive taphonomic and morphometric investigation, a reconstruction was proposed, using virtual imaging techniques, and was produced with the aid of a new rapid prototyping system.

The post-depositional history of Yunxian II

We first analysed the external aspect of the original fossil. It had been discovered palate downwards, crushed by the weight of the sediments above it. This sedimentary pressure was more clearly expressed on the left posterior portion of the vault, resulting in the separation of the face. The integrity of the skull as a whole was preserved due to the sediments surrounding it. Two more types of damage also occurred: (a) certain bony parts were lost (the lateral parts of the supra-orbital ridge and the cheekbones), and (b) bones and

tooth enamel were cracked as they filled up with earth and expanded. A clear break separates the left side of the nasal cavity from its roof so that the position of the left-hand maxilla is too high as compared to the right-hand one.

Yunxian II was scanned by one of us (L.M.) in May 2002 at the Hospital University Institute of Wuhan (see Table 1 for technical parameters) and the computer tomography data revealed further information. *Mimics V 7.1 (Materialise)* and *eFilm V 1.8.1 (eFilm Medical Inc)* software were used to visualize the 2D data, revealing parts of the skull hidden from external view. Early in the fossilization process, the fossil had been entirely filled by sediment, which in turn contributed to its preservation. Accurate boundaries of the facial break could now be clearly identified and we observed that a small section of the frontal bone (0.7 cm) overlapped the rest of the cranial vault. This meant that the rest of the vault had thrust the frontal bone upwards at that location, altering the natural convexity of the forehead.

Reconstruction hypothesis: materials and methods

In order to determine which part of the Yunxian II skull was the least damaged, we compared morphometric data from a sample of nine Asian *Homo erectus* fossil casts¹: skulls III, X, XI, XII from the Zhoukoudian Lower Cave and a skull from Hexian (Longtandong Cave) in China; skull 17 from Sangiran; and skulls 6, 7, 12 from Ngandong in Java (Indonesia). This sample was formed to express the fossil variability and not phyletic association. For each cranium, a mid-sagittal section was drawn using a cubic craniophore, and the craniometric landmarks were united as follows: nasion–bregma, bregma–lambda, lambda–opisthocranium, opisthocranium–opisthion. Further landmarks were orthogonally projected on this sagittal section, located at each tenth of the distance between two craniometric landmarks. The *tpsDig version 1.31 (James Rohlf)* and

¹ The casts we studied are stored at the 'Institut de paléontologie humaine', Paris, France, and at the 'Département de préhistoire', MNHN, Paris, France.

tpsRlw version .24 (James Rohlf) were used to digitize the selected landmarks and calculate a generalized least-square superimposition of all the specimens in the sample. *Thin plate spline* enabled us to view the morphological alterations between two conformations by means of transformation grids, onto which a given specimen was deformed to match a target specimen [13,17,20].

A mid-sagittal outline was drawn in order to restore the original convexities of the cranium – as far as we know them – using the least damaged parts (Fig. 4). The inclination of the nuchal plane was modified until the occipital angle reached 96° (*minimum ante quem* of the sample). The effect of the pressure on the vault had been uneven: the right side was vertical, whereas the left side was crushed towards the outside, so we drew the median line passing between the two coronal sections (Fig. 5) in order to follow it in virtual step to reconstruct the morphology of the vault.

The final modifications to the vault were carried out using a global interactive deformation technique (with *Surfacer V9.08 Imageware* and *RapidForm 2004 Inus Technology* software) applied to a preliminary 3D reconstruction of the skull (Fig. 6) that had been created by surface triangulation using the *Mimics V 7.1 (Materialise)* software. In the same way, we pushed the left maxilla downwards, thus restoring the lateral edge of the nasal aperture and enlarging the height of the orbit. We completed the missing part of the glabellar region of the supra-orbital ridge using its left counterpart as a mirror image. Using the well-preserved cheekbone from the first Yunxian skull, we mirrored it on both sides of Yunxian II. The morphological and spatial closeness of the two fossils, which were discovered within the same bed, separated only by 3.3 m horizontally and 0.7 m vertically, suggested the legitimacy of this approach.

Results and applications

A principal-component analysis put Yunxian II in an extreme location along the first axis (44.13%) (Figs. 2 and 3), highlighting the peculiarities of this fossil: the upward slope position of the frontal bone and the exaggerated flatness of the overall skull, well expressed on the anterior part of the parietal bone, and resulting in a sharp angulation of the occipital bone (Table 2). However, the morphologies of the posterior

region of the frontal and the parietal bones and of the occipital bone fall within the range of variability of the hominid sample. A principal-component analysis shows along the first axis (55.75%) the unnatural expansion of the anterior part of the cranial base in Yunxian II. In the same way, the basicranial index (comparing the lengths of the basilar part and the *foramen magnum*) is higher in Yunxian II than in the rest of the sample (Table 3), with the next highest being Ngandong 7. The basilar proportions of Yunxian II were reduced by 0.7 cm by rotating facial and occipital morphological units towards the centre of the skull. This modification had the effect of decreasing the maximum cranial length, which had originally been too long because of the overall flattening.

Conclusion

Techniques that have only recently been applied in human palaeontology permitted a more accurate investigation of the state of preservation of these fossils and the production of enhanced specimens that will result in more reliable studies [3,5,14,22]. Our investigation dealt with an important fossil hominid recently discovered in Yunxian, China, that had been badly crushed by sedimentation. We managed to correct the deformation that occurred during fossilization on the basis of a thorough investigation of the taphonomic events of this site. CT data, in conjunction with a morphometric analysis of a *Homo erectus* sample from East Asia, allowed us to reconstruct virtually the cranium and to produce an improved replica using a new prototyping system (Fig. 7).

This first reconstruction attempt, which may yet benefit from further technical advances, enables us to discuss now two major anatomical features relevant to taxonomic issues: the cranial capacity and the mid-facial pattern. Indeed, with a reduced endocranial volume, the reconstructed Yunxian II skull now falls within the range of *Homo erectus* variability [8]. Prior to our reconstruction, the facial morphology was described as an apomorphy because of the presence of an infra-orbital depression [7], typically observed in *Homo sapiens* [12]. However, our restoration of the maxillary area, complete with cheekbones, now permits the taxonomic significance of the Yunxian II mid-facial pattern to become a focus of discussion.

Further investigations will be carried out on the Yunxian II reconstruction to determine its phyletic position

and to broaden our knowledge of the emergence of the modern craniofacial pattern during human evolution.

1. Introduction

Le site de Yunxian, dans la province du Hubei en Chine, surplombe le fleuve Han, affluent du fleuve Bleu, dont il occupe, à 219 m d'altitude, la terrasse alluviale la plus haute. La stratigraphie, d'une dizaine de mètres de puissance, est constituée d'une alternance de sables et de limons, déposés sur un socle de schistes précambriens. La couche 3, la plus riche en vestiges osseux et lithiques, contient des encroûtements calcaires. C'est dans ces derniers qu'ont été découverts deux crânes d'hominidés fossiles, Yunxian I et Yunxian II. Le premier est complet, mais totalement aplati, tandis que seuls les os zygomatiques manquent sur le second, qui est moins déformé. Ils ont été attribués à des *Homo erectus* par l'aspect primitif de leur calotte crânienne, bien qu'ils ne manifestent aucun des caractères propres aux représentants asiatiques de cette espèce [10]. La face moyenne de ces spécimens archaïques présente une disposition moderne [7]. Cette combinaison de caractères les distingue du reste du registre fossile. Leur attribution chronologique, controversée, s'étend du Pléistocène inférieur au Pléistocène moyen. Des datations par ESR ont été effectuées sur une dizaine de dents animales associées aux restes humains. L'âge moyen est de $581\ 000 \pm 93\ 000$ ans [6], alors que l'analyse magnétostratigraphique place le niveau en dessous de l'inversion paléomagnétique de Brunhes–Matuyama [11], datée de 780 000 ans. Enfin, l'assemblage faunique est proche de celui mis au jour sur le site de Lantian-Gongwangling, lui-même daté, sur des critères magnétostratigraphiques et lithostratigraphiques, de 1,15 Ma [21].

Les restes humains sont des spécimens clefs dans le paysage paléanthropologique, car ils s'insèrent dans la problématique des plus anciens fossiles connus hors d'Afrique [15]. Comblant une lacune paléontologique autour de 1 Ma, ils contribuent à alimenter le débat animé depuis les années 80 sur la définition du taxon *Homo erectus* [1,2,9,16,18,19].

Enfin, ils apportent une documentation exceptionnelle sur la morphologie du squelette facial, dont les restes sont, parmi le registre fossile, peu nombreux.

Les spécimens ont été largement affectés par des processus post-dépositionnels. Il est clair que les altéra-

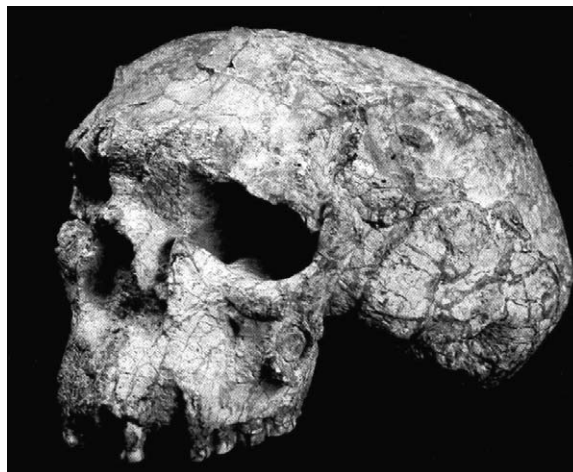


Fig. 1. Le crâne de Yunxian II.
Fig. 1. The Yunxian II cranium.

tions subies diminuent les possibilités de l'analyse paléanthropologique ; c'est la raison pour laquelle un projet de reconstitution du crâne de Yunxian II (Fig. 1), celui qui est le moins déformé, a été mené à bien. Trois grandes étapes ont été observées, allant de la compréhension de l'histoire post-dépositionnelle du spécimen à la manipulation virtuelle de ce dernier, suivant l'hypothèse de reconstitution proposée, jusqu'à sa restitution en frittage de poudre polyamide.

2. L'histoire post-dépositionnelle de Yunxian II

Afin d'identifier les processus altérants et de reconstituer leur succession, un examen macroscopique externe du fossile original a été effectué. Découvert le palais dirigé vers le bas, le crâne de Yunxian II a subi une déformation plastique sous l'effet de la pression des sédiments sus-jacents. Les forces se sont exercées plus intensément sur la partie postérieure gauche du crâne, jusqu'à la rupture du bloc facial, plus dense, dont la partie gauche s'est décrochée vers le haut. Les différentes pièces osseuses ont été maintenues solidaires, indiquant que les processus se sont déroulés en pleine terre donc en espace colmaté. L'un d'entre nous, auteur de la découverte (L. T.), précise que les deux blocs osseux, le massif facial et la boîte crânienne, se sont disjoints à la fouille. Ils ont été restaurés par le Pr. Hu Chengzhi. Deux autres types de dégradation ont été observés : des lacunes osseuses (les deux os zygomati-

tiques manquent et les parties latérales du torus supra-orbitaire sont érodées) et un aspect craquelé de l'état de surface de l'os et de l'émail dentaire (le volume des dents est augmenté par des infiltrations de sédiments dans les espaces ainsi libérés). Un autre décrochement, plus localisé, a affecté le massif facial. En effet, l'os maxillaire gauche se place en position haute par rapport à son homologue droit, à tel point que les bords de l'ouverture nasale sont déformés et que les deux hémisarcades dentaires ne se situent pas au même niveau. Le point de rupture se place au milieu de la hauteur du bord latéral gauche de l'ouverture piriforme. Ce dernier, après s'être détaché de la partie supérieure de cette cavité sensorielle, a été déporté latéralement.

À ces informations s'ajoutent les données issues de l'étude interne du crâne, permises par la scanographie. En effet, le spécimen de Yunxian II a été scanné par l'un d'entre nous (M. L.) en mai 2002 à l'Institut hospitalier universitaire de Wuhan en Chine. Les paramètres de l'acquisition tomographique sont synthétisés dans le [Tableau 1](#).

Les logiciels *Mimics V 7.1. (Materialise)* et *eFilm V 1.8.1 (eFilm Medical Inc.)* ont été utilisés pour la visualisation des données 2D. Ainsi, les parties les plus inaccessibles du fossile ont été visionnées. Il a été possible de constater que le crâne était entièrement rempli d'un sédiment fin et homogène, formant une matrice de terre ayant fossilisé avec le squelette céphalique, qu'elle a contribué à maintenir dans son intégralité. Il s'agit donc d'un événement qui s'est produit tôt dans l'histoire post-dépositionnelle du spécimen. Les limites exactes de la fracture ayant désolidarisé le bloc facial du reste du crâne ont pu être précisées. Nous avons observé, sur une zone d'extension restreinte (0,7 cm), le glissement de la voûte crânienne sous la partie décrochée de l'os frontal. Ce dernier fait indique que les processus de déformation plastique se sont poursuivis

au-delà de la rupture et qu'ils sont responsables de la morphologie de l'écaïlle frontale à ce niveau. La convexité y apparaît en effet artificiellement marquée.

3. L'argumentation d'une proposition de reconstitution : matériels et méthodes

Afin de distinguer les parties du crâne de Yunxian II les moins endommagées, une comparaison morphométrique du spécimen a été effectuée sur un échantillon de neuf *Homines erecti Homo erectus* asiatiques. Il s'agit, pour les fossiles découverts en Chine, des crânes n^{os} III, X, XI, XII de Zhoukoudian Lower Cave et du crâne de Hexian (grotte de Longtandong). Des fossiles mis au jour à Java, en Indonésie, ont été considérés : Sangiran 17, Ngandong 6, 7 et 12. Le choix de ces derniers peut paraître arbitraire, mais précisons que cette comparaison n'a pas un objectif phylétique. Elle a été menée pour mettre en évidence la déformation subie par Yunxian II en le confrontant à la variabilité fossile. Les moulages utilisés sont ceux de l'Institut de paléontologie humaine et du département de préhistoire du MNHN. Pour chacun, le relevé du contour sagittal médian a été obtenu à l'aide d'un craniophore cubique. Sur ce tracé, on a relié par des droites les points craniométriques, en majorité de type I, c'est-à-dire situés à la jonction de deux sutures [4]. Les segments reliant nasion–bregma, bregma–lambda, lambda–opisthocrânion, opisthocrânion–opisthion ont été découpés en dixième de longueur, matérialisé par des points. Ces derniers ont été projetés de manière orthogonale sur le tracé du contour sagittal crânien. Tous ces points repères, produits d'une construction géométrique, ont été digitalisés et transformés en coordonnées cartésiennes par le logiciel *tpsDig version 1.31 (James Rohlf)*. À partir de ces données, une superposition Procrustes des fossiles de l'échantillon a été générée, en suivant le principe des moindres carrés. Les séries de points repères sont, après normalisation de la taille et centrage sur la coordonnée moyenne, orientées de manière à ce que la distance entre leurs centres de gravité soit minimale. Le choix du logiciel *tpsRlw version 1.24 (James Rohlf)* permet, par la technique (*Thin plate spline*), dite des plaques minces [13,17,20], de visualiser les différences de conformation entre les spécimens. Les points repères sont projetés sur une plaque mince quadrillée, qui est ensuite déformée pour faire coïncider un spéci-

Tableau 1
Paramètres techniques de l'acquisition scanographique
Computer tomography data acquisition

Paramètres	Yunxian I	Yunxian II
Puissance	130 kV – 30 mA	130 kV – 30 mA
Taille de la matrice	512 × 512 pixels	512 × 512 pixels
Taille des pixels	0,59 mm ²	0,47 mm ²
Épaisseur des coupes	2,5 mm	1 mm
Nombre des coupes	76	254
Position du crâne	Acquisition parasagittale	Acquisition transversale

men de référence avec un spécimen cible (grilles de transformation de type D'Arcy Thomson).

4. Résultats

Ainsi, une série d'analyses en composantes principales montre l'aspect aberrant de la morphologie crânienne de Yunxian II relativement aux autres fossiles considérés (Figs. 2 et 3). Sa position de configuration extrême sur l'axe 1 (44,13%) désigne le phénomène d'aplatissement général, particulièrement perceptible sur la partie antérieure du pariétal. De même, la convexité artificielle de l'écaille frontale, due au décrochement précédemment décrit, et l'aspect fermé de l'angle entre les plans occipital et nucal sont en cause. Seuls les points sagittaux délimitant les parties postérieures de l'os frontal et de l'os pariétal, ainsi que l'écaille occipitale, présentent une position qui s'intègre dans la variabilité de l'échantillon.

L'angle occipital, calculé sur les contours crâniens, entre les points lambda–opisthocrânion–opisthion apparaît le plus fermé chez Yunxian II, relativement aux autres spécimens considérés (Tableau 2).

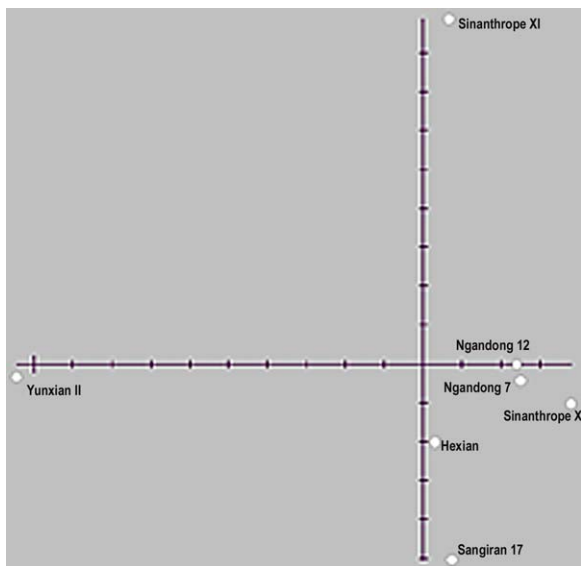


Fig. 2. Analyse en composantes principales (CP1: 44,1%, CP2: 35,2%). 1: Hexian ; 2: Ngandong 12 ; 3: Sangiran 17 ; 4: Yunxian II ; 5: Sinanthrope XI ; 6: Ngandong 7 ; 7: Sinanthrope X.

Fig. 2. Principal-component analysis (PC1: 44,1%, PC2: 35,2%), 1: Hexian; 2: Ngandong 12; 3: Sangiran 17; 4: Yunxian II; 5: Sinanthrope XI; 6: Ngandong 7; 7: Sinanthrope X.

Concernant la section sagittale, l'analyse des différentes données a permis de proposer un contour guide rétablissant l'aspect des convexités originelles (Fig. 4). La partie droite de l'écaille frontale de Yunxian II, moins altérée, a servi de limite inférieure pour rabattre virtuel-



Fig. 3. Dispersion de l'échantillon (points noirs : conformation crânienne sagittale du consensus, flèches noires : conformations crâniennes sagittales des spécimens inclus dans l'analyse).

Fig. 3. Sample variation (black labels: mean mid-sagittal cranial conformation; black arrows: mid-sagittal cranial conformation of the studied specimens).

Tableau 2

Valeur de l'angle occipital chez les spécimens fossiles

Table 2. Value of the occipital angle in fossil hominids

Spécimen fossile	Angle occipital
Ngandong 7	98
Ngandong 12	98
Sinanthrope X	102
Sinanthrope XI	97
Hexian	101
Sangiran 17	96
Yunxian II	88

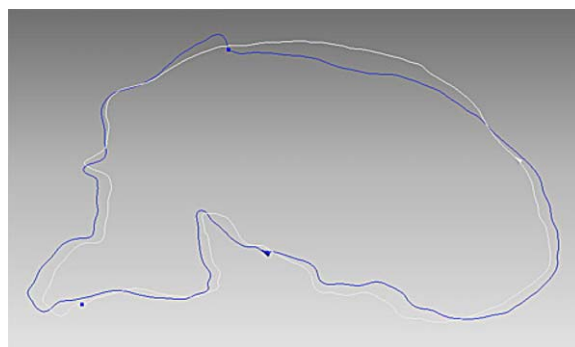


Fig. 4. Superposition de la section sagittale de Yunxian II (en noir) et de la section sagittale proposée pour la reconstitution (en blanc).

Fig. 4. Superimposition of the midsagittal section of Yunxian II (in black) and the midsagittal section proposed for the reconstruction (in white).

lement l'os. La courbure de la partie postérieure du pariétal, peu affectée par le phénomène d'aplatissement, a été utilisée pour reconstituer la partie antérieure de l'os ; cette manipulation paraît justifiée scientifiquement, considérant la très faible courbure sagittale pariétale de cet hominidé fossile. Enfin, une angulation sagittale de l'os occipital, proche de 96° (minimum *ante quem* de notre échantillon), a été rétablie par un mouvement de bascule appliqué au plan nuchal vers le bas l'arrière.

Sur la voûte bipariétale, la pression de direction oblique s'est exercée de manière inégale. La paroi crânienne droite est artificiellement verticale, alors que la partie gauche a été déportée vers l'extérieur. C'est la raison pour laquelle le contour moyen des sections coronales droite et gauche superposées (Fig. 5) a été tracé.

La distorsion du massif facial précédemment décrite a été compensée par une manipulation virtuelle visant à rétablir la connexion entre les deux parties osseuses disloquées, formant initialement le bord latéral gauche de l'ouverture nasale. L'ensemble du maxillaire gauche a donc été déplacé vers le bas et les orbites ont gagné quelques millimètres en hauteur. L'indice orbitaire de Yunxian II (60) apparaît faible relativement à celui de Sangiran 17 (78,2). Les lacunes osseuses au niveau des os zygomatiques et de la zone paraglabellaire droite du torus supra-orbitaire ont été comblées. Sur cette dernière, le symétrique de la partie gauche, mieux conservée, a été plaqué. À l'inverse, les

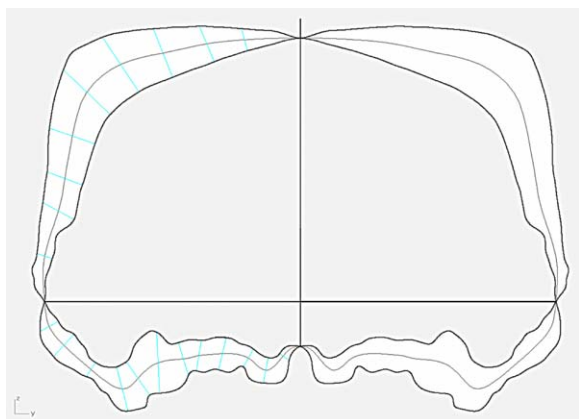


Fig. 5. Superposition de la partie droite et gauche de la section coronale de Yunxian II, relevées au niveau du milieu de la longueur du pariétal (en gris : le contour passant au centre).

Fig. 5. Superimposition of the right and left parts of the coronal section of Yunxian II through the mid-biparietal vault (in grey: the median line).

parties latérales du torus supra-orbitaire, non documentées, n'ont pas pu être reconstituées. Pour la région latérale de la face, nous avons utilisé Yunxian I, chez qui l'os zygomatique est particulièrement bien conservé. Sa position à l'extérieur du volume du crâne l'a préservé de la déformation. Yunxian I et II ont été découverts dans le même niveau stratigraphique, à 3,3 m de distance horizontalement et 0,7 m verticalement. Étant donné leur proximité spatiale et leur parenté morphologique, l'os zygomatique gauche prélevé sur Yunxian I et son symétrique droit ont été adaptés au crâne de Yunxian II.

L'axe 1 (représentant 55,75% de la variance totale) d'une analyse en composantes principales considérant la base du crâne, marginalise Yunxian II, dont les points repères délimitant la partie postérieure sont concentrés vers l'arrière, tandis sa partie basilaire paraît « dilatée » vers l'avant. Cette observation est corroborée par la valeur de l'indice mettant en relation la longueur de la partie basilaire (entre le basion et le sphéno-basion) et celle du foramen magnum (entre le basion et l'opisthion). Elle est forte pour Yunxian II, pour lequel les deux segments sont équivalents en taille et bien supérieure à celles calculées pour le reste de l'échantillon témoin, réduit à trois spécimens, pour lesquels ces parties sont conservées (Tableau 3). Ngandong 7 est le fossile qui présente l'indice le plus fort après Yunxian II. Sur ce dernier, la partie basilaire a été raccourcie de 0,7 cm, afin que ses proportions basicraniennes deviennent au moins identiques à celles de Ngandong 7. Nous avons veillé à ce que cette opération ne modifie que peu le degré de flexion osseuse enregistré à ce niveau. Deux étapes virtuelles ont permis la réduction en longueur de cette région osseuse et la compensation des conséquences, sur les régions crâniennes les plus externes, du phénomène d'aplatissement, exercé principalement sur la partie moyenne du crâne. Une inflexion vers le bas et l'avant a été appliquée au bloc occipital ainsi

Tableau 3

Indice de la base du crâne chez les spécimens fossiles (PB : partie basilaire ; FM : foramen magnum)

Table 3. Basicranial index in fossil hominids (PB: basilar part; FM: foramen magnum)

Spécimen fossile	Longueur PB	Longueur FM	Indice
Ngandong 7	30	36	83
Ngandong 12	30	45	67
Sangiran 17	25	40	62,5
Yunxian II	44	44	100

qu'un mouvement de bascule de direction inféro-postérieure au massif facial. Par cette manipulation, la longueur crânienne maximale a été réduite, alors qu'elle apparaissait comme la plus forte de l'échantillon.

5. La compensation virtuelle des altérations crâniennes

À partir des données tomographiques, issues d'un scanner médical à rayons X, du spécimen fossile, une reconstitution 3D a été générée par triangulation surfacique avec le logiciel *Mimics V 7.1. (Materialise)*. C'est cette dernière qui a été manipulée, à l'aide des logiciels *Surfacer V9.08 (Imageware)* et *RapidForm 2004 (Inus Technology)*, de manière à mettre en forme la série de modifications argumentées précédemment. Cette étape de manipulation virtuelle s'est déroulée comme suit :

- une technique de déformation globale interactive (*free form deformation*) a permis de modifier la morphologie de l'ensemble de la voûte crânienne, pour la faire coïncider avec les contours guides (sections

sagittale et coronale reconstituées) préalablement importés et positionnés (Fig. 6) ;

- la face a été restaurée par le repositionnement du maxillaire gauche, puis complétée par l'image miroir de la partie gauche du torus supra-orbitaire, transférée à droite. L'os zygomatique prélevé sur Yunxian I et dupliqué par symétrie a été mis en place sur Yunxian II ;
- la partie gauche de l'écaille frontale, décrochée, a été délimitée, découpée puis rabattue ;
- le bloc facial et le bloc occipital ont été ramenés vers le bas et l'intérieur du crâne aux dépens de la partie basilaire, raccourcie de 0,7 cm.

Un prototype du spécimen reconstitué a été produit selon un procédé de fusion par rayon laser d'une poudre polyamide.

6. Conclusion

Des techniques récentes, appliquées depuis une dizaine d'années à la paléontologie humaine, permettent un contrôle plus rigoureux de l'état de conserva-

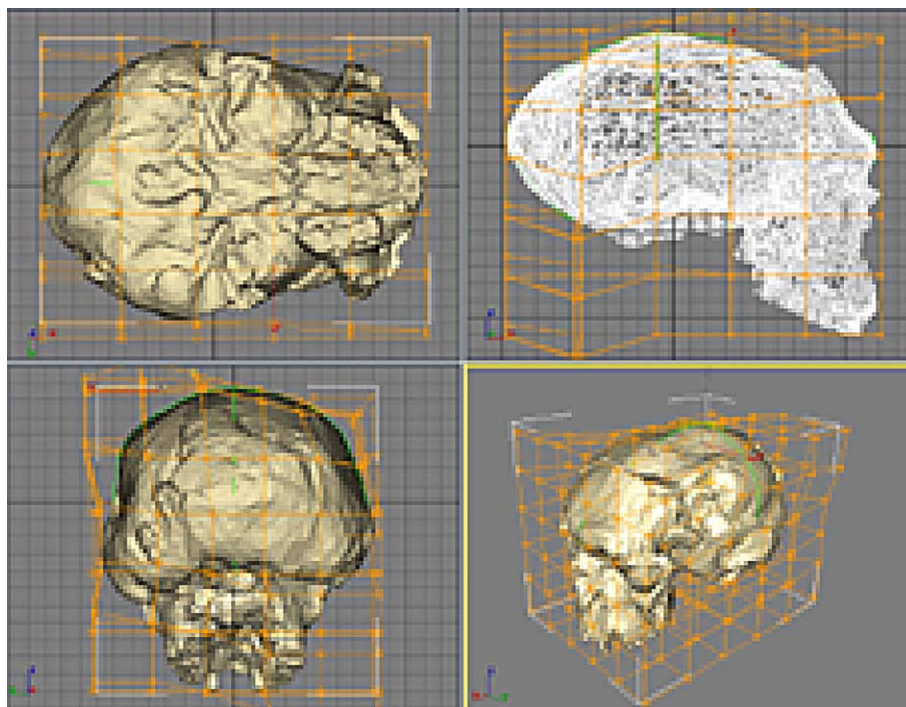


Fig. 6. Technique de déformation globale interactive.
Fig. 6. Global interactive deformation techniques.

tion des spécimens fossiles et la production de nouveaux supports d'étude plus fiables [3,5,14,22]. Pour la première fois, l'investigation a porté sur un fossile humain très ancien, récemment découvert en Chine, ayant subi un processus de déformation de grande ampleur. La compensation des altérations a été menée sur la base d'une compréhension de l'histoire post mortem du fossile, à laquelle les données issues de la scanographie ont largement concouru. De plus, l'analyse morphométrique d'un échantillon d'*Homo erectus* asiatique a permis de déterminer les parties du crâne de Yunxian II les moins endommagées qui ont servi de base à la proposition de reconstitution. Le prototype produit à l'issue de la mise en forme virtuelle du crâne est la concrétisation en trois dimensions de notre hypothèse de reconstitution (Fig. 7).

Cette première proposition, qui pourra bénéficier ultérieurement de nouvelles performances techniques, permet déjà de rediscuter deux caractères fondamentaux dans une perspective taxinomique : la capacité crânienne et la morphologie de la région sous-orbitaire de la face. En effet, la réduction du volume endocrânien, notable une fois le spécimen reconstitué, permet d'intégrer Yunxian II dans la variabilité des *Homo erectus* [8]. De plus, l'agencement de la partie moyenne de la face, qui était qualifié d'apomorphe, apparaît, après restauration, particulier à cet hominidé fossile, à tel point qu'il nécessite d'être quantifié objectivement avant de conclure sur la présence d'une dépression sous-



Fig. 7. Compensation virtuelle des altérations crâniennes (à gauche : le spécimen tel qu'il a été découvert, à droite : tel qu'il a été reconstitué).

Fig. 7. Cranial alterations restored via virtual imaging techniques (left: the specimen as it was discovered; right: as it was reconstructed).

orbitaire, telle qu'elle existe systématiquement chez *Homo sapiens* [12]. L'étude plus rigoureuse et plus ample du spécimen, permise par cette reconstitution, contribuera à alimenter la discussion concernant sa position phylétique et le débat relatif à la mise en place des caractères modernes au cours de l'évolution humaine.

Remerciements

Nous remercions Patrice Corbex pour la réalisation du prototype, Antoine Balzeau et Florent Détroit pour leur contribution technique ; Fabienne Rame, Charles FitzGerald, Russell Ciochon et K. Lindsay Eaves-Johnson pour la traduction en anglais de la version abrégée de cet article.

Références

- [1] S.C. Anton, Evolutionary significance of cranial variation in Asian *Homo erectus*, *Am. J. Phys. Anthropol.* 118 (2002) 301–323.
- [2] S.C. Anton, Natural history of *Homo erectus*, *Yearb. Phys. Anthropol.* 37 (2003) 126–170.
- [3] A. Balzeau, T. Jacob, E. Indriati, Structures crâniennes internes de l'*Homo erectus* Sambungmacan 1 (Java, Indonésie), *C. R. Palevol* 1 (2002) 1–7.
- [4] F.L. Bookstein, *Morphometric tools for landmark data, Geometry and Biology*, University Press, Cambridge, 1991, 435 p.
- [5] M. Braun, *Applications de la scanographie à RX et de l'imagerie virtuelle en paléontologie humaine*, thèse, Muséum national d'histoire naturelle, Paris, France, 1996.
- [6] T. Chen, Q. Yang, Y. Hu, W. Bao, T. Li, ESR dating of tooth enamel from Yunxian *Homo erectus* site, China, *Quaternary Sci. Rev.* 16 (1997) 455–458.
- [7] D.A. Etlér, T. Li, New archaic human fossil discoveries in China and their bearing on hominid species definition during the Middle Pleistocene, in: R.S. Corruccini, R. Ciochon (Eds.), *Integrative paths to the past: paleoanthropological advances in honor of F. Clark Howell*, Prentice Hall, New York, 1994, pp. 639–676.
- [8] D. Grimaud-Hervé, L'évolution de l'encéphale chez l'*Homo erectus* et l'*Homo sapiens* : exemples de l'Asie et de l'Europe, *CNRS, Cah. Paléoanthropol.*, Paris, 1997, 405 p.
- [9] D. Grimaud-Hervé, F. Marchal, A. Vialet, F. Détroit, *Le deuxième Homme en Afrique : Homo ergaster, Homo erectus*, Artcom-Errance, Collection « Paléontologie humaine », Paris, 2002, 259 p.
- [10] T. Li, D.A. Etlér, New Middle Pleistocene hominid crania from Yunxian in China, *Nature* 357 (1992) 405–407.
- [11] T. Li, X. Feng, *The Yunxian man*, Scientific and technological publisher of Hubei, Wuhan China, 2001, 218 p.

- [12] B. Maureille, La face chez *Homo erectus* et *Homo sapiens* : recherche sur la variabilité morphologique et métrique, thèse, université Bordeaux-1, Bordeaux, France, 1994, 634 p.
- [13] P. O'Higgins, The study of morphological variation in the hominid fossil record: biology, landmarks and geometry, *J. Anat.* 197 (2000) 103–120.
- [14] M.S. Ponce de Leon, C.P.E. Zollikofer, New evidence from Le Moustier 1: Computer-assisted reconstruction and morphometry of the skull, *Anat. Rec.* 254 (1999) 474–489.
- [15] R. Potts, A.K. Behrensmeier, A. Deino, P. Ditchfield, J. Clark, Small mid-Pleistocene hominin associated with East African Acheulean technology, *Science* 305 (2004) 75–78.
- [16] G.P. Rightmire, The evolution of *Homo erectus*. A comparative anatomical study of an extinct human species, Cambridge University Press, 1990, 260 p.
- [17] A. Rosas, M. Bastir, Thin-Plate Spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex, *Am. J. Phys. Anthropol.* 117 (2002) 236–245.
- [18] C. Stringer, The definition of *Homo erectus* and the existence of the species in Africa and Europe, *Cour. Forschungsinst. Senckenb.* 69 (1984) 131–143.
- [19] B. Wood, Early hominid species and speciation, *J. Hum. Evol.* 22 (1992) 351–365.
- [20] L.A. Yarroch, Shape analysis using thin-plate spline: Neanderthal cranial shape as an example, *Yearb. Phys. Anthropol.* 39 (1996) 43–89.
- [21] R. Zhu, Z. An, R. Potts, K.A. Hoffman, Magnetostratigraphic dating of early humans in China, *Earth-Sci. Rev.* 61 (2003) 341–343.
- [22] C.P.E. Zollikofer, M.S. Ponce de Leon, R.D. Martin, P. Stucki, Neanderthal computer skulls, *Nature* 375 (1995) 283–285.