



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

Comptes Rendus Palevol

www.sciencedirect.com

Paléontologie humaine et préhistoire

Restauration virtuelle d'Arago 21

*Virtual reconstruction of Arago 21*Gaspard Guipert^{a,*}, Marie-Antoinette de Lumley^b, Henry de Lumley^b^a Antenne de préhistoire de l'institut de paléontologie humaine, technopôle de l'environnement Arbois-Méditerranée, bâtiment Villemin, BP 80, 13145 Aix-en-Provence cedex, France^b UMR CNRS 7194, département de préhistoire, Muséum national d'histoire naturelle, institut de paléontologie humaine, 1, rue René-Panhard, 75013 Paris, France

I N F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Reçu le 17 juin 2013

Accepté après révision 30 juillet 2013

Disponible sur internet le 14 octobre 2013

Présenté par Yves Coppens

Mots clés :

Arago 21

Homo heidelbergensis

Face

Os frontal

Reconstruction virtuelle

Procruste

Keywords:

Arago 21

Homo heidelbergensis

Face

Frontal bone

Virtual reconstruction

Procrustes

R É S U M É

Connu depuis 1971, Arago 21, découvert par Henry et Marie-Antoinette de Lumley, constitue la plus vieille face humaine fossilisée complète d'Europe. Nous avons effectué un travail de reconstruction virtuel en isolant tous les fragments constituant le fossile, avant de tous les articuler selon les contraintes anatomiques. Cette nouvelle reconstruction d'Arago 21, la première virtuelle, a fait l'objet d'une première comparaison tridimensionnelle avec d'autres fossiles allant du Pléistocène inférieur au Pléistocène supérieur d'Europe, d'Asie et d'Afrique. Ces premiers résultats tridimensionnels, limités à l'os frontal, indiquent une proximité de conformation entre Arago 21 et d'autres fossiles comme Sima de los Huesos 5. Cependant, des différences anatomiques et métriques subsistent.

© 2013 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

A B S T R A C T

Discovered in 1971 by Henry and Marie-Antoinette de Lumley, Arago 21 is the oldest complete human face from Europe. Three-dimensional virtual imaging methods were used to isolate the fossil fragments before articulating them according to their anatomical constraints. This new reconstruction of Arago 21, the first virtual one, was then compared by Procrustes superimposition to Pleistocene European, Asian and African fossils. These results, limited to the frontal bone, highlight the proximity between Arago 21 and fossils like Sima de los Huesos 5. However, anatomical and metric differences remain.

© 2013 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Depuis 1971, Arago 21 fait partie des plus vieux restes humains fossiles découverts en France (de Lumley et de Lumley, 1971, 1973). Ce vingt et unième reste humain découvert dans la caune de l'Arago (Tautavel, France), correspond au plus ancien massif facial relativement complet

découvert en Europe. Il provient de l'unité archéostratigraphique « sol G », datée par la méthode $^{238}\text{U}/^{234}\text{Th}$ mesurée par spectrométrie gamma (Yokoyama et al., 1991) et surtout par la biochronologie (Moigne et al., 2006) à environ – 450 000 ans.

Fossile important dans la compréhension de la phylogénie des espèces européennes, Arago 21 est associé au pariétal droit Arago 47 (fragment a et b) et aux fragments occipitaux Arago 78 et 79. Il s'agirait d'un jeune adulte de

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : gaspard.guipert@gmail.com (G. Guipert).

sexe masculin (de Lumley et de Lumley, 1971, 1973). Il a été attribué aux *Homo erectus* européens ou Anténéandertaliens (de Lumley et de Lumley, 1971) et est souvent considéré comme un représentant des *Homo heidelbergensis*.

La première reconstruction de la face et du crâne a été réalisée par Henry et Marie-Antoinette de Lumley en 1981 et présentée au Congrès international de paléontologie humaine à Nice en 1982. Elle fut réalisée à partir de moulages des fragments d'Arago 21 pour préserver l'original. Ce protocole a généré des défauts indissociables des méthodes utilisées à l'époque pour reconstituer Arago 21 (asymétrie du palais et des cavités orbitaires, cavité nasale oblique) ainsi qu'une suture sagittale convexe et un angle astérion–lambda–astérion pas assez ouvert sur la chimère réalisée (Grimaud, 1982a, 1982b; Spitory, 1982, 1984a, 1984b). Plusieurs reconstitutions concernant la face et/ou le crâne ont ensuite été proposées ou réalisées à partir de ce travail (Ascenzi, 1982; Grimaud, 1982a, 1982b; Gunz et al., 2009; Spitory, 1982, 1984a, 1984b; Vlček, 1986).

Avec l'amélioration de l'imagerie médicale à rayonnement X et dans un but de conservation, il a été réalisé en 2005 une numérisation d'Arago 21. À partir de cette numérisation a été réalisée une première reconstruction virtuelle (Guipert, 2005; Guipert et al., 2004). Cette reconstitution avait été réalisée au moyen d'une symétrie sagittale accompagnée du repositionnement de trois fragments d'écaille frontale.

Il a été décidé par la suite de réaliser une nouvelle restauration virtuelle du fossile, en prenant en compte cette fois-ci tous les fragments constituant Arago 21. Nous présentons dans la présente publication cette nouvelle reconstruction et les résultats des premières comparaisons.

1. État de conservation du fossile

Arago 21 est constitué du maxillaire, des os zygomatiques, des os propres du nez, de l'os frontal, de la grande et de la petite aile droite du sphénoïde et de l'ethmoïde. Seules cinq dents sont en place sur l'arcade alvéolaire. D'autres dents ont été associées.

Arago 21 présente des déformations post-mortem liées au contexte géologique de la caune de l'Arago. Suite à son dépôt, le poids des terres sus-jacentes a entraîné des mouvements de torsion et d'écrasement des ossements, générant des chevauchements et des compressions osseuses (Fig. 1).

Les différents os constituants Arago 21 n'ont pas subi les mêmes déformations liées à une pression latérale qui s'est appliquée sur l'ensemble du côté gauche du fossile de différentes manières. Ainsi, l'os frontal a subi une pression latéro-médiale sur son côté gauche, ce qui a entraîné la fracturation de l'écaille. La portion gauche de celle-ci a chevauché la région antéro-médiale de l'os sur environ 1 cm. Ce chevauchement s'étend progressivement de la moitié de l'écaille jusqu'au niveau du torus sus-orbitaire, ce qui déforme la cavité orbitaire gauche. Le pourtour coronal de l'os frontal est divisé en plusieurs fragments plus ou moins jointifs sans chevauchement. Les deux plus gros fragments frontaux correspondent à gauche au torus sus-orbitaire et à une portion de l'écaille frontale, et à droite au torus sus-orbitaire associé à la région glabellaire.

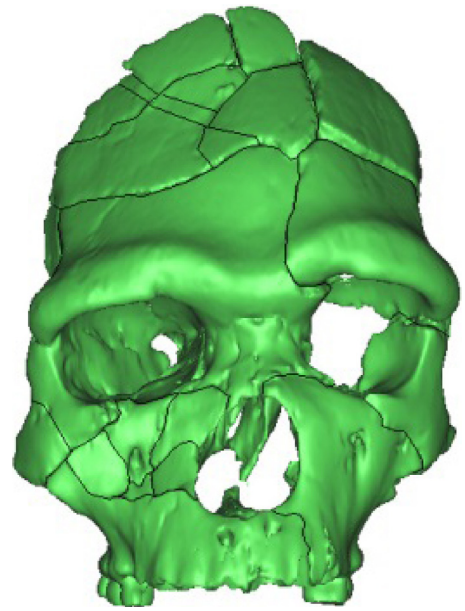


Fig. 1. Mise en évidence des principales lignes de fracture sur une modélisation tridimensionnelle d'Arago 21. En couleur sur Internet.

Fig. 1. Principal fracture lines on a 3D-modelisation of Arago 21. Color available online.

À droite, l'os zygomatique est connecté anatomiquement au frontal, au sphénoïde et au maxillaire. Seul le processus zygomatique est déformé, rabattu latéralement. De l'autre côté, l'os zygomatique gauche a subi une légère rotation, rabattant le processus zygomatique vers l'intérieur. De plus, l'extrémité supérieure du processus frontal est fracturée obliquement vers l'arrière et décalée antérieurement par rapport à l'os frontal.

Les portions droite et gauche du maxillaire se sont comprimées mutuellement postérieurement, sous l'action d'une pression latérale exercée sur le maxillaire gauche, qui a été déformé par une compression latérale et postérieure. En vue supérieure, le maxillaire gauche a subi une rotation anti-horaire, à l'origine de la plicature de la voûte palatine, de la déformation de la cavité nasale. Suite à ce mouvement, l'os maxillaire gauche s'est fracturé antérieurement au niveau de l'alvéole de la deuxième incisive gauche. L'os maxillaire droit semble mieux préservé, à l'exception d'un enfoncement surfacique au niveau de la région située en périphérie du foramen infra-orbitaire.

Les os propres du nez sont en bonne connexion anatomique, tout comme la petite et la grande aile droite du sphénoïde. La cloison nasale de l'ethmoïde est déviée du fait des mouvements du maxillaire.

Malgré ces différentes déformations, il s'agit de l'une des faces les mieux conservées d'Eurasie pour le Pléistocène moyen.

2. Matériel et reconstruction virtuelle

2.1. Matériel

Le fossile Arago 21, après avoir été reconstitué, a été comparé métriquement, puis tridimensionnellement, à

Tableau 1

Liste des fossiles utilisés pour l'analyse procrustéenne de l'os frontal grâce à 15 points de repère craniométriques. En italique, les fossiles originaux sur lesquels nous avons travaillé.

Table 1

Fossils used for Procrustes superimposition and 3D-analysis of the frontal bone with 15 landmarks. In italic, original skulls.

Groupes	N	Fossiles
	1	Arago 21
<i>Homo georgicus</i>	2	<i>D2280, D2282</i>
<i>Homo erectus</i> africains	5	Bodo 1, Kabwe, KNM-ER 3733, KNM-ER 3883, OH 9
<i>Homo erectus</i> chinois	5	Dali, <i>Nankin restauré^a</i> , Zhoukoudian III, Zhoukoudian XI, Zhoukoudian XII
<i>Homo erectus</i> Java	5	Ngandong 6, Ngawi 1, Sambungmacan 3, Sangiran 17
<i>Homo heidelbergensis</i> d'Europe	3	Ceprano, Sima de los Huesos 5, Petralona
<i>Homo neanderthalensis</i>	6	Amud 1, Guattari 1 (Circeo), La Chapelle-aux-Saints, La Ferrassie 1, La Quina H5, Neandertal
<i>Homo sapiens</i> fossiles	26	Jebel Irhoud 1, Jebel Irhoud 2, Hotu Cave 2, Skhul 5, Qafzeh 9, Zuttiyeh, Brno II, Brno III, Mladec 5, Pavlov I, Predmost III, Markina Gora, Chancelade, Cro-Magnon 1, Cro-Magnon 3, Obercassel, Pataud, <i>Arene Candide</i> , <i>Barma Grande 1</i> , <i>Barma Grande 3</i> , <i>Barma Grande 4</i> , <i>Barma Grande 5</i> , <i>Cavillon restauré (Barma del Caviglione 1)</i> , <i>grotte des Enfants 4</i> , <i>grotte des Enfants 5</i> , <i>grotte des Enfants 6</i>

^a [Violet et al., 2010](#)

un ensemble d'originaux ou moulages de crânes fossiles d'Europe, Asie et Afrique allant du Pléistocène inférieur au Pléistocène supérieur (Tableau 1). Les moulages proviennent de la collection du laboratoire départemental de préhistoire du Lazaret, fort de la Drète, Nice, Alpes-Maritimes. Nous avons regroupé tous les fossiles africains du Pléistocène sous l'appellation *Homo erectus* africains et fait la distinction entre les *Homo erectus* venant des sites chinois et indonésiens. Le groupe *Homo heidelbergensis* (ou *Homo erectus* d'Europe) rassemble tous les fossiles européens compris entre *Homo antecessor* et *Homo neanderthalensis*. Le groupe d'*Homo sapiens* fossile a été pris en compte comme population de référence pour l'analyse tridimensionnelle.

2.2. Méthodes

2.2.1. Traitement des données virtuelles

Le fossile Arago 21 a été numérisé en 2005 au moyen d'un scanner à rayonnement X General Electric Light speed 16 au centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, Paris, dans le service du Professeur Cabanis. Les réglages utilisés pour cette acquisition en mode hélicoïdal sont : 120 Kv, 300 mAs, épaisseur des coupes de 0,625 mm, champ d'acquisition de 250 mm, taille des pixels de 0,449 mm avec une matrice de 512 × 512 pixels, format DICOM. En raison de l'état de conservation d'Arago 21 et du fait qu'il a déjà été numérisé, il a été décidé de ne pas procéder pour cette étude à une nouvelle numérisation.

Les données ont été traitées au moyen des logiciels Mimics 12.0 (Materialise) et Rapidform2006.

2.2.2. Mesures

Différentes mesures, définies par [Martin et Saller \(1957\)](#), ont été réalisées sur cette reconstruction virtuelle. Nous en présentons quelques unes : les largeurs M9 (frontale minimale), M10 (frontale maximale), M10b (bistéphannique), M43 (entre les points frontomaxillaires temporaux), M45 (1) (bijugale), M46 (bimaxillaire maximale) ainsi que la hauteur M48 (nasion-prosthion) (Fig. 2).

Certaines de ces mesures ont été comparées à celles prises sur un ensemble de fossiles, moulages et originaux, ou relevées dans la littérature. Toutes les mesures réali-

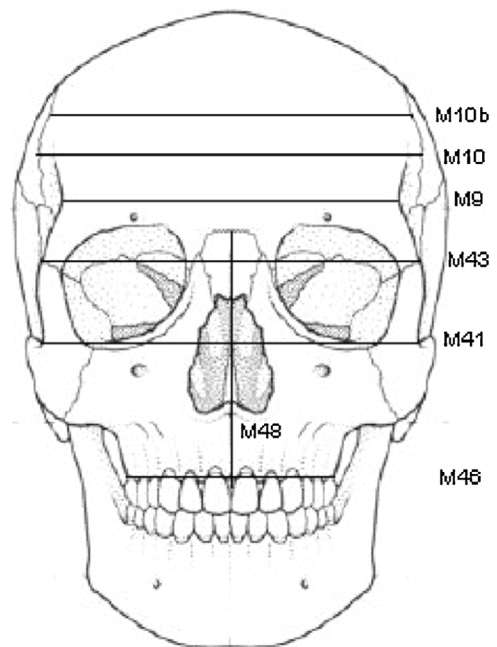


Fig. 2. Mesures crâniennes réalisées, définies par Martin et Saller (1957).
Fig. 2. Skull measurements defined by [Martin et Saller \(1957\)](#).

sées seront publiées ultérieurement dans une étude plus exhaustive du fossile Arago 21 et des ossements associés.

2.2.3. Méthodes procrustéennes

Les coordonnées tridimensionnelles des différents points de repère craniométriques ont été acquises de deux manières : soit sur des modélisations tridimensionnelles réalisées à partir du traitement de scanners médicaux par rayonnement X ; soit directement sur le crâne (original ou moulage) au moyen d'un digitaliseur portable Microscribe3DX[®]. Les superimpositions procrustéennes puis l'analyse en composantes principales ont été réalisées au moyen du logiciel Morphologika2 v2.5 ([O'Higgins et Jones[©], 2006](#)).

En raison du faible nombre de fossiles du Pléistocène possédant une face complète, nous avons privilégié une

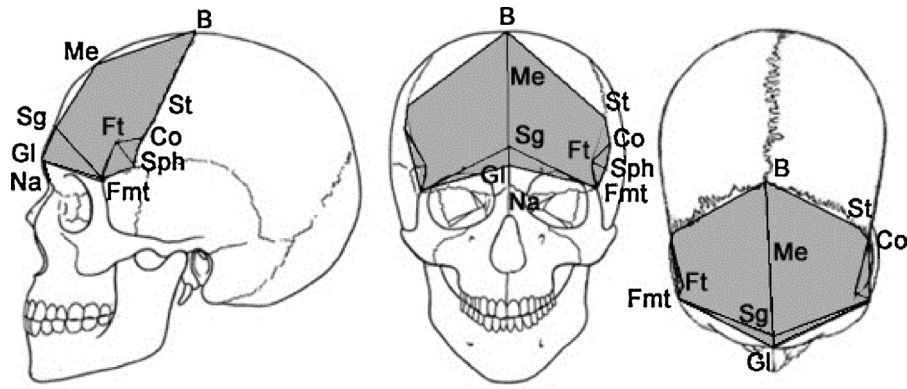


Fig. 3. Modélisation tridimensionnelle de l'os frontal en 15 points de repère craniométriques. B : bregma ; Co : coronion ; Gl : glabelle ; Fmt : fronto-malaire-temporal ; Ft : frontotemporal ; Me : métopion ; Na : nasion ; Sph : sphénion ; St : stéphanion ; Sg : supraglabellaire.

Fig. 3. 3D-modélisation of the frontal bone with 15 landmarks: B: bregma; Co: most lateral point of the coronal suture; Gl: glabelle; Fmt: fronto-malar-temporal; Ft: frontotemporal; Me: metopion; Na: nasion; Sph: sphénion; St: stéphanion; Sg: supraglabellaire.

étude de la conformation de l'os frontal. Le nombre de points de repère a été limité pour prendre en compte le plus grand nombre de fossiles possibles. Lorsqu'un ou deux points de repère craniométriques latéraux n'étaient pas conservés, leurs coordonnées ont été obtenues par symétrisation sagittale des points homologues. Cette symétrisation a été réalisée en tenant compte de l'emplacement des points sagittaux disponibles pour limiter les erreurs de symétrisation (Guipert et Mafart, 2008).

Les différents points de repère craniométriques utilisés (15 au total; Fig. 3; bregma, coronion, glabelle, frontomalaire-temporal, frontotemporal, metopion, nasion, sphénion, stéphanion, supraglabellaire) correspondent aux deux premiers types de points définis par Bookstein (1991).

Les points sagittaux (5) ont été sélectionnés pour modéliser la courbure sagittale de l'écaille frontale, ainsi que la conformation de la région comprise entre le point supra-glabellaire et le nasion. Les 10 points bilatéraux permettent d'étudier la forme générale de l'os frontal en vue supérieure (torus, constriction postorbitaire, largeur maximale et position des lignes temporales).

3. Reconstruction virtuelle

3.1. Méthode

La première étape de la restauration virtuelle d'Arago 21 a consisté à identifier les différents fragments en vue de les isoler progressivement. Les fragments millimétriques n'ont pu être pris en compte, du fait de la résolution des scanners. Les fragments ont été dissociés coupe par coupe. Au total, 33 fragments de tailles variables ont été identifiés puis isolés avant repositionnement. Les principales régions à restaurer étaient le frontal, les zygomatiques et le maxillaire.

La deuxième étape a consisté à mettre en connexion anatomique les différents fragments. Le torus susorbitaire (crête frontale transversale) a été restauré en premier. Puis les deux fragments correspondant au bord latéral gauche ont été mis en connexion. Le positionnement de

ces trois fragments a donné la largeur maximale antérieure de l'os frontal et la courbure transversale de la base de l'écaille frontale. Ensuite ont été positionnés les fragments restants, en allant du bord gauche au bord droit. Bien que tous les fragments soient jointifs, des lacunes subsistent par endroit en raison de microfragments non traités, ainsi que des compressions subies par l'os.

La reconstitution du frontal permet ensuite de restaurer la région du foramen infraorbitaire droit, le bord droit de la cavité nasale puis le zygomatique droit (Fig. 4). Est ensuite articulé le maxillaire gauche, permettant d'obtenir un pourtour d'arcade dentaire plus régulier et une voûte palatine en position originelle. La portion postérieure du maxillaire a été placée en position plus externe.

Le dernier fragment repositionné est l'os zygomatique gauche qui rétablit le pourtour de la cavité orbitaire gauche

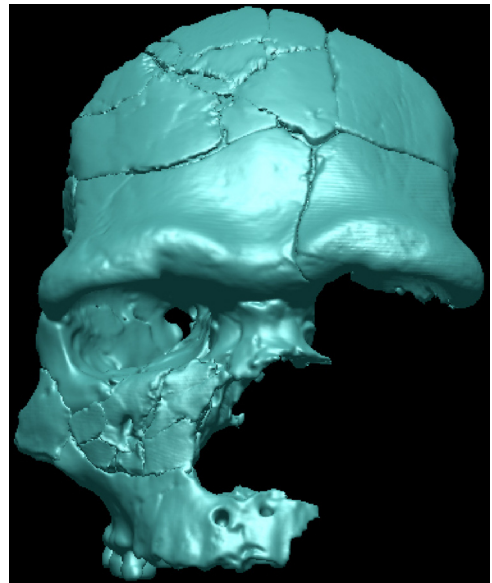


Fig. 4. Étape intermédiaire durant la restauration virtuelle d'Arago 21. En couleur sur Internet.

Fig. 4. Intermediate stage during the virtual reconstruction of Arago 21. Color available online.

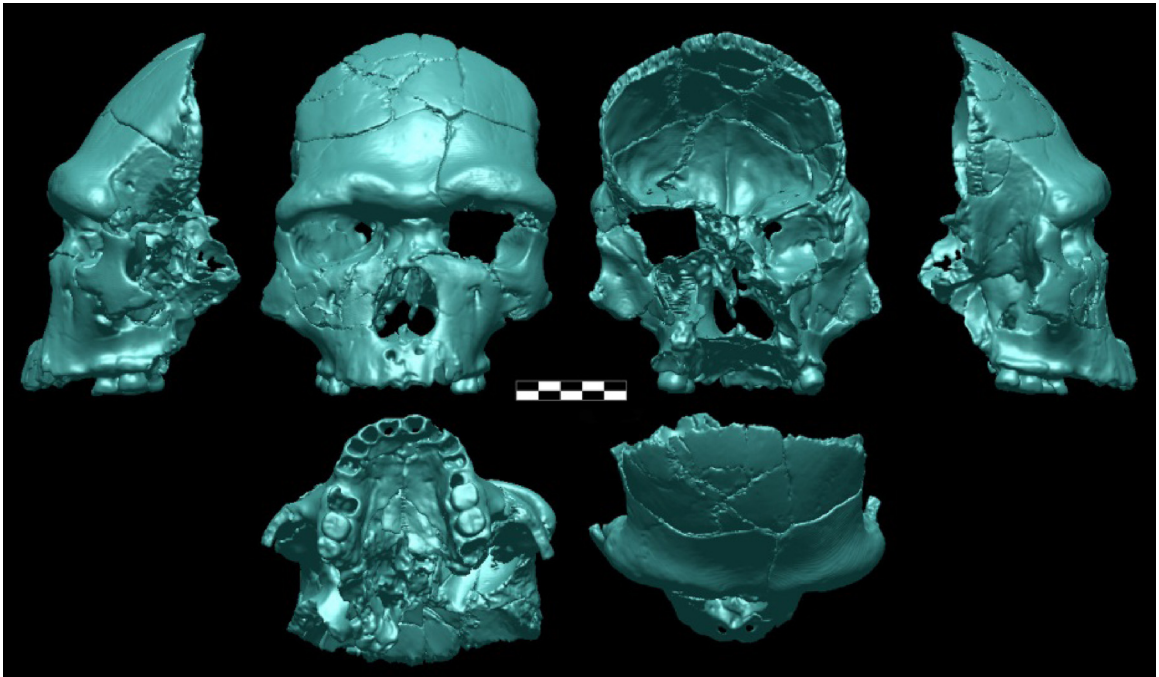


Fig. 5. Arago 21 virtuellement reconstitué, *norma lateralis* gauche, *norma facialis*, *norma occipitalis*, *norma lateralis* droite, *norma basilaris*, *norma verticalis*. Échelle 5 cm. En couleur sur Internet.

Fig. 5. Virtual reconstruction of Arago 21, left *norma lateralis*, *norma facialis*, *norma occipitalis*, right *norma lateralis*, *norma basilaris*, *norma verticalis*. Scale of 5 cm. Color available online.

en reliant le maxillaire à l'os frontal. La présente reconstruction d'Arago 21 ne prend en compte aucun fragment ne correspondant pas à l'original, aucune région n'ayant été reconstituée par symétrisation.

4. Résultats

4.1. Reconstruction

La reconstruction virtuelle d'Arago 21 (Fig. 5) présente quelques hiatus, ainsi qu'une légère inclinaison globale vers la gauche. Cette légère asymétrie et ces lacunes peuvent résulter des contraintes taphonomiques subies par le fossile. Certaines déformations comme la déviation de la cloison nasale de l'ethmoïde n'ont pas été intégralement compensées.

Arago 21 présente un os frontal courbé régulièrement à partir de la dépression supraglabellaire. L'écaille frontale est peu divergente postérieurement (indice de 96,5; Tableau 2), les lignes temporales ayant des trajectoires presque rectilignes et parallèles depuis les points fronto-temporaux jusqu'au niveau des stéphanions. Ces derniers correspondent à un changement d'orientation des sutures coronales, qui passent de trajectoires obliques vers le bas et l'extérieur depuis le bregma à presque verticales. Ceci fait que la largeur frontale maximale est presque identique à la largeur bistéphanique (Tableau 2). Les crêtes temporales saillantes sont anguleuses. Les faces temporales du frontal sont relativement verticales. La région sus-orbitaire correspond au type II/III de Cunningham (1908).

La faible divergence postérieure de l'écaille frontale est masquée par la grande largeur du torus sus-orbitaire. Les

deux cavités orbitaires présentent des contours rectangulaires, celle de droite étant légèrement plus large et moins haute.

Par rapport aux précédentes reconstructions, l'arcade dentaire présente un contour plus régulier, parabolique et frontal. La voûte palatine est plus plate. Aux mesures présentées dans le Tableau 2 s'ajoutent une largeur bijugale M45 (1) de 126,5 mm et une largeur bimaxillaire maximale de 112 mm.

4.2. Analyse procustéenne et ACP

La somme des trois premiers axes de l'ACP représente 50% de la variance totale (premier axe : 26,6% ; deuxième axe : 14,3% ; troisième axe : 9,1% ; Fig. 6).

Le passage des valeurs minimales aux valeurs maximales le long de l'axe 1 (Fig. 6) décrit principalement le bombement de l'écaille frontale (métopion plus antérieur et plus haut), un recul de la glabella par rapport au point supraglabellaire et au nasion, un élargissement de la largeur bistéphanique, ainsi que la réduction en proportion de la largeur frontale antérieure (entre les points frontotemporaux orbitaires). La plus petite valeur correspond à l'os frontal de OH 9 (−0,139), la valeur maximale à la grotte des Enfants 4 (0,133). L'écaille frontale comprise entre le bregma et le point supra-glabellaire ne cesse de croître en allant vers les valeurs positives de l'axe 1, en raison d'un bregma de plus en plus haut et plus postérieur. La largeur bistéphanique ne cesse de croître et est de plus en plus basse par rapport au bregma qui est de plus en plus postérieur. En parallèle, le passage vers les valeurs supérieures de

Tableau 2

Mesures de l'os frontal et de la face en millimètres.

Table 2

Measurements of the frontal bone and face in millimeters.

	Largeur frontale minimale (Min Fb)	M9 (Ft–Ft)	M10 (Co–Co)	M10b (St–St)	Divergence du frontal (Min Fb/M10)	Divergence des lignes temporales (M9/M10b)	M43 (Fmt–Fmt)	Constriction postorbitaire (Min Fb/M43)	M48 (Na–Pr)
Arago 21	109,1	109,1	113,1	113	96,5	96,5	123,2	88,6	80,2
ATD6-15 ^a	–	95,0–100,0	–	100,0	–	95,0–100,0	–	–	–
KNM-ER 3733	92,0	83,0	111,0	77,0	82,9	107,8	116,0	79,3	83,0
KNM-ER 3883	88,0	81,0	108,0	89,0	81,5	91,0	116,0	75,8	–
OH 9	98,0	84,0	105,0	84,0	93,3	100,0	130,0	75,4	–
Kabwe (Broken Hill)	102,0	96,0	115,0	112,0	88,7	85,7	139,0	73,4	85,4
Daka ^b	95,0	89,0	105,0	101,0	90,5	88,1	124,0	76,6	–
Bodo 1	108,0	103,0	115,0	104,0	93,9	99,0	136,0	79,4	84,2
Moyenne	97,2	89,3	109,8	94,5	88,5	95,3	126,8	76,7	84,2
Kocabaş ^c	91,0	81,6	102,0	80,0	89,2	102,0	116,5	78,1	–
Zhoukoudian III ^d	88,5	81,5	101,5	78,0	87,2	104,5	109,0	81,2	–
Zhoukoudian X ^d	94,0	89,0	110,0	–	85,5	–	–	–	–
Zhoukoudian XI ^d	94,0	84,0	106,0	81,0	88,7	103,7	111,0	84,7	–
Zhoukoudian XII ^d	95,0	91,0	108,0	103,0	87,9	88,4	–	–	–
Hexian	100,0	96,0	116,0	104,0	86,2	92,3	111,0	90,0	–
Nankin ^e	–	88,0	98,0	–	–	–	–	–	–
Moyenne	94,3	88,3	106,6	91,5	87,1	97,2	110,3	85,3	–
Sangiran 17	96,0	96,0	115,0	90,0	83,5	106,7	119,0	80,7	79,9
Ngandong 6	103,0	101,0	115,0	113,0	89,6	89,4	–	–	–
Ngandong 7	104,0	104,0	119,0	119,0	87,4	87,4	–	–	–
Ngawi 1	–	98,2	111,3	99,4	–	98,8	107,0	–	–
Sambungmacan 3	95,0	95,0	112,0	110,0	84,8	89,1	105,3	90,2	–
Moyenne	99,5	98,8	114,5	106,3	86,3	94,3	110,4	85,4	79,9
Petralona	108,0	108,0	120,0	119,0	90,0	90,7	130,0	83,1	95,4
Ceprano	110,0	108,0	120,0	130,0	91,7	83,1	130,0	84,6	–
SdlH 3 ^f	–	102,1	115,0	113,5	–	90,0	–	–	–
SdlH 4 ^f	–	117,0	126,0	119,5	–	97,9	–	–	–
SdlH 5 ^f	–	105,7	118,5	110,8	–	95,4	129,3	–	85
SdlH 6 ^f	–	100,0	–	116,0	–	86,2	111,0	–	–
Moyenne	109,0	106,8	119,9	118,1	90,9	90,6	125,1	83,9	90,2
Biache-Saint-Vaast 2 ^g	104,4	104,4	–	–	–	–	127,6	81,8	–
La Chapelle-aux-Saints	109,0	109,0	122,0	114,0	89,3	95,6	123,5	88,3	78,7
La Ferrassie 1	109,0	109,0	121,0	105,2	90,1	103,6	121,0	90,1	82,0
Saccopastore 1	101,0	101,0	116,0	105,8	87,0	95,5	114,0	88,6	88,7
La Quina H5	103,0	100,2	105,0	105,8	98,0	94,7	112,5	91,6	–
Guattari 1	109,9	109,9	127,0	120,0	86,5	90,8	120,0	91,6	83,6
Neandertal	108,0	108,0	122,0	112,0	88,5	96,4	120,5	89,6	–
Amud 1	113,5	113,5	124,0	117,5	91,5	96,6	122,7	92,5	85,6
Moyenne	107,2	106,9	119,6	111,5	90,1	96,2	120,2	89,3	83,7

^a Arsuaga et al., 1999 ; ^b Asfaw et al., 2008 ; ^c Viallet et al., 2012 ; ^d Weidenreich, 1943 ; ^e Viallet et al., 2010 ; ^f Arsuaga et al., 1997 ; ^g Guipert et al., 2011.

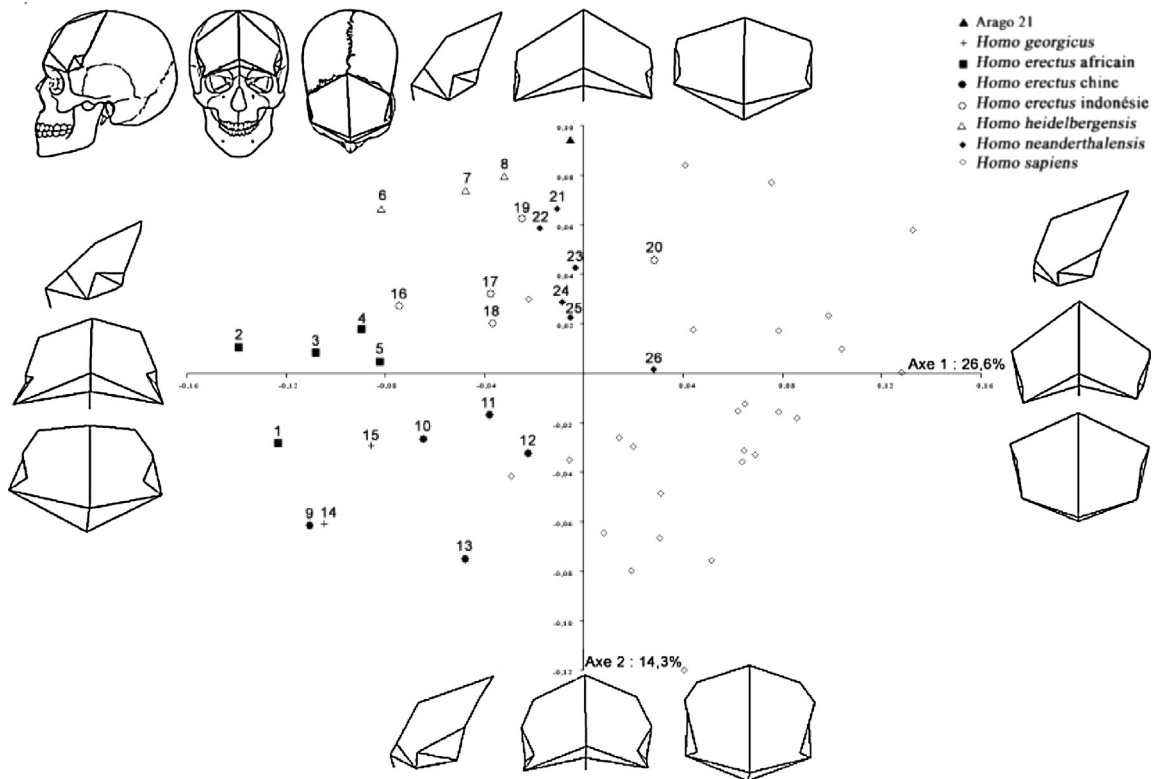


Fig. 6. Analyse en composantes principales des superimpositions procustéennes des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago 21 et de 52 fossiles. 1 : KNM-ER 3733 ; 2 : OH 9 ; 3 : Kabwe ; 4 : KNM-ER 3883 ; 5 : Bodo 1 ; 6 : Petralona ; 7 : Ceprano ; 8 : Sima de los Huesos 5 ; 9 : Nankin ; 10 : Zhoukoudian XII ; 11 : Dali ; 12 : Zhoukoudian III ; 13 : Zhoukoudian XI ; 14 : D2280 ; 15 : D2282 ; 16 : Sangiran 17 ; 17 : Ngawi 1 ; 18 : Ngandong 6 ; 19 : Ngandong 7 ; 20 : Sambungmacan 3 ; 21 : La Chapelle-aux-Saints ; 22 : La Quina H5 ; 23 : Guattari 1 ; 24 : La Ferrassie 1 ; 25 : Neandertal ; 26 : Amud 1.

Fig. 6. Principal Component Analysis of the Procrustes superimpositions of the frontal bone of Arago 21 and 52 fossils. 1 : KNM-ER 3733 ; 2 : OH 9 ; 3 : Kabwe ; 4 : KNM-ER 3883 ; 5 : Bodo 1 ; 6 : Petralona ; 7 : Ceprano ; 8 : Sima de los Huesos 5 ; 9 : Nankin ; 10 : Zhoukoudian XII ; 11 : Dali ; 12 : Zhoukoudian III ; 13 : Zhoukoudian XI ; 14 : D2280 ; 15 : D2282 ; 16 : Sangiran 17 ; 17 : Ngawi 1 ; 18 : Ngandong 6 ; 19 : Ngandong 7 ; 20 : Sambungmacan 3 ; 21 : La Chapelle-aux-Saints ; 22 : La Quina H5 ; 23 : Guattari 1 ; 24 : La Ferrassie 1 ; 25 : Neandertal ; 26 : Amud 1.

l'axe 1 s'accompagne d'une réduction de la largeur frontale antérieure, contribuant à réduire la constriction postorbitaire.

L'os frontal d'Arago 21 présente une valeur intermédiaire de $-0,005$ sur l'axe 1.

Le passage de la valeur minimale de l'axe 2 (Cro-Magnon 3 ; $-0,120$) à la valeur maximale (Arago 21 ; $0,094$) correspond principalement à l'élargissement de l'os frontal, à la réduction antéropostérieure de la distance entre les sphénions et la région antérieure de l'os frontal, ainsi qu'à la réduction de la distance entre les coronions et les sphénions. À cela s'ajoute un point supraglabellaire plus postérieur, ce qui induit, pour les valeurs élevées, une distance glabella–point supraglabellaire plus grande. Les frontaux situés à l'extrémité positive de l'axe 2 ont une largeur frontale minimale proportionnellement plus grande que ceux situés à l'extrémité inférieure, du fait de points frontotemporaux situés plus à l'extérieur. Les stéphanions sont aussi en position plus externe et plus basse. Les valeurs positives de l'axe 2 correspondent à un point supra-glabellaire plus postérieur et un bregma plus antérieur. Tout ceci combiné contribue au fait que les valeurs maximales de l'axe 2 présentent un frontal plus court antéropostérieurement et plus large.

Sans présenter une conformation frontale identique, le frontal modélisé d'Arago 21 avec les points de repère sélectionnés présente suivant l'axe 1 des affinités avec ceux de certains Néandertaliens comme La Chapelle-aux-Saints, La Quina H5, Guattari 1. En revanche, il s'en distingue suivant l'axe 2 et l'axe 3 (non représenté ici), les fossiles les plus proches étant Sima de los Huesos 5 et Ceprano.

5. Discussions

Il ressort de la superposition procustéenne et de l'analyse en composantes principales réalisées que l'os frontal d'Arago 21, modélisé tridimensionnellement au moyen de 15 points de repère craniométriques, diffère de ceux des *Homo georgicus*, des *Homo erectus* africains et des *Homo erectus* asiatiques. Par rapport à Arago 21, ces fossiles présentent en proportion, à des degrés différents : un frontal plus étroit et moins courbé sagittalement, une glabella très avancée par rapport au point supraglabellaire, des sphénions plus bas, des stéphanions en positions plus hautes et plus médiales, des points frontotemporaux en positions plus médiales et plus antérieures donnant une constriction postorbitaire plus marquée, et une écaille frontale plus divergente postérieurement.

En proportion, l'écaille frontale modélisée est moins longue pour Arago 21, mais plus large. Parmi ces fossiles, ce sont les *Homo erectus* indonésiens qui présentent les plus grandes similitudes, notamment Ngandong 7 et Ngawi 1.

La modélisation tridimensionnelle du frontal d'Arago 21 est plus proche de celles des fossiles européens. Parmi ceux-ci, Petralona et les Néandertaliens comme Amud 1, Neandertal, La Ferrassie 1 en sont les plus distants. Les plus semblables étant Ceprano et Sima de los Huesos 5, avec cependant des différences de conformation spatiale (écaille moins courbée). Les Néandertaliens ont en moyenne un os frontal légèrement plus large et plus allongé.

L'individu moyen des *Homo sapiens* fossiles présente une écaille frontale plus bombée et plus large, sans constriction postorbitaire.

L'analyse procustéenne a été limitée à l'os frontal en raison du faible nombre de fossiles du Pléistocène inférieur et moyen présentant une face relativement intacte. Seul Sangiran 17 pourrait être pris en compte pour les populations asiatiques et les *Homo heidelbergensis* seraient limités à Petralona et Sima de los Huesos 5, Steinheim étant déformé.

Du point de vue métrique, Arago 21 diffère systématiquement pour les valeurs étudiées des *Homo erectus* chinois, ces derniers ayant globalement un os frontal plus étroit (M9, M10, M10b) et plus divergent postérieurement avec une largeur entre les points frontomaxillaires temporaux (M43) moindre. Seules les lignes temporales présentent en moyenne une divergence semblable à celle d'Arago 21.

Les différences sont aussi marquées avec les *Homo erectus* indonésiens. Du fait d'une largeur minimale M9 moindre et d'une largeur maximale M10 supérieure ou semblable à celle d'Arago 21, ces fossiles présentent une écaille divergente plus postérieurement. La constriction postorbitaire calculée pour Sambungmacan 3 est similaire à celle d'Arago 21, tandis que celle de Sangiran 17 est plus marquée.

Les *Homo erectus* africains ont une largeur minimale M9 inférieure à celle d'Arago 21. Seuls Kabwe et Bodo 1 ont une largeur maximale M10 supérieure. La moyenne est cependant plus comparable à Arago 21, ce qui explique que toutes les écailles frontales sont plus divergentes postérieurement. Seul Kabwe présente une largeur bistéphanique supérieure. Arago 21 diffère nettement de ces fossiles par une largeur M43 entre les points frontomaxillaires temporaux inférieure (sauf KNM-ER 3733 et 3883), ce qui donne une constriction postorbitaire moindre pour Arago 21. La hauteur nasion-prosthion est moindre chez Arago 21.

Par rapport aux *Homo heidelbergensis*, Arago 21 est globalement plus petit (à l'exception de Sima de los Huesos 5 pour la largeur bistéphanique et Sima de los Huesos 6 pour la largeur M43). Seule la largeur frontale minimale M9 est comparable, voire supérieure à celles des autres fossiles, accentuant l'aspect divergent des autres écailles par rapport à Arago 21. Concernant la distance nasion-prosthion, il est plus court que Petralona et Sima de los Huesos 5.

Les Néandertaliens présentent des largeurs frontales minimales M9 comparables à celle d'Arago 21, mais à l'exception de la Quina H5, dont la largeur maximale M10 est plus petite, tous les Néandertaliens ont une écaille

frontale plus divergente postérieurement. De même, les indices de constriction postorbitaire des Néandertaliens sont semblables.

Cependant, ces fossiles diffèrent du point de vue anatomique. Alors que la section coronale de l'os frontal au niveau des points frontotemporaux est plus arrondie chez les Néandertaliens, elle est plus anguleuse chez Arago 21, avec des crêtes temporales saillantes et anguleuses, ce qui n'est pas observé chez les Néandertaliens.

Le tracé de la suture coronale d'Arago 21 diffère en vue frontale de celui des Néandertaliens, le tracé étant plus arrondi chez ces derniers du fait de la forme « en bombe » de la voûte crânienne. Chez Arago 21, le tracé est d'abord presque vertical depuis les sphéniens jusqu'aux stéphanions puis courbé de manière régulière jusqu'au bregma. Cela rappelle plus le tracé de Petralona et de Ceprano, que celui de Sima de los Huesos 5, plus pentagonal. Sangiran 17 présente des stéphanions plus internes par rapport aux sphéniens.

Selon la classification de [Cunningham \(1908\)](#), la région sus-orbitaire d'Arago 21 est de type intermédiaire II/III tout comme Ceprano, tandis que les Néandertaliens et Petralona correspondent au type III et les *Homo erectus* comme Ngandong 11 au type II. La crête crâniofaciale d'Arago 21 présente un tracé général incurvé, vers le bas dans la région médiane, vers le haut au-dessus de l'angle supéro-interne de l'orbite. Le torus sus-orbitaire encadre une dépression glabellaire surmontée d'une fosse supraglabellaire profonde. Au-dessus de l'orbite, la crête crâniofaciale présente un trajet arciforme, rendu irrégulier par la présence, au-dessus du tiers moyen de la cavité orbitaire, d'une zone aplanie, presque rectiligne, très oblique en bas et en dehors. Cette disposition est nettement différente de celle des Néandertaliens où le torus supra-orbitaire forme au-dessus de chaque orbite un arc dont la convexité est très régulière.

Les cavités orbitaires d'Arago 21 ont une forme rectangulaire légèrement oblique, alors que les cavités orbitaires des Néandertaliens présentent un contour plus arrondi. Les cavités d'Arago 21 sont plus larges que celles de Sima de los Huesos 5. Cependant, le contour supérieur des cavités orbitaires d'Arago 21 est proche de celui de Ceprano.

Les reliefs de la face antérieure du maxillaire d'Arago 21 sont peu marqués (bosse canine très peu saillante, absence de fosse canine). Ces reliefs de la partie inférieure de la face inférieure du maxillaire sont aussi peu marqués, voire absents chez Petralona, Sangiran 17 et les Néandertaliens.

On observe une légère concavité de la face antérieure des maxillaires correspondant à la dépression sous-orbitaire, limitée à la surface de l'os située immédiatement au-dessous du trou sous-orbitaire, jusqu'au rebord alvéolaire ([de Lumley et Spitery, 1982](#)). Cette dépression sous-orbitaire est absente chez Petralona, présente chez Sangiran 17, Sima de los Huesos 5 et Kabwe, et marquée sur Steinheim. La profondeur de cette dépression varie chez les Néandertaliens ([de Lumley et Spitery, 1982](#)).

Au niveau de la face inférieure des maxillaires, les deux bords alvéolaires d'Arago 21 forment une arcade à courbure régulièrement parabolique, notamment dans la

région antérieure incisivo-canine. Ce n'est pas le cas pour Petralona, Sima de los Huesos 5 et les Néandertaliens qui présentent une portion antérieure de l'arcade nettement aplatie (Condemi, 1992; de Lumley et Spitzery, 1982).

Arago 21 présente une conformation tridimensionnelle de l'os frontal semblable à celles de Sima de los Huesos 5 et, à un moindre degré, de Ceprano. Cependant Arago 21 présente des caractères anatomiques et métriques différents de ceux de ces fossiles, en particulier une écaïlle frontale moins divergente postérieurement, du fait d'une largeur maximale postérieure moindre. Cette différence de conformation de l'os frontal, peu dilaté chez Arago 21, pourrait correspondre à une étape plus ancienne dans le développement de l'encéphale et des lobes frontaux et des aires associées. Ceci est en accord avec les dernières estimations de l'âge de Ceprano (Nomade et al., 2011) et les premières concernant Sima de los Huesos 5 (Bischoff et al., 1997). En revanche, les nouvelles datations du niveau humain de Sima de los Huesos (Bischoff et al., 2007) impliqueraient une plus grande ancienneté pour ces fossiles. Les différences observées pourraient correspondre alors soit à une variabilité des populations, soit à des lignées phylétiques différentes. Cependant, la plus grande proximité morphométrique d'Arago 21 avec les Néandertaliens par rapport aux autres populations d'Asie et d'Afrique permet de le considérer comme proche de l'origine de ce taxon.

6. Conclusions

Cette reconstruction virtuelle d'Arago 21 est la première à avoir été réalisée par dissociation puis repositionnement de tous les fragments déformés et déplacés les uns par rapport aux autres. Elle a permis de compenser la plupart des déformations subies et se rapproche le plus de ce à quoi ressemblait le fossile original, la face la plus ancienne et la plus complète d'*Homo heidelbergensis* d'Europe, apportant de nouvelles informations sur la variabilité de ce groupe.

References

- Arsuaga, J.L., Martínez, I., Gracia, A., Lorenzo, C., 1997. The Sima de los Huesos crania (Sierra de Atapuerca, Spain). A comparative study. *J. Hum. Evol.* 33, 219–281.
- Arsuaga, J.-L., Martínez, I., Lorenzo, C., Gracia, A., Muñoz, A., Alonso, O., Gallego, J., 1999. The human cranial remains from Gran Dolina Lower Pleistocene site (Sierra de Atapuerca, Spain). *J. Hum. Evol.* 37, 431–457.
- Ascenzi, A., 1982. Comparaison entre l'Homme de Tautavel, les Anténéandertaliens d'Italie et l'Homme de Saccopastore, 1^{er} Congrès international de paléontologie humaine. *L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles*, pp. 918–933.
- Asfaw, B., Gilbert, W.H., Richards, G.D., 2008. *Homo erectus* Cranial Anatomy. In: Gilbert, W.H., Asfaw, B. (Eds.), *Homo erectus* Pleistocene Evidence from the Middle Awash, Ethiopia. University of California Press, California, 458 p.
- Bischoff, J.L., Fitzpatrick, J.A., Leon, L., Arsuaga, J.L., Falgueres, C., Bahain, J.J., Bullen, T., 1997. Geology and preliminary dating of the hominid-bearing sedimentary fill of the Sima de los Huesos Chamber, Cueva Mayor of the Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain. *J. Hum. Evol.* 33 (2–3), 129–154.
- Bischoff, J.L., Williams, R.W., Rosenbauer, R.J., Aramburu, A., Arsuaga, J.L., García, N., Cuenca-Bescós, G., 2007. High-resolution U-series dates from the Sima de los Huesos hominids yields: implications for the evolution of the early Neanderthal lineage. *J. Archaeol. Sci.* 34, 763–770.
- Bookstein, F.L., 1991. Morphometric tools for landmark data. In: *Geometry and biology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Condemi, S., 1992. *Les Hommes fossiles de Saccopastore et leurs relations phylogénétiques*. CNRS, Paris, 174 p.
- Cunningham, D.J., 1908. The evolution of the eyebrow region of the forehead with special reference to the excessive supraorbital development in the Neanderthal race. *Trans. R. Soc. Edin.* 46, 243–310.
- Grimaud, D., 1982a. Le pariétal de l'Homme de Tautavel, 1^{er} Congrès international de paléontologie humaine. *L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés fossiles*, pp. 62–88.
- Grimaud, D., [Thèse de 3^e cycle : "Géologie des formations sédimentaires", option : Géologie du Quaternaire et préhistoire] 1982b. *Évolution du pariétal de l'Homme fossile. Position de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés*, 706 p.
- Guipert, G., [Thèse] 2005. *Reconstitution et position phylétique des restes crâniens de l'Homme de Tautavel (Arago 21-47) et de Biache-Saint-Vaast 2. Apports de l'imagerie et de l'analyse tridimensionnelle*. Université Aix-Marseille-3, 480 p.
- Guipert, G., Lumley de, M.-A., Lumley de, H., Mafart, B., 2004. Three-Dimensional Imagery: a New Look at the Tautavel Man. [Enter the Past] The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage. CAA 2003. Computer Applications and Quantitative Methods, Proceedings of the 31st Conference, Vienna, Austria, April 2003. Wien: BAR International Series, pp. 100–102.
- Guipert, G., Mafart, B., 2008. Medial sagittal plan of human cranium and virtual reconstitution by mirroring. *Am. Phys. Anthropol. (Suppl.)* 46, 110.
- Guipert, G., Lumley de, M.-A., Tuffreau, A., Mafart, B., 2011. A late Middle Pleistocene hominid: Biache-Saint-Vaast 2. *C. R. Palevol* 10 (1), 21–33.
- Gunz, P., Mitteroecker, P., Neubauer, S., Weber, G.W., Bookstein, F., 2009. Principles for the virtual reconstruction of hominin crania. *J. Hum. Evol.* 57, 48–62.
- Lumley de, H., Lumley de, M.-A., 1971. Découverte de restes humains anténéandertaliens datés du début du Riss à la caune de l'Arago (Tautavel, Pyrénées-Orientales). *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 272, 1729–1742.
- Lumley de, H., Lumley de, M.-A., 1973. Pre-Neanderthal Human Remains from Arago Cave in southeastern France. *Yearb. Phys. Anthropol.* 17, 162–168.
- Lumley de, M.-A., Spitzery, J., 1982. Le maxillaire de l'Homme de Tautavel, 1^{er} Congrès international de paléontologie humaine. *L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés fossiles*, pp. 154–177.
- Martin, R., Saller, K., 1957. *Lehrbuch der Anthropologie 1/7*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 661 p.
- Moigne, A.-M., Palombo, M.R., Belda, V., Heriech-Briki, D., Kacimi, S., Lacombat, F., Lumley de, M.-A., Moutoussamy, J., Rivals, F., Quilès, J., Testu, A., 2006. Les faunes de grands mammifères de la caune de l'Arago (Tautavel) dans le cadre biochronologique des faunes du Pléistocène moyen italien. *L'Anthropologie* 110, 788–831.
- Nomade, S., Muttoni, G., Guillou, H., Robin, E., Scardia, G., 2011. First ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of the Ceprano man (central Italy). *Quat. Geochronol.* 6, 453–457.
- O'Higgins, P., Jones, N., 2006. *Tools for Statistical Shape Analysis*. Hull York Medical School.
- Spitzery, E., 1982. L'occipital de l'Homme de Tautavel. Essai de reconstitution, 1^{er} Congrès international de paléontologie humaine. *L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés fossiles*, pp. 89–109.
- Spitzery, E., [Thèse de 3^e cycle] 1984a. *Évolution de l'os occipital chez les Hominidés*. Université de Provence, Marseille.
- Spitzery, J., [Thèse de 3^e cycle] 1984b. *L'os frontal des Hommes fossiles*. Université de Provence, Marseille, 398 p.
- Vialet, A., Guipert, G., He, J., Feng, X., Lu, Z., Wang, Y., Li, T., Lumley de, M.-A., Lumley de, H., 2010. The *Homo erectus* from the Yunxian and Nankin Chinese sites. Anthropological improvements by using 3D virtual imaging technique. *C. R. Palevol* 9, 331–339.
- Vialet, A., Guipert, G., Alcicek, M.C., 2012. *Homo erectus* still further west. Reconstruction of the Kocabaş cranium (Denizli, Turkey). *C. R. Palevol* 11, 89–95.
- Vlček, E., 1986. Les Anténéandertaliens en Europe centrale et leur comparaison avec l'Homme de Tautavel. *L'Anthropologie* 90, 503–513.
- Weidenreich, F., 1943. The skull of *Sinanthropus pekinensis*: a comparative study on a primitive hominid skull. *Palaeontol. Sin.* D19, 1–486.
- Yokoyama, Y., Nguyen, H.V., Falguères, C., Bibron, R., Léger, C., 1991. Datation directe par la spectrométrie gamma non destructive des restes humains : comparaison avec d'autres méthodes. In: Raynal, J.-P., Miallier, D. (Eds.), *Datation et caractérisation des milieux pléistocènes*. CNRS, Bordeaux, pp. 11–17.