

Paléontologie humaine et préhistoire

Impact probable du volcanisme sur le décès des Hominidés de Dmanissi

Marie-Antoinette de Lumley^a, Jacques-Marie Bardintzeff^{b,c}, Philippe Bienvenu^c,
Jean-Baptiste Bilcot^c, Guy Flamenbaum^e, Christophe Guy^c, Michel Jullien^f,
Henry de Lumley^{a,*}, Jean-Philippe Nabet^d, Christian Perrenoud^g,
Olivier Provitina^c, Martine Tourasse^d

^a *Institut de paléontologie humaine, fondation Albert-I^{er}-Prince-de-Monaco, département de Préhistoire du Muséum national d'histoire naturelle, UMR 5198 du CNRS, 1, rue René-Panhard, 75013 Paris, France*

^b *Laboratoire de pétrographie–volcanologie, bâtiment. 504, université Paris-Sud, 91405 Orsay, France*

^c *Université de Cergy-Pontoise, IUFM, RP 815, 78008 Versailles, France*

^d *Laboratoire d'analyses radiochimiques et chimiques, centre de Cadarache du Commissariat à l'énergie atomique, bâtiment 152, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France*

^e *Département d'étude des combustibles, centre de Cadarache du Commissariat à l'énergie atomique, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France*

^f *Laboratoire de modélisation des transferts dans l'environnement, centre de Cadarache du Commissariat à l'énergie atomique, bâtiment 307, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France*

^g *Département de Préhistoire du Muséum national d'histoire naturelle, centre européen de recherches préhistoriques de Tautavel, avenue Léon-Jean-Grégory, 66720 Tautavel, France*

Reçu le 20 août 2006; accepté après révision le 10 septembre 2007

Disponible sur Internet le 1 février 2008

Résumé

Les restes humains découverts à ce jour sur le site Pléistocène inférieur de Dmanissi (Géorgie) sont abondants, bien conservés, sans trace de prédation ou de transport. Ils ont été retrouvés sur une surface réduite et correspondent au minimum à cinq individus d'*Homo georgicus*, d'âges répartis régulièrement entre l'adolescent et le « vieillard » de plus de 40 ans. Ces caractéristiques font penser à un groupe familial décédé subitement. Les granulométries et analyses chimiques d'une trentaine d'échantillons de la cendre volcanique de la couche VI, englobant la plupart de ces restes humains, démontrent l'unicité de cette cendre et sa position primaire. Ce téphra ne pouvant correspondre à une nuée ardente, il est probable que les Hominidés de Dmanissi ont été surpris et asphyxiés, il y a 1 810 000 ans, par des retombées de cendres volcaniques. *Pour citer cet article : M.-A. de Lumley et al., C. R. Palevol 7 (2008).* © 2007 Publié par Elsevier Masson SAS pour l'Académie des sciences.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : iph@mnhn.fr (H. de Lumley).

Abstract

Probable volcanic impact on the death of the Dmanisi Hominids. The human remains unearthed at the Lower Pleistocene site of Dmanisi (Georgia), are numerous, well preserved and show no evidence of transportation or predation. They were discovered over a small surface and correspond to at least five *Homo georgicus* individuals, whose age at death is regularly distributed from the teenager to the elder over 40 years old. These characteristics evoke a family group who died suddenly. Granulometry and chemical analyses of ca. 30 volcanic tephra samples prove its unicity and its primary position. Since this tephra cannot correspond to a *nuée ardente*, it is probable that the Dmanisi Hominids were surprised and asphyxiated, 1 810 000 years ago, by volcanic ashfalls. **To cite this article:** M.-A. de Lumley et al., C. R. Palevol 7 (2008).

© 2007 Publié par Elsevier Masson SAS pour l'Académie des sciences.

Mots clés : Dmanissi ; Géorgie ; *Homo georgicus* ; Éruption volcanique ; Téphras ; Étologie des décès ; Victimes du volcanisme

Keywords: Dmanisi; Georgia; *Homo georgicus*; Volcanic eruption; Tephra; Death aetiology; Victims of volcanism

Abridged english version

Five skulls, four mandibles and many other bones of *Homo georgicus* [9,13,14] have been discovered in the Plio-Pleistocene sediments of Dmanisi, Georgia, dispersed approximately over 300 m².

The study of these human remains, their distribution and their context yields valuable information: (1) they have been dated to between 1.810 and 1.770 Ma with radiochronology and palaeomagnetism [12], thus attesting to human presence at the gate of Europe much earlier than the classical scenario; (2) they correspond to a minimum of five individuals [14], of both genders and of various ages from a 13–14-year-old young girl, an 18–20-year-old young female, two males aged 25–30 and 40, and an elder individual with no teeth; (3) spatial distribution (Fig. 2) reveals that the individuals were deposited contemporaneously, in the same stratigraphic ensemble of volcanic ashes; (4) the regularly distributed age at death evokes a living family decimated by a catastrophic phenomenon; (5) the exceptional quality of the preservation of the human remains is illustrated by the integrity of the bones, empty endocranial cavities, mostly non-broken long bones and skulls and weak dislocation of anatomic connexions, which is uncommon in prehistoric settlements.

The hominids and faunal remains were found in a volcanic tephra (layer VI), which is up to 1 m thick, and in alluvial sands rich in tephra (layer V) overlying the 'pure' tephra of layer VI. This volcanic ensemble was deposited on a basaltic flow dated back to 1.85 ± 0.01 Ma by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar method [9,10]. The overlying tephra, dated back to 1.81 ± 0.05 Ma by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar technique [12], is contemporaneous with the bone accumulation.

This abundance, diversity, age at death, distribution, and preservation of human remains brings to question the circumstances of their death and accumulation.

1. *The bones were not transported by runoff*, because no lusted bones or blunted edges were identified. The remains were not transported over long distances.
2. *The bones were not brought there by a big carnivore*, as none of them presents characteristic marks of carnivore teeth.
3. *It is not a primary accumulation after natural death*, because the ages at death do not correspond to a natural mortality, but to a catastrophic event, which led to the sudden death of individuals of different ages.
4. *It is not a secondary anthropic accumulation* after the sudden death of a small group of individuals, because of the random distribution of the skeleton parts.
5. *It is not a cannibal den*, because no cutmarks were identified on the human bones.
6. *The Hominids did not sink in quicksand*, because the volcanic tephra is neither thick nor weathered enough to become thixotropic.
7. As the human remains are well preserved and discovered over a small surface in volcanic tephra, the question is to ascertain whether the accumulation is related to volcanism or not.

Methodology

In order to test this hypothesis, field observation and sampling of ca. 30 volcanic tephra sediments were carried out, continuously on vertical series in *secteur II* and *maison XI* as well as locally throughout the site (Figs. 1, 3 and 4). One of them (PP 60) was beside the D 2600 human mandible.

These samples have been analysed with different methods:

- Laser diffraction granulometry (Coulter LS 230, fluid module) on roughly 30 non-treated volcanic tephra (naturally smaller than 2 mm) after 15 min in the appa-

ratus and 150 s of sonication, obscuration between 11 and 12%, Polarisation Intensity Differential Scattering (PIDS) between 51 and 55%, PIDS analysis during 90 s, Fraunhofer optical model;

- morphoscopy using a stereomicroscope and a polarizing microscope, magnification 2 to 400;
- micromorphology on seven thin 135 × 65 mm sections of the tephra layer (out of 43 thin sections for the site) prepared after vacuum resin impregnation of samples consolidated by plaster bands;
- X-Ray Diffraction (Bruker D 8) of four volcanic tephtras among 16 powdered samples (manually grounded in an agate mortar) on rotating specimen holder, cathode Cu, quick detector SOL-X and Göbel mirror, acquisition time 2 h 50, detection limit 3–5%;
- Wavelength Diffraction of X-Ray Fluorescence (WDXRF, Philips PW 1404) on vitreous fusion of 14 tephtra samples of the site, two samples of the basalt (base of flow, Env-S 2 et top of flow, PP 31) and one sample of a nearby tephtra (Env-S 9), semi-quantitative analysis with 15 Philips Analytical standards ‘Certification of the secondary standard for the Philips standardless program’;
- Induced Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP–OES, Thermo Electron IRIS Advantage) and Induced Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP–MS, Thermo Elemental X7), after fusion with LiBO₂ and dissolution in HNO₃ of three tephtra samples of the site (S 103, PPSG-II-3 and PP 60) and one sample of a nearby tephtra (Env-S 9);
- Electron microprobe (Cameca SX 100), 10 nA, 15 kV.

Results

Dated back to 1.81 ± 0.05 Ma, the tephtra layer (layer VI [3] and A1 [10]) fills the holes and the cracks of the underlying basalt up to a thickness of 1 m (Figs. 3 and 4). This tephtra, non-continuous, has clearly been locally eroded prior to the deposition of the overlying ochre and grey fluvial sands.

Granulometry

All the samples are well sorted, present no fraction over 2 mm and display unimodal granulometric curves centred on fine sands (mode between 130 and 170 μm) (Fig. 5). Clay and silt fractions represent 2 and 16% of the sample respectively. This unimodal population, with a rather high grain size according to a presumed source located 20 km west of the site, reveals the force of the explosion.

Morphoscopy

Different tephtra samples from the site yield similar results. For example, the sediment sampled beside the human mandible D 2600 contains rare pumice fragments (<1%) and a few shards and sticks (5%). Most of this tephtra is composed of more or less thick glass grains (78% subangular and 16% angular). S 103 sample is similar (Fig. 6, above). Optically, the tephtra is made up of 2% minerals and 98% glass, hyaline to black, almost always with microlites included. The rarity of grains without microlites, as confirmed in thin section (Fig. 7, above), implies that this tephtra is either the result of the pulverization of the basaltic mouth of the volcano at the time of the explosion or that these minerals had time to crystallize in the magma. A very different tephtra has been sampled in the vicinity of the site (Env-S 9, Fig. 1), mostly composed of hyaline glass without any microlite (Fig. 6, below), often with pipe vesicles or in the form of bubble wall shards.

Micromorphology

On the field or on thin sections (Fig. 7, middle), no bedding was identified in these pure tephtras, although it is present on secondary deposited tephtras. Nonetheless, the volcanic ashes may have been moved without inducing any bedding, even in thin section: the aggregated sediment, sampled as near as possible to the human mandible D 2600, yields composite aggregates and coated grains of all sizes (Fig. 7, below). Bioturbation may explain certain aggregates, but other aggregates and coated grains are clear evidence of remobilised sediment. The sampling is not close enough to human remains to ascertain their presence in primary deposited sediment.

X-Ray Diffraction

Only calcite, quartz, albite, and montmorillonite were detected in the tephtras (Fig. 8). Amorphous vitreous material represents only a small volume of the sample. This implies a weak tephtra alteration, with secondary montmorillonite issued from plagioclases and ashes, and secondary calcite derived from fluid recirculation. Quartz comes from the destruction of the volcanic cone. Higher in the stratigraphy, other minerals appear, thus giving a distinctive pattern to the tephtra of layer VI.

Chemical analysis

The tephtra reveals a homogeneous chemical composition at the scale of the site (14 samples for X-Ray fluorescence and 3 for ICP–OES and ICP–MS) (Tables 1 and 2). Its calc-alkaline composition is different from

that of the more alkaline basalt one, and from the rhyolitic tephra sampled in the environment, 2 km upstream of the Pinezaouri River (Figs. 9 and 10).

ICP–OES and electron microprobe analysis reveals that S 103 and PP 60 samples are highly close in composition, containing roughly 57% of SiO₂ and 5.4% of Na₂O + K₂O, and thus are basaltic andesites close to andesites (57% of SiO₂) according to [11]. These results are characteristic of a calc-alkaline series in a collision context. PPSG-II 3 sample corresponds to a volcanic ash enriched in calcium carbonate, but close in composition to the precedent samples.

The rhyolitic ash (Env-S 9), much richer in SiO₂ and different in its rare-earth composition (Figs. 9–11, Tables 1 and 2), comes from a different eruptive sequence.

Type of volcanism and origin of the deaths

The chemical composition of the tephra reveals an explosive calc-alkaline volcanism in a collision context.

The tephra is not a *nuée ardente*, because of its well-sorted granulometry, typical of vulcanian or plinian ashfalls [2,18].

The volcanic ashes were sorted during aerial transportation from the emissive point, presumably located ca. 20 km west of Dmanisi (Emliki heights in the Džavacheti Mountains). From such a distance, the ashfall does not burn, but when inhaled, it mixes with naso-buccopharyngeal secretions and forms a mixture that provokes suffocation by obstruction of respiratory and digestive tubes.

The Vesuvius eruption, responsible for the destruction of Pompeii, presents similarities and differences. Pompeii was closer to the volcano than Dmanisi. Inhabitants had time to see the development of the eruption, some got away, and some were asphyxiated by ashes and gases, and then buried under several meters of burning pumice ash. *Nuées ardentes* were emitted during the last hours.

Some hydrovolcanic eruptions can be highly explosive. In 1790, Kilauea, in the Hawaii Islands, produced such an eruption with plume and surges 10 km high, which killed at least 80 people. However, the well-sorted Dmanisi ashes differ from badly sorted surge ashes [1,2].

1 810 000 years ago, scavenging *Homo georgicus* groups may have been surprised by volcanic ashfalls and some may have died by asphyxia.

Conclusion

In the Plio-Pleistocene site of Dmanisi, the presence of at least five *Homo georgicus* individuals is puzzling

because of the excellent quality of preservation of the bones. Analysis of the enclosing tephra allows its attribution to a calco-alkaline volcanic ashfall and eliminates the hypothesis of a *nuée ardente*, because of the granulometry of the tephra.

In Dmanisi, the concentration of Hominids in a depression may represent a search for shelter. The ashfall, cold hence non-mortal, could have allowed the Hominids to gather in a natural depression. Tephra inhalation, mixed with natural secretions, may have led to animal and human death by obstruction of respiratory and digestive tubes.

1. Introduction

Invités, du vendredi 22 septembre au dimanche 22 octobre 2000, par le Pr. Leo Gabunia, membre de l'Académie des sciences de Géorgie, et David Lordkipanidze, alors directeur du département de géologie et de paléontologie du Musée national géorgien, sur le site de Dmanissi, en Géorgie,¹ pour y réaliser une étude géologique en collaboration avec les chercheurs géorgiens, nous avons effectué des relevés de coupes stratigraphiques et des prélèvements d'échantillons pour analyses sédimentologiques, micromorphologiques, géochimiques, magnétostratigraphiques et géochronologiques.² Plus de 1000 kg de sédiments, sous formes d'échantillons bruts ou de carottes indurées, ont été apportés en France, dans nos laboratoires.³

Les échantillons analysés dans cette note ont été prélevés au cours de la campagne de septembre 2000.

Cinq crânes, quatre mandibules et de nombreux ossements appartenant à *Homo georgicus* [9,13,14] ont été mis au jour depuis 1991 dans les formations du Pléistocène inférieur du site de Dmanissi, en Géorgie, au sein d'une dépression en surface d'une coulée de basalte, dispersés sur une surface d'environ 300 m² (moins de 20 m de diamètre, Fig. 2).

Tous ces restes d'hominidés sont parfaitement bien conservés, rarement fracturés et, fait exceptionnel, la plupart des crânes sont complets.

¹ Cette mission a bénéficié de subventions du ministère français des Affaires étrangères, de l'ambassade de France en Géorgie et du support de l'Institut de paléontologie humaine, Fondation Albert-I^{er}-Prince-de-Monaco.

² Henry de Lumley, Christophe Falguères, Jean Gagnepain, Tristan Garcia, Christian Perrenoud, pour la partie française, ont participé à cette mission.

³ Nous remercions David Lordkipanidze, aujourd'hui directeur général du Musée national géorgien, d'avoir bien voulu permettre cette mission et d'avoir facilité l'expédition des échantillons vers la France.

2. L'analyse de ces découvertes d'hominidés, de leur environnement immédiat et de leur position biostratigraphique apporte des informations capitales et originales

1. L'ensemble osseux crânien et postcrânien, daté par diverses méthodes radiochronométriques et par le paléomagnétisme, a mis en évidence, pour la première fois, que l'Homme est présent aux portes de l'Europe, en Transcaucasie, entre 1,810 et 1,770 Ma [12], bien avant le scénario classique établi pour le peuplement de l'Europe. Par leurs critères morpho-fonctionnels, ces restes osseux sont attribués à *Homo georgicus* [13,14].
2. L'abondance, la diversité et la qualité de la représentation des restes d'hominidés fossiles (cinq crânes, quatre mandibules et une trentaine d'éléments post-crâniens) permettent de dénombrer un minimum de cinq individus appartenant aux deux sexes et d'âges divers [14] : une adolescente d'environ 13–14 ans, une adulte jeune femelle de 18–20 ans, deux adultes mâles âgés de 25–30 ans et 40 ans et un vieillard édenté. Cet ensemble est concentré sur une aire d'environ 300 m², et il est enfoui dans des cendres volcaniques et des sables alluviaux déposés sur une coulée de basalte.
3. L'analyse de la répartition planimétrique de ces restes osseux indique une contemporanéité du dépôt des individus. Les ossements sont disposés dans un même ensemble stratigraphique (couches VI–V). La précision des fouilles, effectuées en utilisant les trois données cartésiennes spatiales (x,y,z), aide à visualiser la disposition anatomique de l'ensemble des éléments du squelette (Fig. 2) de l'adolescente et du vieillard édenté, par exemple.
4. Les différentes classes d'âge au décès des individus représentés, de l'adolescente au vieillard, évoquent la disparition simultanée de la population, qui pourrait correspondre à une famille. Les âges répartis régulièrement entre le stade adolescent et celui du vieillard évoquent le tableau d'une population vivante qui a été décimée par un événement catastrophique. Dans le cas contraire, d'une mort naturelle, la répartition des âges est irrégulière et présente des pics de mortalité naturelle (cf. *Homo heidelbergensis* de la Sima de Los Huesos à Atapuerca [7] ; hypogée chalcolithique de Roaix, Vaucluse [4]). À Dmanissi, il pourrait s'agir d'une famille d'hominidés décédée subitement.
5. La qualité de la conservation des restes humains est exceptionnelle. C'est surtout l'intégrité des ossements, boîtes crâniennes et mandibules relativement

intactes, avec la cavité endocrânienne non remplie de sédiments, les os longs majoritairement entiers et dont les connexions anatomiques sont faiblement disloquées, qui caractérise le site de Dmanissi. Cette observation est inhabituelle dans l'analyse des habitats préhistoriques, dont les restes osseux sont brisés, réduits à l'état fragmentaire par une action anthropique (Caune de l'Arago par exemple). À Dmanissi, les restes fauniques présentent la même qualité de conservation dans la plupart des cas, sans être constante.

En résumé, les quatre dernières observations argumentent en faveur d'un événement subit, catastrophique, non anthropique, qui a vraisemblablement causé la mort du « groupe familial de Dmanissi ».

Les restes d'hominidés, comme ceux de la faune, sont enfouis à l'intérieur d'une couche de cendres volcaniques (couche VI), conservée sur une épaisseur qui peut atteindre 1 m, et de sables alluviaux riches en cendres (couche V), qui surmontent les cendres « pures » de la couche VI. Cet ensemble cendreux s'est déposé sur un substrat basaltique, dont la coulée a été datée de $1,85 \pm 0,01$ Ma par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ [9,10].

Les cendres sus-jacentes, datées de $1,81 \pm 0,05$ Ma par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ [12], sont contemporaines des dépôts osseux.

3. Étiologie de la mort et de l'enfouissement des individus

La présence de ces nombreux restes d'hominidés, répartis dans une dépression sur une surface restreinte et en parfait état de conservation, pose la question des circonstances de la mort et de l'enfouissement d'au moins cinq individus.

3.1. S'agit-il d'ossements charriés et apportés par le ruissellement ?

Aucune trace de lustrage sur les ossements, ni d'éroussé sur les arêtes, n'a été mise en évidence sur les restes d'hominidés, et il est évident qu'ils n'ont pas été charriés sur une grande distance. Les ossements humains découverts dans la couche V (cendres volcaniques mêlées de sables) peuvent provenir d'individus morts pendant ou peu après le dépôt de la couche VI, puis remobilisés sur de faibles distances, que ce soit lors du dépôt de la couche V, ou de son remaniement par les terriers ou tunnels présents dans la stratigraphie. La réalité d'un « groupe familial » et les 17 restes humains postcrâniens qui « pourraient appartenir à un seul individu » [14],

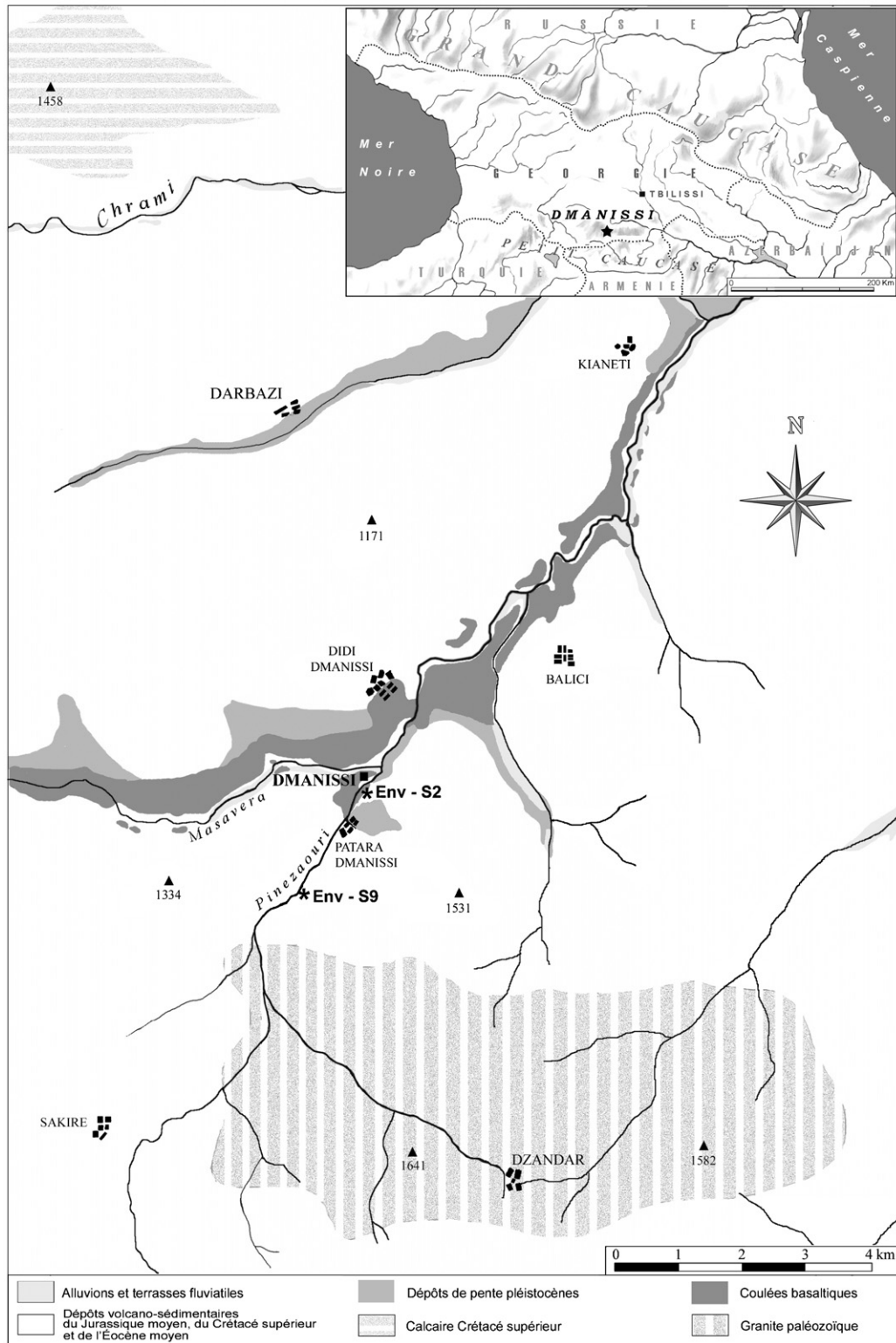


Fig. 1. Localisation des échantillons prélevés dans l'environnement du site de Dmanissi, Géorgie, et étudiés dans cet article.

Fig. 1. Localisation of the studied sediments sampled in the surroundings of the Dmanisi site (Georgia).

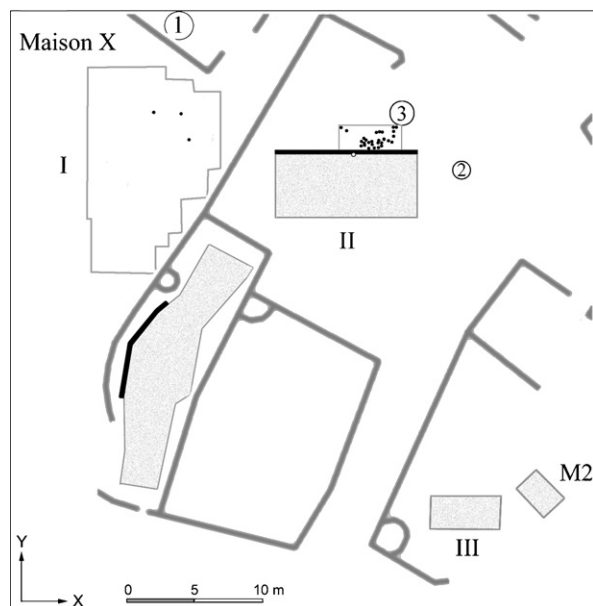


Fig. 2. Répartition spatiale des principaux restes d'Hominidés fossiles de Dmanissi et localisation des deux coupes stratigraphiques échantillonnées.

Fig. 2. Spatial distribution of the main Hominid fossils and localisation of the sampled stratigraphic profiles in the Dmanissi palaeoanthropological site.

découverts dans les couches VI et V, confirment cette interprétation : si certains des restes humains sont conservés dans la couche VI, certains ont été remobilisés en couche V, mais sont issus de la couche VI. Ces remarques vont à l'encontre de l'interprétation de M. Bukhsianidze [5] qui, même si elle parle d'extinction de masse, attribue celle-ci à une forte mise en eau par la rivière.

3.2. S'agit-il d'ossements apportés par un grand carnivore ?

Aucun des restes d'hominidés découverts ne présente les stigmates caractéristiques des dents de carnivores. Bien conservés, ils ne sont pas brisés, au contraire de ce que peut faire une hyène ou un autre grand carnivore lorsqu'il dévore sa proie. Ils ont néanmoins été faiblement éparpillés après la mort des individus, car ils ne sont pas restés en connexion anatomique. M. Tappen et al. [17] parviennent aux mêmes conclusions et ne retiennent pas le gisement de Dmanissi comme une accumulation typique due aux carnivores.

3.3. S'agit-il d'un dépôt primaire de corps après la mort naturelle d'individus ?

Les âges comparés des individus décédés, qui ne correspondent pas à une mortalité naturelle mais à un

événement catastrophique qui a entraîné la mort subite d'individus de classes d'âge différentes, permettent d'éliminer cette hypothèse.

3.4. S'agit-il d'un dépôt anthropique secondaire après le décès subit d'un petit groupe d'individus ?

L'absence de disposition particulière des ensembles squelettiques, dont la répartition paraît aléatoire, permet d'éliminer également cette hypothèse.

3.5. S'agit-il d'un repaire de cannibales ?

Aucune trace de découpe n'a été observée sur les restes d'hominidés, alors qu'elles sont visibles sur les ossements fracturés d'*Homo antecessor* découverts dans la couche TD 6 de Gran Dolina, à Atapuerca [6,8]. À Dmanissi, ce ne sont pas des ossements dont les chairs auraient été découpées ou les os fracturés pour extraire la moelle à des fins de cannibalisme.

3.6. S'agit-il d'individus enlisés dans des cendres transformées en sables mouvants ?

Sous certaines conditions d'humidité, des cendres volcaniques pédogénisées acquièrent des propriétés thixotropes et passent d'un état semi-rigide à un état fluide, lorsqu'un choc ou une pression est appliqué(e). Néanmoins, ce phénomène est exceptionnel et nécessite des conditions perhumides de certains sols développés sur cendres volcaniques [15]. À Dmanissi, la couche de cendres volcaniques est trop mince (moins d'un mètre), elle n'est pas litée, elle ne semble pas suffisamment altérée (cf. spectres de diffraction de rayons X, Fig. 8) et elle repose sur une coulée de basalte non altéré. Enfin, les conditions perhumides nécessaires pour justifier cette hypothèse ne sont pas attestées. Toutes ces caractéristiques excluent un comportement thixotrope du niveau de cendre volcanique.

3.7. S'agit-il de l'impact du volcanisme ?

La plupart des restes d'hominidés du site de Dmanissi, bien conservés, répartis sur une surface restreinte, au sein d'une couche de cendres volcaniques, nous interpellent, et la question se pose alors de savoir si les activités volcaniques n'ont pas joué un rôle dans le décès des individus.

4. Matériel et méthode

Pour répondre à cette question, une étude de terrain et une trentaine de prélèvements de sédiments ont été réalisés dans la couche de cendres volcaniques, en secteur II (Fig. 3) et en maison XI (Fig. 4), aussi bien selon des séries continues verticales, que selon des prélèvements ponctuels, dont l'un (PP 60) a été réalisé à proximité immédiate de la mandibule humaine D 2600, lors de son dégagement (Fig. 3). Ils ont été analysés en laboratoire par différentes méthodes :

- granulométrie par diffraction laser en voie humide (Coulter LS 230) sur une fraction brute (naturellement meuble et inférieure à 2 mm) d'une trentaine d'échantillons, après 15 min dans la cuve et 150 s (60+60+30) d'ultrasons; obscurisation entre 11 et 12 %, *Polarisation Intensity Differential Scattering* (PIDS) entre 51 et 55 %, analyse avec PIDS pendant 90 s, modèle optique Fraunhofer, vitesse de pompe à 16 l/min, grenat étalon de contrôle à $15,96 \pm 1,8 \mu\text{m}$ (Centre européen de recherches préhistoriques de Tautavel);
- morphoscopie au stéréomicroscope et au microscope polarisant photonique, avec un grossissement de 2 à $400 \times$ (Centre européen de recherches préhistoriques de Tautavel);
- micromorphologie à partir de sept lames minces ($135 \times 65 \text{ mm}$) de cendres volcaniques (sur un total de 43 lames minces pour le site), réalisées, après imprégnation sous vide par des résines polyester fluidifiées au styrène monomère, de carottes de sédiments consolidés par des bandes plâtrées (Centre européen de recherches préhistoriques de Tautavel);
- diffraction des rayons X (Bruker D 8) sur poudre désorientée d'échantillons tournant, à partir de 16 échantillons bruts représentant toutes les couches, dont quatre de cendres volcaniques, broyés manuellement au mortier en agate, cathode Cu, détecteur rapide SOL-X et miroir de Göbbel, temps d'acquisition 2 h 50, limite de détection de 3 à 5 % (laboratoire de modélisation des transferts dans l'environnement du Commissariat à l'énergie atomique, centre de Cadarache);
- fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WDXRF, Philips PW 1404) sur des fusions vitreuses de 14 échantillons de cendres volcaniques du site, deux échantillons de basalte, en base (Env-S 2) et en sommet de coulée (PP 31), et un échantillon de cendre volcanique prélevé dans l'environnement proche (Env-S 9), analyse semi-quantitative réalisée avec 15 étalons Phi-

lips Analytical Certification of the secondary standard for the Philips Standardless Program, numérotés de A à O (laboratoire d'analyses radiochimiques et chimiques du Commissariat à l'énergie atomique, centre de Cadarache);

- spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES, Thermo Electron IRIS Advantage) et spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS, Thermo Elemental X7), après fusion avec LiBO_2 et dissolution par HNO_3 de trois échantillons de cendres volcaniques du site de Dmanissi (S 103, PP 60 et PPSG-II 3) et d'un échantillon de cendre volcanique (Env-S 9) prélevé dans l'environnement proche (Centre de recherches pétrographiques et géochimiques de Vandœuvre-lès-Nancy);
- microanalyse électronique Cameca SX 100, 10 nA, 15 kV (université Paris-6).

Des échantillons du reste de la colonne stratigraphique et de l'environnement du site (Fig. 1) ont également été analysés pour comparaison avec les cendres volcaniques.

5. Résultats

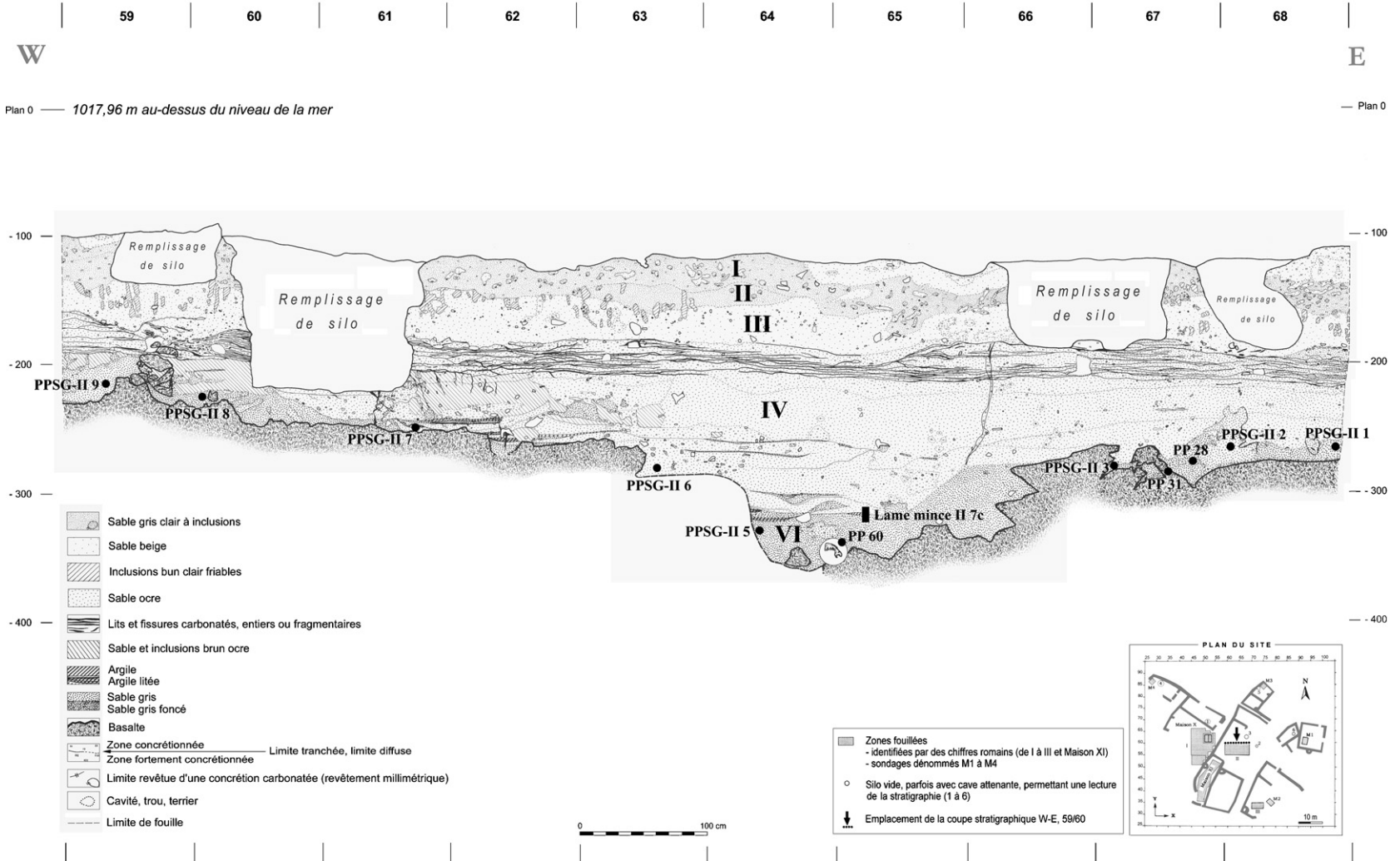
Daté de $1,81 \pm 0,05 \text{ Ma}$ [12], le niveau de cendres volcaniques (couche VI [3] et couche A1 [10]) comble les creux entre les blocs disjoints de basalte sur une épaisseur qui peut atteindre 1 m (Figs. 3 et 4). Ce téphra, non continu, a été clairement tronqué par érosion, lors de la mise en place des sables ocre et gris des dépôts fluviatiles qui recouvrent localement les cendres.

5.1. Granulométrie

Tous les échantillons, bien triés, ne comportent aucune fraction supérieure à 2 mm et présentent une courbe granulométrique unimodale centrée sur les sables fins (mode compris entre 130 et $170 \mu\text{m}$, moyenne à $150 \mu\text{m}$) (Fig. 5). Les fractions argileuses ($0,04$ à $2 \mu\text{m}$) et limoneuses (2 à $40 \mu\text{m}$) représentent respectivement 2 % et 16 % de l'échantillon, avec des écarts-types peu élevés, de 0,4 et 1,8. Cette population unique, de taille relativement élevée par rapport à un événement présumé, situé à une vingtaine de kilomètres à l'ouest, trahit une intensité importante de l'explosion.

5.2. Morphoscopie

Des observations au stéréomicroscope et sous microscope montrent que les échantillons sont assez similaires.



M.-A. de Lunley et al. / C. R. Palevol 7 (2008) 61–79

Fig. 3. Coupe stratigraphique ouest-est à la limite des bandes 59 et 60 : localisation des échantillons étudiés dans cet article et dénomination des couches stratigraphiques. Tous les échantillons ont été prélevés dans la couche VI (téphra volcanique), excepté PP 31, prélevé dans le basalte sous-jacent.

Fig. 3. West-east stratigraphic profile between bands 59 and 60: localisation of the studied samples and denomination of the stratigraphic levels. All the sediments have been sampled in level VI (volcanic tephra), except PP 31, sampled in the underlying basalt.

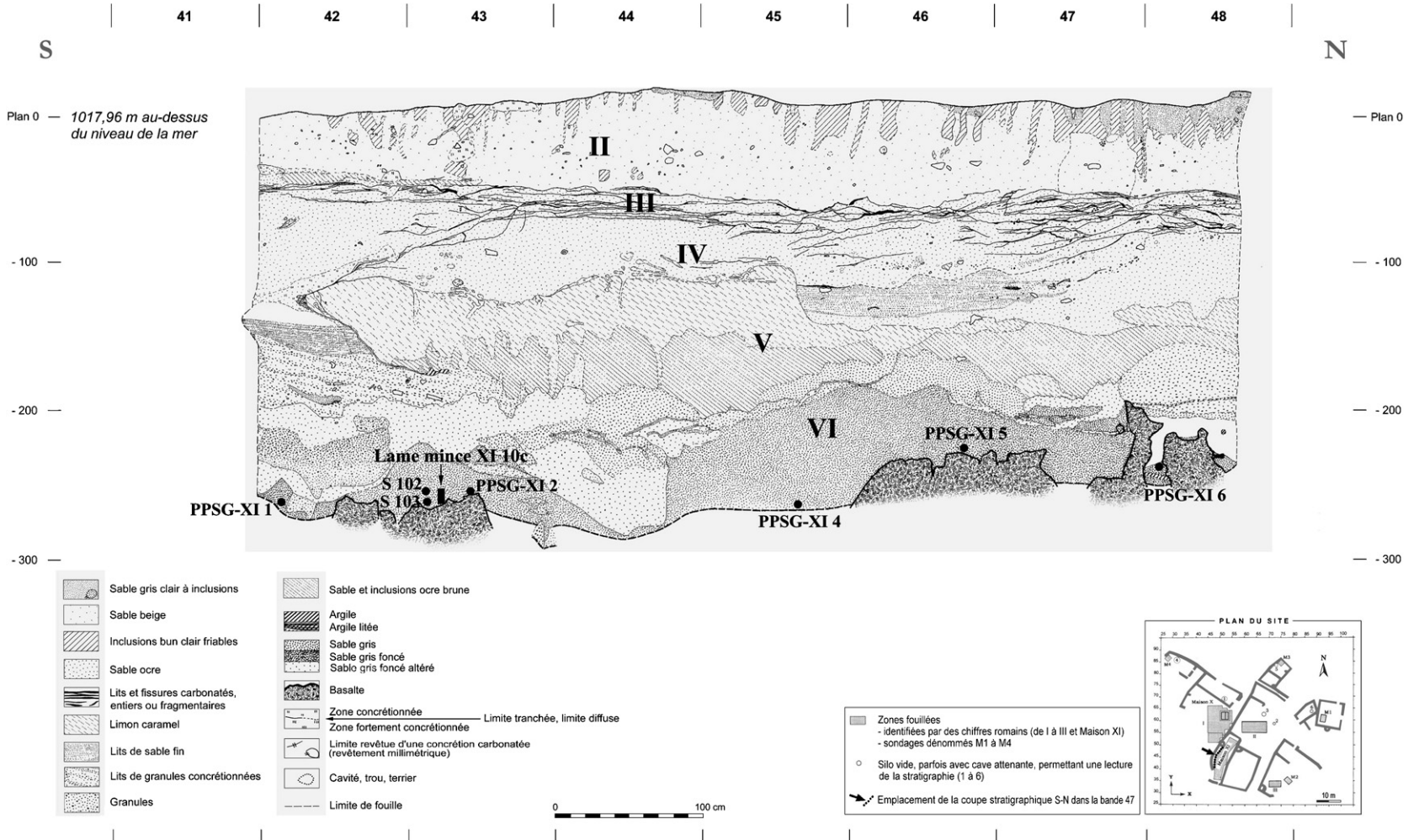


Fig. 4. Coupe stratigraphique sud–nord dans la bande 47 : localisation des échantillons étudiés dans cet article et dénomination des couches stratigraphiques. Tous les échantillons ont été prélevés dans la couche VI (téphra volcanique).

Fig. 4. South–north stratigraphic profile in band 47: localisation of the studied samples and denomination of the stratigraphic levels. All the sediments have been sampled in level VI (volcanic tephra).

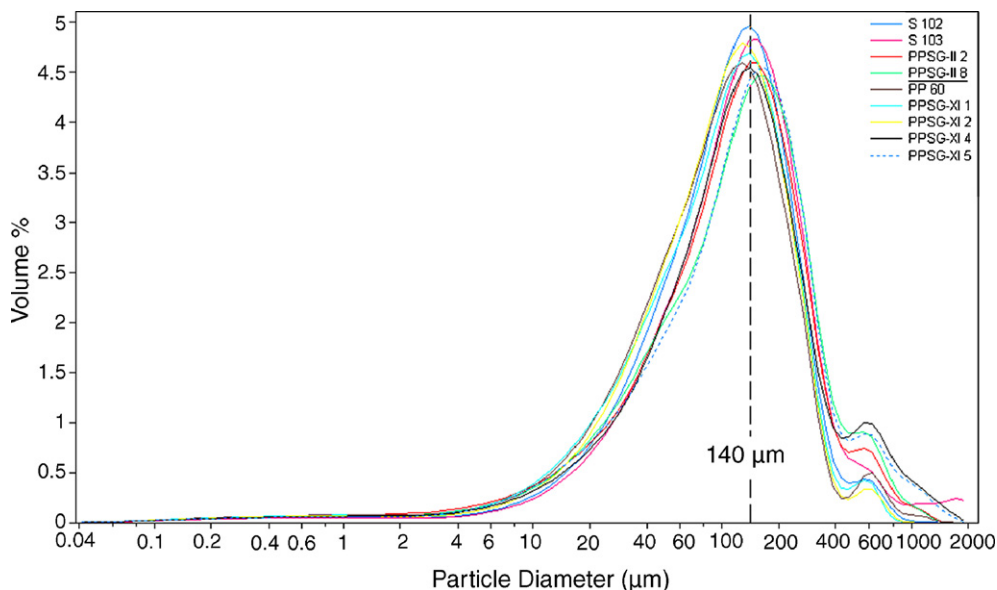


Fig. 5. Granulométrie de quelques échantillons des cendres volcaniques (couche VI) du site de Dmanissi (sédiment brut naturellement inférieur à 2 mm, granulomètre à diffraction laser). Ces cendres bien classées ont un mode compris entre 130 et 170 μm . Le pic de particules à 600 μm correspond à des grains agglomérés. Ces courbes sont typiques de retombées cendreuses et ne peuvent correspondre à des nuées ardentes.

Fig. 5. Granulometry of some samples of volcanic ashes (layer VI) from Dmanisi (sediment naturally smaller than 2 mm, laser-diffraction granulometry). The well-sorted tephra reveals a mode comprised between 130 and 170 μm . The 600- μm particles correspond to agglomerated grains. These curves are typical of ashfalls and cannot correspond to *nuées ardentes*.

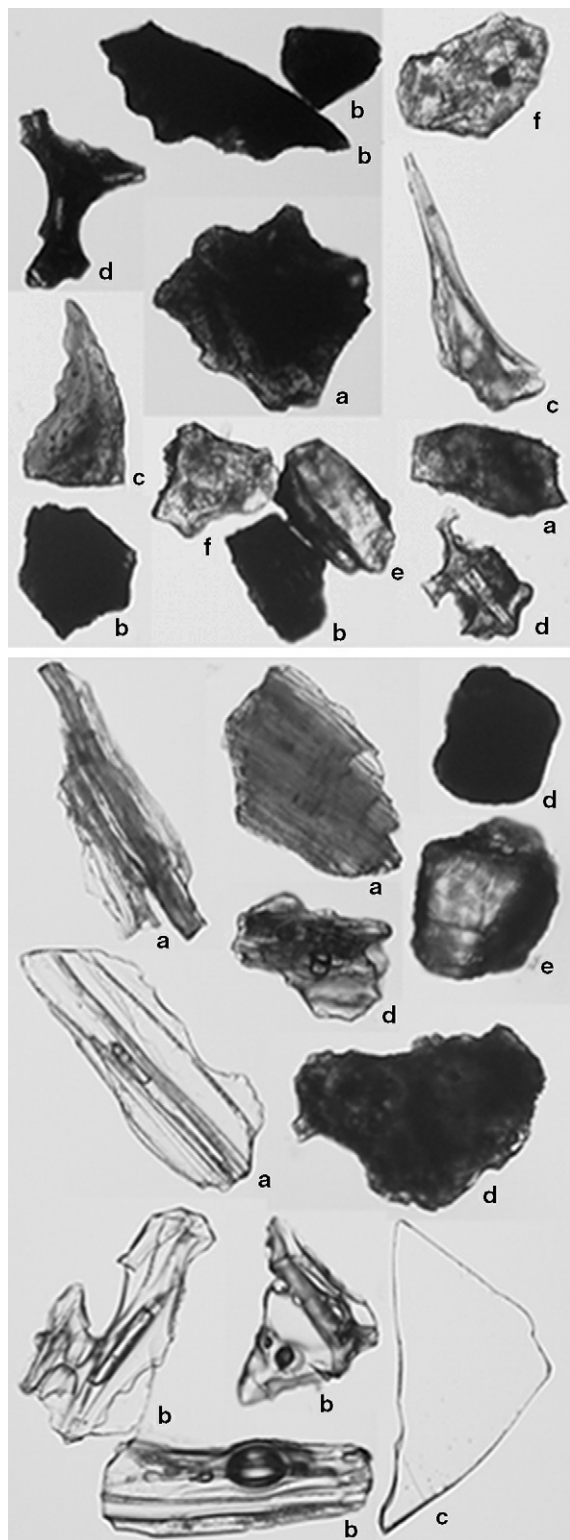
Des comptages effectués sur l'échantillon de cendre prélevé à proximité de la mandibule D 2600 révèlent la rareté de fragments ponceux (moins de 1 %) et la faible représentation de verre aciculaire (5 % d'échardes et bâtonnets). Les verres sous forme de grains plus ou moins épais constituent l'essentiel de la cendre (78 % subanguleux et 16 % anguleux). L'échantillon S 103 est semblable (Fig. 6, haut). Optiquement, leur composition correspond à 2 % de minéraux pour 98 % de verres, hyalins à noirs, qui se subdivisent en 83 % à microlites abondants, ou bien représentés, et 15 % à rares microlites. La grande rareté de grains sans microlites, retrouvée en lame mince (Fig. 7, haut), implique que nous sommes en présence, soit de fragments de verre basaltique qui constituaient la roche de la bouche du volcan et qui a été pulvérisée lors de l'explosion (cendre lithique), soit de verre issu d'un magma, où les minéraux ont eu le temps de s'individualiser (cendre vitreuse). Une cendre prélevée dans l'environnement (Env-S 9), à 2 km du site, en amont de la rivière Pinezaouri (Fig. 1), est très différente, composée en grande majorité de verre hyalin sans microlite (Fig. 6, bas), mais souvent à nombreuses vésicules ou tubulures (*pipe vesicle*) et de fragments d'enveloppe de bulle (*bubble wall shard*). Des observations préliminaires à plus fort grossissement au microscope électronique à balayage confirment ces données.

5.3. Micromorphologie

Sur le terrain ou sur lame mince (Fig. 7, milieu), aucun litage n'est perceptible dans ces niveaux cendreux en cas de dépôt secondaire. Toutefois, les cendres ont pu être remobilisées sans induire de litage, même en lame mince : le sédiment agrégé prélevé au plus près de la mandibule humaine D 2600 révèle clairement la présence d'agrégats composites et de grains enrobés de toutes tailles (Fig. 7 bas). La bioturbation peut expliquer certains agrégats, mais d'autres, ainsi que les grains enrobés, sont les témoins évidents d'une remobilisation du matériel. Nous ne disposons pas de sédiment agrégé prélevé immédiatement à côté des restes humains pour certifier leur présence dans un sédiment non remobilisé.

5.4. Diffraction de rayons X

Les analyses par diffraction de rayons X n'ont révélé que la présence de calcite, de quartz, d'albite et de montmorillonite dans les cendres volcaniques, qu'elles soient noires indurées, noires meubles, grises meubles ou à proximité de la mandibule (Fig. 8). Les bosses de diffraction, caractéristiques de la présence de matériau vitreux, ont été identifiées entre 2,8 et 6 \AA et représentent un faible volume. Cela implique une faible altération



de ces cendres, qui se déroule in situ, avec formation de montmorillonite secondaire à partir des plagioclases et des cendres. La présence de calcite est franchement secondaire et due aux circulations tardives de fluides interstitiels, avec cimentation localisée. Le quartz, présent systématiquement, mais en très faible quantité, provient de la destruction du cône volcanique. Dès que l'on s'élève un peu dans la stratigraphie, la kaolinite, la muscovite et le clinocllore apparaissent, puis quelques zéolites (laumontite, heulandite). La minéralogie des cendres de la couche VI est donc homogène, et distincte de celle du reste de la colonne stratigraphique.

5.5. Analyses chimiques

En fluorescence X, les éléments majeurs analysés semi-quantitativement pour 17 échantillons, dont 14 échantillons de cendre du site, permettent une comparaison globale (Tableau 1). Ils révèlent une homogénéité flagrante des résultats, qui démontrent l'unicité de la cendre volcanique à l'échelle du site. Sa composition intermédiaire la différencie du basalte et de la cendre, rhyolitique, de l'environnement (Fig. 9). Ces différents produits volcaniques, tous calco-alcalins, pourraient résulter de la différenciation d'un même magma, comme tend à le démontrer le graphique MgO–SiO₂ (Fig. 10).

Cette homogénéité des cendres du site, observée en fluorescence X pour les éléments majeurs, est confortée par les résultats obtenus par ICP–OES et ICP–MS, respectivement sur les éléments majeurs et les éléments traces (Tableau 2, Fig. 11).

Les deux échantillons PP 60 et S 103, très semblables, contiennent de l'ordre de 57 % de SiO₂ et

Fig. 6. Assemblage de grains représentatifs des cendres volcaniques du site de Dmanissi (en haut, échantillon S 103) et de l'environnement (en bas, échantillon Env-S 9) sur des dispersions de grains sur lames de verre. Grains de 80 à 160 µm. En haut, les grains bruns (a) à noirs (b), le plus souvent subanguleux, dominant, alors que les éclats (c), les fragments de verre bulleux (d) et les minéraux (e) sont assez rares. Sur les verres transparents (f), on distingue nettement l'abondance des microlites. En bas, les grains hyalins dominent nettement. Sans microlites, ils comportent, en quantités très variables, des tubulures et des vésicules (a,b) ou correspondent à des fragments d'enveloppes de bulles (c). Quelques grains plus ou moins colorés sont présents (d), de même que quelques minéraux (e).

Fig. 6. Chosen grains on smear slides of tephra from the Dmanissi site (above, S 103 sample) and from the environment (below, Env-S 9 sample). Grain size: 80–160 µm. Above, mostly subangular grains, brown (a) to black (b), are dominant, while shards (c), bubble glass (d) and minerals (e) are rare. Transparent grains (f) reveal the abundance of microlites. Below, hyaline grains are clearly dominant. They include no microlites, pipe vesicles and vesicles (a, b) in variable quantities and sometimes correspond to bubble wall shards (c). Some more or less coloured grains are present (d) as well as a few minerals (e).

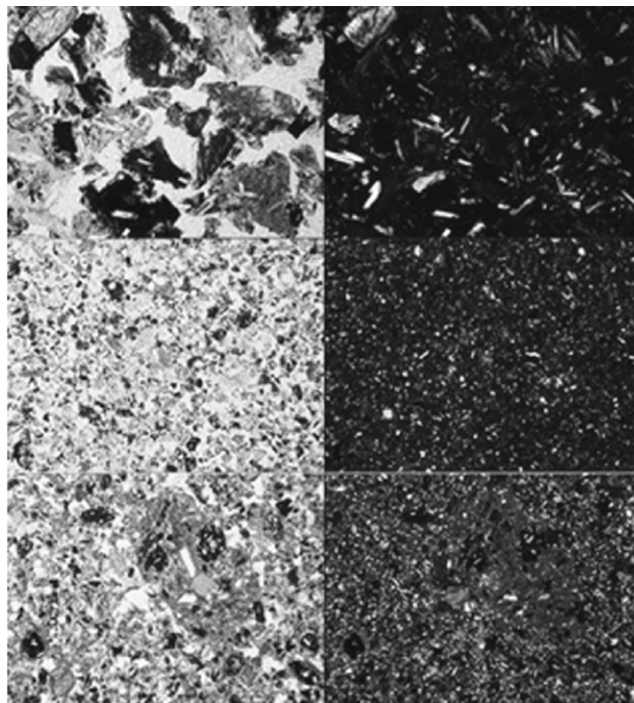


Fig. 7. Lames minces de cendres volcaniques de Dmanissi. À gauche, clichés en lumière polarisée, à droite, clichés en lumière polarisée analysée. En haut (lame XI-10 c, largeur des clichés : 0,8 mm) : aspect des grains qui constituent la cendre la plus pure échantillonnée pour la micromorphologie : remarquer la variété des colorations des fragments de verre et la constance des microlites inclus. Au milieu (lame XI-10 c, largeur des clichés : 4 mm) : même lame mince à grossissement plus faible : cendre la plus pure, très certainement primaire, sans litage ni agrégats. En bas (lame II-7 c, largeur des clichés : 4 mm) : aspect de la cendre prélevée au plus près de la mandibule humaine D 2600 : également non litée mais avec des agrégats et des grains enrobés, témoins d'une bioturbation et d'une remobilisation des sédiments.

Fig. 7 Thin sections of the Dmanisi volcanic ashes. Left, in polarised light, right, in polarised analysed light. Top (thin section XI-10c, frame width: 0.8 mm): grains of the purest ash sampled for micromorphology: note the different coloration of the glass and the regularity of included microlites. Middle (thin section XI-10c, frame width: 4 mm): same thin section at lower magnification: purest ash, probably primary tephra, with no bedding or aggregates. Bottom (thin section II-7c, frame width: 4 mm): volcanic ash sampled as near as possible to the human mandible D 2600: no bedding is present but aggregates and coated grains result from bioturbation and remobilisation of the sediments.

5,4 % de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (Tableau 2), teneurs proches de celles d'andésites basaltiques à la limite des andésites ($\text{SiO}_2 = 57\%$), selon la classification de Le Maître [11]. Ces analyses sont typiques d'une série calco-alcaline en contexte de collision. Déduits des analyses par microsonde électronique, les contenus minéralogiques de ces deux échantillons de cendres sont quasi identiques : plagioclases (labrador, respectivement An 58–51 et An 60–48), clinopyroxènes (Wo 40 et jusqu'à 31 et Wo 42), olivines (chrysolite, Fo 78 et Fo 78–74). Les verres non évolués ont une composition proche de celle de la roche totale (Tableau 3). Les verres de l'échantillon PP 60 (13 analyses représentatives) contiennent 55,3 à 59,1 % de SiO_2 , 3,6 à 4,0 % de Na_2O , 2,0 à 2,7 % de K_2O , 1,3 à 1,5 % de TiO_2 . Ceux de l'échantillon S 103 (10 analyses représentatives) contiennent 54,5 à 59,1 % de SiO_2 , 3,5 à 3,9 % de Na_2O , 1,9 à 2,5 % de K_2O , 1,3 à 2,0 % de

TiO_2 . Des verres évolués ont également été analysés, contenant jusqu'à 74,6 % de SiO_2 dans l'échantillon PP 60.

On ne note donc pas de différences significatives, tant du point de vue pétrographique que granulométrique, ce qui montre que les deux échantillons de cendres, très proches des restes d'ossements, appartiennent à la même séquence éruptive, ou éventuellement à deux séquences rapprochées dans le temps.

Les cendres enrichies en carbonate de calcium, prélevées dans ce même niveau (échantillon PPSG-II 3 : 11,56 % de CaO , 49,99 % de SiO_2 , 7,47 % de perte au feu), contiennent des verres toujours identiques aux précédents (neuf analyses représentatives, 54,1 à 58,7 % de SiO_2 , 3,2 à 4,0 % de Na_2O , 1,6 à 2,8 de K_2O , 1,2 à 1,9 % de TiO_2), auxquels s'ajoutent aussi des verres évolués (jusqu'à 73,2 % de SiO_2) et des plagioclases (labrador, An 58–51).

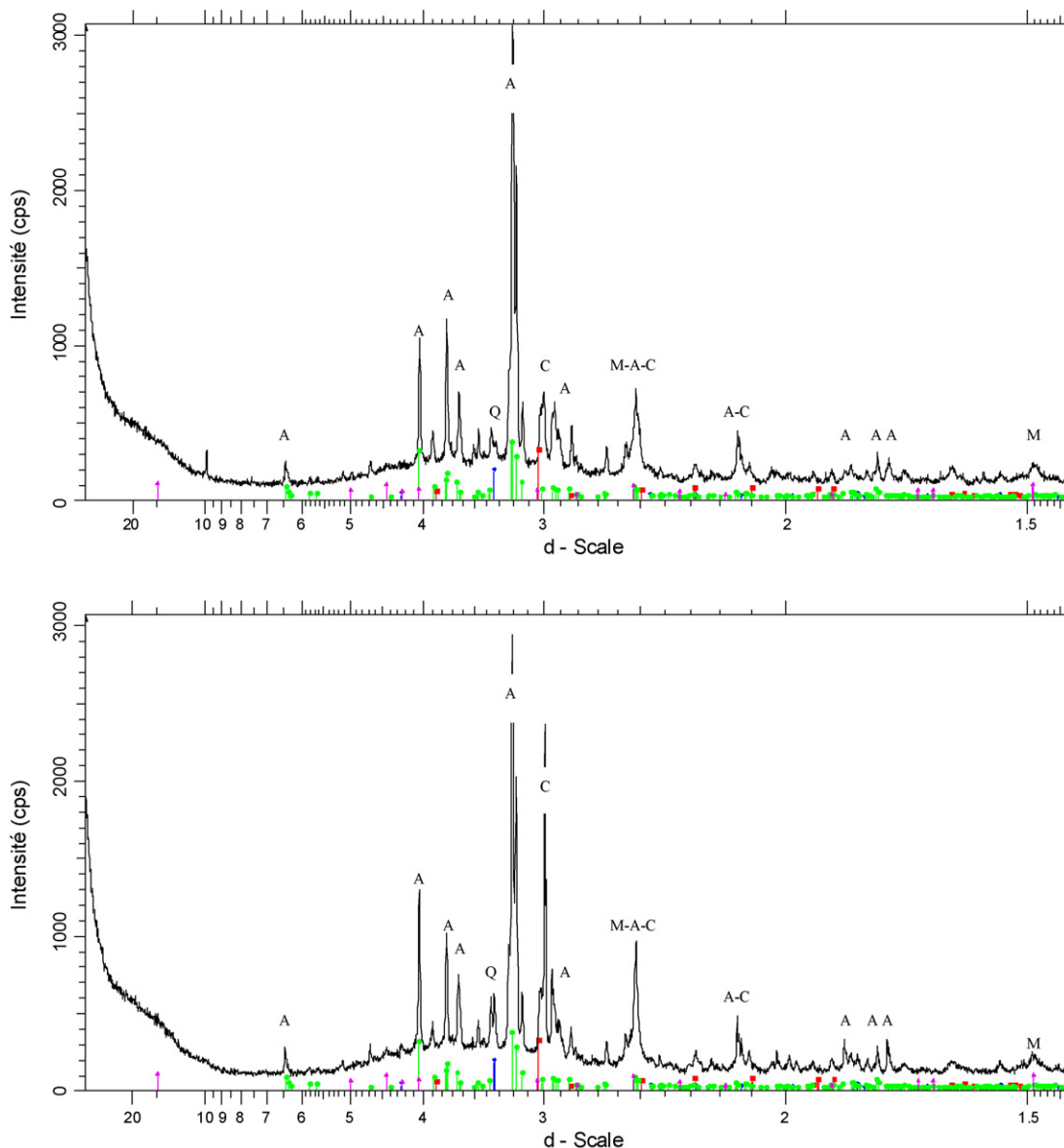


Fig. 8. Diagrammes de diffraction des rayons X des cendres volcaniques (couche VI) du site de Dmanissi. (C : calcite ; Q : quartz ; A : albite ; M : montmorillonite). En haut : cendre volcanique pure indurée échantillonnée près du contact avec le basalte en secteur II (prélèvement PP 28). En bas : cendre volcanique entourant la mandibule humaine D 2600 (PP 60, secteur II, à 3 m de l'échantillon PP 28). Ces diagrammes ne comportent aucune différence significative (seulement une meilleure représentation de la calcite dans PP 60), ce qui atteste la relative pureté de la cendre volcanique dans laquelle a été retrouvée la mandibule humaine.

Fig. 8. X-Ray diffraction diagrams of volcanic ashes (layer VI) from Dmanissi. (C: calcite; Q: quartz; A: albite; M: montmorillonite). Top: pure indurated volcanic ash sampled close to the basalt in *secteur II* (sample PP 28). Bottom: volcanic ash enclosing human mandible D 2600 (PP 60, *secteur II*, 3 m from PP 28). These diagrams present no significant difference (apart from calcite being better represented in PP 60), which demonstrates the relative purity of the volcanic ash surrounding the human mandible.

La cendre rhyolitique échantillonnée à environ 2 km du site de Dmanissi (Env-S 9, épaisseur 50 cm), en amont de la rivière Pinezaouri, est très riche en verres: 67,99 % de SiO₂ pour la roche totale, 69,8 à 73,5 % de SiO₂ pour les verres (Tableau 3).

Bien distincte des autres échantillons (Figs. 9 à 11, Tableaux 1 et 2), elle correspond à une autre séquence éruptive. Notons l'anomalie négative de cette cendre en europium (Fig. 11), liée au fractionnement des plagioclasses.

Tableau 1

Analyses chimiques semi quantitatives obtenues par fluorescence X sur les échantillons de cendre volcanique (couche VI) et du basalte du site de Dmanissi et sur un échantillon de basalte et un de cendre volcanique de l’environnement proche du site (LARC, Cadarache)

Table 1

Semi-quantitative X-Ray fluorescence analyses of 17 volcanic ash and basalt samples from the Dmanisi site and environment (LARC, Cadarache)

Incertitude relative (%)	Basalte (% massique)		Cendres volcaniques (% massique)															
			du secteur II ou de la maison XI												de l’environnement			
	DMA Env-S 2	DMA PP 31	DMA PPSG XI-2	DMA PPSG XI-1	DMA PPSG XI-6	DMA PPSG XI-5	DMA PPSG XI-4	DMA PP 60	DMA PPSG II-8	DMA PPSG II-6	DMA PPSG II-3	DMA PPSG II-2	DMA PPSG II-7	DMA PPSG II-9	DMA PPSG II-5	DMA PPSG II-1	DMA Env-S 9	
SiO ₂	±10	49,9	51,7	59,8	60,4	56,7	56,5	62,6	60,2	55,5	59,5	54,7	56,4	55,8	58,5	57,3	57,4	72,7
Al ₂ O ₃	±10	18,3	19,6	15,5	15,6	16,4	16,8	15,4	15,4	15,9	15,7	16,1	14,4	14,2	14,9	14,9	14,5	11,1
Fe ₂ O ₃	±10	11,5	9,86	7,53	7,19	9,87	9,29	6,53	6,67	7,93	7,01	8	7,53	6,8	6,8	6,4	7,4	4,57
CaO	±10	10,1	9,08	7,66	7,25	8,2	8,04	6,8	7,61	11,9	9,08	13	12,8	14,5	11,6	14,2	12,8	1,73
Na ₂ O	±10	3,01	4,26	3,7	3,89	2,85	3,55	3,21	3,94	2,64	3,32	2,77	2,77	2,77	2,51	2,27	2,57	4,22
K ₂ O	±10	1,12	1,01	2,18	2,24	1,77	1,91	2,42	2,21	1,89	2,14	1,65	1,95	2,36	2,19	1,93	1,9	4,72
MgO	±10	3,32	2,65	2,05	1,92	2,25	2,29	1,56	2,01	2,52	1,67	2,17	1,81	1,97	1,93	1,71	1,77	0,08
TiO ₂	±10	1,49	1,33	0,846	0,912	1,22	0,966	0,673	0,903	1,04	0,861	0,82	0,993	0,872	0,727	0,646	0,88	0,31
MnO	±10	0,23	0,16	0,17	0,13	0,16	0,22	0,25	0,23	0,14	0,15	0,18	0,22	0,10	0,18	0,16	0,11	0,15
Cl	±10	0,11	0,04	0,14	0,15	0,18	0,12	0,18	0,15	0,11	0,16	0,13	0,23	0,18	0,20	0,08	0,19	0,26
SrO	±10	0,07	0,05	0,08	0,09	0,09	0,09	0,07	0,46	0,07	0,08	0,09	0,52	0,09	0,12	0,12	0,08	0,01
P	±15	0,06	0,13	0,17	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,20	0,20	0,20	0,20	0,17	0,18	0,17	0,17	0,01
S	±15	0,18	0,04	0,13	0,07	0,12	0,08	0,12	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,11	0,13	0,12	0,13	0,14
NiO	±15	0,05	0,03	0,04	0,08	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,05	0,02	0,02	0,04	0,02
ZnO	±20	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,05	0,04

Les cendres ont une composition chimique suffisamment homogène pour certifier qu’il s’agit d’un seul téphra.
The results for the ashes are homogeneous enough to certify that it is a single tephra.

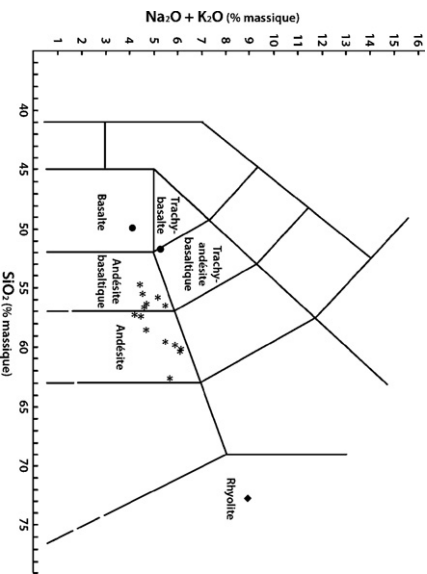


Fig. 9. Diagramme alcalins–silice (selon [111]) d’après les analyses en fluorescence X obtenues sur les échantillons de cendres volcaniques (couche VI) du site de Dmanissi, sur le basalte et sur des cendres de l’environnement. On constate que les cendres du site (étoiles–andésites à andésites basaltiques) se démarquent des échantillons du basalte (ronds noirs–basalte en base de coulée et intermédiaire entre un trachy-basalte et une trachy-andésite basaltique en sommet de coulée) et encore plus de la cendre échantillonnée à 2 km du site, qui est franchement rhyolitique (losange noir).

Fig. 9. Alkali–silica diagram (according to [111]) based upon X-Ray fluorescence analyses of 17 volcanic ash and basalt samples from the Dmanisi site and environment. The andesitic tephra of the site (stars) has a different composition from that of the basalt (black circles), and even more from that of the rhyolitic tephra (black lozenge) sampled 2 km upstream.

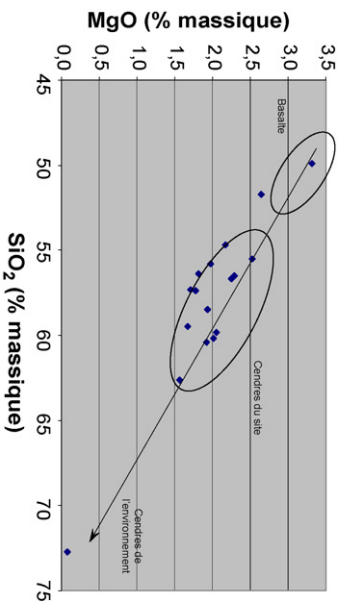


Fig. 10. Diagramme MgO–SiO₂ d’après les analyses en fluorescence X, obtenues sur les échantillons de cendres volcaniques (couche VI) du site de Dmanissi, sur le basalte et sur des cendres de l’environnement. Ce diagramme tend à montrer qu’une parenté magmatique est possible entre ces trois produits volcaniques, avec perte régulière de MgO par rapport à SiO₂, en raison d’une différenciation croissante d’un magma calco–alkalin.

Fig. 10. MgO–SiO₂ diagram based upon X-Ray fluorescence analyses of 17 volcanic ash and basalt samples from the Dmanisi site and environment. This diagram reveals a possible magmatic link between the volcanic products (basalt, tephra of the site, and tephra of the environment), with a regular MgO loss against SiO₂, due to increasing differentiation of a calco-alkaline magma.

Tableau 2

Analyses chimiques quantitatives obtenues par ICP–OES (éléments majeurs en % en poids d'oxydes) et ICP–MS (traces en ppm) sur trois échantillons de cendre volcanique (couche VI) du site de Dmanissi et une cendre de l'environnement prélevée à 2 km du site (Env-S 9) (CRPG Nancy)

Table 2

Quantitative ICP-OES (major elements in oxide weight%) and ICP-MS (trace elements in ppm) analyses of three tephra samples (layer VI) from the Dmanisi site and one from 2 km upstream (Env-S 9) (CRPG Nancy)

Traces	Cendres					
	du site				de l'environnement	
	S 103	PP 60	PPSG-II 3	Incertitude	Env-S 9	Incertitude
SiO ₂	56,01	57,12	49,99	<1 %	67,99	<1 %
Al ₂ O ₃	16,80	16,00	14,91	<1 %	11,52	<1 %
Fe ₂ O ₃	7,90	6,58	7,15	<2 %	4,13	<2 %
MnO	0,13	0,11	0,12	<5 %	0,11	<5 %
MgO	4,03	3,45	3,80	<5 %	0,24	<10 %
CaO	7,18	7,25	11,56	<2 %	1,56	<5 %
Na ₂ O	3,64	3,44	3,08	<5 %	4,46	<5 %
K ₂ O	1,74	1,99	1,49	<5 %	3,91	<5 %
TiO ₂	1,06	0,86	0,96	<5 %	0,28	<10 %
P ₂ O ₅	0,39	0,34	0,37	<10 %	0,03	<5 %
Perte au feu	2,10	3,48	7,47	–	6,03	–
Total	100,97	100,60	100,88		100,24	
Traces						
As	<1,50	1,80	2,26	<15 %	18,66	<10 %
Ba	520	562	497	<8 %	56	<8 %
Be	1,61	1,45	1,36	<15 %	8,20	<15 %
Bi	0,12	0,15	0,12	<15 %	0,53	<15 %
Cd	<0,30	<0,30	<0,30	–	0,75	>25 %
Ce	59,5	59,1	51,9	<5 %	183	<5 %
Co	24,8	19,0	23,6	<10 %	1,3	<15 %
Cr	46,5	50,5	48,6	<5 %	7,5	>25 %
Cs	0,76	1,04	1,12	<10 %	6,40	<10 %
Cu	36,8	36,1	42,3	<10 %	4,7	>25 %
Dy	3,83	3,55	3,54	<5 %	17,44	<5 %
Er	2,12	1,97	1,98	<5 %	10,51	<5 %
Eu	1,42	1,26	1,27	<5 %	0,69	<5 %
Ga	19,1	17,8	17,3	<5 %	32,4	<5 %
Gd	4,37	4,00	3,88	<5 %	16,26	<5 %
Ge	1,31	1,10	1,15	<5 %	2,23	<5 %
Hf	4,03	3,94	3,53	<10 %	22,09	<5 %
Ho	0,76	0,68	0,70	<15 %	3,56	<5 %
In	0,06	0,07	0,06	>25 %	0,20	<15 %
La	31,6	32,8	27,4	<5 %	86,3	<5 %
Lu	0,34	0,32	0,32	<5 %	1,77	<5 %
Mo	2,61	2,35	1,87	<10 %	7,73	<10 %
Nb	14,5	14,2	12,4	<5 %	56,0	<5 %
Nd	24,4	23,4	22,0	<5 %	80,4	<5 %
Ni	49,8	42,3	50,7	<5 %	4,3	>25 %
Pb	8,74	9,98	7,88	<10 %	26,42	<5 %
Pr	6,55	6,40	5,78	<5 %	21,26	<5 %
Rb	33,8	42,6	30,2	<10 %	173,7	<5 %
Sb	<0,15	<0,15	0,15	>25 %	1,16	<10 %
Sm	4,67	4,34	4,32	<5 %	17,06	<5 %
Sn	1,28	1,09	1,18	<10 %	9,37	<10 %
Sr	556	514	608	<5 %	60	<5 %
Ta	0,84	0,84	0,74	<10 %	4,21	<10 %
Tb	0,67	0,61	0,61	<5 %	2,83	<5 %
Th	5,13	6,25	4,46	<10 %	23,94	<5 %
Tm	0,32	0,29	0,29	<10 %	1,62	<5 %
U	1,39	1,68	1,61	<8 %	7,45	<8 %

Tableau 2 (Suite)

Traces	Cendres					
	du site				de l'environnement	
	S 103	PP 60	PPSG-II 3	Incertitude	Env-S 9	Incertitude
V	133	108	120	<5 %	8,82	>25 %
W	0,49	0,61	0,46	>25 %	3,30	<15 %
Y	22,1	20,7	20,3	<5 %	105,1	<5 %
Yb	2,16	1,99	1,99	<5 %	11,10	<5 %
Zn	92,4	83,8	83,0	<8 %	174,4	<8 %
Zr	192	184	168	<8 %	1122	<8 %

S 103 : cendre andésitique basaltique ; PP 60 : cendre andésitique ; PPSG-II 3 : cendre carbonatée ; Env-S 9 : cendre rhyolitique.

S 103: basaltic andesite tephra; PP 60: andesitic tephra; PPSG-II 3: carbonated tephra; Env-S 9: rhyolitic tephra

6. Dynamisme éruptif et origine des décès

La composition chimique des téphras de Dmanissi démontre un contexte volcanique calco-alcalin de collision, caractérisé par un dynamisme éruptif de type explosif.

La très faible altération des cendres, due en partie à leur granulométrie grossière, mais aussi et surtout à la couche III qui a fait obstacle au passage des eaux, témoigne d'une évolution du dépôt dans des conditions assez sèches.

Les nuées ardentes (éruption péléenne), qui s'épanchent à grande vitesse ($100\text{--}600\text{ km h}^{-1}$), soit une durée de mise en place quasi instantanée (de l'ordre de la minute), apparaissent bien différentes

des retombées de cendres (éruptions volcanienne ou plinienne), qui durent de plusieurs heures à plusieurs jours [1]. Les premières laissent des dépôts mal classés, au contraire des secondes [2,18]. La granulométrie des cendres de Dmanissi (Fig. 5) montre de très bons classements, typiques de retombées volcaniennes ou pliniennes, et écarte donc l'hypothèse de nuées ardentes provoquées par une éruption péléenne.

Les cendres de la couche VI de Dmanissi ont été triées lors de leur transport aérien, depuis l'événement probable, situé à une vingtaine de kilomètres du site (certains événements des monts Džavacheti, les monts Emliki, pourraient être à l'origine de ce volcanisme explosif). À cette distance, les cendres qui tombent ne sont plus brûlantes. Mais lorsqu'elles sont inhalées par des êtres vivants, elles

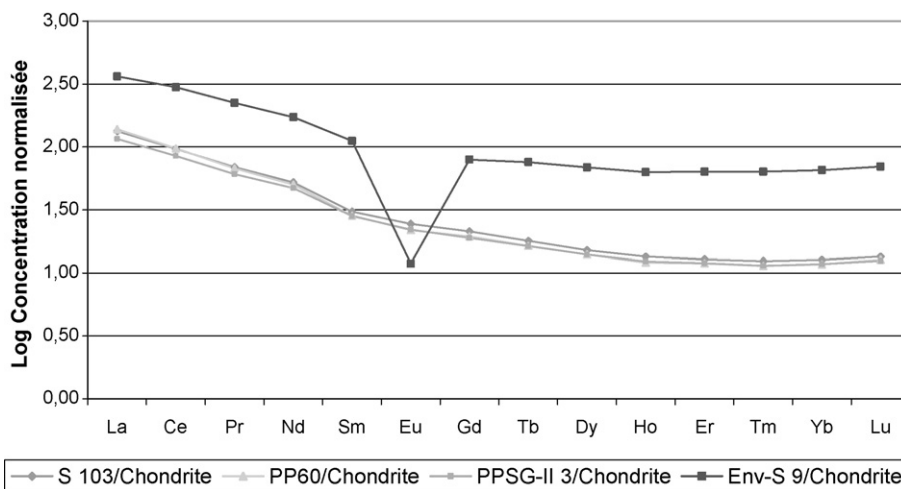


Fig. 11. Diagramme des terres rares normalisé par rapport aux chondrites, d'après les analyses en ICP-MS obtenues sur trois échantillons de cendres volcaniques (couche VI) du site de Dmanissi (S 103, PP60, à proximité immédiate de la mandibule humaine D 2600 et PPSG-II 3) et sur un échantillon de cendres de l'environnement à 2 km du site (Env-S 9) (CRPG Nancy, chondrite de référence dans [16]). Les trois échantillons du site, très proches en composition, correspondent à une même éruption, ou à des éruptions très rapprochées dans le temps.

Fig. 11. Chondrite-normalised rare-earth diagram from ICP-MS analyses of three samples of volcanic ashes of the Dmanisi site (layer VI) (S 103, PP 60 in the immediate vicinity of the D 2600 human mandible and PPSG-II 3) and of one tephra of the environment sampled 2 km upstream from the site (Env-S 9) (CRPG Nancy, reference chondrite in [16]). The three samples from the site are very close in composition and correspond to the same eruption or to different eruptions in short succession.

Tableau 3

Analyses chimiques obtenues par microsonde électronique sur les fragments de verre de trois échantillons de cendre volcanique (couche VI) du site de Dmanissi (S 103, PP 60, pris à côté de la mandibule humaine D 2600, PPSG-II 3) et d'un échantillon de cendre volcanique prélevé à 2 km du site (Env-S 9)

Table 3

Electronic microprobe analyses of glass fragments of volcanic ash (layer VI) from the Dmanisi site (S 103, PP 60 next to the D 2600 human mandible, PPSG-II 3) and of a tephra 2 km away (Env-S 9)

	Cendres										
	du site									de l'environnement	
	S 103			PP 60			PPSG-II 3			Env-S 9	
SiO ₂	55,48	56,04	57,94	56,13	57,31	58,79	54,50	57,15	58,14	69,83	70,71
Al ₂ O ₃	14,58	15,30	15,79	14,73	15,09	15,46	13,08	14,55	15,46	11,59	11,70
FeO	9,98	9,48	7,28	8,74	8,09	7,91	9,08	8,44	7,59	3,80	3,74
MnO	0,12	0,18	0,17	0,25	0,17	0,15	0,18	0,14	0,13	0,16	0,10
MgO	3,47	3,97	3,72	3,58	3,56	2,34	5,92	3,19	3,64	0,01	<L.D.
CaO	6,41	6,23	6,52	6,38	6,31	5,22	9,50	5,42	6,10	0,36	0,37
Na ₂ O	3,62	3,81	3,79	3,60	3,89	3,92	3,23	4,03	3,76	3,79	3,53
K ₂ O	2,24	1,94	2,49	2,33	2,61	2,30	1,55	2,78	2,46	4,30	4,43
TiO ₂	1,98	1,83	1,33	1,53	1,33	1,34	1,44	1,57	1,35	0,23	0,25
P ₂ O ₅	0,72	0,67	0,60	0,64	0,66	0,56	0,60	0,68	0,54	0,01	0,01
Cr ₂ O ₃	0,01	0,08	0,02	0,04	< L.D	< L.D	0,03	0,05	0,03	< L.D	0,02
NiO	0,05	0,07	0,02	0,01	< L.D	0,01	0,06	0,02	< L.D	0,08	0,01
Cl	0,06	0,02	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,11	0,15
TOTAL	98,72	99,62	99,72	98,02	99,06	98,05	99,21	98,06	99,25	94,27	95,02

(Éléments majeurs en pourcentage de poids d'oxyde, <L.D. : inférieur à la limite de détection ; université Paris-6). La composition des verres de la cendre du site, très homogène, se détache nettement de la cendre de l'environnement, qui correspond à des retombées bien différentes.

(Major elements in oxide weight%, <L.D.: lower than detection limit; Université Paris-6). The chemical composition of the tephra of the site is homogeneous and different from that of the tephra of the environment, which corresponds to different ashfalls.

se mélangent aux sécrétions naso-bucco-pharyngiennes et forment un mélange pâteux, qui provoque un étouffement par obstruction des voies respiratoires et digestives. Peut-être les cinq individus se sont-ils réfugiés dans un creux topographique, où ils ont trouvé la mort par asphyxie ?

Le cas de l'éruption du Vésuve, les 24 et 25 août 79 après J.-C., responsable de la destruction de Pompéi, présente quelques similitudes, mais aussi certaines différences. Pompéi se situait plus près du volcan que ne l'a été le site de Dmanissi. Les habitants ont vu l'éruption se développer, certains sont partis, d'autres ont été surpris durant leur fuite, asphyxiés par les cendres et les gaz. Puis leurs corps ont été recouverts de plusieurs mètres de retombées de ponces (éruption plinienne) et ont disparu, brûlés, laissant des moules internes, que les archéologues ont pu remplir ultérieurement de plâtre. Des nuées ardentes ont finalement été émises au cours des dernières heures de la crise éruptive.

Certaines éruptions acquièrent un caractère violemment explosif par l'interaction en profondeur de l'eau et du magma. Appelées hydrovolcaniques ou phréatomagmatiques, elles peuvent avoir des conséquences dramatiques. Ainsi, en 1790 (au mois de novembre ?), sur le volcan Kilauea à Hawaii, siège d'un dynamisme

en général effusif, s'est produit exceptionnellement une éruption explosive. Elle commença par un stade hydrovolcanique, avec des émissions de *surges* (écoulements pyroclastiques très turbulents) et se poursuivit probablement par la formation d'une caldeira d'effondrement. La colonne éruptive a dû atteindre 10 km de hauteur et les dépôts ont eu localement jusqu'à 12 m d'épaisseur. Au moins 80 personnes périrent. Il s'agissait d'un groupe de guerriers et leur mort fut interprétée alors par la vengeance de la déesse Pelé ! Les cendres très bien classées de Dmanissi diffèrent cependant des cendres mal classées liées aux *surges* [1,2].

Alors que, vers 1 810 000 ans, des groupes d'*Homo georgicus* fréquentaient le site de Dmanissi pour y récupérer des carcasses d'animaux morts naturellement, un petit groupe d'individus pourrait avoir été surpris par des retombées de cendres volcaniques et, bien qu'ils aient eu le temps de se réfugier dans une dépression, certains d'entre eux n'ont pu échapper à la mort par asphyxie.

7. Conclusion

Le site plio-pléistocène de Dmanissi a été le théâtre de plusieurs phénomènes éruptifs volcaniques. La pré-

sence des restes d'au moins cinq individus attribués à *Homo georgicus* est étonnante par l'excellente qualité de préservation et de conservation des ossements recueillis. L'analyse des couches de cendres qui les environnent a permis de les attribuer à des retombées de cendres calco-alcalines, signées par des dépôts bien classés, typiques des retombées vulcaniennes ou pliniennes. En revanche, la cendre rhyolitique prélevée à 2 km environ du site, en amont de la rivière Pinezaouri, atteste l'existence d'une séquence éruptive indépendante de celle qui repose sur l'éperon de Dmanissi.

Les résultats des analyses pétrographiques, minéralogiques et chimiques ont permis de préciser l'attribution du dépôt cendreux à des retombées pyroclastiques (cendres volcaniques) et d'éliminer l'hypothèse des nuées ardentes.

À Dmanissi, la concentration des Hominidés dans une dépression pourrait évoquer la recherche d'un abri, face à un événement nouveau. Les cendres, non mortelles, puisqu'elles étaient froides, ont laissé aux Hominidés le temps de se regrouper dans une dépression naturelle. C'est l'inhalation des cendres, mêlées aux sécrétions naturelles, qui aurait entraîné la mort, par obstruction des voies respiratoires et digestives, de la population humaine et faunique.

Cette interprétation, à laquelle d'autres chercheurs peuvent ne pas adhérer, devra être confirmée ou infirmée par d'autres analyses et surtout par l'étude de la répartition spatiale des ossements d'hominidés et d'animaux découverts sur le site, lorsque la fouille aura été conduite sur une plus grande surface et par des études taphonomiques.

Références

- [1] J.-M. Bardintzeff, *Volcanologie*, 3^e édition, Dunod, Paris, 2006.
- [2] J.-M. Bardintzeff, J.-C. Miskovsky, Identité granulométrique de tephra, *Bull. Assoc. Fr. Etude Quaternaire* 4 (1984) 221–231.
- [3] G. Bosinski, D. Lordkipanidze, G. Majsuradze, M. Tvalčrelidze, Die Ablagerungen auf der Basaltlava, in: V. Džaparidze, G. Bosinski, T. Bugianišvili, L. Gabunia, A. Justus, N. Klopovskaja, E. Kvavadze, D. Lordkipanidze, G. Majsuradze, N. Mgeladze, M. Nioradze, E. Pavlenišvili, H.-U. Schmincke, D. Sologašvili, D. Tušabramišvili, M. Tvalčrelidze, A. Vekua, Der altpaläolithische Fundplatz Dmanisi in Georgien (Kaukasus), *Jahrb Roem-German Zentralmus Mainz*, 36 (1989) (1991), 76–83.
- [4] C. Bouville, Hypogée de Roaix, apport à la démographie en Provence, *Bull. Mem. Soc. Anthropol. Paris* 7 B (1980) 85–89.
- [5] M. Bukhsianidze, The fossil Bovidae of Dmanissi, thèse de doctorat international, université de Ferrare, Ferrare, Italie, 2005.
- [6] E. Carbonell i Roura, J.-L. Arsuaga, J.-M. Bermúdez de Castro et al., Atapuerca. Un millón de años, Catalogue d'exposition, Museo de Burgos, Junta de Castilla y León, Consejería de Educación y Cultura, 2000.
- [7] E. Carbonell, M. Mosquera, A. Ollé, X.P. Rodríguez, R. Sala, J.M. Vergès, J.L. Arsuaga, J.M. Bermúdez de Castro, Les premiers comportements funéraires auraient-ils pris place à Atapuerca, il y a 350 000 ans ? *L'Anthropologie* 107 (1) (2003) 1–14.
- [8] Y. Fernández-Jalvo, J. Carlos Díez, I. Cáceres, J. Rosell, Human cannibalism in the Early Pleistocene of Europe (Gran Dolina, Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain), *J. Hum. Evol.* 37 (3–4) (1999) 591–622.
- [9] L. Gabounia, M.-A. de Lumley, A. Vekua, D. Lordkipanidze, H. de Lumley, Découverte d'un nouvel hominidé à Dmanissi (Transcaucasie, Géorgie), *C. R. Palevol* 1 (2002) 243–253.
- [10] L. Gabunia, A. Vekua, D. Lordkipanidze, C.C. Swisher III, R. Ferring, A. Justus, M. Nioradze, M. Tvalchrelidze, S.C. Antón, G. Bosinski, O. Jöris, M.-A. de Lumley, G. Majsuradze, A. Mouskhelishvili, Earliest Pleistocene hominid cranial remains from Dmanisi, Republic of Georgia: Taxonomy, geological setting, and age, *Science* 288 (2000) 1019–1025.
- [11] R.W. Le, Maître (Eds.), *Igneous Rocks, A Classification and Glossary of Terms. (Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks)*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002.
- [12] H. de Lumley, D. Lordkipanidze, G. Féraud, T. Garcia, C. Perrenoud, C. Falguères, J. Gagnepain, T. Saos, P. Voinchet, Datation par la méthode ⁴⁰Ar/³⁹Ar de la couche de cendres volcaniques (couche VI) de Dmanissi (Géorgie) qui a livré des restes d'hominidés fossiles de 1,81 Ma, *C. R. Palevol* 1 (2002) 181–189.
- [13] M.-A. de Lumley, D. Lordkipanidze, L'Homme de Dmanissi (*Homo georgicus*), il y a 1 810 000 ans, *C. R. Palevol* 5 (1–2) (2006) 273–281.
- [14] M.-A. de Lumley, L. Gabounia, A. Vekua, D. Lordkipanidze, Les restes humains du Pliocène final et du début du Pléistocène inférieur de Dmanissi, Géorgie (1991–2000). I – Les crânes, *D 2280, D 2282, D 2700, L'Anthropologie* 110 (2006) 1–110.
- [15] P. Quantin, Andosols et vitrosols, in: *Référentiel pédologique*, INRA éditions, 1995, pp. 85–93.
- [16] S.S. Sun, N.F. McDonough, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes, *Geol. Soc. Spec. Publ.* 42 (1989) 313–345.
- [17] M. Tappen, R. Ferring, D. Lordkipanidze, A. Vekua, G. Kiladze, Preliminary observations on the Vertebrate taphonomy of the Dmanisi locality in the Republic of Georgia, in: M. de Renzi, M.V.P. Alonso, M. Belichón, E. Pañalver, P. Montoya, M. Márquez-Aliga (Eds.), *Current topics on taphonomy and fossilization, Ajuntament de Valencia, Valencia*, 2002, pp. 161–170.
- [18] G.P.L. Walker, Grain-size characteristics of pyroclastic deposits, *J. Geol.* 79 (1971) 696–714.