

Geochemistry (Geochronology)

# Refinement of the age of the Middle Miocene Fort Ternan Beds, Western Kenya, and its implications for Old World biochronology

Martin Pickford<sup>a,b,\*</sup>, Yoshihiro Sawada<sup>c</sup>, Ryoichi Tayama<sup>c</sup>, Yu-ko Matsuda<sup>c</sup>,  
Tetsumaru Itaya<sup>d</sup>, Hironobu Hyodo<sup>d</sup>, Brigitte Senut<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Chaire de Paléanthropologie et de Préhistoire, Collège de France, 3, rue d'Ulm, 75031 Paris cedex 05, France*

<sup>b</sup> *Département 'Histoire de la Terre', UMR 5143 du CNRS, case postale 38, 57, rue Cuvier, 75005 Paris, France*

<sup>c</sup> *Department of Geoscience, Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Japan*

<sup>d</sup> *Research Institute of Natural Sciences, Okayama University of Science, Japan*

Received 13 May 2005; accepted after revision 7 February 2006

Available online 9 June 2006

Presented by Yves Coppens

## Abstract

It has become increasingly obvious over the past two decades that the fossiliferous strata at Fort Ternan, Kenya, are probably somewhat younger than 14 Ma, an age which has long been attached to the deposits. This realisation flows from geological and biochronological observations. In order to test the hypothesis, resampling of all the lava flows in the region of Fort Ternan was undertaken in 2003, especially those underlying the Fort Ternan Beds in the Kipchorion Gorge where the sequence is the most complete. Samples obtained from lava flows underlying and overlying the fossil beds were analysed for anorthoclase K/Ar and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar and biotite <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age determinations. The results reveal that the age of the fossiliferous sediments is ca 13.7 ± 0.3 Ma. Since Fort Ternan yielded the 'core fauna' that defines Faunal Set IV of the East African biochronological sequence this refinement of its age will impact on age estimates of neighbouring Faunal Sets, as well as on other faunas correlated to Fort Ternan, including those in Europe belonging to MN Zones MN 5, MN 6 and MN 7/8. **To cite this article: M. Pickford et al., C. R. Geoscience 338 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

## Résumé

**Précision de l'âge Miocène moyen des niveaux de Fort Ternan, Kenya occidental, et ses implications pour la biochronologie de l'Ancien Monde.** Des données géologiques et biochronologiques obtenues au cours des 20 dernières années suggèrent que les niveaux fossilifères de Fort Ternan seraient un peu plus jeunes que 14 Ma, âge généralement admis pour ces dépôts. Pour tester cette hypothèse, nous avons ré-échantillonné en 2003 toutes les coulées de laves de la région de Fort Ternan, en particulier celles sous-jacentes aux couches de Fort Ternan, dans la gorge de Kipchorion, où la séquence est la plus complète. Sur les laves encadrant les dépôts fossilifères, les datations ont été réalisées sur les anorthoclases par les méthodes K/Ar et <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar et sur les biotites par la méthode <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar. L'âge obtenu pour les sédiments fossilifères est d'environ 13,7 ± 0,3 Ma. Le gisement de Fort Ternan étant le gisement-type du *Faunal Set IV* de la séquence biochronologique est-africaine, cette précision a un impact sur l'âge

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [pickford@mnhn.fr](mailto:pickford@mnhn.fr) (M. Pickford), [sawada@riko.shimane-u.ac.jp](mailto:sawada@riko.shimane-u.ac.jp) (Y. Sawada), [itaya@rins.ous.ac.jp](mailto:itaya@rins.ous.ac.jp) (T. Itaya), [bsenut@mnhn.fr](mailto:bsenut@mnhn.fr) (B. Senut).

des associations fauniques voisines et sur celui de celles corrélées avec Fort Ternan, y compris celui des associations faunistiques européennes (MN 5, MN 6 et MN 7/8). **Pour citer cet article : M. Pickford et al., C. R. Geoscience 338 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

**Keywords:** K/Ar;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ; Fort Ternan; Middle Miocene; Kenya; Biochronology

**Mots-clés :** K/Ar;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ; Fort Ternan; Miocène moyen; Kenya; Biochronologie

## Version française abrégée

### 1. Introduction

C'est dans les années 1960–1970, que la localité fossilifère de Fort Ternan au Kenya (Fig. 1) est devenue célèbre, grâce à sa faune riche et diversifiée et surtout à la présence d'un hominoïde que certains chercheurs considéraient, à l'époque, comme le plus ancien hominidé bipède, capable d'utiliser des outils [11–13]. Fort Ternan est la localité-type de *Kenyapithecus wickeri*, dont la synonymie avec le genre indien *Ramapithecus* a été fortement débattue [12,13,26–28,33,34,36]. Il s'avéra que les deux genres étaient bien distincts [18,19] et que *Kenyapithecus* n'était pas un hominidé, mais bien un grand singe à dimorphisme sexuel fort. Les caractères morphologiques supposés « hominidés » (face courte, petite canine, présence d'une fosse canine, forme parabolique de l'arcade dentaire) étaient mal décrits, ou étaient des caractères de femelle du spécimen-type. Enfin, les outils « supposés » se sont avérés être des pierres anguleuses provenant d'un lahar qui surmonte les paléosols fossilifères [22].

Malgré son exclusion de la famille des Hominidae (*sensu stricto*), *Kenyapithecus* demeure un hominoïde intéressant [32,36], qui pourrait avoir donné naissance aux hominidés bipèdes ultérieurs [30]. C'est pourquoi, la précision de l'âge des dépôts dont il provient est importante.

L'âge des niveaux fossilifères de Fort Ternan a été estimé à 14 Ma par Bishop et al. [2] à partir des analyses isotopiques des cristaux de biotite provenant des sédiments fossilifères (sur l'échantillon MB 15, les âges obtenus étaient de  $14,0 \pm 0,2$  et  $14,7 \pm 0,7$  Ma). Comme ces cristaux étaient automorphes et frais, on considéra qu'ils étaient liés à une activité volcanique contemporaine de la sédimentation, et non pas remaniés. Les analyses de la matrice d'une phonolite située au-dessus des niveaux fossilifères à Fort Ternan ont livré un âge moyen de  $11,8 \pm 0,3$  Ma (échantillon MB 16 [2 (Tableau 3)]). Une nouvelle analyse de ce même échantillon a donné un âge de  $12,5 \pm 0,4$  Ma [2 (Tableau 5, Fig. 3)]; mais une coulée de lave provenant de la même formation, près de Kericho, a été datée à  $12,1 \pm 0,2$ ,

$13,2 \pm 0,3$  et  $13,4 \pm 0,4$  Ma. Des travaux ultérieurs [33] ont inclus des âges obtenus sur des laves encadrant les niveaux fossilifères et sur des cristaux de biotite provenant de ces derniers. Bien que l'âge livré par les cristaux de sanidine provenant de la lave immédiatement inférieure soit plus jeune que 14 Ma (âges établis sur la phonolite par K/Ar,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  et méthodes de dégazage : 12,5–12,6 Ma; âges des micas des niveaux de Fort Ternan par K/Ar,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  et méthodes de dégazage : 13,9–14,0 Ma), ces auteurs ont suggéré que le lahar qui surmonte les sédiments était si chaud lors de sa mise en place qu'il aurait produit une remise à zéro du processus de désintégration radioactive dans la lave sous-jacente, qui apparaissait donc plus jeune que sa date d'éruption réelle. Mais il est étrange que les cristaux de biotite présents dans les sédiments, plus proches de la coulée de boue volcanique que la lave qui leur est sous-jacente, n'aient pas été touchés par la remise à zéro du système isotopique.

Les analyses des faunes de la formation de Ngorora (fin du Miocène moyen) au Kenya [17,19], dont l'âge varie de 13 Ma environ à la base (membre A) jusqu'à 10,5 Ma au sommet (membre E) [5], montrent que de nombreux mammifères des membres A–D de cette formation étaient proches ou identiques à ceux de Fort Ternan, malgré la différence de 2 Ma estimée entre les deux (Tableau 1). Une stase évolutive aussi longue paraît improbable et l'un d'entre nous (MP) [23,24] estimait que l'âge isotopique de 14 Ma calculé pour ce dernier gisement était trop vieux. Il était donc intéressant de ré-échantillonner la coupe pour préciser l'âge des sédiments fossilifères.

### 2. Datations K/Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ : échantillons et préparation des échantillons

Dans la gorge de Kipchorion, immédiatement au sud de Fort Ternan (Figs. 1 et 2), ont été prélevés des échantillons orientés qui proviennent de cinq coulées de laves formant les Lower Kericho Phonolites, sous-jacentes aux couches de Fort Ternan [16,17,20,21]. Un autre échantillon orienté a été récolté au sommet de la colline dans l'Upper Kericho Phonolite, directement au-dessus des niveaux fossilifères. Des datations K/Ar

et  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ont été réalisées (Tableau 2). Après examen en lame mince, trois échantillons très frais ont été conservés pour les datations K/Ar : deux provenant des niveaux inférieurs et un du niveau supérieur :

- (1) KY03082203 : phonolite sous le niveau fossilifère ;
- (2) KY03082204 : phonolite sous le niveau fossilifère ;
- (3) KY03082101 : phonolite au-dessus du niveau fossilifère.

KY03082203 et KY03082101 sont hautement porphyriques et KY03082204, peu porphyrique, est composé de phénocristaux d'anorthose (pouvant atteindre 11 mm de long), de néphéline, de biotite, d'augite, d'apatite et de magnétite baignant dans une matrice formée de feldspaths, de pyroxènes monocliniques, d'aegyrine, d'apatite, de magnétite et de verre dévitrifié. Après préparation (voir version anglaise pour davantage de détails), l'anorthose a été conservée pour les datations K/Ar, ainsi que des échantillons frais d'anorthose en gros grains et de biotite (de 1 à 2 mm de diamètre) pour la datation  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .

### 3. Protocole d'analyse et estimations des âges K/Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Pour le protocole d'analyse et le calcul des âges et des erreurs, la méthode décrite par Nagao et al. [14] et Itaya et al. [9] a été employée.

Les âges K/Ar (Tableau 2) calculés sur l'anorthose des coulées de phonolite KY03082203, KY03082204 et KY03082101 sont tous de  $13,7 \pm 0,3$  Ma et s'accordent avec les données stratigraphiques. Les âges  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sont donnés dans le Tableau 3 et les spectres d'âges ainsi que les rapports  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$  sur la Fig. 3. Ces derniers sont légèrement discordants avec les âges anciens, obtenus sur les fractions à basse température.

Deux âges calculés sur deux cristaux de biotite du même échantillon (KY03082101) sont très différents, avec une forte discordance au-delà des marges d'erreur. De plus, les deux montrent un enrichissement en  $^{40}\text{Ar}$  dans les basses températures, suggérant la présence d'un excès d'argon dans l'environnement pendant la cristallisation. Une tendance similaire est observée dans les spectres d'âges obtenus pour l'anorthose aux basses températures. Un des âges obtenu pour la biotite est même plus jeune que ceux de l'anorthose, ce qui est contraire à l'ordre de refroidissement. Ces âges ont probablement été perturbés par un ou plusieurs événements ultérieurs.

### 4. Discussion des âges K/Ar

Certaines coulées de laves de la Lower Kericho Phonolite [17,20] sont trop altérées pour donner des âges K/Ar fiables. La quatrième coulée de la base de la séquence (Fig. 2), qui est une phonolite massive à biotite–anorthose, a livré un âge de  $13,8 \pm 0,3$  Ma (Tableau 2), alors que l'âge d'une coulée de phonolite porphyrique située au-dessus a été calculé à  $13,7 \pm 0,3$  Ma. La coulée la plus récente dans la Lower Kericho Phonolite, au-dessus de laquelle se sont accumulés les dépôts fossilifères, était trop altérée pour être datée. La coulée de l'Upper Kericho Phonolite qui recouvre la colline juste au-dessus du niveau fossilifère (même unité que celle échantillonnée par Bishop et ses collègues au milieu des années 60 [6 (échantillon MB 16)] a livré un âge de  $13,7 \pm 0,3$  Ma. Au vu de la puissance de l'horizon altéré, développé sur la phonolite qui est immédiatement sous-jacente aux niveaux de Fort Ternan (Fig. 2), nous estimons un âge situé autour de 13,7 Ma pour les niveaux fossilifères.

### 5. Discussion des âges $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Si on tient compte des marges d'erreurs, les résultats des analyses  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  des feldspaths s'accordent assez bien avec ceux obtenus sur les échantillons testés pour K/Ar. En revanche, l'âge calculé à partir de la biotite de l'échantillon KY03082101 (situé au-dessus des couches de Fort Ternan),  $13,2 \pm 0,2$  Ma, est beaucoup plus jeune que celui estimé par K/Ar et par  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  déterminé sur les feldspaths de la même roche (Tableau 3). En outre, l'âge  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  estimé sur la biotite de KY03082203 (sous les couches de Fort Ternan) est plus vieux ( $14,1 \pm 0,1$  Ma) que ne le suggèrent les analyses K/Ar. Bien que ces différences ne soient pas très importantes, elles montrent que la biotite est un minéral moins fiable pour déterminer les âges des dépôts de Fort Ternan, en raison de la présence d'un assez grand excès de composants dans les fractions à basse température. Ceci expliquerait pourquoi les âges des couches de Fort Ternan, estimés auparavant à partir de cristaux de biotite présents dans les sédiments fossilifères, apparaissaient trop vieux lorsqu'on les replaçait dans la colonne stratigraphique globale.

### 6. Corrélations intercontinentales

L'échelle biochronologique est-africaine, calibrée en de nombreux points par des âges isotopiques, a été utilisée pour proposer des corrélations avec les zonations mammaliennes européennes (zones MN) (par exemple,

[10,24], parmi d'autres). Bien qu'il y ait un débat dans la littérature, il est souvent admis que la faune de Sansan (France), niveau repère pour MN 6, est corrélée avec celle de Fort Ternan. Sen [31] a corrélé cette faune avec la zone de polarité normale C5Bn.2n, qui, selon l'échelle de référence (GPTS) de Baksi [1], donnerait un âge de 16,2 à 16,3 Ma pour Sansan, ce qui paraît trop vieux [23]. Daams et al. [4], ont corrélé la même section à la zone normale C5ABn qui, sur le même GPTS, lui accorderait un âge de 14,0 à 14,3 Ma. Pickford [23] estime que la section pourrait également être corrélée à la zone C5Ar.2n, ce qui donnerait alors un âge de 13,3 à 13,4 Ma, en utilisant l'échelle GPTS de Baksi [1]. En revanche, si les calculs sont basés sur d'autres échelles GPTS [3], les niveaux de Sansan pourraient être datés de 15,0 à 15,1 Ma [31], 13,3 à 13,5 Ma [4] ou même de 12,8 Ma [37]. (NB : Dans les articles cités, les âges sont donnés avec deux chiffres après la virgule, alors qu'ici ils sont arrondis au premier chiffre après la virgule.)

Les corrélations fauniques proposées par Pickford et Morales [24], combinées aux âges isotopiques et à la stratigraphie paléomagnétique, suggèrent que l'échelle internationale la plus fiable, au moins pour cette partie du Miocène, serait celle de Baksi [1].

## 7. Discussion

Les dépôts fossilifères de Fort Ternan ont livré une faune importante du Miocène moyen, sur laquelle le Faunal Set IV de la zonation faunique est-africaine a été défini [16]. Bien que les dépôts aient été initialement considérés comme pliocènes (au vieux sens du terme) [11], il est apparu rapidement qu'ils étaient probablement plus anciens [2]. Les estimations initiales basées sur des cristaux de biotite contenus dans les niveaux fossilifères suggéraient un âge de 14 Ma, corroboré ultérieurement [33], en dépit du fait que la coulée de lave surmontée par les mêmes sédiments ait donné un âge plus jeune que 14 Ma. Il avait été proposé que l'horloge isotopique de la lave ait été affectée par la chaleur produite par un lahar qui surmonte les couches de Fort Ternan. Le problème réside dans le fait que les biotites intrasédimentaires n'avaient pas été affectées, alors que les anorthoses de la coulée sous-jacente, bien plus éloignée du lahar, l'étaient. Par ailleurs, l'anorthose étant plus réfractaire que la biotite, elle est donc plus difficile à altérer.

Les faunes du Miocène moyen de la formation de Ngorora (membres B–D) au Kenya, âgées de 13 à 12 Ma [5] et celle de Fort Ternan partagent un certain nombre de taxons [15,20] (Tableau 1). Les similitudes entre ces faunes suggèrent qu'elles sont plus proches chrono-

logiquement que ne l'indiquaient les âges isotopiques. Si ces derniers étaient corrects, il fallait admettre que les faunes n'avaient que peu, voire pas évolué pendant 1 à 2 Ma. Bien qu'une stase évolutive sur une telle période de temps soit théoriquement possible, elle reste à démontrer.

Le ré-échantillonnage et l'analyse de la succession complète des coulées de lave sous-jacentes aux couches de Fort Ternan montrent que ces dernières sont probablement plus jeunes que 14 Ma. Deux des six coulées sous-jacentes aux sédiments ont livré un âge de  $13,7 \pm 0,3$  Ma (les deux autres étaient trop altérées pour être datées); on peut estimer aujourd'hui un âge situé autour de 13,7 Ma pour les niveaux fossilifères de Fort Ternan. Ces estimations étant entachées d'une d'erreur de 0,3 Ma, ces niveaux pourraient alors être aussi jeunes que 13,4 Ma et pas si différents de ceux de la base de la formation de Ngorora, proches de 13 Ma environ. Par ailleurs, la précision de l'âge du gisement de Fort Ternan a un impact sur la stratigraphie paléomagnétique et sur les corrélations fauniques intercontinentales.

## 1. Introduction

The fossiliferous locality of Fort Ternan, Kenya (Fig. 1), rose to prominence during the 1960's and 1970's on account of its rich and diverse fauna which included what was at the time considered by some researchers to be the earliest known remains of bipedal, tool-using hominids which were thought to have lived in communities with social organisations close to those of extant humans [11–13]. It is the type locality of the genus and species *Kenyapithecus wickeri* around which a controversy developed [12,13,26–28,33,34,36]. The thrust of the debate concerned its synonymy or otherwise with the Indian genus *Ramapithecus*. What was generally agreed by the proponents of this debate was that *Kenyapithecus/Ramapithecus* was a hominid in the strict sense of the term (various features of the face and dentition, tool use, community living, postulated bipedal locomotion). This debate was finally settled by Pickford [18,19] in favour of the distinctiveness of *Kenyapithecus* as a genus separate from *Ramapithecus*, but it was removed from Hominidae and returned to the great apes, on account of its strongly dimorphic nature. The supposed hominid-like morphological features (short face, small canine, presence of canine fossa, dental arcade shape) [36] were either inaccurately reported, or are due to the female status of the type specimen and referred material. Throughout the debate, male hominoid specimens from the same site were excluded from *Kenyapithecus* and classified as *Proconsul*,

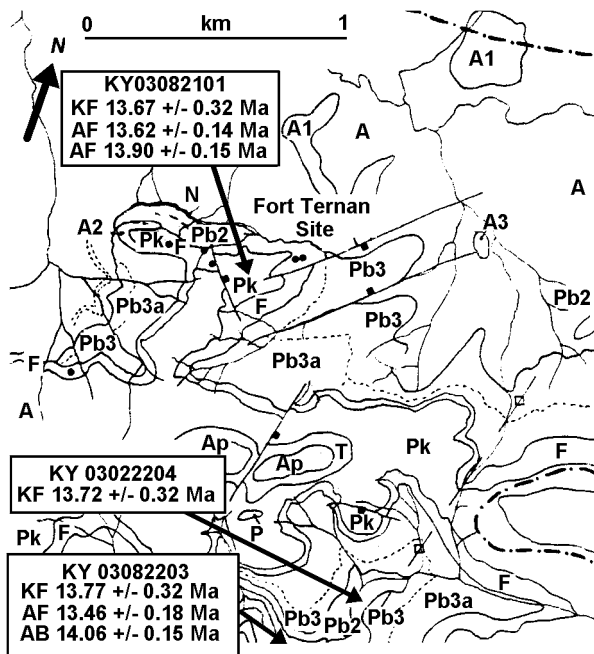


Fig. 1. Geological map of the Fort Ternan area [20], showing sampling localities: Ap, polymict agglomerate; T, tunnel tuff; Pk, Kericho phonolite; F, Fort Ternan beds; Pb3a, Baraget phonolite (weathered); Pb3, Baraget phonolite (fresh); Pb2, biotite, glassy and autobrecciated phonolite; Pb1, pink sanidine tuff; N, regolith beneath Kericho phonolites; A3, zeolitised basanite; A2, olivine nephelinite; A1, aegerine basanite; A, Kapurtay and Cliff agglomerate (AB =  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  determination on biotite; AF =  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  determination on feldspar; KF = K/Ar determination on feldspar). (The dates are given to two decimal places: in the text these are rendered to one decimal place.)

Fig. 1. Carte géologique de la région de Fort Ternan [20] avec les localités échantillonnées : Ap, agglomérat hétérogène ; T, Tunnel Tuff ; Pk, phonolite de Kericho ; F, couches de Fort Ternan ; Pb3a, phonolite de Baraget (altérée) ; Pb3, phonolite de Baraget (fraîche) ; Pb2, Biotite, phonolite vitreuse et autobréchifiée ; Pb1, cinérite à sanidine rose ; N, régolithe sous les phonolites de Kericho ; A3, basanite zéolitisée ; A2, néphéline à olivine ; A1, basanite à aëgyrine ; A, agglomérats de Kapurtay et de Cliff (AB = détermination  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur biotite ; AF =  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur feldspaths ; KF = détermination K/Ar sur feldspaths). (NB : Les âges sont calculés avec deux chiffres après la virgule, alors que, dans le texte, ils sont arrondis au premier chiffre après la virgule.)

despite significant differences from the latter genus. The supposed stone tools from the site were shown to be angular chunks of volcanic rock derived from a lahar that overlies the fossiliferous palaeosols [22]. The case for community living and bipedal locomotion was weak, and it is still that way.

Despite the exclusion of *Kenyapithecus* from the family Hominidae (sensu stricto), it remains an interesting hominoid which could have given rise, in the fullness of time, to bipedal hominids [32]. For this, and other reasons, refinement of the age of the deposits from which it was excavated, is important.

The fossil beds at Fort Ternan were first estimated to be 14 Ma by Bishop et al. [2] on the basis of isotopic analyses of biotite crystals obtained from the sediments which yield the fossils (age determinations (sample MB 15) were  $14.0 \pm 0.2$  and  $14.7 \pm 0.7$  Ma). Because the analysed crystals were euhedral and unaltered, they were considered to result from volcanic activity coeval with sedimentation, rather than being reworked from pre-existing volcanic deposits. Whole-rock analyses of phonolite lava above the fossil beds at Fort Ternan yield an age determination of  $11.8 \pm 0.3$  Ma (sample MB 16 [2 (Table 3)]). Reanalysis of the same sample yielded age determinations of  $12.5 \pm 0.4$  Ma [2 (Table 5, Fig. 3)], while a flow in the same formation near Kericho, yielded ages of  $12.1 \pm 0.2$ ,  $13.2 \pm 0.3$  and  $13.4 \pm 0.4$  Ma. A subsequent survey by Shipman et al. [32] included age determinations from lavas below and above the fossil beds, as well as biotite flakes from the beds themselves. Although sanidine grains from lava immediately beneath the sediments yielded an age younger than 14 Ma (whole-rock ages of Kericho Phonolite by K/Ar isochron and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  total-fusion and stepwise-degassing methods: 12.5–12.6 Ma; mica ages from Fort Ternan beds by K/Ar isochron and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  stepwise-degassing methods: 13.9–14.0 Ma) the authors postulated that the lahar that overlies the sediments was so hot when it was emplaced that it reset the decay process in the underlying lava, thereby making it appear younger than its eruption date. What seems odd about this explanation is that biotite from the sediments, which are closer to the supposedly hot lahar than the underlying lava flow, did not experience resetting, despite the fact that biotite is a less refractory mineral than sanidine. By this means the authors supported the 14 Ma age for the Fort Ternan fauna.

Meanwhile analyses of faunas from the late Middle Miocene of Kenya, in particular those from the Ngorora Formation [17,19], which ranges in age from ca 13 Ma at the base (Member A) to 10.5 Ma at the top (Member E) [5], revealed that many of the mammals from Members A–D of the Ngorora Formation were close to or identical to those from Fort Ternan, in spite of the supposed differences in age of up to 2 Myr (Table 1). Faunal evolutionary stasis over such a lengthy time period is unlikely, and Pickford [23,24] has tended to consider that the isotopic age of 14 Ma for Fort Ternan is too great. Clearly, however, in order to avoid circular reasoning, it was necessary to resample the entire succession of strata in the region of Fort Ternan so as to refine the age determination of the fossiliferous sediments.

Table 1

Large mammal faunas from Fort Ternan and Ngorora (Members A–D) omitting indeterminate genera. Note the large number of species that occur at both sites

Tableau 1

Faunes de grands mammifères de Fort Ternan et de Ngorora (Membres A–D). Noter le grand nombre d'espèces communes entre les deux sites. (Les genres indéterminés n'ont pas été mentionnés)

| Fort Ternan Beds only        | Both Fort Ternan and Ngorora     | Ngorora Members A–D only                       |
|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| <i>Kenyapithecus wickeri</i> | <i>Simiolus</i> sp.              | <i>Victoriapithecus</i> sp.*                   |
| <i>Proconsul</i> sp.?        | <i>Hyainailourus sulzeri</i>     | <i>Otavipithecus</i> or <i>Kenyapithecus</i> ? |
| <i>Rangwapithecus</i> sp.    | <i>Percrocuta tobieni</i>        | <i>Dryopithecus</i> sp.?                       |
| <i>Oiocerus tanycerus</i>    | <i>Agnotherium antiquum</i>      | <i>Dissopsalis pyroclasticus</i> *             |
| <i>Butleria rusingense</i>   | <i>Orycteropus chemeldoi</i>     | <i>Eomellivora</i> sp.                         |
|                              | <i>Afrochoerodon</i> sp.         | <i>Sivaonyx</i> sp.                            |
|                              | <i>Deinotherium giganteum</i>    | <i>Gomphotherium</i> sp.                       |
|                              | <i>Chilotheridium pattersoni</i> | <i>Choerolophodon pygmaeus</i> *               |
|                              | <i>Paradicerus mukirii</i>       | <i>Tetralophodon</i> sp.                       |
|                              | <i>Listriodon bartulensis</i>    | <i>Parapliohyrax tugenensis</i>                |
|                              | <i>Albanohyus</i> sp.            | <i>Aceratherium acutirostratum</i> *           |
|                              | <i>Kenyapotamus ternani</i>      | <i>Brachypotherium</i> sp.*                    |
|                              | <i>Dorcatherium chappuisi</i>    | <i>Lopholistriodon kidogosana</i>              |
|                              | <i>Dorcatherium piggoti</i>      | <i>Homoiodorcas tugenium</i>                   |
|                              | <i>Climacoceras gentryi</i>      |                                                |
|                              | <i>Palaeotragus primaevus</i>    |                                                |
|                              | <i>Samotherium africanum</i>     |                                                |
|                              | <i>Kipsigicerus labidotus</i>    |                                                |
|                              | <i>Gentrytragus gentryi</i>      |                                                |
|                              | <i>Gazella</i> sp.               |                                                |

\* Taxa from Ngorora that are known to occur in deposits older than Fort Ternan. Their absence from the latter site is probably due to differences in palaeoecology between Ngorora and Fort Ternan.

## 2. K/Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating

### 2.1. Sample description and preparation

Oriented samples from five lava flows mapped as Lower Kericho Phonolites, which underlie the Fort Ternan Beds [16,17,20,21], were collected from Kipchorion Gorge, immediately south of Fort Ternan (Figs. 1 and 2). In addition, an oriented sample of the Upper Kericho Phonolite was collected from the hilltop directly above the fossiliferous beds. These were analysed for K/Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (Table 2). The following three samples were suitable for K/Ar age determination:

- (1) KY03082203: phonolite lava below a fossil layer;
- (2) KY03082204 phonolite lava below a fossil layer;
- (3) KY03082101 phonolite lava above a fossil layer.

These lava samples are very fresh. KY03082203 and KY03082101 are highly porphyritic, and KY03082204 is sparsely porphyritic, and consists of phenocrysts of

anorthoclase (up to 11 mm in length), nepheline, biotite, augite, apatite and magnetite with a ground mass of feldspar, clinopyroxene, aegirine, apatite, magnetite and devitrified glass. Samples of anorthoclase for K/Ar age determination were prepared by crushing and sieving. Anorthoclase phenocrysts of 423–254  $\mu\text{m}$  were sieved. The sieved fraction was cleaned in water, then dried in an oven at 110 °C. The magnetic minerals were removed manually by magnet. The anorthoclase grains were removed from the sieved samples by a Frantz isodynamic separator, heavy liquid (bromoform) and additional handpicking. The separated minerals were ultrasonically washed several times in ethanol and ion exchange water for 10 min. The separated anorthoclase samples were leached two or three times in HCl solutions (HCl:H<sub>2</sub>O = 1:4) for 15 min in order to remove any argillaceous alteration products. A portion of the fraction was ground by hand in an agate mortar, and used for potassium analysis.

Fresh coarse-grained anorthoclase and biotite samples (1–2 mm in diameter) for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age determination were separated by handpicking under a microscope.

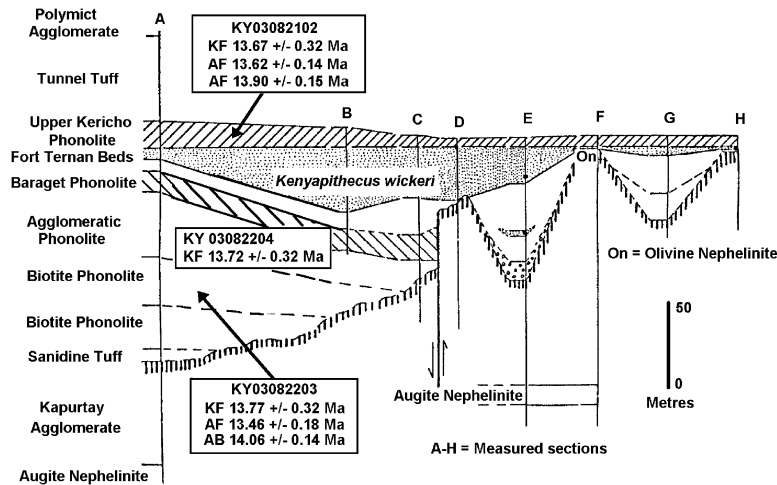


Fig. 2. Stratigraphy of the Fort Ternan area [20] showing positions of samples. A–H, measured sections in different sectors of the Fort Ternan area (the main fossil beds are in section C). The vertical hatching denotes the unconformity between the Kapurtay Agglomerates below and the Kericho Phonolites above. (AB =  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  determination on biotite; AF =  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  determination on feldspar; KF = K/Ar determination on feldspar.) (The dates are given to two decimal places: in the text these are rendered to one decimal place.)

Fig. 2. Stratigraphie de la région de Fort Ternan [20] avec la localisation des échantillons. A–H, sections mesurées dans différents secteurs de la région de Fort Ternan (les principaux niveaux fossilifères sont situés dans la section C). Les hachures verticales soulignent la discordance entre l'agglomérat de Kapurtay à la base et les phonolites de Kericho au-dessus. (AB = détermination  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur biotite ; AF = détermination  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur feldspaths ; KF = détermination K/Ar sur feldspaths.) (NB : Les âges sont calculés avec deux chiffres après la virgule, alors que dans le texte, ils sont arrondis au premier chiffre après la virgule.)

## 2.2. Analytical procedure and results of K/Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determinations

Analytical procedures for potassium and argon and calculations of ages and errors were based on the method described by Nagao et al. [14] and Itaya et al. [9]. Potassium was analyzed by flame photometry using a 2000 ppm Cs buffer and has an analytical error of less than 2% at  $2\sigma$  confidence level. Argon was analyzed on a 15-cm radius-sector-type mass spectrometer with a single collector system using an isotopic dilution method and  $^{38}\text{Ar}$  spike [9]. Calibration of the  $^{38}\text{Ar}$  spike is accurate to within 1%. Multiple runs of a standard (JG-1 biotite, 91 Ma) indicate that the error of argon analysis is about 1% at  $2\sigma$  confidence level. The sample was wrapped in aluminium foil, then preheated for a day or more at about 200 °C under vacuum to eliminate any absorbed atmospheric argon. Argon was extracted at 1600 °C on ultrahigh vacuum lines with an atmospheric  $^{40}\text{Ar}$  blank of less than  $2.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ STP}$ . The clean up of reactive gas was done by two Ti–Zr getters, and the  $^{38}\text{Ar}$  spike added. The decay constants for  $^{40}\text{Ar}$  and  $^{40}\text{Ca}$ , and  $^{40}\text{K}$  content in potassium used in the age calculations are from Steiger and Jäger [35].

The results of K/Ar age determinations are shown in Table 2. The anorthoclase K/Ar ages from phonolite lava flows KY03082203, KY03082204 and

KY03082101 are  $13.8 \pm 0.3 \text{ Ma}$ ,  $13.7 \pm 0.3 \text{ Ma}$  and  $13.7 \pm 0.3 \text{ Ma}$ , respectively. The results are consistent with stratigraphy.

Individual mineral grains (0.3–1 mm in size) were placed in 2-mm holes on an aluminium tray. Neutron flux and interference factors were monitored by age standard grains (3 g hornblende; [29]), and calcium ( $\text{CaSi}_2$ ) and potassium (synthetic  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  glass) salts for Ca and K corrections. Subsequently the tray was vacuum-sealed in a quartz tube. Neutron irradiation of the sample was carried out in the core of the 5-MW Research Reactor at Kyoto University (KUR) for 5 h. The fast neutron flux density is confirmed to be uniform in the dimension of the sample holder as little variation in  $J$ -values of the evenly spaced age standards was observed [6].

A mineral grain was analyzed by step-heating technique using a 5-W continuous argon ion laser. Temperatures of samples were monitored by an infrared thermometer with a precision of 3 °C in an area of 0.3-mm diameter [7]. Each crystal was heated under a defocused laser beam at a given temperature for 30 s. The extracted gas was purified with a SAES Zr–Al getter (St 101) kept at 400 °C for 5 min. Argon isotopes were measured using the custom-made mass spectrometer with a high resolution ( $[M/\Delta M] > 400$ ), which allows separating hydrocarbon peaks except for mass 36 [8]. Typical blanks

Table 2

Isotopic age determinations of samples of lava flows in the vicinity of Fort Ternan, Western Kenya. The Fort Ternan fossiliferous beds lie between the Lower and Upper Kericho phonolites

Tableau 2

Déterminations des âges isotopiques des échantillons de laves à proximité de Fort Ternan, Kenya occidentale. Les niveaux fossilifères de Fort Ternan sont situés entre les phonolites inférieure et supérieure de Kericho

| Sample No.  | Locality    | Stratigraphic position                         | Rock type      | Material analysed | K (wt%)     | Radiogenic $^{40}\text{Ar}$ $10^{-8}$ ccSTP/g | Non-radiogenic Ar% | K/Ar age Ma |
|-------------|-------------|------------------------------------------------|----------------|-------------------|-------------|-----------------------------------------------|--------------------|-------------|
| KY 03082101 | Fort Ternan | Upper Kericho Phonolite above Fort Ternan Beds | phonolite lava | anorthoclase      | 6.47 ± 0.13 | 344.4 ± 4.2                                   | 6.4                | 13.7 ± 0.3  |
| KY 03082205 | Fort Ternan | Lower Kericho Phonolite below Fort Ternan Beds | phonolite lava |                   |             |                                               |                    |             |
| KY 03082204 | Fort Ternan | Lower Kericho Phonolite below Fort Ternan Beds | phonolite lava | anorthoclase      | 5.49 ± 0.11 | 293.6 ± 3.7                                   | 8.3                | 13.7 ± 0.3  |
| KY 03082203 | Fort Ternan | Lower Kericho Phonolite below Fort Ternan Beds | phonolite lava | anorthoclase      | 5.52 ± 0.11 | 296.1 ± 3.7                                   | 6.8                | 13.8 ± 0.3  |
| KY 03082202 | Fort Ternan | Lower Kericho Phonolite below Fort Ternan Beds | phonolite lava |                   |             |                                               |                    |             |
| KY 03082201 | Fort Ternan | Lower Kericho Phonolite below Fort Ternan Beds | phonolite lava |                   |             |                                               |                    |             |

The decay constants for  $^{40}\text{Ar}$  and  $^{40}\text{K}$  used in the age calculations are from [35].

Table 3

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age determinations of feldspar and biotite from lavas in the Fort Ternan area, and comparison with K/Ar age determinations from the same rock samples (Fig. 3)

Tableau 3

Détermination des âges  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  des feldspaths et des biotites des laves de la région de Fort Ternan, et comparaison avec les âges K/Ar estimés à partir des mêmes échantillons de roches (Fig. 3)

| Sample No.      | Locality    | Rock type | Material     | K/Ar       | $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | Remarks         |
|-----------------|-------------|-----------|--------------|------------|---------------------------------|-----------------|
| KY03082101 Feld | Fort Ternan | phonolite | anorthoclase | 13.7 ± 0.3 | 13.6 ± 0.1                      |                 |
| KY03082101 Feld | Fort Ternan | phonolite | anorthoclase | 13.7 ± 0.3 | 13.9 ± 0.2                      | Second step age |
| KY03082101 B1   | Fort Ternan | phonolite | biotite      | –          | 13.2 ± 0.2                      | Plateau         |
| KY03082101 B2   | Fort Ternan | phonolite | biotite      | –          | 14.5 ± 0.2                      |                 |
| KY03082203 B1   | Fort Ternan | phonolite | biotite      | –          | 14.1 ± 0.1                      | Plateau         |
| KY03082203 F1   | Fort Ternan | phonolite | anorthoclase | 13.8 ± 0.3 | 13.5 ± 0.2                      | Second step age |

of extraction lines were  $10^{-14}$  to  $10^{-12}$  cm<sup>3</sup> STP range for  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{38}\text{Ar}$ ,  $^{39}\text{Ar}$  and  $^{40}\text{Ar}$ , respectively. Results of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analyses are shown in Table 3. Age spectra and  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ratios are exhibited in Fig. 3, which shows slightly discordant spectra with old ages in the low temperature fractions.

Two ages of single crystal biotite grains from the same sample (KY03082101) differ greatly from each other, not even agreeing within their analytical uncertainties. Furthermore, both show a gain of  $^{40}\text{Ar}$  in the low-temperature fractions, suggesting some post-eruptive excess argon. A similar age trend in low temperatures is also seen in the anorthoclase age spectra.

One of the biotite ages is even younger than the anorthoclase ages, disagreeing in the order of temperature closure (Table 3). These biotite ages may have been disturbed by a later event, resulting in the age variation. We adopt cooling ages of the minerals as 14.0 Ma for biotite and 13.7 Ma for anorthoclase.

### 2.3. Discussion of age determinations

#### 2.3.1. K/Ar age determinations

The basal flows of Lower Kericho Phonolite [17,20] are too altered to yield reliable K/Ar ages. The fourth flow from the base of the sequence (Fig. 2), which is



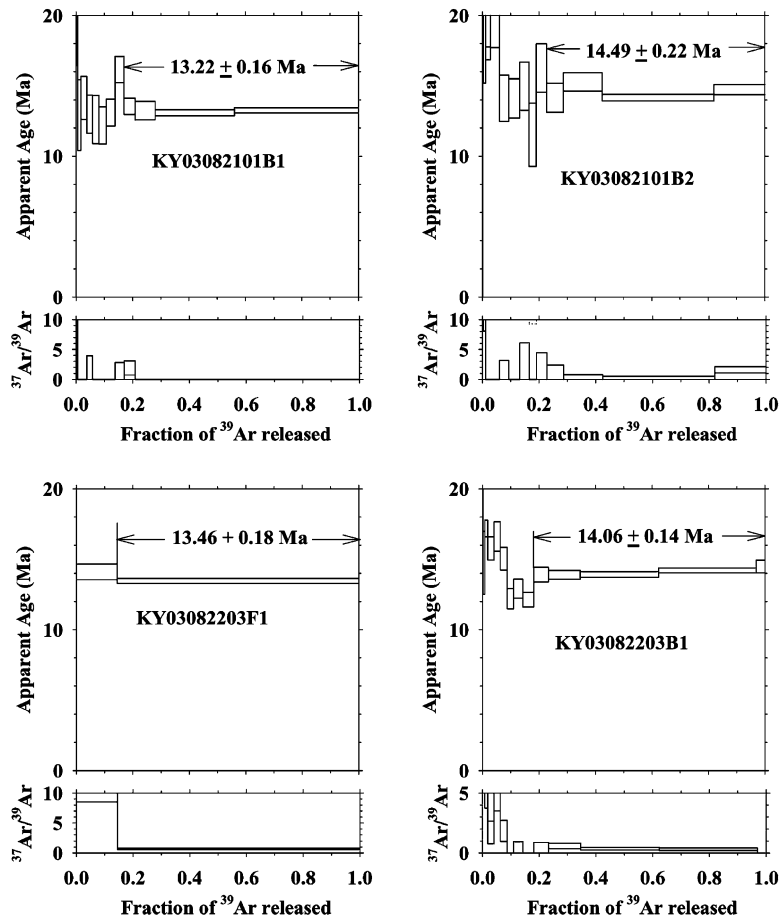


Fig. 3. Age spectra and  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$  ratios of samples from the Fort Ternan area, western Kenya and correlation plots of biotite samples. (The dates are given to two decimal places: in the text these are rendered to one decimal place.)

Fig. 3. Spectre des âges et rapports  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$  des échantillons de la région de Fort Ternan, Kenya occidentale et tracés des corrélations des échantillons de biotite. (NB : Les âges sont calculés avec deux chiffres après la virgule, alors que, dans le texte, ils sont arrondis au premier chiffre après la virgule.)

a massive biotite–anorthoclase phonolite, yields an age of  $13.8 \pm 0.3$  Ma (Table 2), while a porphyritic phonolite flow above it yields an age of  $13.7 \pm 0.3$  Ma. The uppermost flow in the Lower Kericho Phonolites was too altered to be dated. This is the flow upon which the fossiliferous strata accumulated. The Upper Kericho Phonolite flow that caps the hill above the fossil site (the same unit sampled by Bishop et al. [2 (sample MB 16)]) yields an age of  $13.7 \pm 0.3$  Ma. Even though there is a thick weathered horizon that developed on the phonolite flow that immediately underlies the Fort Ternan Beds (Fig. 2), we consider that the fossil beds are about 13.7 Ma.

### 2.3.2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determinations

Considering the error margins, the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analyses of feldspar are in good agreement with the sam-

ples analysed for K/Ar from which they were extracted. In contrast, the biotite in sample KY03082101 (from above the Fort Ternan Beds) yields two  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  age determinations, one of  $13.2 \pm 0.2$ , which is younger than expected from K/Ar analysis and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis of feldspar from the same rock, and  $14.5 \pm 0.2$ , which is older than expected (Table 3; Fig. 3). In contrast, the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  determination on biotite from KY03082203 (from beneath the Fort Ternan Beds) yields an age ( $14.1 \pm 0.1$  Ma) which is older than expected from the K/Ar analysis. Although the differences are not very great, they reveal that biotite is less suitable for determining the ages of the Fort Ternan deposits due to the presence of a relatively large excess in the low-temperature step-heating fractions. This could explain why previous attempts to date the Fort Ternan Beds on the basis of biotite collected from the fossiliferous strata

appear to be too old when considered in the overall context of the entire stratigraphic column.

### 3. Intercontinental correlations

The East African biochronological scale, which has been calibrated at a number of points by isotopic age determinations, has been used to propose broad correlations to the European mammal zonation (MN Zones) (e.g., [10,24], among others). The fauna from Sansan (France), the *niveau repère* for MN 6, is often thought to correlate with the fauna from Fort Ternan, although there is a diversity of opinions in the literature about this. Sen [31] correlated the Sansan fauna to polarity zone C5Bn.2n which, in terms of the Baksi [1] GPTS, would make it 16.2–16.3 Ma, which is too old [23]. Daams et al. [4] correlated the Sansan section to C5ABn, which on the same GPTS would make it 14.0–14.3 Ma. Pickford [23] considered that the strata could as well correlate to polarity zone C5Ar.2n, which would make it 13.3–13.4 Ma, using the Baksi [1] version of the GPTS. If, in contrast, calculations are based on other GPTS [3], the correlations proposed would date the Sansan strata to 15.0–15.2 Ma [31], 13.3–13.5 Ma [4] or 12.8 Ma [37]. (Note that in the papers cited, ages are given to two decimal places—in this paper these are rounded out to one place after the decimal.)

The faunal correlations proposed by Pickford and Morales [24] and the combination of isotopic age determinations and palaeomagnetic stratigraphy suggest that the more reliable GPTS, at least for this span of the Miocene period, is that of Baksi [1], although there is sufficient residual uncertainty in the data for other scales to be possible.

### 4. Discussion

The Fort Ternan fossiliferous deposits have yielded an important Middle Miocene fauna which is the core fauna for Faunal Set IV [16] of the East African Faunal Zonation. Initially considered to be of Pliocene age (in the old sense of the term) [11], it was soon realised that Fort Ternan was significantly older [2]. Initial age determinations based on biotite particles from the site suggested an age of 14 Ma, making it Middle Miocene. This age determination was supported by a subsequent publication [32] despite the fact that a lava flow beneath the sediments yielded an age younger than 14 Ma. It was argued that the isotopic ‘clock’ of this lava flow had been reset by heat emanating from a lahar that overlies the Fort Ternan Beds. A major difficulty with this hypothesis is that the supposed heat from the lahar would

have had to bypass the biotite in the Fort Ternan Beds without affecting it in any way and yet alter anorthoclase in the underlying lava, which is appreciably deeper beneath the lahar. Apart from that, anorthoclase is more refractory than biotite and is more difficult to alter in the way postulated.

Subsequently, study of late Middle Miocene faunas from the Ngorora Formation (Members B–D), Kenya suggests ages between 13 and 12 Ma [5] and those from Fort Ternan reveal that they share a number of taxa [15,20] (Table 1). The similarities between the faunas suggest that they were closer in time than indicated by the isotopic age determinations, which, if correct, would mean that there was little evolutionary activity over a period of 1 to 2 Ma. While faunal evolutionary stasis over such extended time periods is theoretically possible, it remains to be demonstrated. Partly because of this, Pickford [23,25] proposed that Fort Ternan is younger than 14 Ma.

Resampling and analysis of the complete succession of lava flows that underlie the Fort Ternan Beds, indicate that indeed the fossiliferous strata are likely to be younger than 14 Ma. Two of the six flows beneath the sediments yield age determinations of  $13.7 \pm 0.3$  Ma (the others are too weathered to be dated). Considering the depth of these flows beneath the Fort Ternan lahar, it is unlikely that they have been affected by post-depositional thermal events as once postulated [32]. On the basis of the most recent analyses, the Fort Ternan fossil beds are now considered to be about 13.7 Ma. Given that these age determinations come with an error bar of 0.3 Ma, then the Fort Ternan fossil beds could be as young as 13.4 Ma, and thus not greatly different from the base of the Ngorora Formation (ca 13 Ma).

The refinement of the age of the Fort Ternan Beds presented here will impact on allied geological and palaeontological domains including palaeomagnetic stratigraphy and intercontinental faunal correlations.

### Acknowledgements

We thank the French Ministry of Foreign Affairs (‘Commission des fouilles archéologiques à l’étranger’), the CNRS (PICS 1048, UMR 5143), the ‘Département Histoire de la Terre’ of the ‘Muséum national d’histoire naturelle’, the ‘Collège de France’ (‘Chaire de Paléanthropologie et de Préhistoire’), and the Community Museums of Kenya. Authorisation to carry out research in Kenya was accorded by the Ministry of Education, Science and Technology. We thank the Japanese Society for the Promotion of Science (Grant-in-Aid for Scientific Research No. 14253006) for financial support

and Dr M. Nakatsukasa for funding in the field. The age determinations were carried out in part under the Visiting Researchers Program of the Kyoto University Research Reactor Institute.

## References

- [1] A.K. Baksi, A geomagnetic polarity time scale for the period 0–17 Ma, based on  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  plateau ages for selected field reversals, *Geophys. Res. Lett.* 20 (1993) 1607–1610.
- [2] W.W. Bishop, J.A. Miller, F.W. Fitch, New potassium-argon age determinations relevant to the Miocene fossil mammal sequence in East Africa, *Am. J. Sci.* 267 (1967) 669–699.
- [3] S.C. Cande, D.V. Kent, Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic, *J. Geophys. Res.* 100 (1995) 6093–6095.
- [4] R. Daams, L. Alcalá, M. Alvarez Sierra, B. Azanza, J. van Dam, A. van der Meulen, J. Morales, M. Nieto, P. Peláez-Campomanes, D. Soria, A stratigraphical framework for Miocene (MN 4–MN 13) continental sediments of Central Spain, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 327 (1998) 625–631.
- [5] A. Deino, L. Tauxe, M. Monaghan, R. Drake,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Age calibration of the litho- and paleomagnetic stratigraphies of the Ngorora Formation, Kenya, *J. Geol.* 98 (1990) 567–587.
- [6] H. Hyodo, S.W. Kim, T. Itaya, T. Matsuda, Homogeneity of neutron flux during irradiation for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age dating in the research reactor at Kyoto University, *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.* 94 (1999) 329–337.
- [7] H. Hyodo, T. Itaya, T. Matsuda, Temperature measurement of small minerals and its precision using laser heating, *Bull. Res. Inst. Nat. Sci. Okayama Univ. Sci.* 21 (1995) 3–6 (in Japanese, with English abstract).
- [8] H. Hyodo, T. Matsuda, S. Fukui, T. Itaya,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age determination of a single mineral grain by laser step heating, *Bull. Res. Inst. Nat. Sci. Okayama Univ. Sci.* 20 (1994) 63–67 (in Japanese, with English abstract).
- [9] T. Itaya, K. Nagao, K. Inoue, Y. Honjou, T. Okada, A. Ogata, Argon isotope analysis by a newly developed mass spectrometric system for K/Ar dating, *Mineral. J.* 15 (1991) 203–221.
- [10] J.L. Kirschvink, The least-squares lines and plane analysis of paleomagnetic data, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 62 (1980) 699–718.
- [11] L.S.B. Leakey, A new Lower Pliocene fossil primate from Kenya, *Ann. Mag. Nat. Hist.* 13 (4) (1961) 689–697.
- [12] L.S.B. Leakey, Bone smushing by Late Miocene Hominidae, *Nature* 218 (1968) 528–530.
- [13] L.S.B. Leakey, Fort Ternan hominid, *Nature* 222 (1969) 1202.
- [14] K. Nagao, H. Nishido, T. Itaya, K. Ogata, K/Ar age determination method, *Bull. Hiruzen Res. Inst.* 9 (1984) 19–38 (in Japanese).
- [15] M. Pickford, Geology, palaeoenvironments and vertebrate faunas of the mid-Miocene Ngorora Formation, Kenya, in: W.W. Bishop (Ed.), *Geological Background to Fossil Man*, Scottish Academic Press, Edinburgh, 1978, pp. 237–262.
- [16] M. Pickford, Preliminary Miocene Mammalian Biostratigraphy for Western Kenya, *J. Hum. Evol.* 10 (1981) 73–97.
- [17] M. Pickford, Sequence and environments of the Lower and Middle Miocene hominoids of Western Kenya, in: R. Ciochon, R. Corruccini (Eds.), *New Interpretations of Ape and Human Ancestry*, Plenum Press, New York, 1983, pp. 421–439.
- [18] M. Pickford, *Kenyanthropus*: A review of its status based on newly discovered fossils from Kenya, in: P.V. Tobias (Ed.), *Hominid Evolution: Past, Present and Future*, Alan Liss, New York, 1985, pp. 107–112.
- [19] M. Pickford, Hominoids from the Miocene of East Africa and the phyletic position of *Kenyanthropus*, *Z. Morphol. Anthropol.* 76 (1986) 117–130.
- [20] M. Pickford, Cainozoic Palaeontological Sites of western Kenya, *Münch. Geowiss. Abh. A. Geol. Paläontol.* 8 (1986) 1–151.
- [21] M. Pickford, The geochronology of Miocene higher primate faunas of East Africa, in: J. Else, P. Lee (Eds.), *Primate Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986, pp. 19–45.
- [22] M. Pickford, Did *Kenyanthropus* utilise stones?, *Folia Primatol.* 47 (1986) 1–7.
- [23] M. Pickford, Dating of the Neogene Old World anthropoid fossil record: essential base for phylogenetic analysis, biogeography and palaeoecology, *Primatologie* 1 (1998) 27–92.
- [24] M. Pickford, J. Morales, Biostratigraphy and palaeobiogeography of East Africa and the Iberian Peninsula, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 112 (1994) 297–322.
- [25] M. Pickford, B. Senut, Geology and Palaeobiology of the Namib Desert, southwestern Africa, *Mem. Geol. Surv. Namibia* 18 (2000) 1–155.
- [26] D.R. Pilbeam, Notes on *Ramapithecus* the earliest known hominid, and *Dryopithecus*, *Am. J. Phys. Anthropol.* 25 (1966) 1–5.
- [27] D.R. Pilbeam, Man's earliest ancestors, *Sci. J.* 3 (1967) 47–53.
- [28] D.R. Pilbeam, The earliest hominids, *Nature* 219 (1968) 1335–1338.
- [29] J.C. Roddick, High precision intercalibration of  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  standards, *Geochim. Cosmochim. Acta* 47 (1983) 887–898.
- [30] Y. Sawada, M. Pickford, B. Senut, T. Itaya, M. Hyodo, T. Miura, C. Kashine, T. Chujo, H. Fujii, The age of *Orrorin tugenensis*, an early hominid from the Tugen Hills, Kenya, *C. R. Palevol* 1 (2002) 293–303.
- [31] S. Sen, Present state of magnetostratigraphic studies in the continental Neogene of Europe and Anatolia, in: R. Bernor, V. Fahlbusch, H. Mittmann (Eds.), *The Evolution of Western Eurasian Neogene Mammal Faunas*, Columbia University Press, New York, 1996, pp. 56–63.
- [32] B. Senut, Origins of hominids: From *Ramapithecus-Kenyanthropus* to *Orrorin*, in: *Paleoantropologia, Zona Arqueológica*, in: *Miscelánea en homenaje a Emiliano Aguirre*, vol. III, Museo Arqueológico Regional, Madrid, 2004, pp. 372–380.
- [33] P. Shipman, A. Walker, J.A.H. Van Couvering, P.J. Hooker, J.A. Miller, The Fort Ternan hominoid site, Kenya: Geology, Age, Taphonomy and Palaeoecology, *J. Hum. Evol.* 10 (1981) 49–72.
- [34] E.L. Simons, Late Miocene hominoid from Fort Ternan, Kenya, *Nature* 221 (1969) 448–451.
- [35] R. Steiger, E. Jäger, Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology, *Earth Planet. Sci. Lett.* 36 (1977) 359–362.
- [36] A. Walker, P. Andrews, Reconstruction of the dental arcades of *Ramapithecus wickeri*, *Nature* 244 (1973) 313–314.
- [37] W. Wei, Revised age calibration points for the geomagnetic polarity time scale, *Geophys. Res. Lett.* 22 (1995) 957–960.