

CBPF-NF-042/84

LA DATATION DES HOMINIDES FOSSILES:
PROBLEMES ET PERSPECTIVES

par

G. Poupeau^{1,2}, J. Danon¹ et A.K. Baksi³

¹Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CNPq/CBPF
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

²CNRS-ORSTOM, Paris, France

³Département de Géologie, Louisiana State University
Baton Rouge, Louisiana 70803-4101, U.S.A.

A paraître dans: Archéologie Africaine et Sciences de la Nature
Appliquées à l'Archéologie
(Symposium de Bordeaux, 25-30 Septembre 1983)

LA DATATION DES HOMINIDES FOSSILES: PROBLEMES ET PERSPECTIVES

G. Poupeau^{1,2}, J. Danon¹ et A.K. Baksi³

¹Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290 Rio de Janeiro, Brasil

²CNRS-ORSTOM, Paris, France

³Département de Géologie, Louisiana State University
Baton Rouge, Louisiana 70803-4101, U.S.A.

Août 1984

RESUME

La datation des Hominidés antérieurs à l'Homo Erectus a reposé jusqu'à présent sur la géochronologie isotopique de roches et de minéraux d'origine volcanique en relation stratigraphique avec des fossiles. Deux méthodes ont été largement utilisées, les datations par potassium-argon et par traces de fission de l'uranium.

La datation des matériaux volcaniques: coulées de laves, tephres, associés à des restes d'hominidés présente de nombreuses difficultés liées essentiellement à divers types de contamination et d'altération. Deux exemples pris dans le rift est-africain illustrent les problèmes liés à ces datations.

Des progrès récents dans les méthodes de datation pourraient contribuer d'une part à une meilleure utilisation des méthodes K-Ar et traces de fission pour les matériaux volcaniques. D'autre part, avec l'introduction de nouvelles méthodes de datation par thermoluminescence et résonance paramagnétique électronique, il semblerait possible de dater directement soit les ossements fossiles eux-mêmes, soit du matériel sédimentaire associé. Ceci ouvre des perspectives nouvelles en particulier pour tous les sites qui ne sont pas interstratifiés avec du matériel volcanique.

Mots-clés: Hominidés; Datations; Potassium-Argon; Traces de Fission; Résonance Paramagnétique Electronique.

1 INTRODUCTION

La modification sensible des climats terrestres depuis le Miocène, qui a abouti au fractionnement et à la disparition en de nombreux points de la terre des grandes forêts tropicales du tertiaire, s'est manifestée au niveau biologique par une accélération des processus de sélection et d'adaptation. C'est au cours de cette période que de profondes modifications se sont produites dans la super-famille des Hominoidea pour aboutir, vers 1,5 millions d'années (m.a.), au genre Homo. On dispose actuellement, pour reconstituer cette évolution, de plus de 2000 restes d'hominoides⁺ - souvent limités à quelques dents ou fragments osseux-, répartis sur quelque 51 sites en Afrique et en Eurasie (Behrensmeyer 1982).

Depuis une vingtaine d'années environ, l'habitude d'une pré-hension multidisciplinaire de ces sites s'est peu à peu instaurée (Johanson et Maitland 1981). Cette approche a produit une grande richesse d'informations - à partir de données floristiques, faunistiques et sédimentologiques - sur les paléoenvironnements dans lesquels les hominidés ont évolué. Cependant, leur datation précise, qui est fondamentale à divers points de vue (corrélations entre changements climatiques et variations de la biosphère; établissement pour une époque donnée, de la coexistence de différents groupes d'hominidés occupant diverses niches écologiques, etc...) reste souvent à établir. Dans un grand nombre de cas, les restes fossiles sont trouvés en surface c'est à dire dégagés par l'érosion et éventuellement transportés à une certaine distance de leur encaissant.

⁺ pongidés et hominidae (humains et leurs plus proches fossiles) de grande taille (Behrensmeyer 1982).

A moins de pouvoir dater directement les os, ce qui aujourd'hui encore demeure une gageure (malgré les suggestions de Ikeya et Miki 1980, voir plus bas), l'âge de tels fossiles ne peut être déterminé que si l'on peut identifier leur formation d'origine d'après les fragments de matrice qui adhèrent encore souvent à leur surface. Même dans ce cas, l'endroit exact d'où ils proviennent ne peut être connu. Il en est de même des restes d'animaux et de végétaux trouvés à leur voisinage, et qui ne doivent être utilisés comme éléments de datation qu'avec les plus extrêmes précautions. Lorsque l'on connaît avec certitude la couche géologique d'origine de restes fossiles d'hominidés, ou mieux, lorsque ceux-ci sont trouvés in situ, en stratigraphie, on dispose fondamentalement de deux moyens d'établir leur âge, les corrélations faunistiques et les datations radiométriques. Lorsque les couches "datées" ne sont pas celles où se trouvent les restes d'hominidés, ce qui est presque toujours le cas pour les datations radiométriques, la magnétostratigraphie peut éventuellement préciser dans quelle période de polarité normale ou inverse ces restes sont situés.

Les datations faunistiques permettent une datation numérique (c'est à dire exprimée en années) parce que l'âge des espèces animales trouvées en présence de reste d'hominidés est lui-même calibré à partir de séquences stratigraphiques bien datées radiométriquement. L'extension temporelle d'une espèce ou d'un groupe d'espèces étant souvent peu ou mal connu d'une part et leur existence en deux ou plusieurs points d'un continent n'étant pas nécessairement synchrone d'autre part, ces datations doivent être utilisées avec beaucoup de prudence. Les datations radiométriques, de leur côté, donnent directement un âge exprimé en années. Mais les méthodes actuellement en usage ne s'appliquent qu'aux matériaux volcaniques et sont sujettes à produire des âges géologiquement non significatifs de

par la nature même des roches disponibles.

La datation numérique d'un site renfermant des restes d'hominidés exige donc un ensemble de conditions très spécifiques. C'est ce qui explique que sur les 51 sites répertoriés par Berhensmeyer, seuls 16 ont pu être datés radiométriquement (table 1). Il s'agit en très grande majorité de sites du rift est africain (12 sites sur un total de 17), où l'on bénéficie de conditions particulièrement favorables avec intercalations nombreuses d'unités volcaniques dans des séries sédimentaires.

Malgré les progrès réalisés depuis la première datation numérique d'un hominidé, celle du Zinjanthropus, découvert par Mary Leakey en 1959 à Olduvai et daté par Evernden et Curtis en 1960, des problèmes considérables subsistent encore pour la datation de la majorité des sites. (On doit de plus se souvenir que l'âge de dépôt d'une couche sédimentaire ne représente en toute rigueur que l'âge minimum des fossiles qu'elle contient). Les problèmes liés à ces datations ont été discutés à plusieurs reprises (cf. Calibration of Hominoid Evolution, 1972; Geological Background to Fossil Man, 1978). Nous présentons ci-dessous un résumé de ces difficultés, illustrées par deux exemples pris en Afrique de l'Est, et nous présentons quelques développements récents en géochronologie du quaternaire qui seraient susceptibles d'applications en paléanthropologie.

2 DATATIONS PAR POTASSIUM-ARGON

Le potassium 40 se décompose par radioactivité β en argon 40. La datation d'une roche volcanique par la méthode K-Ar, ou par la méthode du $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$, qui en dérive, (Faure 1977), repose sur les hypothèses suivantes:

- 1 - au moment de son épanchement, le matériel volcanique perd tout l'argon 40 qu'il renfermait en profondeur
- 2 - Dès son refroidissement, la roche se comporte en système fermé à la fois pour l'argon et le potassium jusqu'au moment de la mesure en laboratoire, sauf à l'égard d'une introduction éventuelle d'argon atmosphérique.

Dans ces conditions, la quantité de ^{40}Ar rapportée au potassium de la roche permet de calculer l'âge t de sa mise en place selon la relation:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{40}\text{K}} \frac{\lambda}{\lambda_e} + 1 \right) \quad (1)$$

où λ et λ_e sont respectivement les constantes de désintégration de ^{40}K totale et de production de ^{40}Ar (Faure 1977). Le terme $^{40}\text{Ar}^*$ représente la fraction d'argon 40 de la roche d'origine radiogénique produite in situ depuis l'épanchement du matériel volcanique.

La teneur en potassium de la roche est mesurée par voie chimique ou physique (méthode K-Ar) ou par spectrométrie de masse (méthode ^{39}Ar - ^{40}Ar , avec une forme modifiée de l'équation 1). L'argon 40 est toujours mesuré en spectrométrie de masse. Il ne renferme, dans le cas idéal, que deux composants, l'un radiogénique, $^{40}\text{Ar}^*$ et l'autre d'origine atmosphérique, ou du moins ayant la composition isotopique de l'argon atmosphérique. On déduit ce dernier de l'argon total mesuré, à partir de la valeur du rapport $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ atmosphérique de 295,5 (Dalrymple et Lanphere 1969).

Les limitations de la méthode de datation par K-Ar des roches volcaniques proviennent tout d'abord de l'âge de l'échantillon

* C'est à dire sans perte ni gain en potassium et argon 40, autre la production de ce dernier par la désintégration radioactive du potassium 40.

lui-même, de sa teneur en potassium et de la contamination atmosphérique. Dans leur très grande majorité, les sites à hominidés datés par le K-Ar se situent dans le rift est-africain. Les teneurs typiques en potassium de cette région permettent de descendre la limite inférieure des datations par K-Ar jusque vers 100 000 à 500 000 ans, avec une précision analytique (2σ) de l'ordre de 1% (Fitch et al. 1978).

Les sources d'erreur dans l'interprétation des dates calculées selon l'équation (1) ou l'expression équivalente dans la technique ^{39}Ar - ^{40}Ar proviennent de différentes sources: présence d'argon hérité de la profondeur (Faillite de l'hypothèse 1 ci-dessus), ou de phénomènes d'altération postérieurs à l'éruption entraînant des migrations de ^{40}K ou/et ^{40}Ar (Faillite de l'hypothèse 2). Une cause supplémentaire de problèmes dans le cas des tephres est due à d'éventuels remaniements post-éruptifs au cours desquels le matériel volcanique peut se trouver mélangé à des minéraux détritiques de diverses origines et parfois d'âge beaucoup plus ancien.

- Laves massives

L'âge K-Ar d'une roche volcanique ne correspond pas toujours à celui de son éruption. Il peut être, selon les cas, soit plus jeune, soit plus ancien. Dans une lave massive, des âges K-Ar trop élevés par rapport à l'âge réel de mise en place proviennent de la présence d'argon 40 "en excès", c'est à dire non totalement éliminé au moment de l'éruption. L'origine de cet excès est généralement attribuable soit à la présence de xénolithes et de xénocristaux (fragments de roches arrachés par le magma volcanique aux parois des conduits lors de son cheminement vers la surface), soit à la présence de cristaux du magma lui-même, formés en profondeur. Il

apparaît en effet que le matériel bien cristallisé pourrait ne perdre qu'une fraction de son argon 40.

Xénolithes et xénocristaux possèdent en général un âge beaucoup plus élevé que celui de la lave elle-même. Si ces matériaux sont plus riches en potassium que la lave, ils peuvent donc renfermer une quantité considérable d'argon 40 radiogénique (c'est à dire produit par désintégration in situ du potassium 40). De leur côté, les cristaux formés en profondeur dans le magma lui-même, sous une pression élevée, ont pu incorporer dans leur réseau cristallin une partie de l'argon 40 ambiant. Il est donc important, avant toute tentative de datation par K-Ar, de procéder à un examen pétrographique préliminaire détaillé des laves. Là où xénolithes et cristaux pré-éruptifs sont décelés, on devra s'efforcer par une technique de sélection appropriée (séparation par densité, par granulométrie, etc...), d'extraire à partir d'un broyat de la roche, les composants éruptifs proprement dits, de leurs précurseurs et des matériaux étrangers. Les laves où l'analyse pétrographique ne révèle apparemment aucun composant étranger, ne sont cependant pas à l'abri de problèmes. On connaît ainsi des cas de coulées composées uniquement de cristaux très fins post-éruptifs où cependant l'"âge" K-Ar est très largement supérieur à l'âge réel de l'extrusion. On doit dans ce cas, surtout fréquent dans les laves âgées de moins d'un million d'années, supposer que les porteurs d'argon 40 en excès sont de dimensions submicroscopiques.

Postérieurement à leur mise en place, les roches volcaniques peuvent être affectées de phénomènes d'altération secondaires. C'est ainsi que de nombreux basaltes du Gregory Rift en Tanzanie sont zéolitisés et fournissent des âges trop anciens. Pour un même basalte, on constate que les "âges" K-Ar sont souvent d'autant plus an-

ciens que la zéolitisation est localement dans la coulée plus importante, sans toutefois que cette corrélation soit suffisamment systématique pour permettre des corrections. Les modifications postérieures à la mise en place incluent encore éventuellement des altérations de type deutérique, ou liées à des cycles postérieurs de magmatisme ou d'activité métasomatique, divers degrés de dévitrification des parties vitreuses intergranulaires, etc.... Les effets de ces altérations sur l'âge K-Ar sont variables. Il peuvent agir dans la direction d'un rajeunissement, dans le cas de la dévitrification par exemple, qui entraîne un départ d'argon 40, ou d'un vieillissement, et il est souvent très difficile d'évaluer le résultat global des modifications post-éruptives sur l'âge K-Ar d'une roche. Ainsi, les possibilités d'erreurs dans la datation K-Ar sont très nombreuses et de nature extrêmement variables. On doit donc, pour dater une coulée, procéder à des datations multiples, sur différents échantillons représentant si possible plus d'un facies pétrographique et pour chacun de ceux-ci, à partir de différentes fractions minérales. C'est uniquement à partir de la consistence interne de ces résultats que l'on peut éventuellement déduire un âge de mise en place (voir par exemple Walter et Aronson 1982).

- Tephras

On appelle tephra* l'ensemble des fragments projetés dans l'atmosphère lors d'une éruption volcanique (Kittleman 1979). Un tephra est constitué d'un mélange de fragments vitreux, composant principal, avec des minéraux du magma lui-même et des minéraux et blocs arrachés aux parois de la cheminée d'alimentation du volcan. L'ensemble des matériaux expulsés par un volcan lors d'une

* du grec τέφρα , cendre.

phase explosive retombe sur le sol en une couche plus ou moins étendue et d'épaisseur variable selon la masse de matière éjectée, la morphologie locale, la distance au volcan, la nature de l'éruption, etc... En principe, il serait possible de dater un tephra par K-Ar à partir des minéraux ou des esquilles de verre qu'il renferme.

L'expérience montre qu'en général les fragments de verre ne donnent pas d'âges significatifs. Le plus souvent, leur âge K-Ar est beaucoup plus élevé que celui de l'éruption. Les esquilles de verre des tephras résultent en effet d'une "trempe" très rapide des gouttelettes de magma éjectées dans l'atmosphère, et on suppose que la rapidité du phénomène empêche le dégazage total de l'argon 40 qu'elles renfermaient. Par ailleurs, dès leur déposition, les verres se modifient par une hydratation progressive, qui peut se prolonger pendant plusieurs millions d'années. Ce processus s'accompagne d'une perte en sodium compensée par un gain en potassium, dont le résultat tend à "rajeunir" les âges K-Ar. En outre, l'hydratation des verres des tephras pourrait induire des pertes en argon, qui se prolongeraient après la saturation en eau des verres. Ces gains en potassium et pertes en argon sont considérés comme responsables des nombreux âges K-Ar "trop jeunes" de tephras reportés dans la littérature. Bien que l'on connaisse des mesures d'âges K-Ar sur des esquilles de verre de tephras qui soient concordants avec l'âge réel de l'éruption lorsque celui-ci est connu par ailleurs, J. Obradovitch (in Naeser et al. 1981) estime que toute datation sur ce type de matériel doit être considérée a priori comme douteuse.

Selon J. Obradovitch, l'argon 40 en excès est relativement rare dans les minéraux volcaniques associés à un tephra et il sem-

blerait donc plus avantageux de dater ce type de formation à partir de sa fraction cristalline. Dans ce cas, on doit être capable de reconnaître les minéraux propres au tephra des minéraux d'origine étrangère (xénocristaux). Ceci est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit de tephras remaniés, c'est à dire ayant subi postérieurement à leur dépôt un transport par ruissellement ou fluviatile, avant leur déposition finale. La contamination d'un tephra par du matériel étranger peut donc se produire soit (i) au cours du processus éruptif lui-même et comprendre des minéraux et blocs de matériel volcanique ancien et/ou d'origine crustale, éjectés avec les cendres, (ii) au moment même du dépôt, en particulier s'il s'agit d'un processus violent (nuée ardente) ou (iii) postérieurement à celui-ci pour les tephras remaniés.

Parmi les minéraux communs des tephras utilisés en datation par K-Ar, il n'est malheureusement pas possible de distinguer les contaminations lorsqu'il s'agit de minéraux sombres (biotite, hornblende). Parmi les minéraux clairs, il est possible d'isoler, lorsqu'elles sont présentes, les sanidines volcaniques des autres feldspaths (microcline par exemple) à l'aide un stéréomicroscope, lorsque les cristaux sont de dimensions suffisantes. Même ainsi, il peut exister, au sein de tephras remaniés, des sanidines provenant de différentes éruptions et qu'il n'est pas toujours facile de distinguer.

Les problèmes d'échantillonnage se trouvent, dans une certaine mesure, minimisés, lorsqu'on dispose de blocs cimentés, ou ponces, les minéraux d'un même bloc étant supposés provenir de la même éruption. Toutefois, les ponces volcaniques sont très poreuses, avec de nombreuses communications entre tubules dans les parties vitreuses. Ce réseau de cavités facilite l'introduction de particules fines et les cas d'âges K-Ar trop "anciens" sur des minéraux extraits

de ponces ne sont pas exceptionnels.

Comme dans les cas des laves, il n'existe donc pas de "re^ucette" pour produire des âges significatifs. Le plus grand soin doit être apporté dès le travail sur le terrain, où l'on s'efforcera de prélever les roches les moins altérées possibles, ce qui n'est pas toujours facile et de multiplier les échantillonnages pour une même unité volcanique. Un soin particulier devra être apporté au laboratoire dans l'analyse pétrographique afin de défini^r la meilleure stratégie possible dans la datation. Actuellement, la datation par K-Ar apparait plus comme un "art" que comme une technique bien établie, où l'expérience et le soin de l'expérimen^tateur entrent pour une bonne part dans la qualité des résultats produits. Plusieurs auteurs ont bien montré cet aspect de la problématique des datations des roches volcaniques quaternaires (Fitch 1978, Fitch et al 1978, Bishop 1977, Naeser et al. 1981, Walter et Aronson 1982, etc.).

- Deux tendances nouvelles dans la datation par K-Ar

Deux voies ouvertes au cours des dernières années seraient susceptibles de faciliter la datation des roches volcaniques récentes. Dans la première de ces méthodes, développée par O.A.Schaeffer* pour la datation des basaltes lunaires, on utilise un spectromètre de masse à source laser. L'échantillon à dater est préparé sous la forme d'une section polie, que l'on expose à un rayon laser pulsé. Le rayonnement laser provoque localement la fusion et la volatilisation de la roche et l'argon ainsi libéré est immédiatement analysé dans un spectromètre de masse. L'avantage de cette méthode est que

* voir O.A.Schaeffer, Nuclear and Chemical Dating Techniques, American Chemical Society Symposium 176, Washington D.C., p. 139-148, 1982.

le diamètre de la zone volatilisée peut être inférieur à ~ 20 microns, c'est à dire qu'il est possible de dater individuellement différents cristaux d'une phase minérale déterminée, ou dans le cas d'une roche finement grenue, une zone paraissant présenter un moindre degré d'altération, etc... . En effet, un contrôle optique (microscope) permet de sélectionner sur la section polie la zone d'impact du faisceau laser. Cette technique, qui nécessite une irradiation préalable en réacteur, fournit donc des âges de type $^{39}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$. Relativement simple, elle permet en principe d'obtenir rapidement une série d'âges sur diverses phases minérales ou en divers points de la matrice finement grenue d'une roche volcanique. Hall et York (1978) ont ainsi démontré qu'il était possible de dater des basaltes très jeunes ($\sim 40\ 000$ ans) renfermant de l'argon en excès. L'apparition récente de spectromètres de masse à très haute sensibilité pourrait permettre une plus large extension de cette méthode (qui utilise une quantité d'échantillon très inférieure à celles des techniques classiques) aux roches volcaniques quaternaires.

Une autre direction vient d'être ouverte par G.J. Wasserburg et coll. Elle consiste paradoxalement à profiter de la présence dans certaines roches volcaniques de xénolithes porteurs d'argon 40 en excès! L'hypothèse sur laquelle repose cette approche est que lors d'une éruption volcanique, ces xénolithes perdent une bonne partie de leur argon 40, celui qui diffuse le plus facilement vers l'extérieur sous l'effet d'un réchauffement.

En particulier, l'argon libérable à des températures inférieures à 900°C devrait être totalement dégazé dans les xénolithes (Gillespie et al. 1982). Après l'éruption, la désintégration du ^{40}K produit de l'argon 40 et la fraction de celui-ci qui va occuper les sites ainsi libérés peut en principe être utilisée en datation par $^{39}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$. C'est ainsi que Gillespie et al. (1983, 1984) ont montré que lorsqu'on dispose de xénolithes suffisamment riches en potassium (granites par exemple), on pouvait dater avec une très bonne précision des laves âgées d'à peine $100\ 000$ ans.

Les potentialités de ces deux approches restent encore en bonne partie à explorer, mais les premiers résultats obtenus en font des méthodes très prometteuses pour l'avenir. En ce qui concerne la seconde, on ne peut que regretter la trop grande rareté de xénolithes favorables à son utilisation (c'est à dire suffisamment riches en potassium).

3 DATATIONS PAR TRACES DE FISSION DE L'URANIUM

L'uranium 238 est un nuclide instable qui décroît selon deux cheminements différents, soit par radioactivité α (qui aboutit, après une série de radioisotopes intermédiaires au plomb 206), soit par fission spontanée. Pour chaque atome d'uranium 238 qui décroît par fission, environ deux millions décroissent par radioactivité α . Cependant, pour des raisons d'ordre pratique, seule la fission spontanée donne lieu à une méthode de datation pour le quaternaire (Poupeau 1979).

La fission d'un atome d'uranium donne deux noyaux-fils, ou fragments de fission, fortement ionisés et animés d'une énergie cinétique suffisante pour s'éloigner l'un de l'autre selon des directions opposées. Le parcours total d'un fragment varie, selon les minéraux, de $\approx 4\mu\text{m}$ à $8\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m} = 10^{-3}\text{ mm}$). Le long de ce parcours, les fragments de fission produisent par ionisation une zone de dommages dans le minéral (ou le verre s'il s'agit par exemple d'une obsidienne), ou trace "latente", en général suffisamment stable pour être utilisée en géochronologie. Les traces latentes qui intersectent une surface externe d'un minéral ou d'un fragment vitreux (surface obtenue par exemple par polissage) peuvent être "révélées" par une attaque chimique qui agrandit leur diamètre jusqu'à les rendre observables avec un simple microscope optique. La seule source de traces dans les minéraux terrestres est due à la fission spontanée de ^{238}U . Par conséquent, le nombre de traces "fossiles" que l'on peut observer à la surface d'un minéral est fonction du temps depuis lequel les traces ont commencé à être enregistrées, ainsi que de sa teneur en uranium. Afin de tenir compte de ce dernier facteur, on procède à une irradiation par des neutrons

thermiques dans un réacteur nucléaire, qui induit la fission de l'uranium 235. L'âge t de la phase minérale datée est alors exprimé selon:

$$t = k \frac{N_f}{N_i} \phi \quad (2)$$

où N_f et N_i sont respectivement le nombre de traces fossiles de ^{238}U et de traces induites de ^{235}U pour une même surface de comptage, ϕ la dose de neutrons (en neutrons/cm²) utilisée pour la fission de l'uranium 235 et k un paramètre ajustable qui tient compte du rapport isotopique naturel $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, de divers paramètres liés aux conditions d'irradiation et de la constante de désintégration par fission spontanée de ^{238}U (pour une discussion de ces paramètres, voir par ex. Poupeau 1981).

Le problème majeur rencontré dans la datation par traces de fission de roches volcaniques quaternaires est de nature statistique, en raison du faible nombre d'évènements (c'est à dire de traces) à compter (Poupeau 1979). En effet, une teneur de 1 ppm* d'uranium produit seulement quelques traces par cm² et par 1000 ans. Dans ces conditions, il n'est possible de dater, pour des âges supérieurs à environ 10 000 ans, que des verres volcaniques à haute teneur en uranium, comme les obsidiennes, qui renferment couramment de ~ 4 à ~ 15 ppm d'uranium. La grande homogénéité de ces roches vitreuses permet en effet d'obtenir des surfaces de polissage suffisamment grandes pour qu'il soit possible de compter un nombre statistiquement significatif de traces fossiles pour une datation. A partir d'échantillons âgés d'au moins quelques centaines de milliers d'années, on peut ajouter à ces verres l'utilisation de minéraux

* ppm = part par million. 1 ppm d'uranium dans une roche ou un minéral équivaut à 1 mg d'uranium pour 10⁶ mg, ou 1 kg de cette roche ou de ce minéral.

riches en uranium, comme sphènes et zircons. Ainsi, un zircon volcanique typique offrant une surface de comptage de 100x30 microns et renfermant 100 ppm d'uranium présenterait, s'il était âgé de 1 million d'années, environ 15 traces de fission fossiles. Les zircons des tephtras du rift est-africain renferment de ~50 ppm à 300 ppm d'uranium et par conséquent ne peuvent guère être utilisés que pour des roches âgées de plus d'un million d'années.

- Datation des laves volcaniques

Jusqu'à présent aucune lave volcanique associée à des hominidés fossiles n'a encore été datée par la méthode des traces de fission. Cela tient à la fois à la rareté des phases minérales convenables et à celle des roches vitreuses.

Des minéraux de type zircon et sphène ne sont présents que dans les roches volcaniques les plus "différenciées". Ils sont totalement absents des basaltes et des roches qui en sont génétiquement proches. Là où ces minéraux sont présents, leur abondance est en général trop faible pour qu'il soit possible de les extraire dans des conditions satisfaisantes.

Les laves continentales vitreuses sont les obsidiennes. Bien que l'on connaisse certaines coulées d'obsidienne datées par traces de fission dans le rift est-africain (p.ex. Ethiopie), aucune à notre connaissance n'est liée à un contexte anthropologique. Par ailleurs, les traces de fission ont déjà été utilisées pour la datation d'artefacts d'obsidienne récents (Fleischer et al. 1965a, Wagner 1978).

- Tephtras

La méthode des traces de fission n'a été appliquée que tardivement à la datation des tephtras liés aux sites à Hominidés. A l'exception d'une première tentative sur des esquilles de verre (Fleischer et al. 1965b), toutes les mesures actuellement publiées ont été obtenues sur des zircons. Ainsi, on possède des bonnes data-

tions sur quelques tuffs volcaniques du Kenya (Hurford 1974, Gleadow 1980), d'Ethiopie (Aronson et al. 1977, 1980, Walter 1980) et des zircons volcaniques de la formation de Sangiran à Java (Nishimura 1981, Suzuki et al. 1984). Ces datations concernent des sites d'âges compris entre 0,5 m.a. et 4 m.a.

Un avantage important de la méthode des traces sur celle du K-Ar est que l'on date individuellement chaque cristal de zircon. Il est donc en principe possible, si l'on isole une population de zircons d'un tuff donné, de déceler si tous ces cristaux ont été émis lors d'une seule éruption (ou d'une série d'éruptions d'âges suffisamment proches pour ne pas être discernables dans la limite de précision des datations), ou proviennent de sources différentes. L'utilisation de la méthode des traces s'avère donc particulièrement importante lorsqu'il s'agit de dater des tuffs remaniés pouvant renfermer aussi bien des minéraux de diverses éruptions d'âges différents que des cristaux détritiques anciens provenant de l'altération des roches crustales qui bordent le rift (Afrique de l'est) ou forment le soubassement local (Java). Ainsi, parmi les 22 zircons du tuff (tephra) BKT-2 individuellement datés par Naeser et Walter (Aronson et al. 1980, Walker 1980) semblent exister deux populations présentant respectivement un âge moyen de $2,44 \pm 0,57$ m.a. et $5,47 \pm 0,21$ m.a. (Fig. 1). Toutefois, le tuff BKT-2 étant apparemment un dépôt volcanique primaire non remanié, Walter (1980) considère que dans ce cas, il serait plus approprié de considérer qu'il s'agit d'une seule population d'âge moyen $2,7 \pm 0,2$ m.a. Dans la même région, ces auteurs ont daté un sable enrichi en matériaux volcaniques qui présente deux et peut être trois population, d'âges parmi les zircons.

L'âge K-Ar des sanidines de ce sable est d'environ 8 m.a. ce qui suggère une source commune pour ces feldspaths et les zircons présentant les âges traces de fission les plus anciens, entre 7 et 9 m.a. (Fig.1). Le groupe des zircons le plus récents, avec un âge moyen de 4.0 ± 0.4 m.a. représenterait une population unique et fournirait donc un âge maximum pour ce niveau stratigraphique en raison de son caractère détritique.

Une difficulté majeure dans l'identification de populations d'âges différents de zircons dans les tephres vient du faible nombre de traces fossiles de ^{238}U révélables dans les cristaux. Ainsi dans les zircons du tuff BKT-2, le nombre de traces fossiles par cristal variait entre 4 et 24 (Walter 1980). Dans ces conditions, la précision sur un âge individuel oscille entre $\pm 20\%$ et $\pm 50\%$. De plus, dans la technique utilisée, les zircons les plus pauvres en uranium tendent à donner des âges inférieurs à l'âge TF réel (voir discussion dans Walter 1980). Comme pour les datations par K-Ar donc, les plus grandes précautions doivent être prises, depuis la sélection sur l'affleurement, pour l'interprétation des âges traces de fission des zircons. En particulier, l'analyse pétrographique et sédimentologique des échantillons est indispensable, afin d'établir avec la plus grande certitude si le niveau daté est bien un dépôt volcanique primaire ou s'il s'agit d'un dépôt remanié. Dans le premier cas en effet, l'âge traces de fission des zircons est bien celui du dépôt, mais dans le second il n'en constitue plus qu'une limite supérieure.

- Vers une datation des esquilles de verre?

Dans un article récent (Naeser et al. 1981) il était remarqué que la contamination d'un tephra remanié par des verres d'une

autre éruption n'était en général pas un problème, puisque les cen-
dres volcaniques sont très essentiellement constituées d'esquilles
vitreuses. Il semblerait donc intéressant de dater les tephras en
relation avec des hominidés fossiles à partir des verres. Les ver-
res volcaniques enregistrent bien les traces de fission et sont en
principe utilisables en géochronologie, si l'on tient compte d'un
effacement partiel des traces de fission à la température ambiante
(Storzer et Wagner 1969, Storzer et Poupeau 1973). Une difficulté
supplémentaire dans le cas des tephras (contrairement aux obsidiennes
par exemple) tient aux dimensions des esquilles (généralement < 200
microns) et à leur géométrie (présence de bulles, de canaux, etc...),
qui limite sérieusement la surface disponible de comptage. Naeser et
al. (1980) et Poupeau (1981) ont montré qu'il était toutefois possi-
ble d'obtenir des âges significatifs sur des verres de tephras
de plus de ~500 000 ans, même lorsque l'hydratation augmente sensi-
blement le taux d'effacement des traces de fission fossiles (Poupeau
1981). Il y aurait donc, pour les tephras associés aux ho-
minidés, la possibilité de dater par traces de fission à la fois
les zircons et les esquilles de verres, lorsque ces dernières ne sont
affectées d'aucune dévitrification.

Les problèmes liés à la datation des tephras par traces de
fission ont été discutés entre autres par Westgate et Briggs (1980),
Naeser et al. (1980, 1981) et Poupeau (1981).

Ce rapide survol des méthodes actuellement utilisées pour
la datation des hominidés montre bien la difficulté de ces mesures
et de leur interprétation, comme l'illustrent les deux exemples
commentés ci-dessous.

4 DEUX EXEMPLES DE DATATIONS CONTROVERSEES

Ces deux exemples, pris en Afrique de l'est, concernent respectivement la datation d'un tephra volcanique du nord du Kenya, le tuff KBS et celle d'une coulée du basalte Kadada Moumou en Ethiopie. Ils montrent à quel point même des spécialistes chevronnés peuvent être conduits à des interprétations erronées.

- La controverse du tuff KBS (Fig. 2)

Le tuff volcanique KBS est situé à l'est du lac Turkana, dans la formation Koobi Fora. La figure 3 montre la position relative de quelques tuffs volcaniques majeurs intercalés dans cette série, ainsi que celles de quelques hominidés importants. Le crâne en position stratigraphique la plus basse, l'échantillon 1470, découvert en 1972, possède des caractères suffisamment modernes pour son attribution au genre Homo. Sa position dans la série indique qu'il avait précédé dans le temps des formes apparemment moins évoluées, comme l'Australopithecus Boisei. Une première datation du tuff KBS en 1970, à 2,6 m.a., faisait de ce fossile de très loin le plus ancien ancêtre du genre Homo. Les conséquences anthropologiques de cette datation ne satisfaisaient apparemment ni les paléontologistes ni les archéologues, qui entamèrent rapidement une controverse qui ne devait s'éteindre (provisoirement?) qu'une dizaine d'années plus tard, après de nombreux efforts pour établir sur une base ferme l'âge du tuff KBS.

Le tuff KBS est constitué d'un matériel volcanique (tephra) remanié et déposé par une rivière importante à l'entrée du lac Turkana. De nombreuses évidences laissent penser que le dépôt final du tuff a suivi de très peu son éruption. Une tentative préliminaire de datation par K-Ar de ce tuff, en 1959, révéla la présence de

contaminants anciens, produisant des âges supérieurs à 200 m.a. Les datations ultérieures ont donc toutes été menées à partir de minéraux et de verres extraits de blocs de ponce, afin de limiter au maximum les problèmes de contamination. La première mesure d'âge ainsi obtenue par Fitch et Miller (1970) par la technique alors nouvelle du $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$, s'élevait à $2,61 \pm 0,26$ m.a. L'attribution d'un âge aussi ancien s'est trouvée une première fois contestée par des paléontologistes, lors d'un Symposium tenu en 1973 à Nairobi. En effet, les faunes de grands vertébrés (en particulier les éléphants et les cochons, espèces caractérisées à l'époque par une évolution rapide) des niveaux stratigraphiques inférieurs au tuff KBS à Koobi Fora étaient caractéristiques d'ensembles bien datés entre 1,75 m.a. et moins de 2,6 m.a. dans les formations proches de la vallée de l'Omo (au Sud de l'Ethiopie) ou des gorges d'Olduvai en Tanzanie. D'autre part, les mesures magnétostratigraphiques de Brock et Isaac (1974) semblaient favoriser, pour le tuff KBS, un âge soit proche de 2,48 m.a., soit compris entre 1,67 m.a. et 1,87 m.a. Une nouvelle série de datations par $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$, de Fitch et al. (1974) devait produire des âges très dispersés, entre $0,52 \pm 0,33$ m.a. et $2,64 \pm 0,29$ m.a. Les âges les plus jeunes furent interprétés comme une conséquence de pertes en argon, alors que l'âge le plus ancien était soupçonné d'être "trop" élevé en raison de contaminations (Fitch et al. 1976). De nouvelles mesures par le même groupe amenèrent à une révision de l'âge du tuff KBS à $2,42 \pm 0,01$ m.a. (Fitch et al. 1976), les âges plus récents à nouveau mesurés (jusque vers 1,7, voire 1,07 m.a.) étant soupçonnés "d'overprinting", par des événements plus récents (altération, contaminations). Cet âge de 2,42 m.a. s'est trouvé la même année apparemment confirmé par une première datation par traces de fission de zircons, à $2,44 \pm 0,08$ m.a. (Hurford et al. 1976).

Toutefois, une contradiction était apparue l'année précédente dans l'évaluation de l'âge radiométrique du tuff KBS, avec la publication de résultats obtenus dans un autre laboratoire par la méthode K-Ar conventionnelle. Curtis et al. (1975) avaient en effet mesuré à la fois sur les verres et les sanidines de plusieurs localités provenant de tuffs cartographiés comme appartenant au tuff KBS, des âges de $1,82 \pm 0,04$ m.a. et $1,60 \pm 0,05$ m.a. Selon ces auteurs, la concordance des âges entre verres et sanidines, milieux aux propriétés physico-chimiques très différentes, constituait une bonne évidence qu'aucun phénomène tardif n'avait altéré le chronomètre K-Ar. Ils rejetèrent donc l'hypothèse "d'overprinting" de Fitch et al. et considérèrent leurs âges comme celui de l'éruption du tuff KBS. A nouveau, des paléontologistes (White et Harris 1977) soulignèrent la contradiction entre les âges des faunes de suidés d'Olduvai et de Koobi Fora et suggérèrent que l'âge du tuff KBS soit de l'ordre de 1,8 m.a., en accord avec Curtis et al., ou que l'âge de la série d'Olduvai, bien datée toutefois, soit à "vieillir" de 0,5 m.a. Ils soulignent la nécessité d'une révision de l'ensemble de ces âges pour une interprétation correcte des processus évolutifs en Afrique Orientale.

L'année 1980 devait apporter une série de réponses concordantes. A partir d'une nouvelle série d'échantillonnages, McDougall et al. obtenaient, sur des phénocristaux d'anorthoclases extraites de 13 échantillons différents de ponces du tuff KBS, une série d'âges concordants K-Ar présentant une moyenne de $1,89 \pm 0,01$ m.a. Ces résultats étaient en excellent accord avec ceux obtenus par Drake et al. (1980), également par K-Ar, cette fois sur sanidines et verres, concordants entre eux à $1,8 \pm 0,1$ m.a. De son côté, Gleadow (1980) obtenait sur des zircons extraits des mêmes ponces que

celles datées par McDougall et al. un âge traces de fission de $1.87 \pm 0,04$ m.a. Enfin en 1981, McDougall, reprenant la méthode $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ sur des phénocristaux d'anorthoclases extraits de trois échantillons de ponces, obtenait des âges concordants à $1,88 \pm 0,02$ m.a.

Un âge de l'ordre de 1,8 à 1,9 m.a. pour le tuff KBS semble maintenant être généralement accepté. C'est en effet celui pour lequel l'ensemble des résultats géochronologiques, géochimiques, paléomagnétiques, paléontologiques et anthropologiques, est le plus consistant. Les "âges" plus anciens produits par la méthode $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ ont été interprétés par les auteurs récents comme des artefacts de laboratoire (voir p.ex. Curtis et al. 1975, McDougall 1981) ou des effets de contamination par du matériel du socle. En effet, Fitch et Miller avaient obtenu en 1970 un âge de 200m.a. et en 1976 des âges de 8,4 m.a. et 17,5 m.a. et Curtis et al. en 1975, de 2,01 à 6,9 m.a.; tous ces âges, obtenus par K-Ar sur des différentes phases minérales avaient été interprétés comme le résultat de contaminations détritiques. De son côté, Gleadow (1980) a montré que le tuff KBS renferme des apatites, sphènes et zircons de socle dont les âges traces de fission pouvaient atteindre 500 m.a., ainsi que des zircons et apatites volcaniques de plus de 20 m.a.

De son côté, l'âge traces de fission de 2,4 m.a. aurait résulté des difficultés inhérentes à la datation par traces de fission d'échantillons très jeunes.

Le contexte géologique du tuff KBS est décrit dans White et al. (1981); Hay (1980) et Taieb et Poupeau (1980) ont commenté ailleurs les différents aspects de cette longue controverse.

- Quel âge a donc Lucy? (Fig. 4)

Ce second exemple est pris en Ethiopie. Il concerne également un fossile célèbre, Lucy, seul hominidé connu par un squelette presque complet, et le site 333 où ont été découverts les restes associés d'au moins 13 individus ("First Family"). Ces fossiles ont été trouvés dans la partie basse de la vallée de l'Awash, dans la région de Hadar. Leur position stratigraphique est donnée schématiquement

dans la figure 5, où ils apparaissent compris entre deux unités volcaniques, le tuff BKT-2 déjà cité plus haut (voir Fig. 1) et le Kadada Moumou Basalt (KMB). De plus, sous ce basalte se trouvent des fragments de mâchoire et une articulation du genou d'un hominidé, caractéristique d'un individu ayant une stature verticale. La datation du basalte KMB et du tuff BKT-2 permet donc en principe de donner une limite supérieure de l'âge de Lucy et de la "First Family", et un âge minimum de l'acquisition de la marche verticale.

Une première datation de la série de Hadar fixait l'âge du tuff BKT-2 à 2,6 m.a. ($2,63 \pm 0,04$ m.a. par K-Ar sur feldspaths de type anorthoclase et $2,58 \pm 0,23$ m.a. par traces de fission sur zircons) et celui du basalte KBM à 3.0 ± 0.06 m.a. (Aronson et al. 1977). Ces derniers âges ont été obtenus par K-Ar sur une variété pétrographique de couleur sombre du basalte KMB. Des échantillons de teinte plus claire, plus altérés, avaient fournis des âges compris entre 2,5 m.a. et 2,65 m.a. Toutes les mesures K-Ar avaient été faites sur roche totale. En raison des altérations qui affectaient même les échantillons les plus "frais", Aronson et al. recommandèrent de considérer la date de 3 m.a. comme une valeur minimum de l'âge du basalte.

Ce premier résultat ne satisfaisait pas un paléontologiste spécialiste des suidés pour lesquels un âge de plus de 3,0 à 3,4 millions d'années pour le basalte KMB paraissait plus probable (Cooke 1978, Johanson et Maitland 1981, p.201).

En 1980, Walter et Aronson annoncèrent qu'en raison de l'adoption d'une nouvelle constante internationale pour la décroissance radioactive du potassium ainsi que d'une modification de standard dans leur laboratoire, leur âge de 3 m.a. déterminé en 1977, devait être révisé à 3,12 m.a. Dans le même article, ces auteurs publient de nouvelles datations du tuff BKT-2 et du basalte KMB. Les nouveaux âges du tuff concordent avec les premières

données, à $2,92 \pm 0,11$ m.a. (K-Ar) et $2,7 \pm 0,23$ m.a. (traces de fission, voir figure 1 et sa discussion dans le texte). Par contre, l'âge du basalte KMB, déterminé sur de nouveaux échantillons, moins altérés semble-t-il que ceux datés 3 ans au paravant, s'établirait maintenant à $3,60 \pm 0,15$ m.a., moyenne obtenue à partir de la datation de diverses variétés pétrographiques d'âges compris entre $3,34 \pm 0,24$ m.a. et $3,80 \pm 0,21$ m.a. Cette datation semblait être cohérente à la fois avec les données paléomagnétiques et paléontologiques (Fig. 5).

Neuf mois après la publication de ces résultats dans la revue Nature, deux articles, dans la même revue, contestèrent cette datation. Dans le premier, Brown (1982) annonce que le tuff SHT situé stratigraphiquement sous le basalte KBM, correspond à un tuff bien connu au nord du Kenya, le tuff Tulu Bor (Fig. 2), bien daté à 3,2 m.a. Brown appuie son argumentation sur la similitude de composition chimique entre ces deux tuffs qui constituerait presque à coup sûr la preuve qu'il s'agit bien d'une seule unité. On sait en effet que pratiquement chaque tuff possède sa propre "signature" chimique. Brown insiste aussi sur le fait que dans ces conditions, les successions des inversions de polarité magnétique relevées dans les colonnes stratigraphiques de Hadar s'interprêteraient de façon plus consistante qu'avec un âge de 3,6 m.a. pour le basalte KMB. Si l'argumentation de Brown devait être acceptée, il faudrait donc à nouveau revoir l'interprétation de l'âge de ce basalte.

Le second article paru dans Nature, de Boaz et al. (1982), offre une argumentation de nature différente. De nouveau, il représente une protestation des paléontologistes. Selon Boaz et ses collègues, les associations faunistiques caractéristiques des for-

mations de Hadar seraient davantage compatibles avec celles que l'on retrouve plus au sud dans des formations bien datées par un ensemble de mesures entre $3,05 \pm 0,30$ m.a. et $3,39 \pm 0,23$ m.a., qu'avec des faunes plus anciennes.

Contrairement à la datation du tuff KBS, la question de l'âge du basalte KMB n'est toujours pas résolue actuellement. Il serait pourtant important, tant d'un point de vue paléontologique (Boaz et al. 1982) qu'anthropologique (Lewin 1982) d'obtenir une réponse dépourvue d'ambiguïté.

5 VERS DE NOUVELLES METHODES DE DATATION DES HOMINIDES FOSSILES?

Nous avons évoqué, à la fin des paragraphes 2 et 3, diverses options nouvelles qui pourraient être adoptées dans les méthodes K-Ar et traces de fission et permettre d'obtenir des contrôles additionnels pour la datation des roches volcaniques associées aux hominidés fossiles. D'autres options sont envisageables, qui pourraient cette fois s'appliquer directement aux fossiles eux-mêmes ou aux matériels sédimentaires qui les renferment.

Une première possibilité est offerte par la racémisation des acides aminés des os fossiles. Après la mort d'un individu, les protéines qui constituent la trame du collagène des os s'altèrent entre autres par "racémisation", processus qui consiste fondamentalement en une "inversion" dans la molécule de la position de certains radicaux. L'observation que les acides aminés organiques, avec une configuration spatiale de type "L", s'épimérisaient après la mort sous la forme d'alloisomère de type "D", a conduit à l'élaboration d'une méthode de datation pour les fossiles, par la mesure de leur rapport D/L (voir par ex. Schroeder et Bada 1976).

Bada (1981) a testé les possibilités d'utilisation de la racémisation de l'acide aspartique pour la datation des ossements fossiles des gorges d'Olduvai. Ses résultats montrent qu'en raison de problèmes de contamination, l'application de cette méthode doit se limiter aux derniers 80 000-100 000 ans. Le même auteur (Bada et al. 1973) avait déjà montré, toujours à partir d'échantillons d'Olduvai, que les datations par épimérisation de la leucine des os pouvait également conduire à sous-estimer sérieusement l'âge d'ossements fossiles, malgré une tendance à la contamination moindre que pour l'acide aspartique. De plus, en dehors de l'acide aspartique, il semble que la précision de la mesure du rapport énantiomérique D/L soit relativement mauvaise et puisse introduire une source supplémentaire d'erreur dans les mesures d'âge (Bada et al. 1979). Toutefois, l'utilisation de l'acide leucique des dents semble pouvoir donner de bon résultats dans les gorges d'Olduvai, pour des échantillons d'âges compris entre 0,8 m.a. et 1.8 m.a. (Hare et al. 1978). Il y a peut-être là une direction à exploiter d'autant plus intéressante qu'une mesure d'âge ne nécessite qu'environ 5 à 10g de matériel.

Une autre direction est offerte par les développements récents des datations par thermoluminescence (TL) et résonance paramagnétique électronique (RPE). Longtemps limitée à la datation des échantillons archéologiques (Poupeau 1983), la TL voit peu à peu son domaine s'élargir à la datation de divers types de sédiments (Poupeau et al. 1984a) et aux roches volcaniques (Poupeau 1982). De son côté, la RPE pourrait s'appliquer à divers matériels sédimentaires ainsi qu'éventuellement aux ossements fossiles (Poupeau et Rossi 1984). En particulier, carbonates

de diverses origines et os fossiles seraient datables sur au moins les trois ou quatre derniers millions d'années. Le problème majeur pour les os est constitué par les problèmes de migrations (gains et/ou pertes) d'uranium et de ses produits-fils dans les os fossiles depuis leur inclusion dans une couche sédimentaire (Yokoyama et al. 1981). Les carbonates, malgré de nombreux problèmes méthodologiques (voir par ex. Poupeau et al. 1984b), semblent actuellement donner les meilleurs résultats et déjà sont utilisés dans la datation de formes intermédiaires entre l'Homo Erectus et l'Homo Neanderthalis (voir par exemple Yokoyama et al. 1984). L'un d'entre nous (G.P.) est allé récolter quelques échantillons de carbonates associés à des Hominidés fossiles des gorges d'Olduvai et des rives du lac Natron en Tanzanie. Les échantillons recueillis montrent de forts signaux parasites (dus à l'ion paramagnétique Mn^{++}) pour les datations en RPE, mais leur signal de TL apparaît nettement plus favorable à la datation (Poupeau et coll., travaux en cours).

Une dernière direction que nous mentionnerons, beaucoup plus spéculative que les précédentes, est liée au développement des techniques de datation par spectrométrie de masse à haute énergie, ou datations par accélérateurs de particules. Cette technique, apparue à la fin des années 70, serait capable d'utiliser divers radio-isotopes cosmogéniques comme ^{10}Be , ^{26}Al et ^{36}Cl , produits dans l'atmosphère terrestre lors de réactions nucléaires induites par interaction avec les particules énergétiques du rayonnement cosmique. La demi-vie de ces isotopes est suffisante pour qu'il soit possible de les utiliser pour la géochronologie isotopique des sédiments déposés au cours des quelques derniers millions d'années (Gove 1978, Litherland 1980) et leur application en paléoanthropologie est donc sérieusement envisageable.

6 CONCLUSIONS

Depuis la première datation radiométrique par K-Ar d'un hominidé fossile en 1960, de nombreux progrès ont été accomplis à la fois d'un point de vue instrumental et méthodologique, ainsi qu'en ce qui concerne la connaissance des raisons de dysfonctionnement des chronomètres radioactifs naturels. Toutefois, comme les exemples de la datation du tuff KBS et du basalte KMB le montrent bien, l'utilisation d'un seul système géochronométrique (K-Ar ou traces de fission) pour la datation des roches volcaniques associées à des dépôts anthropogéniques, comme dans le rift est-africain, peut mener à des résultats erronés, quel que soit le soin apporté par l'expérimentateur. Ainsi, chaque système chronométrique devrait donc être appliqué, pour un niveau volcanique donné, à plusieurs échantillons, si possible de faciès différents (si des variations pétrographiques sont présentes) et les moins altérés possibles, de préférence à partir de plusieurs phases minérales (feldspaths et verres pour le K-Ar; zircons et verres pour les traces de fission), l'adoption d'un âge d'éruption ou de dépôt résultant de la cohérence interne des mesures géochronologique et d'une consistence suffisante avec les données d'ordre paléomagnétique, géochimique, paléontologique, etc... Quelques progrès récents (spectrométrie de masse à source laser, utilisation des xénolithes pour le K-Ar; datations par âges-plateaux pour les verres des tephras en traces de fission) seraient susceptibles de contribuer à une approche plus fine de la datation de ces matériels.

De nouvelles technologies développées au cours des dernières années pourraient permettre de dater beaucoup plus directement les restes d'Hominidés et leurs industries les plus anciennes, puisque

certain types de sédiments déposés au cours des derniers millions d'années apparaissent maintenant potentiellement datables par plusieurs techniques, notamment la géochronologie par accélérateur et la résonance paramagnétique électronique. Déjà, plusieurs tentatives ont été faites en vue de dater des speleothems permettant de "caler" les âges de plusieurs formes d'Homo Erectus, entre 1 m.a. et 0.3 m.a. La RPE en particulier pourrait éventuellement permettre de dater les hominidés des grottes d'Afrique du Sud, dont il serait si important de connaître l'âge. Les méthodes basées sur la datation des sédiments par ^{10}Be et ^{26}Al pourraient de leur côté se révéler précieuses pour la datation d'autres fossiles, en particulier ceux des séries du Pakistan et de l'Inde.

Dernière possibilité enfin, celle d'une datation directe des ossements fossiles eux-mêmes. Des méthodes comme la RPE ou la racémisation des acides aminés ne demandent que quelques grammes de matériel et seraient donc potentiellement applicables en de nombreux sites. De formidables problèmes demeurent encore à résoudre toutefois, avant qu'il soit éventuellement possible d'utiliser ces deux méthodes en routine pour la datation des os. La systématique des contamination chimique et de la mobilité isotopique dans les os fossiles sont encore actuellement trop mal connues pour qu'il soit possible d'établir dans quelles conditions d'environnement ces chronomètres sont susceptibles de disfonctionnement.

Quoi qu'il en soit, le bilan et les perspectives actuels de la géochronologie du quaternaire apparaissent très positifs. Il s'agit actuellement d'un domaine en plein changement et l'on peut espérer d'ici peu qu'il sera possible de dater les variations de l'environnement qui ont vu apparaître l'Homo Erectus avec la finesse demandée par les anthropologistes, les paléontologistes et les théoriciens de l'évolution.

LEGENDES DES FIGURES

- Fig. 1 : Histogramme des âges traces de fission obtenus sur les zircons du tuff non remanié BKT-2, et d'un sable tuffa cé (très enrichi en éléments volcaniques) surmontant le tuff SHT, dans la formation de Hadar (Ethiopie). Le tuff BKT-2 a été daté à partir de 22 zircons et le tuff SHT de 14 zircons (adapté de Walter 1980 et Aronson et al. 1980).
- Fig. 2 : Datations radiométriques (cercles) et estimations successives d'après les assemblages faunistiques (carrés) de l'âge du tuff KBS (formation de Koobi Fora, Kenya).
- Fig. 3 : Coupe schématique de la formation Koobi Fora dans l'est du lac Turkana (nord du Kenya), montrant les positions relatives de quelques tephras caractéristiques et celle de fossiles et d'artefacts importants. Le tuff Karari est daté à 1,3 m.a. et le tuff Tulu Bor à 3,2 m.a. (résultats cités par Curtis et al. 1975 et Drake et al. 1980). L'âge du tuff KBS est discuté dans le texte (modifié, d'après Gleadow 1980).
- Fig. 4 : Âges radiométriques et autres estimations de l'âge du basalte KMB depuis 1977.
- Fig. 5 : Coupe synthétique de la série de Hadar (Ethiopie), avec les âges du tuff BKT-2 et du basalte KMB, et une interprétation possible de la magnétostratigraphie de la série (modifié, d'après Johanson et Maitland 1981).

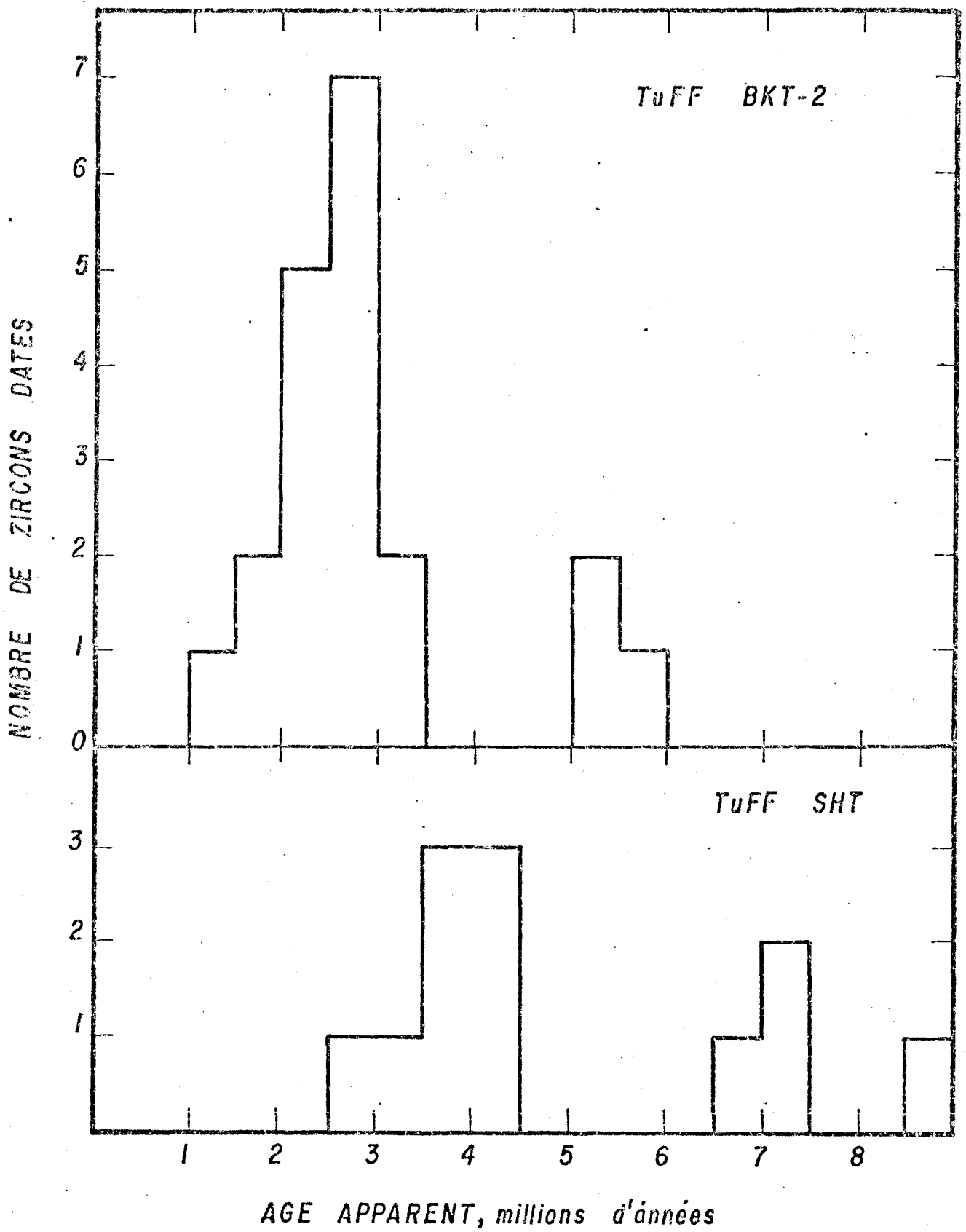


Fig. 1

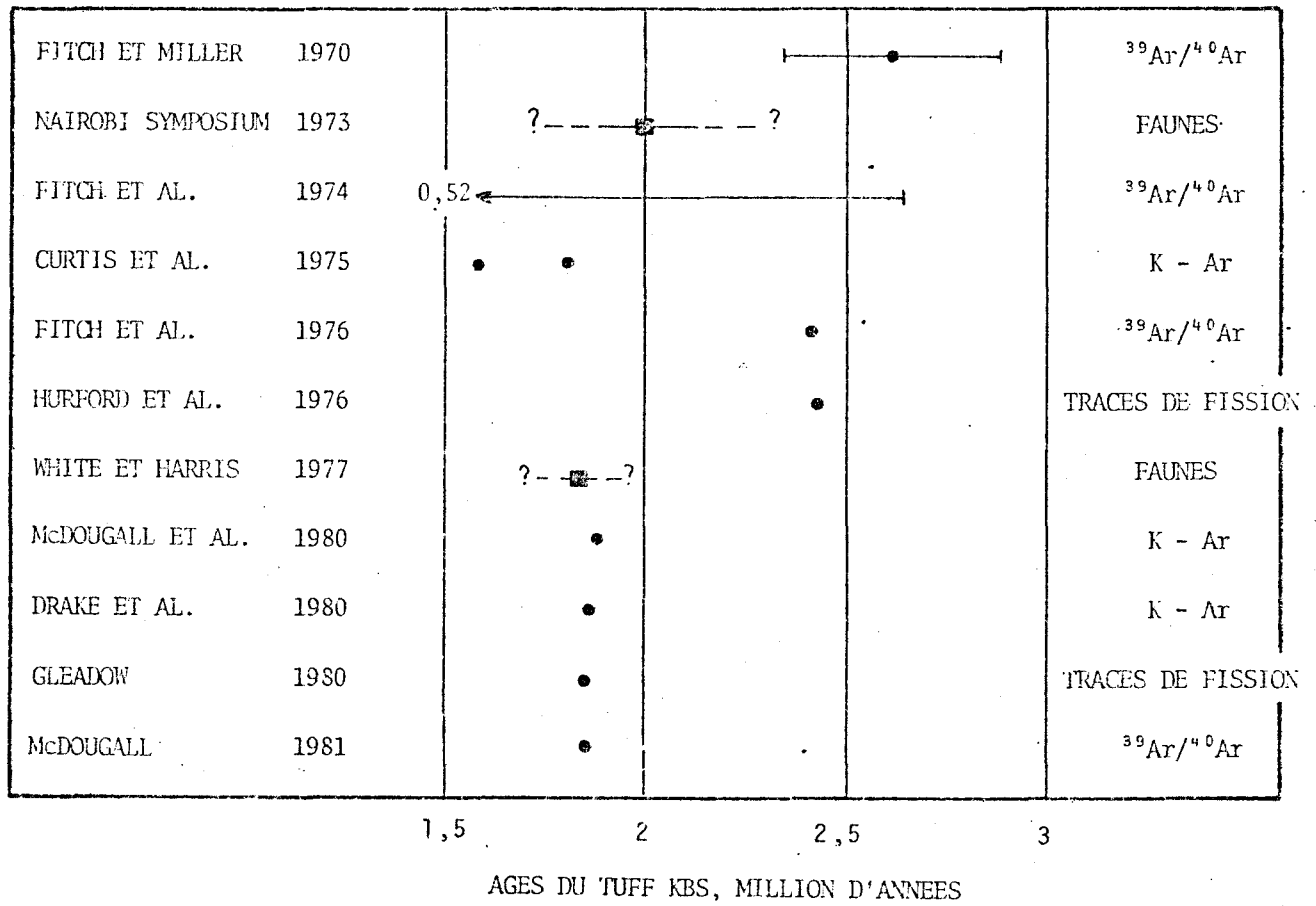


Fig. 2

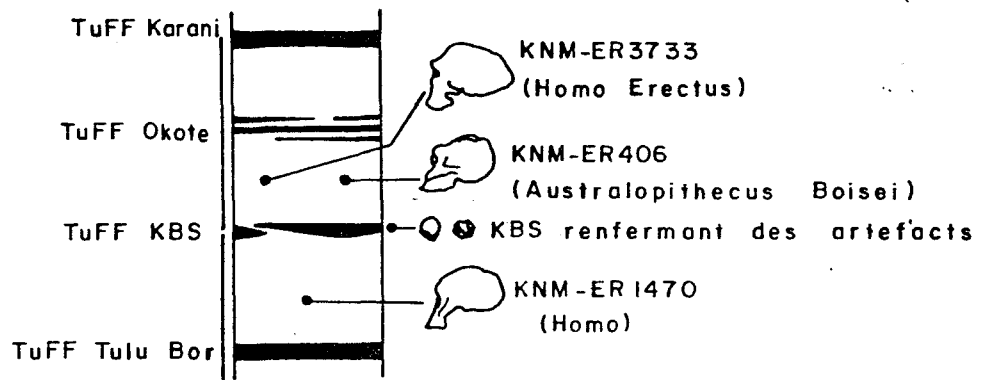


Fig. 3

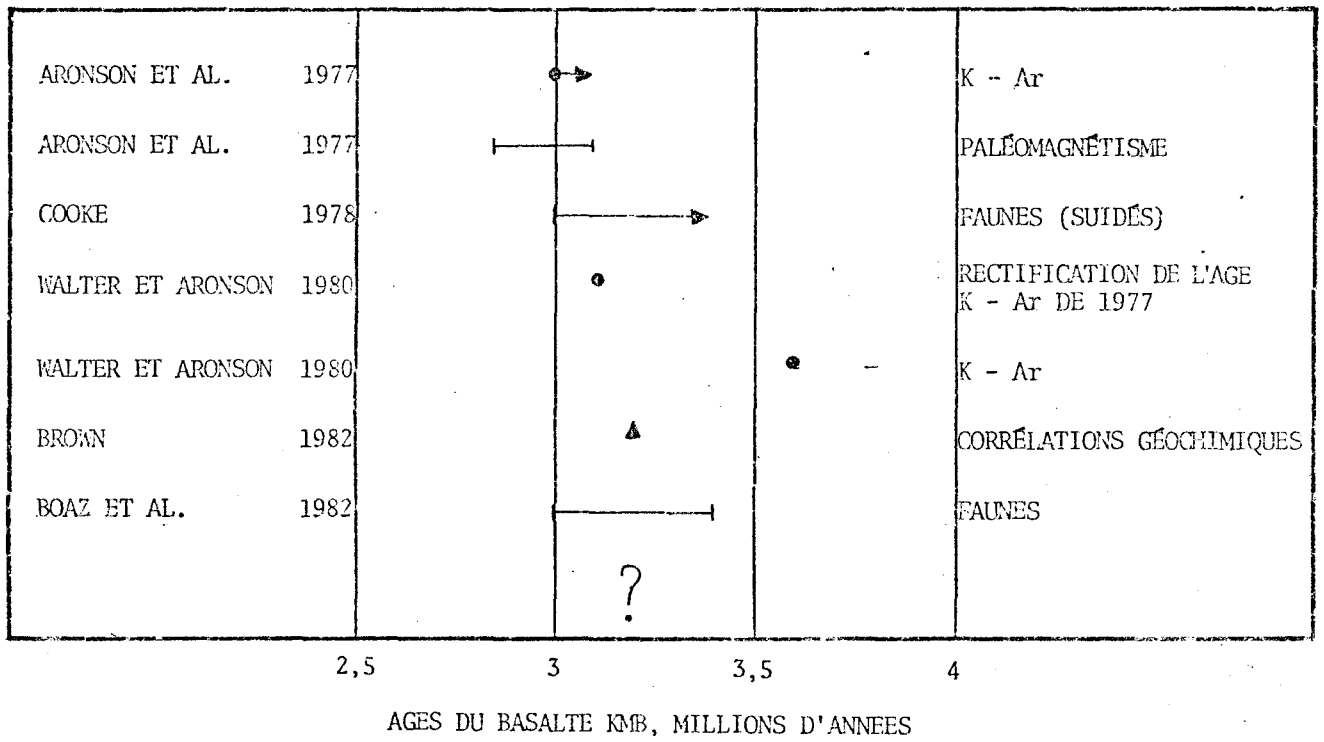


Fig. 4

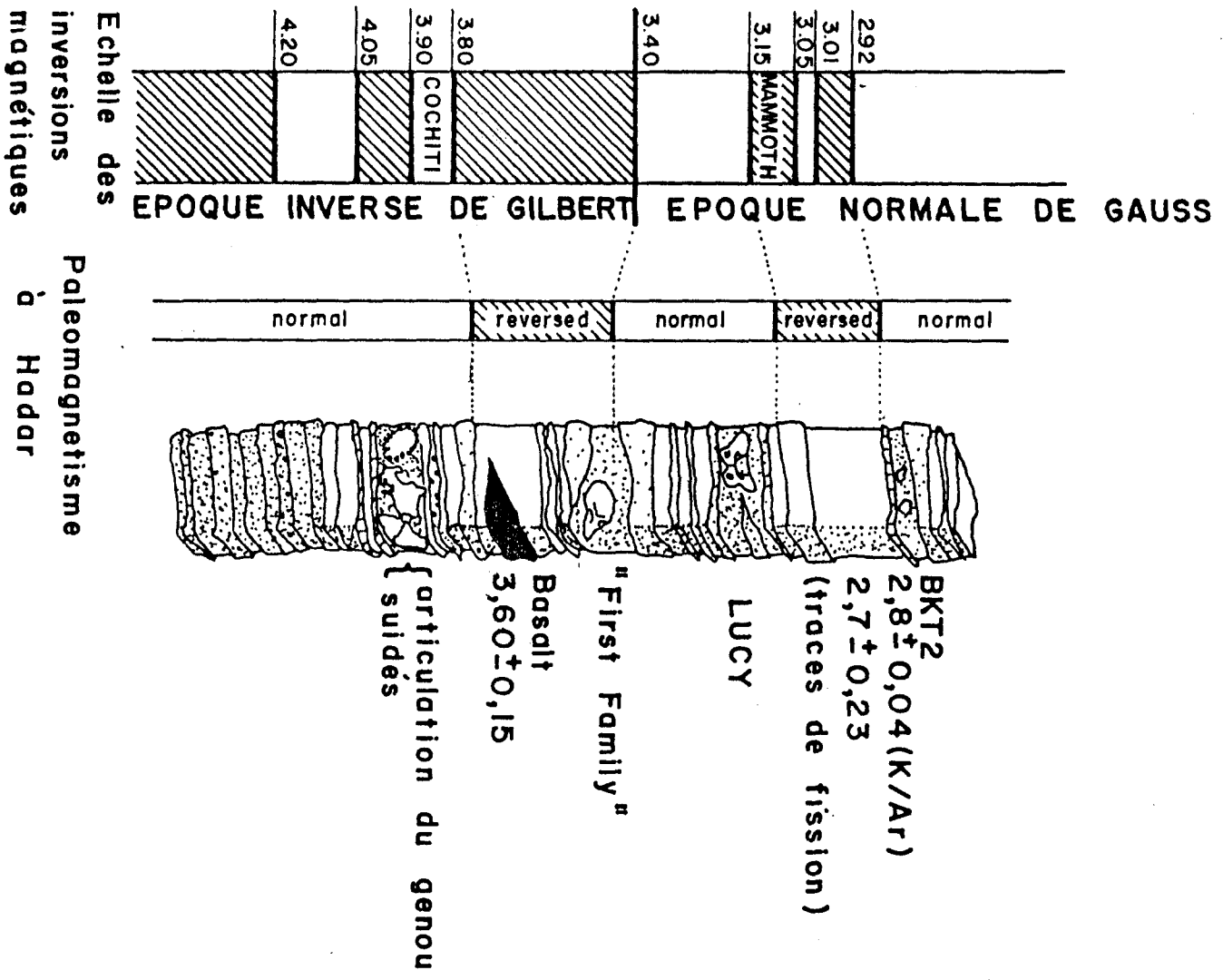


Fig. 5

TABLE 1

Modes d'estimation de l'âge des sites à Hominoides entre
15 et 1 m.a. *

Localité	Datations Faunistiques	Datations radiométriques ^o
Afrique { Est (Rift)	5	12
Lybie		1
Sud	5	0
Europe et Moyen Orient	15	0
Inde, Pakistan	5	2
Ceylan, Chine	5	1

* d'après la compilation de Behrensmeyer (1982).

^oou/et paléomagnétiques.

REFERENCES

- ARONSON J.L., SCHMITT T.J., WALTER R.C., TAIEB M., TIERCELIN J.J., JOHANSON D.C., NAESER C.W. and NAIRN A.E.M. (1977)
New Geochronologic and palaeomagnetic data for the hominid-bearing Hadar formation of Ethiopia
Nature, 267, 323-327
- ARONSON J.L., WALTER R.C., TAIEB M. et NAESER C.W. (1980)
Proc. VIII Pan-African Congress, Nairobi, R.E. Leakey et B.A. Ogot Eds., National Museum of Kenya.
- BADA J.L. (1981)
Racemisation of amino acids in fossil bones and teeth from the Olduvai Gorge region, Tanzania, East Africa
Earth Planet. Sci. Letters, 55, 292-298
- BADA J.L., KUENVOLDEN K.A. et PETERSON E. (1973)
Racemisation of amino acids in bones
Nature, 245, 308
- BADA J.L. et al. (1979)
Earth Planet. Sci. Letters, 43, 265-268
- BEHRENSMEYER, A.K. (1982)
The geological context of human evolution
Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 10, 39-60
- BISCHOP W.W. (1977)
Geochronological framework for African Plio-Pleistocene Hominidae: as Cerberus sees it
dans Early Hominids of Africa, C.C. Jolly Ed., Duckworth, 255-265.
- BOAZ N.T., HOWELL F.C. et McCROSSIN M.L. (1982)
Faunal age of the Usno, Shungura B and Hadar Formations, Ethiopia
Nature, 300, 633-635
- BROCK A. et ISAAC G.L. (1974)
Paleomagnetic stratigraphy and chronology of the hominid-bearing sediments est of Lake Rudolf, Kenya
Nature, 247, 344-348
- BROWN F.H. (1982)
Tulu Bor Tuff at Koobi Fora correlated with the Sidi Hakoma Tuff at Hadar
Nature, 300, 631-633
- CALIBRATION OF HOMINOID EVOLUTION (1972)
W.W. Bishop et J.A. Miller, Eds., Scottish Academic Press, Edinburgh, 487p.

- COOKE H.B.S. (1978)
Pliocene-Pleistocene suidae from Hadar, Ethiopia
Kirtlandia, n° 29
- CURTIS G.H., DRAKE R., CERLING T. et HAMPEL J. (1975)
Age of KBS tuff in Koobi Fora Formation, East Rudolf, Kenya
Nature, 258, 395-398
- DALRYMPLE G.B. and LANPHERE M.A. (1969)
Potassium-argon dating
Freeman, San Francisco, 258p
- DRAKE R.E., CURTIS G.H., CERLING T.E., CERLING B.W. et HAMPEL J.
(1980)
KBS Tuff dating and geochronology of tuffaceous sediments
in the Koobi Fora and Shungura formations, East Africa
Nature, 283, 368-372
- FAURE G. (1977)
Principles of Isotope Geology
J. Wiley, New York
- FITCH F.J. (1978)
Selection of suitable material for dating and the assessment
of geological error in potassium-argon age determination
in Calibration of Hominoid Evolution, W.W. Bishop et J.A. Miller
Eds., Scottish Academic Press, 77-91
- FITCH F.J. et MILLER J.A. (1970)
Radioisotopic age determination on Lake Rudolf artefact site
Nature, 226, 226-228
- FITCH F.J., FINDLATER I.C., WATKINS R.T. et MILLER J.A. (1974)
Dating of the rock succession containing fossil hominids at
East Rudolf, Kenya
Nature, 251, 213-214
- FITCH F.J., HOOKER P.J. et MILLER J.A. (1976)
Dating of the KBS tuff in the Koobi Fora Formation, East Rudolf
Kenya
Nature, 263, 740-744
- FITCH F.J., HOOKER P.J. et MILLER J.A. (1978)
Geochronological problems and radioisotope dating in the Gregory
Rift Valley
in Geological Background to Fossil Man, W.W. Bishop Ed.,
Scottish Academic Press, 441-461
- FLEISCHER R.L., PRICE P.B., WALKER R.M. et LEAKEY L.S.B. (1965a)
Fission-track dating of a mesolithic knife
Nature, 205, 1138
- FLEISCHER R.L., PRICE P.B., WALKER R.M. et LEAKEY L.S.B. (1965b)
Fission-track dating of Bed I, Oduvai Gorge
Science, 148, 72-74

- GEOLOGICAL BACKGROUND TO FOSSIL MAN (1978)
W.W. Bishop Ed., Scottish Academic Press, Edinburgh
- GILLESPIE A.R., HUNEKE J.C. et WASSERBURG G.J. (1982)
An assessment of ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of incompletely degassed xenoliths
J. Geophys. Res., 87, 9247-9257
- GILLESPIE A.R., HUNEKE J.C. et WASSERBURG G.J. (1983)
Eruption age of a pleistocene basalt from ^{40}Ar - ^{39}Ar analysis of partially degassed xenoliths
J. Geophys. Res., 88, 4997-5008
- GILLESPIE A.R., HUNEKE J.C. et WASSERBURG G.J. (1984)
Eruption age of a 100 000 yr-old basalt from ^{40}Ar - ^{39}Ar
J. Geophys. Res., 89, 1033-1048
- GLEADOW A.J.W. (1980)
Fission-track age of the KBS tuff and associated hominid remains in northern Kenya
Nature, 284, 225-230
- HALL C.M. et YORK D. (1978)
K-Ar et ^{40}Ar - ^{39}Ar age of the Laschamp geomagnetic polarity reversal
Nature, 274, 462-464
- GOVE H.E., Editeur (1978)
Proceedings of the First Conference on Radiocarbon Dating with Accelerators
The University of Rochester, Rochester, USA, pp. 401
- HARE P.E., TURNBILL H.F. et TAYLOR R.E. (1978)
Amino-acid dating of pleistocene fossil materials; Olduvai Gorge, Tanzania
dans: View of the Past; Essays in Old World Prehistory and Palaeoanthropology, L.G. Freeman Ed., Mouton Pub., La Hague, p.7
- HAY R.L. (1980)
The KBS tuff controversy may be ended
Nature, 284, 401
- HURFORD A.J. (1974)
Nature, 249, 236-237
- HURFORD A.J., GLEADOW A.J.W. et NAESER C.W. (1976)
Fission track dating of pumice from the KBS tuff, East Rudolf, Kenya
Nature, 263, 738-740
- IKEYA M. et MIKI T. (1980)
ESR dating of animal and human bones
Science, 107, 977-979

- JOHANSON D. et Maitland E. (1981)
Lucy. The Beginning of Humankind
Simon and Schuster, 409p
- KITTLEMAN L.R. (1979)
Tephra
Scientific American, décembre, 132-142
- LEWIN R. (1983)
Fossil Lucy growths younger, Again
Science, 219, 43-44
- LITHERLAND A.E. (1980)
Ultrasensitive mass-spectrometry with accelerators
Ann. Rev. Nucl. Sci., 30, 437-473
- McDOUGALL I. (1981)
⁴⁰Ar-³⁹Ar age spectra from the KBS tuff, Koobi Fora formation
Nature, 294, 120-124
- McDOUGALL I., MAIER R., SUTHERLAND-HAWKES P. et GLEADOW A.J.W. (1980)
K-Ar age estimate for the KBS tuff, East Turkana, Kenya
Nature, 284, 230-234
- NAESER C.W., IZETT G.A. et OBRADOVITCH J.D. (1980)
Fission-track and K-Ar ages of natural glasses
U.S. Geol. Survey Bull. 1489, 31p
- NAESER C.W., BRIGGS N.D., OBRADOVITCH J.D. and IZETT G.A. (1981)
Geochronology of quaternary tephra deposits
in Tephra Studies, S. Self and R.S.J. Sparks (Ed),
Reidel Pub., 13-47
- NISHIMURA S. (1981)
On the fission-track dating of tuffs and volcanic ashes
Nuclear Tracks, 5, 157-168
- POUPEAU G. (1979)
Les datations par traces de fission de l'uranium. Principes et
applications aux problèmes du quaternaire
Bull. Assoc. Fr. Étude du Quaternaire n° 1-2, 15-26
- POUPEAU G. (1982)
Precision accuracy and meaning of fission-track ages
dans Nuclear Tracks, Indian Academy of Sciences Pub., Bangalore,
67-100.
- POUPEAU G. (1982)
Recent advances in Quaternary Geochronology
dans Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia, Vol. 4
1442-1450

- POUPEAU G. (1983)
Les datations par thermoluminescence en archéologie: une revue
Revista de Arqueologia (Brésil), 1, 53-70
- POUPEAU G. et ROSSI A. (1984)
Les datations par Résonance Paramagnétique Electronique
dans: Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires natu-
rels. Applications, chapitre X, Masson Pub., Paris,
sous presse
- POUPEAU G., SOUZA J.H. et RIVERA A. (1984a)
Thermoluminescence dating of pleistocene sediments. A review
and some preliminary results on sand formations from Brazil
Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, Balkema
Pub., Rotterdam, volume 3, in press
- POUPEAU G., TELES M., ROSSI A., ZULETA E. et YOKOYAMA Y. (1984b)
Electron Spin Resonance (ESR) and Thermoluminescence (TL) stu-
dies of stalagmitic floors of the Caune de l'Arago at Tautavel
(France)
Colloque International du CNRS sur les "Datations Absolues et
Analyses Isotopiques en Préhistoire. Méthodes et Limites", CNRS,
Paris, sous presse
- SCHROEDER R.A. et BADA J.L. (1976)
A review of the geochemical applications of the amino-acid ra-
cemisation reaction
Earth Sci. Rev., 12, 347-391
- STORZER D. et WAGNER G.A. (1969)
Correction of thermally-lowered fission-track ages of tektites
Earth Planet. Sci. Letters, 5, 463-468
- STORZER D. et POUPEAU G. (1973)
Ages-plateaux de minéraux et verres par la méthode des traces de
fission
C.R.Acad. Sci. Paris, 276D, 137-139
- SUZUKI M., WIKARNO, BUDISANTOSO, SAEFUDIN I. et ITTHARA M. (1984)
Fission-track ages of hominid fossil-bearing formations in San-
giran, Central Java
Special Publication of the Geological Research and Development
Centre, Bandung, Indonesia, sous presse
- TAIEB M. et POUPEAU G. (1980)
L'âge du "premier homme"
La Recherche, 11, 1314-1315
- WAGNER G.A. (1978)
Archaeological applications of fission-track dating
Nuclear Track Detection, 2, 51-64

WALTER R.C. (1980)

The volcanic history of the Hadar Early-man site and the surrounding Afar region of Ethiopia, Ph.D., Case Western Reserve University, Cleveland, USA.

WALTER R.C. et ARONSON J.L. (1982)

Revisions of K-Ar ages for the Hadar hominid site, Ethiopia
Nature, 296, 122-127

WESTGATE J.A. et BRIGGS N.D. (1980)

Dating methods of pleistocene deposits: V. Tephro-chronology and Fission-track dating
Geoscience Canada, 7, 3-10

WHITE T.D. et HARRIS J.M. (1977)

Suid evolution and correlation of African Hominid localities
Science, 198, 13-21

WHITE H.J., BURGGRAF D.R., BAINBRIDGE R.B. et VONDRA C.F. (1981)

Hominid Habitats in the Rift Valley, Part 1
dans: Hominid Sites: their geological settings, G. Rapp et C.F. Vondra Eds., Westview Press, Boulder, Colorado, 57-114

YOKOYAMA Y., QUAGEBEUR J.P., BIBRON R., LEGER C., NGUYEN H.V. et POUPEAU G. (1981)

Electron Spin Resonance (ESR) dating of bones of the Caune de l'Arago at Tantavel
dans: Datations Absolues et Analyses Isotopiques en Préhistoire. Méthodes et Limites. CNRS, Paris, 457-492 (pré-tirage).

YOKOYAMA Y., QUAGEBEUR J.P., BIBRON R., LEGER C., NGUYEN H.V. et POUPEAU G. (1984)

Electron Spin Resonance (ESR) dating of stalagmites of the Caune de l'Arago at Tantavel
dans: Datations Absolues et Mesures Isotopiques en Préhistoire. Méthodes et Limites. Colloque International du CNRS, Paris, sous presse.