

## Sols, milieux naturels et conservation archéologique

Par Jean-Paul Legros

**MOTS-CLES** : sol, conservation, hominidés, squelettes, enfouissement, ossements, momies, archéologie.

**RESUME** : Cet article examine pourquoi la conservation des résidus archéologiques est conditionnée par les caractères du milieu et des sols. Sans enfouissement dans le sol, les chances de conservation sont réduites pour la plupart des objets tant les phénomènes d'altération sont puissants à la surface de la Terre. Si l'enfouissement se produit, ce qui est un cas plutôt rare, il faut encore que le sol ne digère pas trop vite les résidus englobés. Les cas de conservation les plus favorables sont présentés et expliqués. Ce sont évidemment ceux qui correspondent aux découvertes archéologiques les plus fréquentes ou les plus intéressantes quant-à leur ancienneté. Il résulte de tout cela des biais dans notre connaissance du passé. In fine, un plaidoyer est fait pour que la collaboration entre spécialistes du sol et archéologues aille plus avant.

### INTRODUCTION

Cette communication a pour objet d'examiner le rôle du sol et du milieu naturel dans la conservation des pièces d'archéologie. On traitera dans l'ordre des résidus organiques, résidus minéraux, enfin on décrira les cas d'enfouissement géologique naturel. Les problèmes sont complexes et seulement effleurés ici. On s'appuie cependant sur de très nombreux travaux scientifiques, cités ou non, si bien que les faits indiqués ne sont guère contestables. En revanche, dans une discussion finale, il est postulé que les conditions très particulières de la conservation sont susceptibles de conduire à des interprétations archéologiques erronées. L'auteur

n'est pas archéologue et ses propos n'engagent que lui. Il s'agit de montrer qu'il y a doute concernant un certain nombre d'idées admises. L'enceinte académique convient bien à des questions pouvant faire débat.

Dans tout le texte, c'est surtout l'homme ancien qui nous intéresse. Il nous faudra donc parler d'os et de cadavres. Espérons que personne ne sera dégoûté ou choqué.

## I. CONSERVATION DES RESTES ORGANIQUES

Les médecins légistes, intervenant par exemple, dans le contexte de crimes contre l'humanité, indiquent parfois que la nature du sol ou du milieu n'intervient pas dans la conservation des dépouilles humaines. C'est certainement vrai si on considère les parties molles et de faibles durées de séjour dans la terre (année, une ou quelques décennies). En effet, pour de courtes périodes, les facteurs intrinsèques semblent prédominants : rapidité de l'enfouissement après le décès, profondeur d'enfouissement, taille du cadavre, présence ou non d'un cercueil, etc. Pour de longues durées, c'est différent. Nous allons le montrer. Mais voyons d'abord les mécanismes d'altération.

### 1) Mécanismes d'altération

Les microorganismes sont les principaux décomposeurs de la Planète dès lors qu'on a soustrait les cadavres aux charognards. Ces microorganismes s'attaquent aux matières carbonées pour plusieurs raisons qui peuvent intervenir séparément ou en association :

Exploiter à leur profit une **source de carbone** ; c'est le cas très commun des microorganismes hétérotrophes c'est-à-dire incapables de fixer par eux-mêmes le gaz carbonique de l'air pour former des substances carbonées via la photosynthèse ;

Constituer une **source d'azote** car les microorganismes capables de fixer l'azote atmosphérique sont assez rares ;

Représenter une **source d'énergie** ; les matières organiques constituent un capital d'énergie accumulé via la photosynthèse (plante) ou via la consommation de différentes matières vivantes (chairs animales) ; en les décomposant les

microorganismes récupèrent les calories correspondantes. L'homme, quand il met une bûche de bois au feu, réalise une opération similaire. Mais pour réaliser l'équivalent de cette combustion, le microorganisme concerné doit procéder à une oxydation. Or nous avons tous appris à l'école qu'une oxydation était une perte d'électrons. C'est facile à obtenir à l'air. L'oxygène de l'air, les molécules d'O<sub>2</sub>, terribles oxydants, vont se réduire et se transformer en ions O<sup>2-</sup> chargés négativement (en fait on obtient de l'eau H<sub>2</sub>O). Autrement dit, O<sub>2</sub> va jouer le rôle d'accepteur d'électrons ce qui permet en même temps à la substance carbonée attaquée par le microorganisme de perdre les mêmes électrons donc de s'oxyder (elle donne alors du CO<sub>2</sub>). Bref, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O sont les produits finaux de la « minéralisation » de la matière organique que les microorganismes détruisent à la surface de la Terre. Mais tout se complique en l'absence d'oxygène. Il faut alors trouver un accepteur d'électrons de remplacement. Cela n'est pas toujours facile. L'accepteur peut être un composé métallique ou une partie de la matière organique elle-même. Dans un cas extrême, le gaz carbonique présent, CO<sub>2</sub>, est réduit en méthane CH<sub>4</sub>. Celui-là peut s'enflammer à l'étincelle d'un soulier ferré, d'où les frayeurs de nos ancêtres qui voyaient des feux-follets au voisinage des tourbières et cimetières.

Dans le détail, les opérations sont incroyablement complexes. Certains microorganismes travaillent à la suite des uns des autres et s'associent pour constituer une chaîne de réaction. D'autres travaillent en sens inverse, les uns pour s'alimenter, les autres pour exploiter de l'énergie, par exemple fabrication et consommation simultanée de nitrates. D'autres encore ont la propriété de réaliser des tâches très différentes suivant les conditions de milieu où on les place, par exemple en présence ou en absence d'oxygène. Enfin, la plupart des espèces de microorganismes sont encore inconnues.

## **2) Facteurs de bonne conservation des résidus organiques**

La conservation sera donc d'autant meilleure et donc d'autant plus longue que la vie biologique sera entravée. Cela concerne des milieux extrêmes qui vont être passés en revue.

<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>

- **Froid intense.** Nous savons tous que l'on a retrouvé des mammouths presque intacts sous les hautes latitudes : Sibérie, Alaska, Canada. Ils se sont conservés dans la glace ou plus souvent dans le sol perpétuellement gelé sous-jacent. Il est appelé suivant les régions : permafrost, permagel ou pergélisol. Parmi les animaux congelés certains ont un âge mesuré de 40 000 ans. On a aussi trouvé, dans un glacier, un homme qui a été appelé Ötzi parce qu'il a été mis à jour dans les Alpes de l'Ötztal sur la frontière entre Italie et Autriche. Il a vécu 3200 ans avant JC et est remarquablement conservé. Cependant ses chairs ont subi des transformations biochimiques amenant une sorte de saponification (*grave wax* des anglophones). Elle conserve mais donne un teint cireux. Et de fait, Ötzi est maintenant jaune comme la cire d'abeille ! On a pu déterminer qu'il était mort tué par une flèche reçue dans le dos. Et on a retrouvé ses armes et tout son équipement.

- **Sécheresse absolue.** Sur toute la planète, l'homme a embaumé ses morts illustres avec des techniques plus ou moins sophistiquées mais comprenant toujours l'extraction des parties molles des cadavres. Cela c'est fait dans les Andes, en Chine, au Tibet, au Japon, etc. Mais les momies ne se conservent, dans la longue durée, que si les conditions de milieu sont favorables c'est-à-dire limitent la prolifération des microorganismes. C'est le cas en Egypte où l'air est desséché : 56 mm de pluie par an en moyenne au Caire et 0 mm/an à Assouan. C'est aussi le cas dans les Andes. Par exemple, le désert d'Atacama est réputé le plus sec du monde. Il n'y pleut pratiquement jamais. Les momies sont nombreuses au Chili, au Pérou et en Bolivie [BECRIAUX, 2009]. Leur conservation est encore plus facile qu'en Egypte car, sur les hauts-plateaux d'Amérique du Sud, il fait froid. On a d'ailleurs retrouvé en haute montagne les corps d'enfants qui ont été sacrifiés pendant la période Inca. Le record de conservation régional est de 7000 ans. Il intéresse un groupe de personnes qui ont été empoisonnées à l'arsenic probablement par ingestion involontaire d'eau polluée. Cela a facilité la protection de leurs dépouilles contre l'attaque des microorganismes même si, contrairement à l'Egypte, l'enfouissement est sommaire : positionnement dans des grottes, sous quelques pierres, ou même en abri sous roche après que les corps aient été recouverts d'une mince couche d'argile.

<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>



**Photo 1** : Momie retrouvée avec ses habits en plein désert d'Atacama par le Père Le Peige et maintenant pièce du musée archéologique de San Pedro de Atacama. Photo : Roger Bécriaux

Parmi toutes ces momies, l'une des plus remarquables est une jeune femme qui a été baptisée « Miss Chili ». Elle est bien conservée pour son âge d'environ 3000 ans. Mais n'exagérons rien car peu d'entre nous auraient envie de la faire danser.

- **Absence totale d'oxygène.** L'oxygène se dissout mal dans l'eau et sa diffusion dans ce liquide est extrêmement lente au moins quand il n'y a pas d'agitation pour mélanger air et eau. C'est le cas des tourbières. Dans ces milieux, la faible quantité d'O<sub>2</sub> qui pénètre dans l'eau à partir de la surface est immédiatement consommée par la vie biologique de sub-surface. Certes il existe, en profondeur, des bactéries strictement anaérobies. Mais celles-ci dégradent peu les tissus animaux. On pourrait dire que l'Évolution n'a pas prévu le cas, en principe rare, des animaux qui tombent dans les tourbières et elle n'a pas doté les bactéries de ces milieux des systèmes enzymatiques adaptés à la digestion correspondante. Le nombre de gens retrouvés dans les tourbières est tout à fait considérable, déjà plus de 1000 en Europe du Nord et Scandinavie. Leur état de fraîcheur est souvent bon, impressionnant même. Les acides organiques présents dans le milieu tannent la peau qui est maintenue en bon état. En revanche, la tourbière étant acide, les os sont progressivement dissous. On y reviendra plus loin. A la limite, ces os disparaissent complètement. C'est sans doute pourquoi, l'homme de Lindow, qui dort maintenant au British Museum, est aplati comme s'il était passé sous un rouleau compresseur. Dans d'autres cas, le squelette est apparemment intact mais les os sont devenus poreux au point d'avoir perdu de 80 à 95% de leur densité [PESTKA *et al*, 2010]. Beaucoup de ces malheureux ont été assassinés. Les tourbières

constituaient, dans l'imaginaire des gens, une porte sur l'enfer. D'après Tacite, il semble qu'on se débarrassait là des traîtres, déserteurs ou homosexuels, après les avoir noyés ou exécutés. Mais, on a peut-être trop généralisé. Des gens se sont sans doute noyés, sans l'aide de personne, dans ces milieux parsemés de trous d'eau et dangereux. En effet, un squelette fracturé, compte-tenu du contexte de déminéralisation, n'est pas la preuve d'un coup reçu. La plus vieille momie des tourbières, la femme de Koelbjerg, a été datée de 3500 ans avant J.C. Mais en général, les inhumations datent de l'âge du fer, c'est-à-dire de la période qui couvre les dix siècles précédant le Christ. Les plus récentes correspondent au XVIIIe siècle.

En Chine, on a développé des techniques d'embaumement dans lesquelles la privation d'oxygène était telle qu'on a retrouvé à Sing-Jui le corps encore souple d'une femme après 2150 ans. Comme d'autres, elle était entourée de 10 ou 20 draps de soie, puis placée dans trois cercueils emboîtés, puis ceux là étaient noyés dans plusieurs tonnes de charbon, enfin une couche d'argile d'un mètre d'épaisseur venait occluser le tout.

Dans le meilleur des cas, la conservation de nos restes organiques ne dépasse pas quelques petits milliers d'années. Ce manque d'éternité est un peu décevant, surtout quand nos familles se sont ruinées en travaux d'embaumement. Pour durer un peu plus, il faut se faire irradier avec des éléments radioactifs pour tuer tous les microorganismes qui ont trouvé logement dans nos pauvres carcasses. Mais nous allons voir que nos squelettes ont de bonnes chances de tenir plus longtemps.

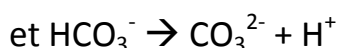
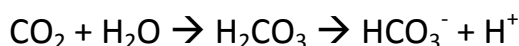
## **II. CONSERVATION/ALTERATION DES OS ET MINERAUX**

Les os sont un matériel complexe, pour un quart organique (collagène) et pour trois quarts minéral : carbonate-hydroxyapatite faiblement cristallisé et de formule  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4\text{CO}_3)_3(\text{OH})$ . A quelques résidus près, le collagène disparaît rapidement après l'enfouissement par attaque microbiologique. Les squelettes deviennent alors des minéraux comme les autres et les lois qui s'appliquent à l'altération dans les sols les concernent aussi. Nous allons les examiner ce qui donne au passage quelques indications sur l'altération des monuments.

## 1) Mécanismes d'altération des minéraux

Fort peu de mécanismes interviennent quand on considère l'altération d'une roche à l'échelle d'un des cristaux qu'elle contient.

Le premier est la **dissolution**. Le gaz carbonique de l'air se dissout naturellement dans les gouttes de pluie pour donner de l'acide carbonique, autrement dit des ions  $H^+$ , selon les réactions :



Contrairement à ce que l'on pense parfois de manière intuitive, l'eau de pluie n'est donc pas une eau neutre comme l'eau distillée ; elle est acide et donc agressive ! Certes, il s'agit d'une acidité faible (pH de 5,5 à 6,5), mais avec le temps, elle agit et aussi se reconstitue à l'infini (les ions  $H^+$  consommés sont aussitôt remplacés par la dissociation d'autres molécules d'eau). Depuis le 19<sup>ième</sup> siècle, c'est bien pire à cause de la pollution atmosphérique. En effet, l'atmosphère s'est enrichie en  $SO_2$  qui, par oxydation, donne des sulfates, autrement dit de l'acide sulfurique ! Le phénomène est renforcé, dans certains sols, par les teneurs en gaz carbonique qui peuvent être multipliées par 100 à cause de la respiration des organismes et microorganismes. Dans un tel contexte, presque tous les minéraux sont lentement dissous. C'est particulièrement le cas du carbonate de calcium, le calcaire, qui exprime en montagne de superbes formes de dissolution (karst). Il a été montré que ce type de phénomène a été le mode d'altération principal des os de mammoths dans le Wisconsin [JOHNSON, 2005].

L'autre grand mécanisme d'altération des minéraux est **l'hydrolyse** telle que la définissent les géologues. C'est, si l'on veut, une dissolution qui, en plus de conduire à des ions en solution, transforme le minéral primitif en un autre d'une autre espèce. Par exemple, un grain de feldspath, dans un granite, va libérer quelques ions tout en se commuant en argile pour l'essentiel de sa masse. Cela n'intéresse pas les os sauf si on donne à l'hydrolyse, comme le font les médecins, un sens élargi qui inclut de toutes petites modifications intermédiaires de l'hydroxyapatite en voie de solubilisation, ou même qui compte pour hydrolytique

toute attaque aqueuse d'un tissu organique. Bref, au-delà du vocabulaire, au cours de la dégradation, la partie minérale des os se transforme peu ou pas; elle disparaît.

En théorie, la fragmentation est un phénomène susceptible d'intervenir mais, à l'échelle du cristal, elle n'est guère efficace sauf dans le cas très particulier des micas.

A l'échelle de la pierre à bâtir ou de l'os pris globalement, il faut ajouter l'ensemble : **fissuration, fragmentation, désengrènement**. Si leurs traductions macroscopiques sont spécifiques, leur nature est fondamentalement la même. Pour faire tomber un squelette en poussière ou pour dégrader la façade d'un monument en pierre, il n'est pas nécessaire de tout faire fondre, il suffit de décoller les uns des autres les constituants. A ce niveau, peuvent intervenir la dissolution de la suture entre différents minéraux ou l'hydrolyse de grains faisant lien. L'eau de pluie pénétrant dans le matériau peut aussi le faire éclater par l'action du gel. En plus, au bord de la mer, les embruns interviennent. Ils contiennent des sels qui cristallisent au sein des matériaux poreux ce qui est susceptible de les éclater ou désengrener.

## 2) Vitesses d'altération en surface

L'altération de la pierre peut être observée et datée sur nos monuments. A l'air libre, elle est beaucoup plus importante que dans le sol qui joue un rôle de protection sur lequel nous allons revenir. Par exemple, sur l'île de Malte, les grès calcaires de monuments construits en 1763 et soumis depuis aux embruns ont perdu jusqu'à 10 cm d'épaisseur en deux siècles et demi seulement. Même chose pour le Peyrou à Montpellier.



**Photo 2.** Attaque violente des calcaires gréseux et coquilliers avec lesquels on a construit les « Corps de garde » du Peyrou, à Montpellier, vers 1774. Sous la fenêtre, certaines pierres ont déjà été remplacées. Photo auteur.



<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>

Lorsqu'un résidu archéologique est enfoui dans le sol, à court terme il est protégé ne serait ce que de la convoitise des voleurs s'il s'agit d'un trésor. A long terme, cela n'est pas pareil. Dans la plupart des cas, le sol digère plus ou moins vite les éléments qu'il contient et même dissout sa matière propre : à l'échelle des temps géologiques, il fond comme du sucre; il implose lentement [LEGROS, 2007 - LUCAS, 1989]; c'est le « soil collapse » des américains. Donnons un exemple pour fixer les idées. Les dépôts des terrasses fluviales de la vallée du Rhône, entre Lyon et Valence, sont constitués de mélanges de galets de calcaire, galets cristallins (granites, gneiss) et galets siliceux (quartz, quartzites). Ces galets ont 10 ou 20 cm de diamètre. Donc, au départ, le milieu est calcaire mais très drainant puisque fait de gros cailloux. Dans un tel cas, il a été montré [BORNAND, 1978] que 150 000 ans suffisent pour dissoudre complètement les galets calcaires, 300 000 ans suffisent pour altérer complètement les cristallins en argile et 500 000 ans ou 600 000 ans réussissent à pulvériser les quartz en grains de sable siliceux. Un os, même gros, n'a aucune chance de subsister dans ces conditions. Il n'est donc pas étonnant qu'on manque d'éléments de faune ancienne pour dater précisément ces terrasses de la vallée du Rhône [BORNAND et LEGROS, 2009].

D'une manière plus générale, les spécialistes ont estimé la vitesse d'enfoncement de la surface du sol en se référant à la quantité d'ions exportés chaque année par les fleuves. Suivant les endroits, cette descente représente de 2 à 20 m par million d'années. Et c'est beaucoup plus si l'érosion mécanique vient conforter cette sorte d'endodissolution chimique. Les preuves de cet enfoncement sont légion partout dans le Monde. Citons pêle-mêle : les inversions de relief qui portent en hauteur les coulées basaltiques de vallée, les filons de quartz résistants qui émergent maintenant des granites, les cheminées des fées de Cappadoce, etc.



**Photo n°3.** Relief ruiniforme de Cappadoce (Turquie) matérialisant une érosion différentielle dans des cendres consolidées (ignimbrites) mises en place par épaisses couches successives lors d'explosions volcaniques. Photo auteur.

A l'échelle des temps géologique, des chaînes de hautes montagnes ont été rasées complètement, y compris en France.

### 3) Interaction sols/résidus

Voyons quels sont les facteurs qui, dans les sols et les boues accélèrent ou bien freinent l'altération des résidus archéologiques associés.

- **Bilan hydrique.** Prenons une image et assimilons le sol à une série de 5000 feuilles de papier buvard superposées. Versons à la surface un verre d'eau. Il y a toutes chances pour que la partie inférieure de la couche ne soit pas humectée. Dans le sol c'est la même chose. La surface reçoit la pluviométrie annuelle mais, plus on descend, moins l'eau pénètre. L'eau stockée à tous les étages du sol, sera pompée par la végétation et donc réexpédiée vers l'atmosphère. Mais dans la plupart des sols, la capacité de rétention pour l'eau n'est pas suffisante pour interdire un drainage profond qui va alimenter, avec une intensité variable, les nappes phréatiques et les sources. Dans un exposé antérieur sur les sols salés [LEGROS, 2009], on avait comparé les cas extrêmes de Faya Largeau, au Tchad, avec un drainage profond annuel de 20mm seulement et la Guyane avec un drainage annuel de 2300 mm. Comme l'eau traversant le sol se sature en différents ions, cela veut dire que les sols de Guyane ont une capacité d'exportation 115 fois plus forte que les sols du Tchad. Leurs minéraux sont donc détruits au moins cent fois plus vite, toutes choses égales par ailleurs.

- **pH et teneur en Ca.** Dans les sols ordinaires, mangroves et terrains salés exclus, les pH s'étagent entre 5 et 8,5. Or, on sait qu'une unité de pH représente une variation de 10 fois des teneurs en ions  $H^+$ . En d'autres termes, d'un sol à l'autre, l'agressivité pour les minéraux et les os peut varier d'un facteur  $10^{4,5}$  soit 30 000 fois ! Le pH des sols dépend de toutes sortes de facteurs mais, dans la plupart des cas, il est réglé par les teneurs en carbonate de calcium, le calcaire. C'est un sel de base forte et d'acide faible. En solution, il détermine donc un pH basique. En conséquence, les sols calcaires sont relativement protecteurs. Plus précisément [BERNA *et al*, 2004] : au dessus de pH 8,1 les os sont protégés; entre pH 8,1 et pH 7, l'hydroxyapatite d'origine biologique est remplacée par une autre forme voisine mais stable ; en dessous de pH 7, il y a dissolution directe. Des statistiques portant

sur 219 fragments osseux trouvés en Europe, dans toutes sortes de conditions, mettent bien en évidence ce rôle prépondérant du pH [NIELSEN-MARSH *et al*, 2007].

- **Taille des débris.** Imaginons que l'altération soit susceptible de faire disparaître une épaisseur de pierre de 5 cm. Sur les monuments les plus massifs, pyramides d'Égypte par exemple, on s'en apercevra à peine. Sur les blocs mégalithes de l'île de Malte, on remarquera la forte corrosion de surface. Mais des boulets de canon en pierre du 17<sup>ème</sup> siècle seront sérieusement affectés. Quant au collier de perles de pierre taillé par un gaulois hypothétique, il aura totalement disparu. En fait, les objets sont attaqués en fonction de leur surface et sont protégés en fonction de leur masse. Les plus gros s'en sortent mieux. Les archéologues se sont émus du fait qu'on retrouve peu de squelettes juvéniles dans des contextes où la mortalité infantile devait être très élevée. Ils estiment que cela est dû pour une part à une mauvaise conservation des os correspondants en relation avec leur plus faible taille et aussi leur calcification non achevée.

- **Nature des débris.** La nature des débris joue un rôle fondamental dans la conservation. Certains matériaux sont plus résistants que d'autres même si cela dépend beaucoup des conditions de milieu. Donnons quelques exemples. L'or est inaltérable. C'est bien pourquoi on le retrouve à l'état de très fines pépites dans des milieux aussi agressifs que les sols équatoriaux, en Guyane par exemple. Des bijoux en or, enfouis dans les sols peuvent donc y rester presque éternellement. En pays tempéré, les vases en bronze résistent fort bien. Le fer est relativement labile. A l'air, il rouille et se détruit. Dans l'eau, il sert d'accepteur d'électrons à certaines bactéries anaérobies et passe à l'état réduit, forme sous laquelle il est soluble et donc éliminé assez vite. Les résidus de l'âge du fer sont donc limités. En général, le bois disparaît en quelques années à la surface. Mais enfoui dans une vase humide, il résiste parfaitement. C'est le cas des poteaux qui soutiennent Venise. Dans le sol, beaucoup de minéraux s'hydrolysent et donnent des argiles. Cela signifie que ces argiles sont en équilibre avec les conditions de température et de pression qui règnent à la surface de la Terre. Mais qu'est-ce qu'une poterie sinon de l'argile cuite ? Sa résistance mécanique est faible certes, mais sa résistance chimique est bonne dans le sol.

- **Milieux fossilisants.** La fossilisation peut intervenir dans les boues marines ou continentales dans lesquelles circulent des solutions concentrées en minéraux et susceptibles de cristalliser. La fossilisation est de trois types principaux.

Il peut y avoir **moulage** par la boue d'un organisme, puis séchage, puis disparition de l'organisme par les mécanismes décrits en première partie, enfin comblement de la cavité laissée libre par du calcaire, des phosphates, du fer, voire d'autres éléments solubles.

Une deuxième possibilité est la **pétrification** c'est-à-dire le comblement des espaces vides ménagés au sein même de l'organisme par des solutions carbonatées, ferrugineuses ou siliceuses qui vont cristalliser. Le bois est susceptible de se pétrifier, les os aussi. Le mécanisme suivant a été évoqué pour la pétrification des os [TRUEMAN *et al*, 2004] : après la mort d'un animal, à la surface du sol, les os s'altèrent. La destruction du collagène augmente directement la porosité et fournit en plus des ions H<sup>+</sup> qui attaquent l'hydroxyapatite et déterminent donc des microcavités. L'os devenu très poreux pompe comme une mèche l'eau du sol sous-jacent et les sels qu'elle contient. Il y a alors évaporation à la surface supérieure de l'os qui retient les sels, de calcium en particulier. Il se transforme ainsi en pierre. Ce type de mécanisme implique donc un climat sec et des sols riches en sels minéraux.

Mais les fossiles observés ont quelquefois une organisation interne si fine qu'elle implique le remplacement de la matière organique par de la matière minérale, molécule après molécule. C'est la **minéralisation** (au sens de transformation en minéral). Les détails du mécanisme sont encore mal compris. En revanche, dans le monde des cristaux, ce type de phénomène est bien connu. En climat très sec, il conduit par exemple au remplacement des différents minéraux constitutifs du granite par du carbonate de calcium. C'est l'épigénie.

Les ossements de l'australopithèque Lucy, découverte en Ethiopie en 1974, ont été fossilisés.

- **Durée.** Dans la plupart des cas, le sol ralentit la destruction des résidus sans la stopper complètement. Donc, un sol donné peut apparaître comme protecteur à l'échelle du millénaire (on y retrouve par exemple des squelettes du Moyen-âge) et se révéler destructeur à plus long terme.

Si l'on combine les différents facteurs que nous avons passés en revue, en particulier le pH et le drainage, on voit que la protection d'un même type de matériel peut varier en durée et suivant les milieux d'un facteur  $10^{6,5}$  soit 3 millions de fois en plus ou en moins. Si on ajoute une fossilisation éventuelle, la protection réelle offerte par le milieu peut aller de presque rien à plusieurs centaines de millions d'années.

### III. ENFOUISSEMENT ET PROTECTION PAR LE SOL

#### 1) Les types d'enfouissement

Comme il a été dit, le sol peut exercer une relative protection pour quelques milliers ou millions d'années. Encore faut-il qu'il y ait enfouissement naturel des débris archéologiques. Voyons les principaux cas.

- **Apports éoliens.** Des limons, en général calcaires, sont apportés par le vent en beaucoup d'endroits de la Planète. Ils correspondent aux remaniements de matériaux arrachés à des régions sans couverture végétale, en particulier lors des époques glaciaires : pourtours des calottes glaciaires, boues marines exondées par la descente du niveau de la mer, frange des déserts froids ou chauds. Les apports peuvent atteindre 20 à 40 cm par millénaire [Lu et Sun, 2000] et se poursuivre jusqu'à atteindre 300 m d'épaisseur en Chine ! Par exemple, dans l'île de San Miguel, sur les côtes californiennes, les vents du nord d'ouest ont amené des dépôts éoliens importants si bien qu'on estime à plus de 600 les sites d'enfouissement de matériel archéologique tel que os de poissons, coquillages, squelettes d'animaux divers, etc. , ceci au cours des 10.000 années de l'Holocène [RICK T.C., 2002].

- **Alluvions fluviales/colluvions.** Les fragments arrachés à l'amont des bassins versants ne sont pas tous charriés jusqu'à la mer mais alimentent des alluvions ou colluvions qui se déposent dans les basses vallées. Les vitesses de sédimentation sont fort variables. Elles augmentent pendant les glaciations car il y a beaucoup de débris glaciaires à transporter. Nous sommes actuellement dans une période interglaciaire mais le remblaiement reste important. Par exemple, en Chine, on a mesuré 2 à 3 mètres en 2000 ans pour le fleuve Jaune, dans la région de Shangqui [JING *et al*, 2007]. Les fleuves côtiers du Languedoc, dont le régime est

presque torrentiel à cause des pluies méditerranéennes d'hiver, ont une vitesse de remblaiement particulièrement élevée. D'après les spécialistes, c'est ce qui explique la richesse archéologique de la région de Lattes. L'abbaye de Cruas (Ardèche) que nous a présentée notre confrère Jean-Pierre Dufoix a subi un enfouissement partiel d'environ 8 mètres en 8 siècle. Il est vrai qu'elle a été positionnée par erreur au beau milieu d'un cône de déjection [LEGROS, 2008].

- **Eboulements.** Il arrive que des falaises s'effondrent brutalement enfouissant des villages entiers. L'exemple français le plus connu historiquement, et attesté par plusieurs écrits, est l'effondrement du plateau du Granier, au nord-est du massif de la Chartreuse, un jour de novembre 1248. Il y eu sans doute un millier de victimes. Les études géologiques faites par l'Université de Savoie indiquent que l'éboulis formé mesure 7,5 km de long, 6,5 km de large et jusqu'à 40 m d'épaisseur. Sa surface bosselée accueille maintenant « les abymes de Myans » dont le vin d'Apremont est célèbre. Peut-être qu'un jour, des travaux de génie civil exhumeront quelque vestige miraculeusement conservé.

- **Eruptions volcaniques.** Les émissions de cendres brulantes sont capables d'enterrer en quelques heures une ville et ses habitants, ceci sans abimer ce qui est incombustible. Tout le monde connaît le cas de Pompéi lié à la fameuse éruption du Vésuve en 79 après Jésus-Christ. La description précise du phénomène à été donnée par Pline le jeune qui était resté à Misène, c'est-à-dire à 30 km du volcan. Le récit fait était si étrange et si effrayant que longtemps, on a cru que l'auteur exagérait. On sait maintenant qu'il a parfaitement décrit tout ce qu'il a vu et vécu.

Il a eu d'autres cas, consignés ou non historiquement, au-delà des autres cités enfouies par le Vésuve (Herculanum, Oplontis, Stabies). On sait que les cendres des grosses éruptions peuvent faire le tour de la Terre et que, à 10 ou 20 km de certains volcans, des dizaines de mètres de dépôt ont pu être apportés en quelques jours. C'est le cas par exemple en Cappadoce, dans l'île de Santorin, dans la zone du Saint-Helens aux USA en 1980, etc. Dans de telles situations, on ne retrouve pas les corps mais leur empreinte c'est-à-dire leur forme exacte conservée par les cendres qui les brulent et, en même temps, se refroidissent.

- **Stratification en milieu urbain.** Il est tout à fait étonnant de voir combien le niveau des villes monte avec le temps. Les causes sont multiples et associées. On a

<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>

amené à toutes sortes de matériaux de construction pendant des siècles. C'est seulement récemment que de grandes excavations sont faites pour évacuer les déblais avant de construire. Avant on stratifiait ! C'était souvent justifié. En effet, l'élévation naturelle des alluvions de certains fleuves est importante, nous l'avons vu. Cela a conduit à rehausser régulièrement les quais des ports fluviaux pour éviter les inondations et donc à rehausser les constructions qui se trouvaient en arrière. Cela est très caractéristique à Paris où les planchers des salles anciennes sont situés plusieurs mètres en dessous du niveau actuel des rues. La magnifique salle des Gens d'Armes de la Conciergerie, achevée en 1313, est à environ 3 mètres sous la rue du Palais (Ile de la Cité).



**Photo 4** : Salle des Gens d'Armes de La Conciergerie à Paris. Au fond, l'escalier qui monte vers la rue. Photo auteur.

Est aussi largement en contrebas de la rue, la superbe salle gothique du couvent des Bernardins, datée du 13<sup>ième</sup> siècle et récemment restaurée. On la trouve rue de Poissy, dans le 5<sup>ième</sup>.

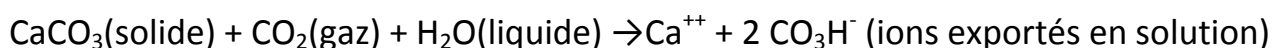
Pour les villes côtières, le rehaussement du niveau de base des constructions était utile pour accompagner l'élévation du niveau des mers lié au réchauffement postglaciaire. La montée des eaux s'est effectuée à vitesse très variable au cours des temps. Pendant la transgression flandrienne (-15000 ans, -6000 ans) la montée a été de 100 mètres en méditerranée soit plus d'un cm par an [AMBERT *et al*, 2004] ! Dans la période récente, il y a eu ralentissement. En effet, depuis le XII siècle, la mer est montée seulement de 1,5 mètre environ. C'est ainsi qu'à Marseille les ruines du port ancien sont à l'intérieur des terres mais sous le niveau de la mer. A bordeaux, le

<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>

phénomène est équivalent : les plus anciennes des constructions portuaires sont sous l'eau [GE *et al*, 2005]. A l'avenir une accélération devrait intervenir en relation avec le changement climatique annoncé.

Le résultat de tous ces phénomènes est que dans les villes, plus on creuse, plus on trouve des niveaux anciens d'habitation et de sépultures. Sous Montréal, qui est pourtant une ville neuve liée à la colonisation européenne, il y a déjà 2,5 mètres de remblai en moyenne !

- **Grottes.** Les grottes des massifs calcaires constituent un milieu particulièrement protecteur. La dissolution du calcaire dans l'eau, phénomène très complexe dans le détail, peut se schématiser par l'équation suivante :



Quand le gaz carbonique vient à manquer, la réaction peut fonctionner en sens inverse c'est-à-dire de droite à gauche. C'est précisément ce qui se passe dans les grottes. En effet, lorsque l'eau suinte au plafond de la cavité, elle se met à l'équilibre avec l'air plus pauvre en CO<sub>2</sub> que le sol sus-jacent. Ce dégazage provoque la précipitation du carbonate de calcium d'où l'apparition des stalactites et stalagmites. En d'autres termes, l'eau de la grotte est saturée en calcium. En plus, l'os est un phosphate de calcium moins soluble que le carbonate de calcium et il existe en minéralogie une loi terrible : le plus faible se sacrifie au profit du plus fort. Autrement dit, le carbonate se dissout, sature la solution en calcium, si bien que le phosphate se trouve protégé. Au total, dans les grottes, les débris osseux sont peu ou pas attaqués. Et l'enfouissement y est naturel : chute de stalactites, apport par les circulations d'eau de particules terreuses elles mêmes saturées en calcium.

- **Massacres et guerres.** Beaucoup d'hommes ont été massacrés et jetés dans des fosses constituant autant de résidus archéologiques pour plus tard. La tranchée des baïonnettes, à Verdun, est un exemple mythique, pourtant fort discuté. Environ cinquante de nos poilus auraient été enterrés brutalement et vivants par des obus, alors qu'ils étaient debout. Seuls leurs fusils auraient émergé du sol après l'attaque ennemie.

- **Sépultures.** Très évidemment, il ne faut pas oublier que les hommes, ont appris à enterrer leurs morts. Les sépultures les plus anciennes connues ont presque



100 000 ans au Moyen-Orient. En Dordogne on trouve celles des Néanderthaliens entre -50 000 ans et -40 000 ans. Les cimetières c'est-à-dire les lieux d'ensevelissement organisé et groupé sont inventés au Néolithique, approximativement entre -9000 et -6000 ans avant J-C.

Au terme de cette revue des milieux d'enfouissement, il est essentiel de bien voir que tous ensemble, ils ne constituent qu'une faible part de la surface de la Planète. Sur des étendues considérables sévissent érosion mécanique et érosion chimique. Là, les sols n'exercent aucune protection sérieuse à long terme.

## 2) Exemples de milieux plus ou moins protecteurs

- **Les limons d'origine éolienne**, les loëss sont généralement calcaires et ils retiennent bien l'eau si bien que le drainage profond y est faible. Donc, ils sont protecteurs même si, sous l'influence de la pluie, ils s'acidifient lentement dans leur partie superficielle. Dans l'hémisphère nord, ils sont abondants aux moyennes latitudes : nord de la France, Belgique, Allemagne, sud de la Russie, Chine... En installant la ligne du TGV Est, on a mis à jour dans les loëss, en 2009, à Gougenheim en Moselle, 44 squelettes en excellent état de conservation en dépit de leur âge de 6000 ans (Néolithique).

- **Les vertisols**, sols noirs, calcaires ou saturés en calcium et en tout cas très argileux, donc difficilement pénétrés par l'eau, sont également protecteurs. Ils sont communs dans les régions intertropicales sèches. Ils facilitent la fossilisation. On y a trouvé des os de dinosaures datés du Crétacé [PAICK *et al*, 2001].

- **Les grottes** constituent des milieux favorables, nous l'avons vu. On y a trouvé en 1929 l'homme de Pékin. Les sols correspondants ont fait l'objet d'études très détaillées [GOLDBERG *et al*, 2001]. Les ossements sont inclus dans des strates successives intercalées de couches riches en éclats carbonatés. Elles correspondent donc à un milieu saturé en calcium offrant des conditions de très bonne conservation. Elles expliquent le maintien de débris d'os de 400 000 ans ou plus.

En revanche les sols acides sur granite, gneiss ou dépôts houillers sont corrosifs sous toutes les latitudes. C'est le cas à Bibracte, en plein Morvan, à 800 m d'altitude sous forêt de hêtres et résineux. Certes on a exhumé là les murs qui révèlent la trace de toute une ville et des matériaux résistants : amphores et

<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>

quelques volumineuses pièces en bronze. Mais on lit dans la Presse locale : « *La mise en valeur du site du mont Beuvray a été décidée en 1980. Dans son édition du 17.9.85, le Journal de Saône-et-Loire déclare que les fouilles laissent augurer d'importantes découvertes. Un centre archéologique européen et un musée de la civilisation celtique sortent de terre, point culminant d'un projet de grande envergure au bénéfice d'une archéologie française en quête de reconnaissance nationale et internationale. Le mont Beuvray est le dernier des grands travaux du Président Mitterrand. Mais, à la grande surprise des archéologues, les fouilles ne donnent pas les résultats escomptés...* ». Et le musée du Beuvray expose des copies d'objets gaulois découverts ailleurs.

#### **IV .DISCUSSION**

Pour obtenir des informations sur les hommes préhistoriques et les civilisations du passé il faut tout à la fois la coïncidence d'un enfouissement hypothétique, d'une conservation assurée dans certains milieux seulement et aussi la chance de la découverte fortuite du site intéressant. Donc, ce qui nous est donné de connaître est très réduit. Par exemple, les géologues pensent que seulement 20% des espèces animales ou végétales ayant vécu dans le passé ont été identifiées. Par exemple aussi, on découvre tous les ans de nouvelles espèces de dinosaures. Bref, nous voyons notre passé partiellement et au travers de lunettes déformantes. Il faut en prendre conscience et on peut donc s'interroger sur plusieurs points.

Le paléolithique inférieur est surtout connu par ses solides outils en silex ou roches voisines (bifaces, hachereaux) et par ses traces de feux, le charbon étant particulièrement résistant dans les sols. A partir du paléolithique moyen, toutes les périodes sont définies en relation avec des abris sous-roche (calcaire) ou des grottes (Moustérien, Aurignacien, Solutréen, Magdalénien, etc.). Cela concerne en particulier la grande majorité des 84 sites du paléolithique supérieur (30 000 ans – 12 000 ans) connus en France, par exemple les très célèbres grottes Chauvet, Cosquer et Lascaux... On a justifié de différentes façons l'attrait des hommes pour les grottes : protection contre les bêtes, le froid, intérêt irrésistible pour des sites à fort caractère. Tout cela est logique quand on envisage la dernière période glaciaire pendant laquelle l'hiver était certainement moins rude sous terre que dehors. Mais

pourquoi les néanderthaliens de Palestine (Amud, Tabun, Kebara), seraient-ils allés vivre en permanence au fond des grottes, dans des sites froids et humides, alors que dehors il faisait si bon ? A qui fera-t-on croire que les hommes de ces temps là ne franchissaient pas la frontière invisible séparant les contrées calcaires des contrées granitiques ! Ils ont progressivement conquis le monde et étaient autrement aventureux ! Mais, si des hommes du paléolithique ont vécu dans nids de branchages ou des tentes en peau de bêtes, ceci dans les forêts granitiques du Massif Central, des Vosges ou de Bretagne, ils ont été depuis dissous jusqu'à la dernière vertèbre, qu'ils aient été ou non enterrés après leur mort. On a donc peu de chances de retrouver la trace de l'homme des cavernes... hors des cavernes même si c'est là qu'il se tenait principalement ! D'ailleurs, on observe bien des traces de campement, mais seulement quand ils ont été installés aux bords de lacs ou de fleuves dont les boues ont conservé différents éléments en particulier la base des poteaux des habitations. Bref, il y a de quoi se poser des questions : ce qu'on retrouve dans les seuls milieux où on peut retrouver quelque chose est-il réellement représentatif des modes de vie anciens ?

Le second point d'interrogation intéresse directement l'origine de l'homme. En 1974, une équipe codirigée par Yves Coppens a découvert la fameuse « Lucy » dans l'est de l'Afrique. Coppens a décrit les conditions de milieu correspondant à cette découverte d'une australopithèque de 3,18 millions d'années et alors considérée comme un pré-hominidé [COPPENS, 1988]. Il s'agissait d'un enfouissement naturel dans des alluvions qui se sont accumulées sur plus de 1000 m d'épaisseur et ont été régulièrement saupoudrées par des éruptions volcaniques. La conservation a été assurée car le milieu est globalement sec et basique. Les couches fossilifères ont été mises à jour par suite de la fracture ouverte, dans l'est de l'Afrique, par des phénomènes tectoniques de grande ampleur (rift africain). Coppens aurait pu en déduire que cette extraordinaire conjonction de phénomènes ne laissait pas grande chance de tomber ainsi par hasard et directement sur le vrai ancêtre de l'homme. Mais au lieu de cela, l'auteur, non sans malice, retourne les arguments : pour lui, c'est par ce que les conditions étaient exceptionnelles dans cet endroit là que l'homme y est apparu. Selon Coppens, dans un contexte d'aridification, les arbres venaient à manquer pour grimper et voir au loin. Nos ancêtres, alors quadrupèdes, auraient eu intérêt à se redresser pour que leur vue passe au dessus des herbes (je

<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>

simplifie un peu !). De l'autre côté du rift, c'est-à-dire dans l'ouest de l'Afrique, la forêt serait demeurée et les singes auraient continué à courir à quatre pattes. C'était « *l'East Side Story* » [SCIENCE ACTUALITE, 2009]. Mais depuis, on a trouvé des pré-hominidés dans l'ouest africain, là aussi dans les zones sèches. Cela concerne en particulier, le très célèbre Toumaï, vieux de 7 millions d'années, découvert au Tchad, en 2001. En plus, la filiation Lucy-homme est une hypothèse maintenant abandonnée. On permettra de remarquer que si les préhominidés se sont primitivement adaptés, comme le gorille, à la forêt chaude et humide d'Afrique, on aurait peu de chance de le prouver en retrouvant des squelettes. Les archéologues de la dernière génération ont bien conscience du problème. Dans l'exposition qu'ils ont organisée à la Cité des Sciences et de l'Industrie, sur le thème « *De Toumaï à Sapiens, la ruée vers l'Homme* » (mars-juin 2009), ils indiquent à plusieurs reprises que le milieu forestier africain est pour l'essentiel acide et ne conserve par les ossements. Ils pensent maintenant que les premiers hominidés se sont développés dans toute l'Afrique il y a 6 millions d'années. Pour Brigitte Senut, professeur au Muséum, l'homme serait - je simplifie encore - monté dans l'arbre comme quadrupède avant d'en redescendre comme bipède. Cela se résume par une formule lapidaire : *L'homme ne descend pas du singe ; il est un singe parmi d'autres*. L'idée que les pré-hominidés ont vécu dans les forêts humides a d'ailleurs reçu des éléments locaux de confirmations. Certes, les grands boucliers sur gneiss ou granite des régions intertropicales sont généralement trop pluvieux ou acides pour conserver les ossements à l'échelle du million d'année. Mais il y a une exception : les massifs calcaires ! Ceux-ci sont rares et soumis à une dissolution gigantesque qui, par exemple, a sculpté le plateau de Bemaraha à Madagascar, la fameuse baie d'Along au Vietnam et la région de Guilin en Chine. C'est dans ce type de milieu qu'il faut chercher ! En Asie du sud-est, à plusieurs endroits, on a trouvé des pré-hominidés. Par exemple, dans l'île de Florès, dans une grotte, on a creusé très profondément les sédiments et on a fini par trouver un crâne, aussitôt baptisé « homme de Florès » (*Homo floresiensis*), individu gracile, pesant moins de 30 kg et grand seulement d'un mètre.

Enfin, les civilisations anciennes grecques, romaines et même égyptiennes, doivent beaucoup à leurs sols calcaires. Ceux-ci les ont convenablement nourri et leur ont évité un déficit en calcium. Les roches correspondantes ont constitué pour

<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>

elles un matériau de construction qui est manifestement le meilleur du monde et a permis de bâtir des monuments de grande ampleur et aussi de réaliser des œuvres culturelles en grand nombre. Et c'est encore le milieu calcaire qui a offert à ces civilisations la meilleure conservation possible de leurs traces. Il conviendrait de ne pas l'oublier afin d'éviter de trop croire à la supériorité culturelle de la civilisation gréco-latine.



**Photo 5.** Parfait état de conservation de la face avant d'un sarcophage romain en marbre (même si le marbre a sans doute été repoli) trouvé enfoui dans le sol à Perge (Turquie) et daté approximativement du troisième siècle de notre ère. Photo auteur.

A l'inverse, si on connaît si mal les civilisations africaines de la zone humide c'est qu'elles n'ont pas eu les mêmes chances : sols pauvres, matériaux de construction moins favorables en général, possibilités de conservation particulièrement réduites. C'est la même chose en Asie du sud-est. Par exemple, en Birmanie, les stupas (petites pagodes) ont été fabriqués en briques car il n'y avait pas de pierres disponibles. Exposés en surface à un climat humide et chaud, ils s'altèrent rapidement et, faute de protection adaptée, leur avenir est incertain.

<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>



**Photo 6.** Stupas birmans du 16<sup>ème</sup> siècle, en mauvais état de conservation, au sud du lac Inlé, en Birmanie.  
Photo auteur.

## CONCLUSION

Cet exposé qui a mis l'accent sur la conservation plus ou moins bonne des résidus archéologiques par le milieu et par les sols, n'avait pas la prétention de donner des leçons aux archéologues. Certains sont très au fait de ces questions. Mais, pour le moins, notre texte démontre qu'un dialogue doit être établi entre archéologues et pédologues. Or, les publications archéologiques cosignées par les spécialistes du sol sont peu nombreuses en France. La seule revue française de science du sol (EGS) n'en publie presque jamais. Un ouvrage récent, sympathique et utile, s'intitule : « *Les Sciences de la Terre appliquées à l'Archéologie* ». Il insiste sur la nécessité de bien prendre en compte le contexte dans lequel l'archéologie est pratiquée. Il cite les spécialistes de Science du sol à toutes les pages ou presque. Mais, les bons préceptes qu'il donne restent à appliquer. Par exemple, Il faudrait prendre en compte la nature des sols dans les fouilles d'archéologie préventive telles qu'on les réalise avant de construire une autoroute ou une voie de TGV. Il est clair que la probabilité de trouver quelque chose dépend des milieux. En Angleterre, l'idée a été émise d'une délimitation des sols sur la thématique « préservation archéologique possible » [WARD *et al*, 2008]. Pour les spécialistes du sol, l'alliance

avec les archéologues serait précieuse. Elle permettrait des progrès sur un des points où nous sommes bien faibles : la datation de l'âge des sols.

Au-delà, et même si nous avons montré le caractère rare de la préservation des vestiges par le sol, il faut bien voir qu'il y a lieu de s'en réjouir. Heureusement que le sol fait disparaître les résidus des civilisations passées et heureusement qu'il digère les cadavres d'animaux et d'hommes. Sinon, la surface de la planète, contaminée par des débris de toutes sortes, ne serait plus vivable. Les chercheurs de l'université de Göttingen (Allemagne) travaillant sur le risque de contamination par l'ESB des betteraves à sucre en relation avec le fait qu'elles emportent des particules de terre jusqu'à l'usine, se sont aperçus que, dans la partie supérieure de la plupart des sols, les os des animaux ne sont pas détruits complètement mais persistent au niveau des sables fins, peut-être pendant des millénaires. Dans leur mise au point de 2004, ils indiquent qu'on ne peut pas chiffrer la quantité de matière osseuse en cause. Mais dans des conversations avec des journalistes, en 2005, ils ont lâché un chiffre : de 9 à 99 tonnes de résidus osseux à l'ha ! Effrayant, non ?

## BIBLIOGRAPHIE

- BECRIAUX R., 2009. Atacama : les momies des sables. *Académie des Sciences et Lettres de Montpellier*, séance du 9/02/2009. Bull. tome 40, pp. 41-47.
- AMBERT M., BESSET F., LE STRAT P., ROSSI PF., 2004. *Hérault, miroir de la Terre*. BRGM Editions, 158 p.
- BERNA F., MATTHEWS A., WEINER S., 2003. Solubilities of bone mineral from archeological sites: the recrystallization window. *Journal of Archeological Science*, 31 (2004), 867-882.
- BORNAND M., 1978. *Altération des matériaux fluvio-glaciaires, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône*. Thèse d'Etat, USTL, Montpellier, 325 p + annexes.
- BORNAND M., LEGROS J.P., 2009. Carte pédologique de France, *feuille de Saint-Etienne*, carte à 1/100.000 et Notice de 290 pages + annexes.
- COPPENS Y., 1988. *Pré-ambules. Les premiers pas de l'Homme*. Editions Odile Jacob, 247 p.

- GE T., MIGEON W., SZEPERTYSKI B., 2005. L'élévation séculaire des berges antiques et médiévales de Bordeaux. Etude géoarchéologique et dendrochronologique. *Compte Rendus Géosciences*, vol. 337, 3, février, pp. 297-303.
- GOLDBERG P., WEINER S., BAR-YOSEF O., XU Q., LIU J., 2001. Site formation processes at Zhoukoudian, China. *Journal of Human evolution*; vol. 41, n°5, 483-530.
- GORDON C.C., BUIKSTRA J.E., 1981. Soil, pH, bone preservation, and sampling bias at mortuary sites. *American Antiquity*, vol. 46, 3, pp. 566-571.
- HENDERSON J., 1987. Factors determining the state of preservation of human remains, in A. Boddington, A.N. Garland, R.C. Janaway (eds), *Death, Decay and reconstruction, Approaches to archaeology and forensic science*, Manchester University Press, Manchester, p. 43-44.
- JING Z., RAPP Jr G., GAO T., 2007. Holocene landscape evolution and its impact on the Neolithic and bronze age sites in the Shangqiu area, Northern China. *Geoarcheology*, vol. 10, 6, pp. 481-513.
- JOHNSON E. , 2005. The taphonomy of mammoth localities in southeastern Wisconsin (USA), *Quaternary International* 142–143 (2006) 58–78.
- LEGROS J.P., 2007. *Les grands Sols du Monde*, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 574 p.
- LEGROS J.P., 2008. Sol d'alluvions et art Roman, Lettre de l'AFES n°88, nov., p. 9.
- LEGROS J.P., 2009. La salinisation des terres dans le Monde, *Académie des Sciences et Lettres de Montpellier*, séance du 22/06/09, bull. n° 40, 257-269.
- LU H. , SUN D., 2000. Pathways of dust input to the Chinese Loess Plateau during the last glacial and interglacial periods. *Catena*, 40, 251-261.
- LUCAS Y, 1989, *Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne. Equilibres, déséquilibres et transformations*. Thèse, Université de Poitiers, n°211, 157 p.
- NIELSEN-MARSH C.M., SMITH C.I., JANS M.M.E., NORD A., KARS H., COLLINS M.J., 2007. Bone diagenesis in the European Holocene II: taphonomic and environmental considerations. *Journal of Archeological Science*, 34, (2007), 1523-1534.
- PAIK I.S., KIMH.J, PARK K.H., SONG Y.S., LEE Y.II., HWANG J.Y, HUH M., 2001. Palaeoenvironments and taphonomic preservation of dinosaur bone-bearing deposits in the Lower Cretaceous Hasandong Formation, Korea, *Cretaceous Research* (2001) 22, 627–642
- PESTKA J.M., BARVENCIK F., BEIL F.T., MARSHALL R. P., JOPP E., SCHILLING A. F BAUEROCHSE A., FANSA M., PÜSCHEL K., 2010., Skeletal analysis and



<http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>

comparison of bog bodies from Northern European peat bogs, Springer, *Michael Amling Naturwissenschaften* (2010) 97:393–402

RICK T.C, 2002. Eolian processes, ground cover, and the archeology of costal dunes: A taphonomic case study from San Miguel Island, California, USA. *Geoarcheology*, vol. 17, 8, pp. 811-833.

SCIENCE ACTUALITE, 2009. *De Toumaï à Sapiens, la ruée vers l'homme*. Plaquette de la Cité des Sciences, 18 p.

TRUEMAN C.N.G., BEHRENSMEYER A.K., TUROSS N., WEINER S., 2004. Mineralogical and compositional changes in bones exposed on soil surfaces in Amboseli National Park, Kenya : diagenetic mechanism and the role of sediment pore fluids. *Journal of Archeological Science*, 31 (2004), 721-739.

WARD I., SMITH B., LAWLEY R., 2008. Mapping the archeological soil archive of sand and gravel mineral reserves in Britain. *Geoarcheology*, vol. 24, 1, pp. 1-21.