

## Chapitre 12

# Interface air-sol : les séquences lœssiques, marqueurs de la circulation atmosphérique

**Christine HATTÉ**, *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR CEA-CNRS-UVSQ 8212, Domaine du CNRS, 91198 Gif-sur-Yvette, France.*

**Denis-Didier ROUSSEAU**, *École Normale Supérieure de Paris, Laboratoire de Météorologie Dynamique, UMR CNRS 8539, École CERES-ERTI, 24 rue Lhomond, 75231 Paris, France.*  
*Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, NY 10964, USA.*

### 12.1 Présentation des lœss

Le lœss est un sédiment éolien qui est relativement fréquent en domaine continental (Fig. 12.1). En Europe et en Amérique du Nord, il est distribué à proximité d'anciens déserts polaires ou de moraines frontales des gigantesques inlandsis qui s'étaient développés sur ces continents pendant les glaciations. En Asie par contre, la situation est différente, puisque le Plateau de lœss est situé au sud des déserts du nord de la Chine et du sud de la Mongolie. Les sédiments lœssiques couvrent donc un vaste territoire dans l'hémisphère nord, à des latitudes où très peu d'autres enregistrements des paléoclimats glaciaires sont disponibles, alors qu'à des latitudes plus méridionales, lacs, tourbières, voire spéléothèmes et sédiments marins collectés non loin des côtes fournissent des archives continentales d'une grande qualité.

Le lœss est un sédiment fin transporté principalement par le vent à des altitudes variables selon la granulométrie considérée, mais aussi l'état du

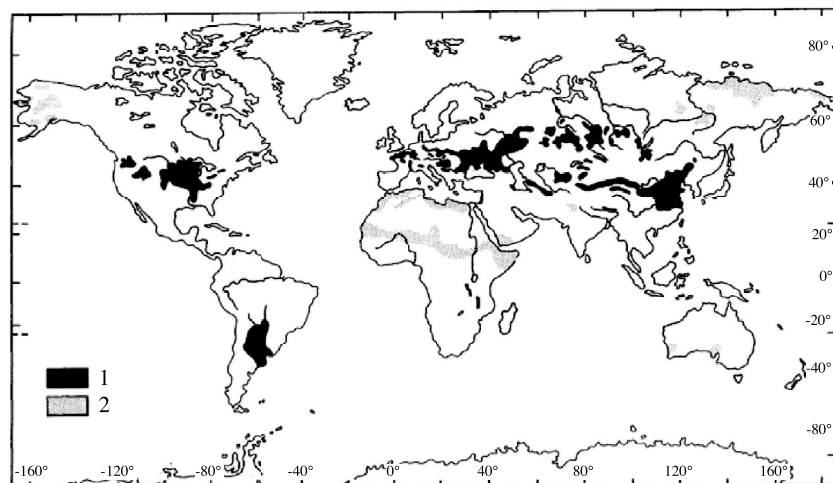


FIG. 12.1 – Distribution globale des sédiments loessiques et assimilés. 1 : sédiments loessiques ; 2 : dérivés loessiques (d’après Pécsi [23] modifié).

substratum et des conditions environnementales dans la région d’origine du matériel (Fig. 12.2). D’une manière simplifiée, le matériel grossier est déplacé sur des distances ne dépassant pas la centaine de kilomètres et le transport se fait principalement par saltation, c’est-à-dire par une série de sauts successifs. Au contraire, le matériel fin (argiles. . . ), qui peut avoir une origine locale, peut également avoir été transporté à des altitudes de plusieurs kilomètres sous la forme de poussières minérales et avoir été redéposé via des dépôts humides ou secs (selon qu’ils sont associés ou non à des précipitations). Par essence donc, le loess, est généralement un marqueur de la circulation atmosphérique passée.

## 12.2 Les loess comme source d’indicateurs paléoclimatiques

Bien que déposés à des latitudes moyennes ou hautes dans des conditions climatiques peu favorables au développement biologique, différents indicateurs paléoenvironnementaux sont néanmoins disponibles dans ce type de matériel. Quatre grandes catégories sont présentées ci-après.

### 12.2.1 Les indicateurs sédimentologiques

L’observation même d’une séquence loessique est très instructive. En effet, quand l’enregistrement couvre un ou plusieurs cycles climatiques, celui-ci n’est

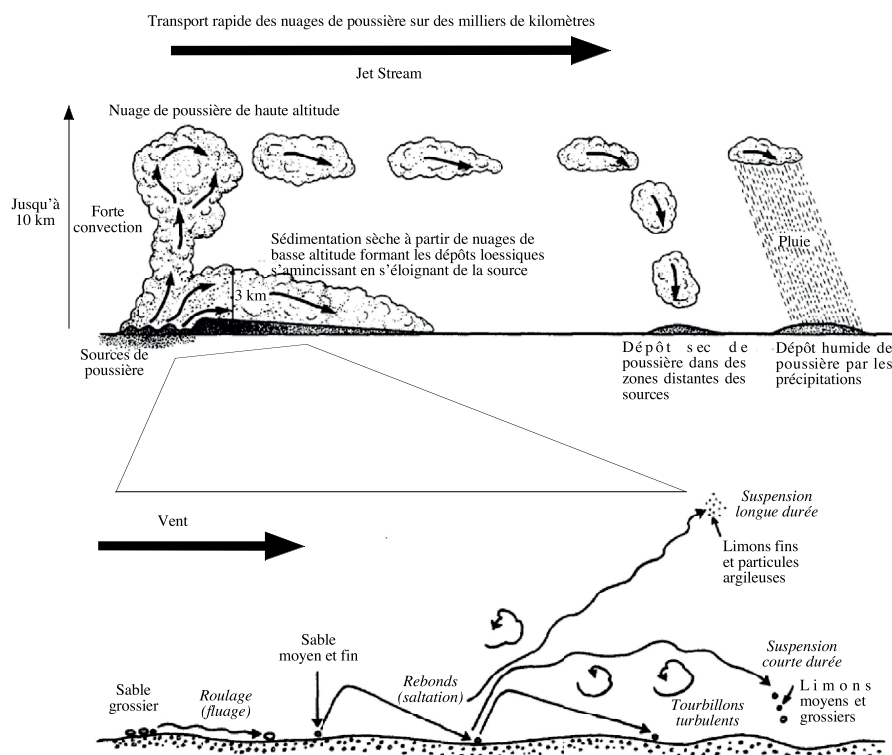


FIG. 12.2 – Représentation synthétique des différents types de transport de poussière contribuant à la formation des dépôts loessiques. A – Deux modes de transport et de dépôt de la poussière éolienne identifiés depuis les déserts du nord-ouest de la Chine vers le Plateau de Loess et l’Océan Nord Pacifique durant le Quaternaire (d’après Pye et Zhou [24] modifié). B – Schéma montrant les différents modes de transport du sédiment éolien notamment aux bas niveaux de l’atmosphère (d’après Pye [25] modifié).

jamais composé d’une seule unité stratigraphique. Si le sédiment loessique caractérise les périodes froides et plus ou moins arides, d’autres périodes, plus clémentes, sont marquées par des paléosols. Ainsi, si à basse résolution, la succession paléosol-loess correspond à un ou des cycles climatiques, à plus haute résolution, la reconnaissance d’événements plus fins se fait par l’observation de successions de sols ou d’une hiérarchie particulière d’unités pédosédimentaires [1]. En Europe, un paléosol brun lessivé (Bt), racine d’un sol brun, marquera un niveau interglaciaire, alors qu’un sol humifère forestier ou un gley de toundra (sol hydromorphe) marqueront des intervalles plus ou moins tempérés de type interstadiaire [2]. La granulométrie, via la détermination des classes dominantes, du mode, ou de rapports de classes, permet de caractériser

d’une manière relative la force du vent qui a mis en place les dépôts [3,4]. Cette dynamique éolienne est associée aux variations de la circulation atmosphérique générale (Fig. 12.3).

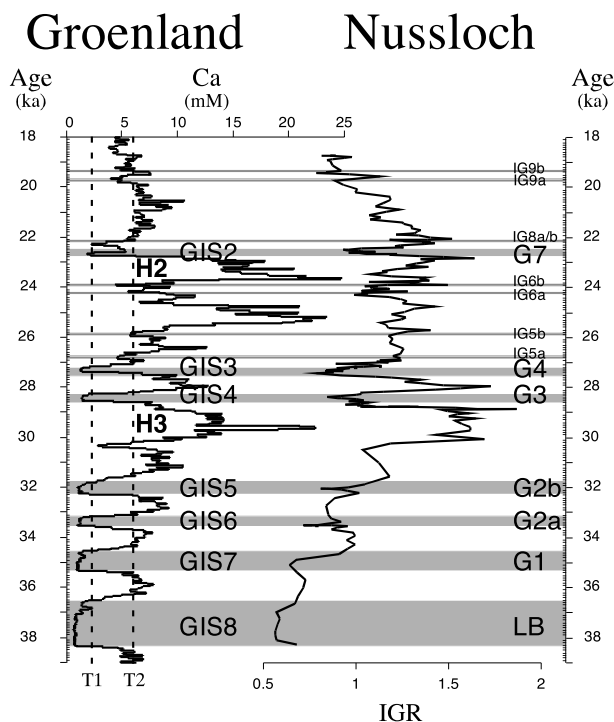


FIG. 12.3 – Corrélation des variations de l’indice granulométrique (IGR) défini à Nussloch avec celles de la concentration en calcium (représentant la poussière transportée) dans le sondage GRIP. Le seuil T1 appliqué aux données du Groenland permet de mettre en évidence les principaux intervalles de faible concentration de poussières, ce qui correspond aux interstades dits de Dansgaard-Oeschger (DOI) 8 à 2. Ils sont corrélés à des intervalles où IGR présente de **faible** à Nussloch, correspondant à un sol brun boréal dénommé Lohne Boden (LB) ou à des gleys de toundra bien développés (G1, G2a, G2b, G3, G4 et G7). Le seuil T2 délimite les intervalles à très forte concentration en poussière au Groenland, ce qui correspond aux stadiers des DO, ainsi que quelques pics de poussière moins importants (d’après Rousseau *et al.* [4] modifié).

À compléter

Une autre caractéristique, l’épaisseur des unités, permet également de faire le lien avec la dynamique éolienne. En effet, le suivi d’une unité particulière sur un territoire donné va permettre de caractériser des gradients qui seront orientés selon les vents dominants, la partie la plus épaisse étant au vent [3] (Fig. 12.4). La minéralogie, notamment la composition en minéraux lourds,



FIG. 12.4 – Carte d’Amérique du Nord indiquant l’extension maximale de la calotte Laurentide au dernier maximum glaciaire, avec les vents du système anticyclonique modélisés par COHMAP et ceux dérivés de l’épaisseur mesurée sur le terrain. Indication des influences océaniques déduites (d’après Rousseau *et al.* [3] modifié).

permet également de retracer l’origine de certains dépôts et d’en déduire les vents dominants ayant présidé au transport.

### 12.2.2 Les indicateurs géochimiques

La deuxième catégorie d’indicateurs concerne les indices géochimiques et notamment isotopiques qui constituent un outil puissant ouvrant d’indéniables perspectives d’étude. Ainsi l’analyse du  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique préservée en très petite quantité dans le sédiment loessique traduit la présence de végétation; celle-ci peut être également observée via la présence de concrétions carbonatées se développant autour des racelles des herbacées (par exemple, [5, 6]). Les valeurs de ce rapport isotopique permettent également de caractériser le type de végétation et donc les conditions environnementales et climatiques associées. La discrimination peut se faire au niveau du cycle photosynthétique (plantes en C3 par rapport à celles en C4) ou à l’intérieur

d'un même type photosynthétique par la définition des saisonnalités en température ou précipitation. L'inversion de modèles de végétation incluant un module de fractionnement isotopique permet alors de reconstituer avec fiabilité les fluctuations du régime de précipitations annuelles survenues durant le dépôt de la séquence [7] (Fig. 12.5). L'analyse d'autres éléments chimiques, comme les terres rares, ou d'autres isotopes, permet de rechercher l'origine du matériel transporté à partir d'échantillons prélevés dans les zones sources potentielles et ainsi d'estimer les mécanismes liés au transport [8, 9].

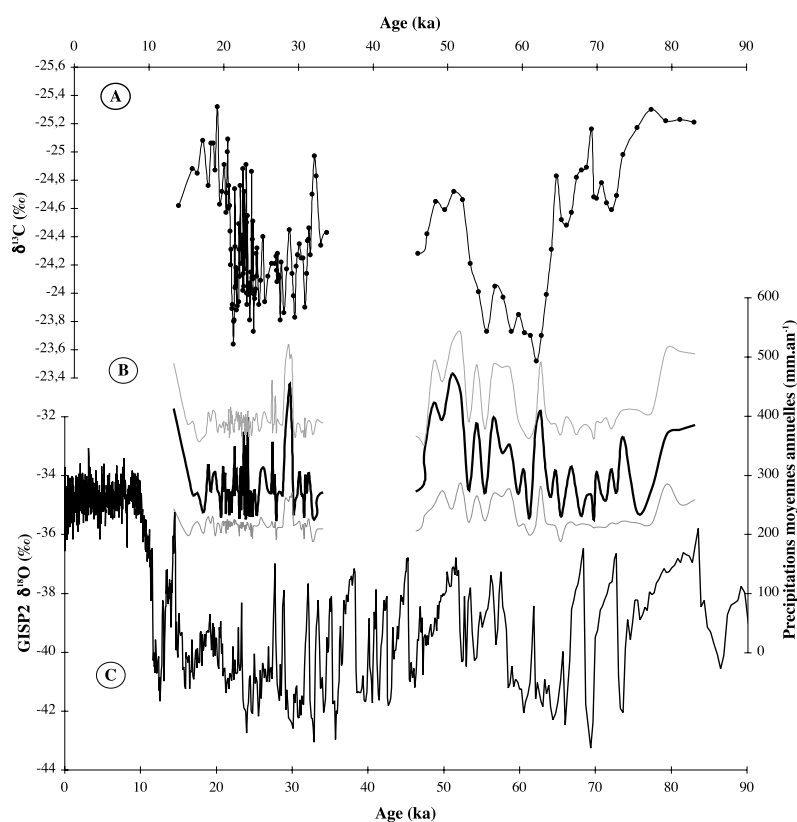


FIG. 12.5 – Reconstitution des paléo-précipitations à Nussloch au cours des derniers 80 ka. A –  $\delta^{13}\text{C}$  en fonction du temps. La gamme des valeurs obtenues correspondent à des plantes de type photosynthétique C3. B – Reconstitution des paléoprécipitations par modélisation inverse du signal isotopique (d'après Hatté et Guiot [7] modifié). C – Comparaison avec le  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces du Groenland (GISP2). Pendant les périodes de haut niveau marin, les phases chaudes des événements de DO se traduisent par une nette augmentation des précipitations (+30 à 40 %), alors que pendant les périodes de bas niveau marin, l'éloignement du trait de côte préserve Nussloch de toute amélioration climatique qui pourrait résulter d'un épisode chaud.

### 12.2.3 Les indicateurs géophysiques

Il s’agit principalement de la susceptibilité magnétique en champ faible qui permet d’une part, de caractériser les différentes unités lithologiques présentes dans une même séquence, et d’autre part, d’appréhender l’origine du matériel via la granulométrie magnétique [10]. En général, les unités lœssiques typiques présentent des valeurs de susceptibilité magnétique relativement basses, contrairement aux paléosols qui eux sont caractérisés par des valeurs nettement plus élevées. Largement utilisée dans les séquences chinoises, la susceptibilité magnétique basse fréquence avait été interprétée par Kukla *et al.* [11] comme correspondant à un apport relativement constant en matériel fin au cours du temps. Dans cette hypothèse, la pédogenèse associée à la formation des différents paléosols interglaciaires chinois concentrait les grains magnétiques. Kukla a ainsi été conduit à proposer un modèle chronologique indépendant de tout calibrage astronomique, tout en supposant les séquences continues et complètes. Toutefois, la découverte dans les paléosols de bactéries sécrétant des grains magnétiques a remis en cause cette hypothèse qui fait toujours l’objet de débats [12]. Par contre, des études sur les sols chinois actuels le long de gradients reflétant l’impact de la mousson estivale ont permis de proposer une calibration du signal de susceptibilité et d’établir une fonction de transfert permettant de reconstituer, pour cette région, les paléoprécipitations annuelles en relation avec les variations de la mousson est-asiatique [13]. Une nouvelle méthode de caractérisation de l’origine des lœss consiste à travailler directement sur un grain de quartz et d’en étudier à la fois l’indice de cristallinité et l’intensité du signal de résonance de spin. Cette récente technique permet de différencier l’origine des grains et ainsi de suivre les variations de source du matériel transporté. Appliquée pour la première fois dans des séquences lœssiques chinoises, cette méthode a permis de préciser l’origine des grains de quartz transportés vers le Plateau de Loess (désert de Gobi pendant les périodes stadias, déserts du nord de la Chine pendant les périodes plus clémentes) [14].

### 12.2.4 Les indicateurs biologiques

Ceux-ci sont relativement diversifiés. Si des restes de micromammifères, os, dents, voire crânes, ou de macromammifères peuvent être identifiés de manière plus ou moins sporadique, d’autres fossiles sont par contre plus fréquents. Parmi ceux-ci, les mollusques terrestres constituent des assemblages typiques d’environnement diversifiés [15, 16]. Identifiés généralement au niveau spécifique, ces organismes présentent l’intérêt d’être encore représentés actuellement. En application du principe de l’actualisme, il est possible d’appliquer les exigences et caractéristiques écologiques actuelles aux individus fossiles. Des analyses statistiques multivariées permettent de reconstituer l’environnement dans lequel une communauté fossile s’est développée [15]. L’utilisation des exigences écologiques des taxons recensés dans les lœss chinois a permis

de définir des groupes écologiques qui s'avèrent être des indicateurs fiables des paléomoussons estivales et hivernales (Fig. 12.6). Des fonctions de transfert faisant appel aux mollusques terrestres et développées sur le principe des analogues actuels ont été mises au point pour reconstruire les températures saisonnières sur des séquences de loess européennes [17].

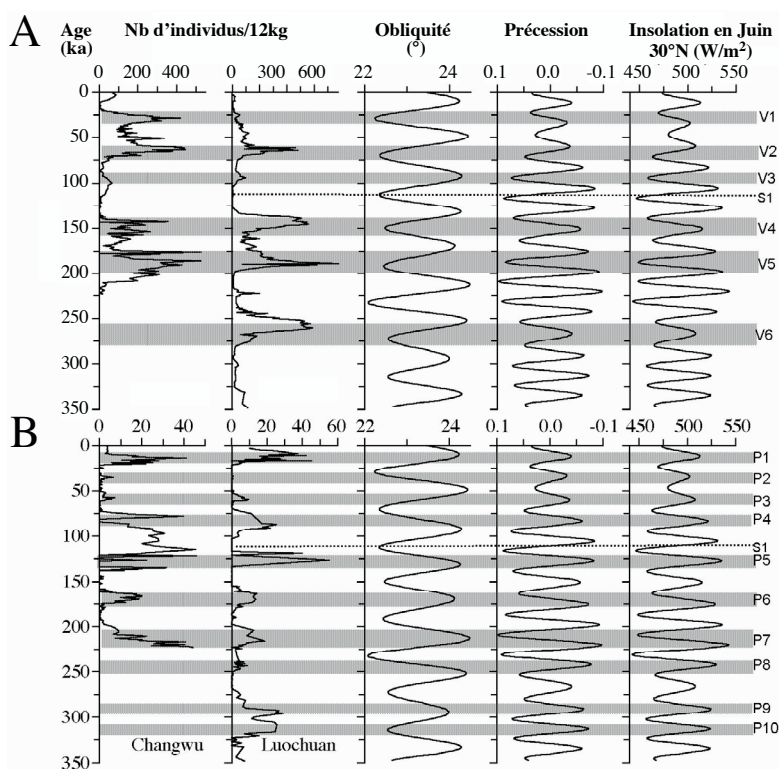


FIG. 12.6 – Variations de l'abondance de mollusques caractéristiques des paléomoussons estivaux et hivernaux durant les trois derniers cycles climatiques dans deux séquences du Plateau du Loess chinois (Changwu et Luochuan) et leur relation avec les paramètres astronomiques et l'insolation à 30°N. A – Variations de l'abondance de *Vallonia tenera* et *Pupilla aeoli*, indicateurs de la paléomousson hivernale. B – Variations de l'abondance de *Punctum orphana*, indicateur de la paléomousson estivale (d'après Wu *et al.* [16] modifié).

De nombreuses autres méthodes ont encore été développées à partir des micromammifères ou des coléoptères, en utilisant comme référence la répartition actuelle des espèces et les gammes moyennes de climat associé [18]. Les mollusques terrestres ont aussi été étudiés via leur signature en acides aminés. Cette approche permet de distinguer des différences importantes d'un cycle climatique à l'autre [19]. Un autre indice paléoclimatique est également étudié

dans les sédiments lœssiques, les phytolithes, concrétions siliceuses présentes dans les tissus superficiels des plantes. Elles sont parfois bien préservées et identifiées, en particulier dans les séquences lœssiques chinoises, où elles ont permis de reconstituer les températures et les précipitations du dernier cycle climatique [20].

### 12.3 Un exemple européen : la séquence de Nussloch dans la vallée du Rhin

Cette série lœssique présente une sédimentation contrastée, résultat de l'influence de l'océan Atlantique Nord, qui donne lieu à des environnements plus humides (développement de sols plus importants et de structures périglaciaires) et à des variations à haute fréquence (millénaire) des vitesses de dépôts de lœss. Selon des études basées sur une chronologie précise [21], ces variations, à haute fréquence, peuvent être reliées aux événements climatiques de Dansgaard-Oeschger (D/O) décrits dans les carottes de glaces du Groenland, ainsi que dans les carottes marines de l'Atlantique Nord [2–4, 7].

Les enregistrements de la concentration en poussière dans les carottes de glace du Groenland montrent des alternances entre des phases de fortes ou très faibles concentrations de poussières dans l'atmosphère en relation avec les variations d'un indice granulométrique à Nussloch [4]. Ainsi les faibles valeurs de l'indice granulométrique rencontrées dans les paléosols sont corrélées aux intervalles de faible concentration en poussière au Groenland qui eux-mêmes correspondent aux réchauffements associés aux événements D/O. Les fortes valeurs de l'indice granulométrique sont contemporaines des intervalles à forte concentration en poussière dans la glace et correspondent aux phases les plus froides et notamment aux événements de Heinrich [4] (Fig. 12.3). L'enregistrement des événements climatiques abrupts dans la pédostratigraphie de la séquence de Nussloch est également fonction de l'intensité et de la durée du réchauffement interstadiaire. Plus l'interstade à faible concentration en poussières au Groenland est long, plus il est marqué par un paléosol bien développé. Un interstade court est marqué par un gley (sol présentant une teneur importante en argiles et à texture plastique) dont la signature dépend de l'intensité du réchauffement [4]. Des variations similaires et synchrones ont été déterminées dans d'autres séquences de l'Europe occidentale, témoignant d'un schéma cohérent de la dynamique éolienne à l'échelle de l'Europe.

Les variations du  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique témoignent de conditions plus arides durant les phases froides des événements de D/O [5, 7] (Fig. 12.5). Les phases chaudes sont marquées par de plus grandes populations de mollusques terrestres, notamment *Succinea oblonga*, espèce hygrophile ([2] et références incluses).

En conclusion, les lœss enregistrent fidèlement les changements climatiques de l'échelle astronomique à l'échelle millénaire [6, 11]. Ils informent sur la

dynamique atmosphérique passée (champs de vent, régimes de précipitations et températures). En Europe, et plus particulièrement à Nussloch, les dépôts enregistrent l'influence des variations survenues dans l'Atlantique Nord, événements de Dansgaard-Oeschger ou de Heinrich [4]. En Asie, les principales fluctuations reconnues dans les séquences loessiques sont liées à celles de la mousson est-asiatique [22]. En Amérique du Nord, les dépôts éoliens des Grandes Plaines indiquent une influence mixte, Atlantique *lato sensu*, mais aussi Pacifique.

## Références bibliographiques

- [1] Kukla, G. J. et An, Z. S. (1989), « Loess Stratigraphy in Central China », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 72, pp. 203-225.
- [2] Antoine, P. *et al.* (2009), « Rapid and Cyclic Aeolian Deposition During the Last Glacial in European Loess : A High-Resolution Records from Nussloch, Germany », *Quaternary Science Reviews*, 28, pp. 2 955-2 973.
- [3] Rousseau, D.-D. *et al.* (2007), « Evidence of Cyclic Dust Deposition in the US Great Plains During the Last Deglaciation from the High-Resolution Analysis of the Peoria Loess in the Eustis Sequence (Nebraska, USA) », *Earth and Planetary Science Letters*, 262, pp. 159-174.
- [4] Rousseau, D.-D. *et al.* (2007), « Link Between European and North Atlantic Abrupt Climate Changes over the Last Glaciation », *Geophysical Research Letters*, 34, doi :10.1029/2007gl031716.
- [5] Hatté, C. *et al.* (2001), «  $\delta^{13}\text{C}$  Variation of Loess Organic Matter as a Potential Proxy for Paleoprecipitation », *Quaternary Research*, 55, pp. 33-38.
- [6] Wang, H. et Follmer, L. R. (1998), « Proxy of Monsoon Seasonality in Carbon Isotopes from Paleosols of the Southern Chinese Loess Plateau », *Geology*, 26, pp. 987-990.
- [7] Hatté, C. et Guiot, J. (2005), « Palaeoprecipitation Reconstruction by Inverse Modelling Using the Isotopic Signal of Loess Organic Matter : Application to the Nussloch Loess Sequence (Rhine Valley, Germany) », *Climate Dynamics*, 25, pp. 315-327.
- [8] Gallet, S. *et al.* (1996), « Geochemical Characterization of the Luochuan Loess-Paleosol Sequence, China, and Paleoclimatic Implications », *Chemical Geology*, 133, pp. 67-88.
- [9] Guo, Z. T. *et al.* (2002), « Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China », *Nature*, 416, pp. 159-163.
- [10] Lagroix, F. et Banerjee, S. K. (2002), « Paleowind Directions from the Magnetic Fabric of Loess Profiles in Central Alsaka », *Earth and Planetary Science Letters*, 195, pp. 99-112.
- [11] Kukla, G. *et al.* (1990), « Magnetic Susceptibility Record of Chinese Loess », *Transactions of the Royal Society Edinburgh : Earth Sciences*, 81, pp. 263-288.

- [12] Zhou, L. P. *et al.* (1990), « Partly Pedogenic Origin of Magnetic Variations in Chinese Loess », *Nature*, 346, pp. 737-739.
- [13] Maher, B. A. et Thompson, R. (1995), « Paleorainfall Reconstructions from Pedogenic Magnetic Susceptibility Variations in the Chinese Loess and Paleosols », *Quaternary Research*, 44, pp. 383-391.
- [14] Sun, Y. *et al.* (2008), « Tracing the Provenance of Fine-Grained Dust Deposited on the Central Chinese Loess Plateau », *Geophysical Research Letters*, 35, doi :10.1029/2007GL031672.
- [15] Rousseau, D.-D. (1987), « Paleoclimatology of the Achenheim Series (Middle and Upper Pleistocene, Alsace, France). A Malacological Analysis », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59, pp. 293-314.
- [16] Wu, N. Q. *et al.* (2001), « Orbital Forcing of Terrestrial Mollusks and Climatic Changes from the Loess Plateau of China During the Past 350 Ka », *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 106, pp. 20 045-20 054.
- [17] Rousseau, D.-D. (1991), « Climatic Transfer Function from Quaternary Molluscs in European Loess Deposits », *Quaternary Research*, 36, pp. 195-209.
- [18] Moine, O. *et al.* (2002), « Paleoclimatic Reconstruction Using Mutual Climatic Range on Terrestrial Mollusks », *Quaternary Research*, 57, pp. 162-172.
- [19] Oches, E. A. et McCoy, W. (1995), « Amino Acid Geochronology Applied to the Correlation and Dating of Central European Loess Deposits », *Quaternary Science Review*, 14, pp. 767-782.
- [20] Lu, H. Y. *et al.* (2007), « Phytoliths as Quantitative Indicators for the Reconstruction of Past Environmental Conditions in China II : Palaeoenvironmental Reconstruction in the Loess Plateau », *Quaternary Science Reviews*, 26, pp. 759-772.
- [21] Lang, A. *et al.* (2003), « High-Resolution Chronologies for Loess : Comparing AMS <sup>14</sup>C and Optical Dating Results », *Quaternary Science Reviews*, 22, pp. 953-959.
- [22] Guo, Z. T. *et al.* (2000), « Summer Monsoon Variations over the Last 1.2 Ma from the Weathering of Loess-Soil Sequences in China », *Geophysical Research Letters*, 27, pp. 1 751-1 754.
- [23] Pécsi, M. (1990), « Loess Is Not Just the Accumulation of Dust », *Quaternary International*, 7/8, pp. 1-21.
- [24] Pye, K. et Zhou, L. P. (1989), « Late Pleistocene and Holocene Aeolian Dust Deposition in North China and the Northwest Pacific-Ocean », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 73, pp. 11-23.
- [25] Pye, K. (1995), « The Nature, Origin and Accumulation of Loess », *Quaternary Science Reviews*, 14, pp. 653-667.

