



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Palevol

www.sciencedirect.com



Paléontologie humaine et préhistoire

Minéraux volcaniques et alpins à l'abri du Maras (Ardèche, France) : témoins de vents catabatiques dans la vallée du Rhône au Pléistocène supérieur



Volcanic and alpine minerals in the Maras rock shelter site (Ardèche, France): Witnesses of katabatic winds in the Rhône valley during the Late Pleistocene

Simon Puaud^{a,*}, Marianna Nowak^a, Sylvain Pont^b, Marie-Hélène Moncel^a

^a UMR 7194 CNRS « Histoire naturelle de l'homme préhistorique »/département de préhistoire du Muséum national d'histoire naturelle, 1, rue René-Panhard, 75013 Paris, France

^b Direction des collections/laboratoire de minéralogie et de cosmochimie, Muséum national d'histoire naturelle, 61, rue Buffon, 75005 Paris, France

I N F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Reçu le 10 octobre 2014

Accepté après révision le 3 février 2015

Disponible sur internet le 10 juin 2015

Suivi par Marcel Otte

Mots clés :

Téphras
Paléolithique moyen
Volcanisme
Vents catabatiques
Massif central
Couloir rhodanien
Alpes
France

R É S U M É

La reprise de fouilles sur le site du Maras (Paléolithique moyen, Ardèche) a permis de dégager une couche (n° 4) épaisse, comportant deux niveaux d'occupation (4.1 et 4.2) associés à des niveaux de blocs calcaires séparés par des lœss stériles. Ces lœss contiennent des minéraux volcaniques qui ne sont pas concentrés en lits distincts et probablement issus du remaniement de téphras. Leur nature apporte des éléments sur leur origine : clinopyroxène vert, zircon, sphène (Mont-Dore), olivine (Massif central et/ou Alpes). Le glaucophane est caractéristique des Alpes. Les minéraux montdorians proviennent de la dernière phase d'activité du Sancy (392–280 ka). Leur présence dans ces lœss datés de la fin du SIM 5 et du SIM 4 marque donc leur position secondaire. L'homogénéité minéralogique suppose la déflation récurrente des mêmes zones sources (couloir rhodanien/Massif central). L'abandon du site par les Néandertaliens à plusieurs reprises lors de la mise en place de la couche 4 serait à relier à la rigueur du climat propre aux conditions de dépôt des lœss.

© 2015 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

A B S T R A C T

Keywords:

Tephrae
Middle Palaeolithic
Volcanism
Katabatic winds
French Massif Central
Rhône corridor
Alpes
France

The new excavations at the site of Maras (Middle Palaeolithic, Ardèche) allow the identification of a thick layer (No. 4). It contains two human occupation phases (4.1 and 4.2) associated with beds of limestone fragments separated by sterile loess. Their study shows that they contain volcanic minerals that are not concentrated in tephrae levels. Nature provides evidence on their origin: green clinopyroxene, zircon, sphene (Mont-Dore), olivine (Massif Central and/or the Alps). The glaucophane is characteristic of the Alps. The Montdorians minerals come from the last phase of activity of Sancy (392–280 ka). Their presence in the loess dates to the end MIS 5 and beginning of MIS 4 thereby marks their

* Auteur correspondant. Institut de paléontologie humaine, 1, rue René-Panhard, 75013 Paris, France.

Adresse e-mail : puaud@mnhn.fr (S. Puaud).

secondary position. The mineralogical homogeneity implies recurrent deflation of the same source areas (Rhône Valley/Massif Central). The regular abandonment of the site by Neanderthals during the development of layer 4 would be connected with the severe climate allowing deposition of loess.

© 2015 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Abridged English version

Well-identified tephra in prehistoric and paleontological sites in the South-East France have been observed several times (Debard and Pastre, 2008). These minerals come from eruptions of volcanoes of the Massif Central (Fig. 1). These eruptions were located in the Mont-Dore massif or in the volcanic area of Bas-Vivarais. These eruptions took place during the Middle and Upper Pleistocene: during the last pyroclastic cycle of the Sancy volcano (Mont-Dore) between 392 ka and 280 ka (Nomade et al., 2012) and two or three times in the Bas-Vivarais: between 206 ± 13 ka and 170 ± 23 ka and 40 ± 6 ka and 15 ± 11 ka according to the most recent data (Nomade et al., 2014) and $166\,000 \pm 15\,000$ ans, $78\,800 \pm 5300$ ans and $45\,400 \pm 3200$ ans according to Guérin and Gillot (2007).

The discovery of these pyroclastites in archaeological context and primary position allows dating the sequences. These minerals also provide palaeogeographical data. Their nature indicates their sources and consequently the winds which brought them.

A part of the sequence of the Maras shelter (level 4) has been studied, in particular the silt deposits, in order to find tephra layers (Nowak, 2014). Sampling of the sediments, magnetic susceptibility and analysis of the heavy minerals observed at the SEM and their chemical composition (EDS probe) provide new data on the regional sedimentary dynamic contemporaneous of the Neanderthal occupations during the first part of the Upper Pleistocene (Marine Isotopic Stage, MIS, 5 and 4).

The abri du Maras is a rockshelter located in a small valley, close to the Ardèche gorges and the Rhône corridor. It is located at the junction of several natural areas, the Ardèche gorges, the plains of the Saint-Just and the Rhône valley, and finally the Saint-Remèze plateau. This location has largely affected the subsistence behaviors of Neanderthals when they occupied the site (Daujeard, 2008) and the deposit dynamics. A part of the infilling is composed of aeolian deposits due to the location of the shelter close to the Rhône Valley. These deposits came from the alluvial formations and the alpine till (Debard, 1987, 1988, 1997).

New excavations have been undertaken on the site since 2006, in particular at the bottom of the sequence (Moncel et al., 2010, in press a) (Fig. 2).

The sequence has yielded two layers (layers 5 and 4) with archaeological material (Moncel et al., in press b). Layer 5 is rubble with organic matter and a silty matrix indicating a temperate and fresh context while layer 4 is composed of beds of limestone blocks separated by sterile silt levels indicating a cold and dry climate. Large mammal remains in layer 5 attest a temperate climate (high ratio of

Cervus elaphus). For layer 4, *Rangifer tarandus* is the main species associated with *Bos-Bison* and *Equus* (Moncel et al., in press b). Waiting for new ESR and U-Th dating, the first U-Th dates (Moncel and Michel, 2000) place the layers 5 and 4 at the beginning of Upper Pleistocene, end of MIS 5 and beginning of MIS 4 for the bottom of the layer, between 100 and 70 ka.

Characterization and mineralogical study of the loessal levels of layer 4 (Figs. 3 and 4) at the abri du Maras allow providing new results regarding the sedimentary dynamic of the infilling, and their nature and geographical origin (Fig. 5):

- the sedimentological analyses of the sterile levels of layer 4 indicate a presence of loessal deposits, typical of a cold and dry period of time. These deposits would be dated to the end of MIS 5 or beginning of MIS 4 if we refer to the dating results;
- the mineralogical study indicates three types of heavy mineral associations: volcanic, metamorphic and ubiquitous/plutonic;
- the homogeneous distribution of volcanic minerals and the regularity of magnetic susceptibility values do not allow identifying levels of tephra in layer 4. However, minerals (green Cpx, sphene, zircon) may be related to the last Sancy volcano eruption. It has already been identified in an archaeological context on the site of Orgnac 3 (Debard and Pastre, 1988) and recently dated to 302.9 ± 2.9 ka (Michel et al., 2013). It implies transportation and a secondary deposit of these minerals;
- proximity of the site to the Rhône Valley and the recognition of glaucophane, an alpine mineral, suggest a Rhodanian origin. Aeolian erosion of alluvial and fluvio-glacial formations in the Rhône Valley by a palaeo-Mistral would explain the accumulation of loess at the site;
- recognition of olivine questions on the origin of a part of the deposits. It could come from the Massif Central: Bas-Vivarais (earliest stages), Devès or Chaîne des Puys (beginning of the first phase) or with less certainty of Alpine ultramafic rocks;
- the distribution of the archaeological material into two levels in layer 4 indicates that the site was regularly abandoned when loess were deposited. It could indicate severe climatic conditions and justify the lack of human occupations in the shelter. Neanderthals would come back when conditions would be more humid or favorable (artefacts and bones embedded in levels of limestone blocks). The site, located in a small valley, apart from the Rhodanian corridor, would have been a shelter during the most severe climatic phases. Despite its protected position, this shelter was abandoned during the coldest periods, when cold winds, full of dust, blew in the area.

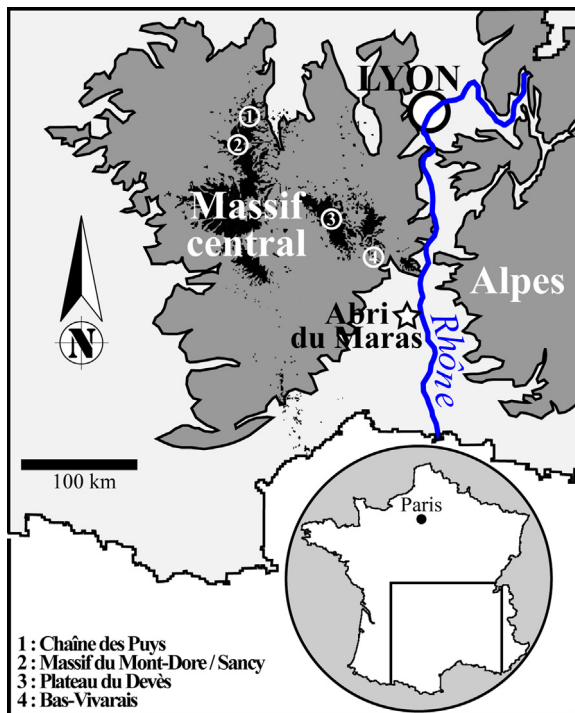


Fig. 1. Localisation de l'abri du Maras, dans le Sud-Est de la France, entre le Massif central et les Alpes, à la sortie des gorges de l'Ardèche et à proximité de sa confluence avec le Rhône. Le volcanisme est représenté en noir.

Fig. 1. Location of the abri du Maras, in southeastern France, between the French Massif Central and the Alps, at the end of the Ardèche canyon and near its confluence with the Rhône River. The volcanic sites are in black. Modifié d'après Nehlig et al., (2003).

1. Introduction

Des téphras bien individualisés au sein du remplissage sédimentaire de sites préhistoriques et paléontologiques du Sud de l'Ardèche ont été mis en évidence à plusieurs reprises (Debard et Pastre, 2008). Ces produits proviennent de l'éruption d'édifices volcaniques du Massif central (Fig. 1), situés dans le massif du Mont-Dore (identifiés dans le site d'Orgnac 3, Debard et Pastre, 1988) ou de la province volcanique du Bas-Vivarais (identifiés dans le site de l'abri Moula, Pastre et al., 1994; Sanzelle et al., 2000). L'émission de ces éjectas est survenue au cours du Pléistocène moyen et supérieur : entre 392 et 280 ka pour le dernier cycle pyroclastique du Sancy (Mont-Dore) (Nomade et al., 2012) et, suivant les chronologies, à deux ou trois reprises dans le Bas-Vivarais : entre 206 ± 13 ka et 170 ± 23 ka, puis entre 40 ± 6 ka et 15 ± 11 ka selon les données les plus récentes (Nomade et al., 2014) et $166\,000 \pm 15\,000$ ans, $78\,800 \pm 5300$ ans et $45\,400 \pm 3200$ ans, selon Guérin et Gillot (2007).

La découverte de ces pyroclastites en contexte archéologique permet, lorsqu'elles sont demeurrées en position primaire, de contraindre la chronologie des séquences archéologiques. En effet, le dépôt d'un téphra constitue une surface isochrone, de grande extension, datable par des méthodes physiques ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K/Ar, TL). Outre leur intérêt chronologique, ces dépôts, mais pas exclusivement,

apportent également des éléments d'ordre paléogéographique puisque leur composition minéralogique peut constituer la signature de leur source et donc de discuter du régime des vents qui les ont apportés.

À l'abri du Maras (Ardèche, Sud-Est France), une partie de la séquence correspondant aux dépôts de limons de la couche 4 a été étudiée dans le but de rechercher d'éventuels lits de téphras (Nowak, 2014). L'échantillonnage sériel de cette couche, la mesure de la susceptibilité magnétique, l'analyse des minéraux lourds ainsi que de celle de leur composition chimique ont apporté de nouveaux éléments relatifs à la dynamique sédimentaire régionale contemporaine de la fréquentation de ce territoire par les Néandertaliens au cours de la première moitié du Pléistocène supérieur (Stade Isotopique Marin, SIM, 5 et 4).

2. Le site de l'abri du Maras

Le site de l'abri du Maras est un abri-sous-roche situé dans un vallon affluent de rive gauche de la partie terminale des gorges de l'Ardèche, sur la commune de Saint-Martin-d'Ardèche. La situation de cet abri est remarquable puisqu'elle occupe l'interface entre différentes régions naturelles : celle des gorges de l'Ardèche ; celle de la plaine de Saint-Just et de la vallée du Rhône, en aval du gué de Saint-Martin, et celle du plateau de Saint-Remèze. Cette situation a largement influencé les comportements de subsistance des Néandertaliens ayant occupé le site (Daujeard, 2008 ; Daujeard et Moncel, 2010 ; Daujeard et al., 2014 ; Raynal et al., 2013), ainsi que la mise en place des différents dépôts. En effet, la proximité du site avec la vallée du Rhône explique qu'une partie de son remplissage sédimentaire a bénéficié des apports éoliens issus de la déflation des terrasses alluviales du fleuve et de celle des moraines alpines (Debard, 1987, 1988, 1997).

Fouillé dans les années 1950 et 1960 (Baudet et al., 1955 ; Combiér, 1967), le site fait de nouveau l'objet de fouilles programmées depuis 2006 (Moncel et al., 2010, in press b).

Actuellement, la base de la séquence située en avant du site est en cours de fouille. Cette partie de la séquence (Fig. 2) a livré deux épaisses couches contenant du matériel archéologique (couches 4 et 5) (Moncel et al., in press a). Le faciès sédimentaire de la couche 5, reposant sur le substrat calcaire, est un cailloutis à matrice de limons organiques. Il est contemporain de conditions climatiques tempérées fraîches (interstadaire ou interglaciaire), tandis que le faciès de la couche 4, des loëss à passées caillouteuses, caractérise un environnement froid et plus sec (stadaire ou glaciaire). Entre les couches 5 et 4, ainsi qu'au-dessus de la couche 3, des accumulations de dalles de calcaire marquent des changements brutaux dans la morphologie de l'abri avec la succession de différentes phases de recul de son auvent.

Les restes de grands mammifères forment dans la couche 5 un corpus de taxons tempérés dans lequel *Cervus elaphus* domine. Pour la couche 4, c'est *Rangifer tarandus* qui est présent en très grande abondance, associé à de grands bovidés et aux chevaux (Moncel et al., in press b). En attente de nouvelles dates ESR et U-Th, les datations U-Th déjà obtenues par Moncel et Michel (2000) s'accordent à dater

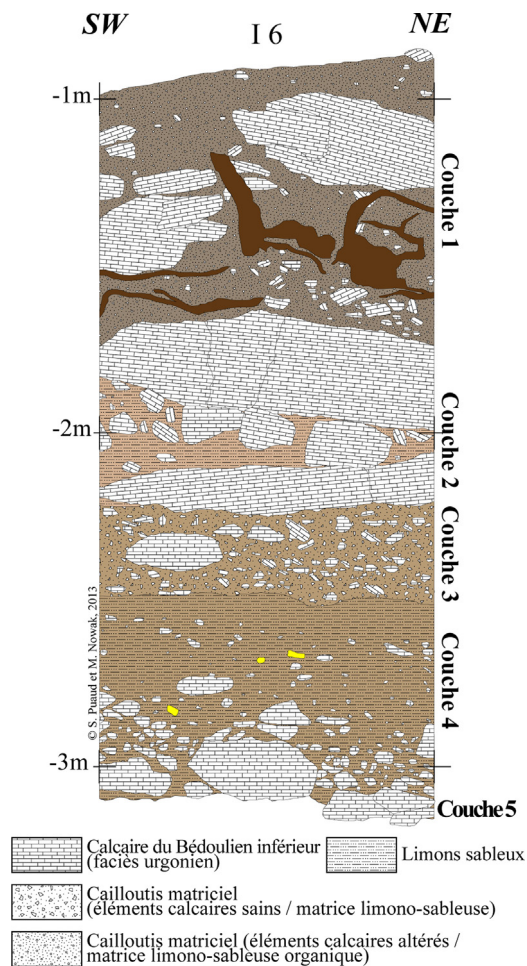


Fig. 2. (Couleur en ligne.) Extrait du profil stratigraphique de la partie supérieure du remplissage sédimentaire de l'abri du Maras. Les prélèvements ont été effectués dans les loëss de la couche 4.

Fig. 2. (Color online.) Section of the upper part of the sedimentary infilling of the abri du Maras. Sampling was made in the loess of layer 4.

les couches 5 et la base de la couche 4 du début du Pléistocène supérieur, au cours des stadias et des interstadias de la moitié supérieure du SIM 5, ou à la fin du SIM 5 et au début du SIM 4, soit entre 100 et 70 ka.

3. Matériel et méthodes

La couche 4a fait l'objet d'un échantillonnage sérieux réalisé avec un pas de 2,5 cm, sur toute sa hauteur, soit 37 échantillons. Préalablement au prélèvement, la mesure de la susceptibilité magnétique (SM) du sédiment a été effectuée à l'aide d'un susceptibilitémètre de terrain Bartington® équipé d'une sonde portable MS2K. Les échantillons ont été ensuite traités au laboratoire pour la calcimétrie au calcimètre de Bernard (Aubert, 1978), la granulométrie de la fraction fine (particules inférieures à 2 mm, granulomètre laser Malvern® Mastersizer 2000) et la séparation des minéraux lourds, par densimétrie au bromoforme ($d = 2,89$), sur la fraction granulométrique comprise entre 500 et 40 μm , en vue de leur détermination au

microscope pétrographique (Duplaix, 1958; Parfenoff et al., 1970; Tourenq, 2002). Les échantillons les plus riches en minéraux lourds ont également fait l'objet d'observations au microscope électronique à balayage (MEB TESCAN VEGA II LSU). Les échantillons, métallisés au carbone (couche de 20 nm), ont été soumis à un faisceau d'électrons d'une énergie de 15 keV. L'analyse chimique des grains est donnée par une sonde EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometry) Bruker® possédant une résolution de 133 eV.

Les préparations, les analyses sédimentologiques et les observations au microscope pétrographique ont été réalisées au département de Préhistoire du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), les séances de MEB-EDS (Service de MEB de la Direction des Collections) au Laboratoire de Minéralogie et de Cosmochimie du MNHN.

4. Sédimentologie et minéraux lourds des loëss

Les mesures de la SM et le résultat des analyses sédimentologiques sont présentés sur la Fig. 3. Les valeurs de la SM (Fig. 3a) prises sur le terrain montrent des variations qui disparaissent sur la courbe de celles mesurées au laboratoire. Ces variations sont liées à la présence de fragments de calcaire. Les mesures faites au laboratoire ont été réalisées sur la fraction fine et ne montrent pas de réelles variations. La courbe est linéaire et suit la valeur 50. L'absence de contraste ne permet pas d'envisager l'existence de niveaux de téphras (Walter-Simonnet et al., 2008).

Les sédiments de la couche 4 se caractérisent par une texture limono-sableuse (20 à 50% de sables) très peu argileuse ($\approx 5\%$) (Fig. 3b) et la présence de carbonate de calcium ($[\text{CaCO}_3] \approx 30\%$) (Fig. 3c). À ces caractéristiques s'ajoutent un bon indice de tri ($S_o \approx 2$), une médiane inférieure à 50 μm , une composition essentiellement siliceuse et l'absence de figure sédimentaire sur le terrain. Elles montrent que ces dépôts correspondent à des loëss (Antoine et Lautridou, 2008).

L'observation des frottis de minéraux lourds au microscope pétrographique a permis de déterminer 12 espèces minérales (Tableau 1). L'olivine n'a été décelée qu'après analyse à la sonde EDS (Fig. 4g, h). Ces minéraux peuvent être regroupés en trois cortèges issus de contextes géodynamiques différents (Tableau 2): association de minéraux volcaniques avec le clinopyroxène vert (Fig. 4a à e), le sphène et une partie du zircon, (Fig. 4f, i), de minéraux métamorphiques avec les silicates d'alumine (Fig. 4l) et le glaucophane (Fig. 4j, k) et des minéraux ubiquistes et des roches plutoniques (micas, zircon, oxydes de fer ou de titane).

Il faut noter l'abondance du clinopyroxène vert présentant systématiquement l'habitus aciculaire. Observée et décrite à plusieurs reprises (Meilhaud, 1955; Pelletier, 1966, 1968, 1969), cette morphologie constituerait un caractère acquis, lié aux phénomènes d'altération *in situ* (Pastre, 1986). Les images MEB de ces minéraux (Fig. 4a à e) semblent le confirmer puisque l'on peut définir, de haut en bas de la séquence, un gradient d'altération positif. Les acicules sont moins développées sur les minéraux prélevés au sommet de la couche qu'à sa base.

Tableau 1

Nature et pourcentages des minéraux lourds extraits des limons de la couche 4 de l'abri du Maras. % opaques à partir de la somme totale des grains. % des minéraux à partir de la somme hors opaques.

Table 1

Nature and percentages of heavy minerals extracted from silty layer 4 of the abri du Maras. % of opaque is from the total of grain. % of minerals is from the sum of non-opaque.

<i>Altitude (cm)</i>	-223,3	-226	-228,8	-231,3	-233,3	-235,5	-238,5	-241,3	-243,5	-246	-249	-252,3	-254,3	-254,8	-256	-258,5	-261,3
Échantillon	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37	B38	B39	B40	B41	B42	B43	B44	B45	B46
Amphibole	12,4	7,1	6,4	5,2	9,2	1,7	2,9	7,3	7,8	14,7	8,2	11,4	8,1	5,2	11,9	10,2	13,4
Clinopyroxène vert aciculaire	62	44,9	52,4	50,0	51,2	54,1	49,6	41,2	29,9	30,8	34,8	27,2	39,2	32,1	21,0	46,5	33,9
Zircon	23,6	10,1	19,3	16,7	19,4	19,4	22,7	25,8	19,0	18,6	26,6	20,3	14,0	22,6	30,8	16,7	21,0
Sphène	-	1,0	0,4	-	1,4	0,4	0,8	1,5	2,2	0,6	-	-	1,6	1,9	0,7	-	0,9
Sillimanite	1,2	-	-	-	0,5	0,4	0,8	0,5	-	-	1,3	0,6	0,5	-	0,7	0,5	-
Disthène	5,6	11,1	7,7	11,9	5,1	8,3	6,3	3,6	9,2	7,1	8,2	13,3	7,0	8,5	4,9	5,6	7,6
Staurotide	0,4	0,5	-	-	-	-	0,4	1,0	0,5	0,6	-	1,3	-	0,5	0,7	-	0,4
Glaucophane	-	-	0,4	0,5	-	-	-	-	1,6	3,2	-	0,6	-	1,4	1,4	-	-
Grenat	1,2	8,1	3,0	7,6	3,7	4,5	3,4	9,8	9,8	14,1	12,0	12,7	11,3	14,6	18,9	13,5	5,4
Rutile	2,4	14,1	6,9	5,7	6,5	9,1	10,9	6,2	15,2	7,1	8,2	10,1	13,4	11,3	6,3	5,1	15,6
Anatase	0,8	3,0	3,0	0,5	-	1,2	0,4	2,6	1,6	2,6	0,6	1,3	2,2	-	2,8	0,9	1,3
Biotite	0,4	-	0,4	1,9	3,2	0,8	1,7	0,5	1,1	0,6	-	1,3	2,7	1,9	-	0,9	0,4
Opagues	21,6	34,9	21,8	22,2	24,9	27,3	29	37,4	39,9	46,9	45,3	45,1	36,3	32,1	48,6	31,3	31,5

<i>Altitude (cm)</i>	-263,5	-265,5	-267,8	-270,5	-276,5	-277	-279	-281,8	-285,5	-288,3	-289,8	-291,5	-294	-298,3	-301	-304	-306,5	-308,8	-310,8	-312,3
Échantillon	B47	B48	B49	B50	B52	E95	E96	E97	E98	E99	E100	E101	E102	E103	E104	E105	E106	E107	E108	E109
Amphibole	15,4	21,5	13,3	12,2	16,7	13,7	15,4	11,9	11,6	18,5	27,6	14,7	19,6	18,2	16,1	22,7	20,5	17,0	16,1	20,5
Clinopyroxène vert aciculaire	36,5	26,8	51,9	34,8	11,8	35,3	39,7	23,3	29,2	25,3	22,7	22,9	7,7	14,3	20,2	4,3	10,6	16,3	11,4	10,9
Zircon	9,6	17,4	14,1	25,0	30,4	16,3	10,9	24,5	19,7	16,0	9,9	14,7	23,1	20,6	14,3	26,1	27,0	16,3	18,8	26,3
Sphène	-	-	0,7	0,6	-	1,6	0,6	1,9	1,5	0,6	0,7	1,2	2,1	0,8	3,0	1,7	-	-	1,3	0,7
Sillimanite	1,3	0,7	1,5	1,2	-	1,1	-	0,6	-	-	0,7	0,6	1,4	0,8	-	1,7	-	0,7	-	1,5
Disthène	7,1	8,1	2,2	9,1	15,7	9,5	6,4	9,4	6,6	7,4	13,5	15,3	8,4	10,3	8,9	8,7	14,9	13,5	10,7	16,1
Staurotide	1,9	0,7	-	-	-	0,5	-	-	1,5	-	0,7	-	0,7	-	-	-	0,7	-	-	-
Glaucophane	0,6	-	-	0,6	1,0	1,6	-	1,3	2,2	3,1	3,5	4,1	4,2	0,8	4,2	0,9	2,8	2,1	1,3	1,5
Grenat	6,4	4,0	7,4	11,0	16,7	4,7	3,2	8,8	14,6	15,4	7,8	11,2	14,0	11,1	10,7	10,4	5,0	6,4	10,7	10,2
Rutile	19,9	19,5	6,7	3,0	2,9	11,6	16,7	13,8	5,1	4,9	5,7	7,1	9,1	11,1	12,5	14,8	13,5	11,3	8,7	1,5
Anatase	-	1,3	2,2	1,8	3,9	3,2	5,1	3,8	7,3	7,4	6,4	7,1	7,0	11,9	8,9	8,7	2,8	14,2	16,8	8,0
Biotite	1,3	-	-	0,6	1,0	1,1	1,9	0,6	0,7	1,2	0,7	1,2	2,8	-	1,2	-	2,1	2,1	4,0	2,9
Opagues	25	47,7	37,8	51,5	53,8	15,9	8,8	18,9	40,2	35,7	41,7	30,6	42,6	52,8	39,6	60,3	48,7	47,2	42,9	44,3

Tableau 2

Types d'associations minéralogiques contenues dans les sédiments limoneux de la couche 4 de l'abri du Maras.

Table 2

Types of mineral assemblages contained in the silty sediment of layer 4 of the abri du Maras.

Altitude (cm) Échantillon	-223,3 B30	-226 B31	-228,8 B32	-231,3 B33	-233,3 B34	-235,5 B35	-238,5 B36	-241,3 B37	-243,5 B38	-246 B39	-249 B40	-252,3 B41	-254,3 B42	-254,8 B43	-256 B44	-258,5 B45	-261,3 B46			
Roches volcaniques	88	62,1	78,1	71,9	79,7	75,2	75,2	74,2	58,7	64,1	69,6	58,9	61,3	59,9	63,6	73,5	68,3			
Roches métamorphiques	8,4	19,7	11,2	20,0	9,2	13,2	10,9	14,9	21,2	25,0	21,5	28,5	18,8	25,0	26,6	19,5	13,4			
Minéraux ubiquistes et roches plutoniques	3,6	18,2	10,7	8,1	11,1	11,6	13,9	10,8	20,1	10,9	8,9	12,7	19,9	15,1	9,8	7,0	18,3			
Altitude (cm) Échantillon	-263,5 B47	-265,5 B48	-267,8 B49	-270,5 B50	-276,5 B52	-277 E95	-279 E96	-281,8 E97	-285,5 E98	-288,3 E99	-289,8 E100	-291,5 E101	-294 E102	-298,3 E103	-301 E104	-304 E105	-306,5 E106	-308,8 E107	-310,8 E108	-312,3 E109
Roches volcaniques	61,5	65,8	79,3	72,0	58,8	65,3	66,0	59,7	60,6	59,9	60,3	52,4	50,3	53,2	50,6	53,0	58,2	49,6	46,3	57,7
Roches métamorphiques	17,3	13,4	11,1	22,0	33,3	17,4	9,6	20,1	24,8	25,9	26,2	31,2	28,7	23,0	23,8	21,7	23,4	22,7	22,8	29,2
Minéraux ubiquistes et roches plutoniques	21,2	20,8	9,6	6,1	7,8	17,4	24,4	20,1	14,6	14,2	13,5	16,5	21,0	23,8	25,6	25,2	18,4	27,7	30,9	13,1

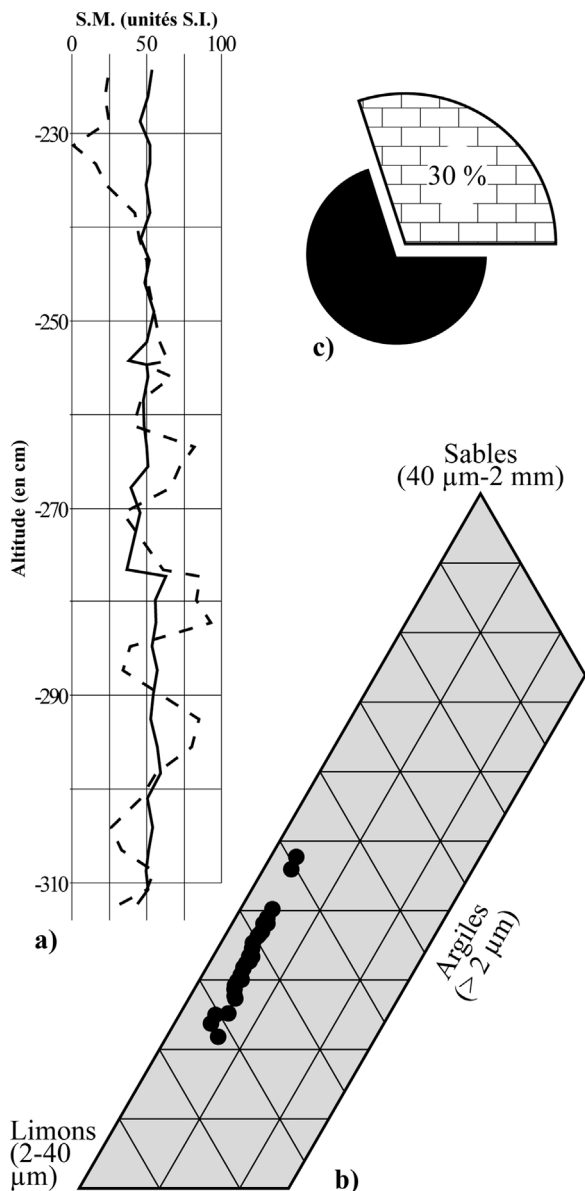


Fig. 3. Caractérisation des sédiments de la couche 4 de l'abri du Maras. a : mesures de la susceptibilité magnétique (pointillé : sur le terrain ; trait plein : au laboratoire, sur fraction fine) ; b : granulométrie de la fraction fine (< 2 mm) décarbonatée ; c : valeur moyenne de la calcimétrie.

Fig. 3. Sediment characterization of layer 4 (abri du Maras). a : magnetic susceptibility data (dotted line: field; solid line: lab, fine fraction only); b : grain-size of the fine fraction (<2 mm) uncarbonated; c : calcimetry (average value).

5. Interprétations

Le résultat des analyses sédimentologiques des dépôts de la couche 4 de l'abri du Maras montre qu'ils ont été mis en place par la dynamique éolienne. La proximité du site avec la vallée du Rhône, les reliefs alpins et le Massif central nous permet d'envisager, au cours de la période de dépôt des lœss (stade/glaciaire), des conditions idoines pour que des vents catabatiques, tel le Mistral actuel, assurent le

transport de particules entre les zones de déflation et l'abri du Maras. L'anticyclone centré sur le proche Atlantique et la dépression du golfe de Gênes sont les éléments qui règlent actuellement la formation du Mistral (Amphoux, 1933; Baldit, 1925; Jacq et al., 2005). Les morphologies et les formations éoliennes pléistocènes de la vallée du Rhône, notamment dans sa partie inférieure, sont bien connues et ont été largement décrites (Ambert, 1988, 2001, 2013). L'édification de dunes éoliennes dans les gorges de l'Ardèche a également été proposée par Gély (2005) et Puaud (2007).

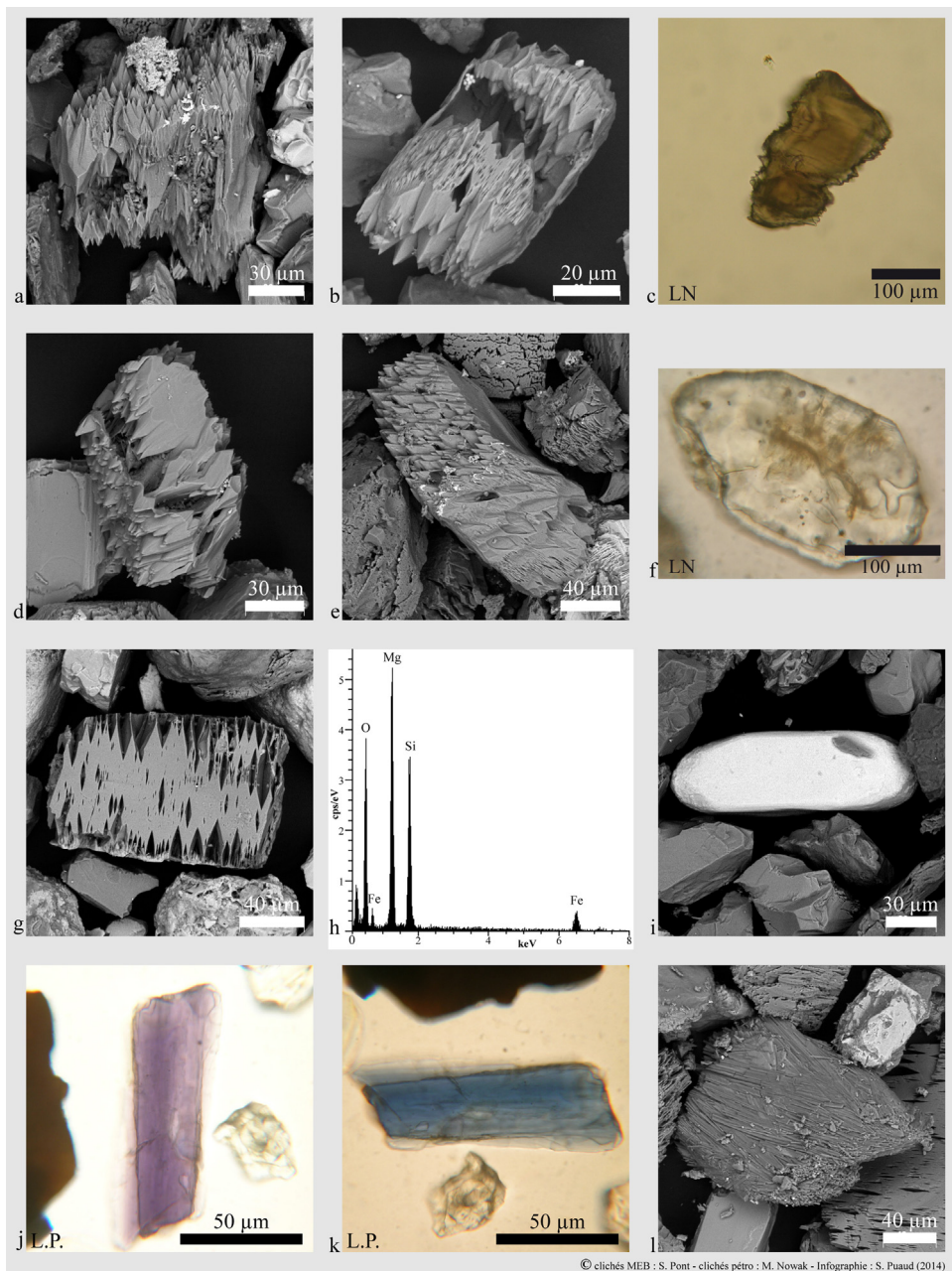
Les terrasses alluviales du Rhône et les formations morainiques accumulées au front des glaciers Alpins ont constitué les sources, en tout ou partie, du matériel sédimentaire déposé à l'abri du Maras. Le glaucophane (Fig. 4j, k) a été retrouvé, certes en faibles quantités, mais dans les deux tiers des échantillons, répartis sur toute l'épaisseur de la couche. Cette amphibole a une origine régionale exclusivement alpine (complexes ophiolitiques des Alpes franco-italiennes) (Bocquet, 1974; Frey et al., 1974). Les gneiss et micaschistes alpins ont pu de la même façon être les sources des autres minéraux du cortège métamorphique.

L'analyse minéralogique a également révélé l'abondance des minéraux volcaniques. La répartition homogène de ces espèces montre qu'il n'existe pas de concentration qui attesterait la présence éventuelle de niveaux de téphras. Ce qui est confirmé par les résultats de la mesure de la SM dont la régularité et l'absence de contraste ne permettent pas d'individualiser de niveaux volcaniques.

Les diagnoses minéralogiques effectuées à partir de l'examen des frottis de minéraux lourds permettent de définir cependant des associations minérales (volcanique, métamorphique ubiquiste/plutonique) mais également de distinguer certaines de leurs caractéristiques propres qui permettent de leur attribuer une origine. Le clinopyroxène vert présentant un habitus aciculaire provient du volcan du Sancy (Cantagrel et Baubron, 1983; Pastre et Cantagrel, 2001) lorsqu'il est associé au sphène, à la biotite et au zircon (présentant lui-même des particularités typiques liées à son origine volcanique (Fig. 4f, i, Pupin, 1976, 1983). Cette association est propre aux « nuées ardentes de ponces trachytiques basiques du paroxysme terminal du volcan du Sancy » (Pastre et Cantagrel, 2001). Ces pyroclastites se sont mises en place au cours du dernier cycle d'activité pyroclastique de ce volcan, entre 392 et 280 ka (Nomade et al., 2012).

S'il paraît très probable que les zircons observés au MEB, présentant le faciès arrondi (« surfondu »), proviennent des pyroclastites du Sancy, leur présence en abondance dans les limons (près de 20% en moyenne) nous montre qu'une autre source de ce minéral est à considérer puisque ses proportions dans les pyroclastites ne dépassent jamais quelques pour cent.

La présence de minéraux des cortèges magmatique, métamorphique et ubiquistes illustre la multiplicité des sources. Les roches alpines sont à l'origine d'une partie des minéraux des roches métamorphiques et magmatiques. L'activité phréatomagmatique, responsable de la pulvérisation du socle, constitue une source importante de minéraux



© clichés MEB : S. Pont - clichés pétro : M. Nowak - Infographie : S. Puaud (2014)

Fig. 4. (Couleur en ligne.) Microphotographies des minéraux lourds (microscopie électronique à balayage, MEB ; analyse chimique par sonde EDS, spectrométrie de rayons X en dispersion d'énergie et microscopie photonique en transmission, lumière polarisée). a à e : clinopyroxène vert aciculaire présentant différents états d'altération (a : –275 cm, b : –301 cm, c : –238 cm, d : –237 cm, e : –227 cm) ; f et i : zircon volcanique ; g et h : olivine et son spectre EDS ; j à l : silicates du métamorphisme (glaucophane pléochroïque – violacé/bleu – et sillimanite).

Fig. 4. (Color online.) Microphotographs of the heavy minerals (Scanning Electron Microscopy, SEM; chemical analysis by EDS probe, Energy Dispersive Spectrometry; photonic transmission microscopy, polarizing light). a to e: acicular green clinopyroxene showing different states of alteration (a: –275 cm, b: –301 cm, c: –238 cm, d: –237 cm, e: –227 cm); f and i: volcanic zircon; g and h: olivine with its EDS spectrum; j to l: silicate metamorphism (pleochroic glaucophane – purplish/blue – and sillimanite).

variés et notamment de zircon. La fréquence de ce type de dynamique éruptive dans le Bas-Vivarais ou le Devès, affectant un socle de nature magmatique ou métamorphique, rend compte du large spectre des espèces minérales présentes dans les limons du Maras.

Les analyses effectuées à la sonde EDS (Fig. 4h) ont diagnostiqué l'olivine (Fig. 4g). Ce minéral a été reconnu dans chacun des échantillons analysés (7). D'origine mantellique ou basaltique, ce minéral pourrait provenir de deux sources :

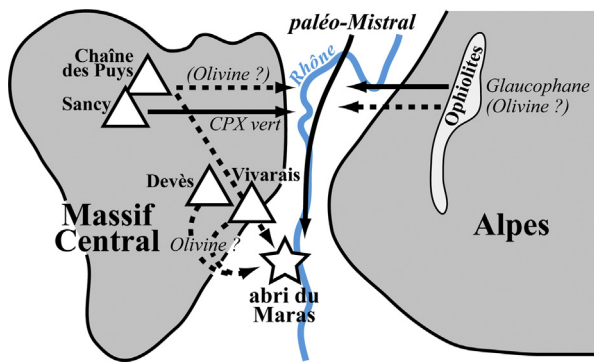


Fig. 5. Schéma synthétique des différents ensembles géologiques à l'origine des limons de la couche 4 du Maras. Depuis ces stocks jusqu'à l'abri, via un transit par les formations fluviatiles et fluvio-glaciaires de la vallée du Rhône, le parcours des minéraux est indiqué par les flèches noires (en pointillés les trajets éventuels de l'olivine).

Fig. 5. Synthetic diagram of the geological origin of silt layer 4 of the Maras site. From these sources to the rockshelter, via a transit into the fluvial and glacio-fluvial deposits of the Rhone valley, the mineral route is indicated by black arrows (dotted line is the possible route of the olivine).

- une source centralienne, à partir des cônes stromboliens ou des maars du Dévès et du Bas-vivarais (Berger, 1973) ou moins vraisemblablement de l'activité de la Chaîne des Puys au cours de sa phase ancienne ;
- une source alpine, à partir des péridotites des complexes ophiolitiques des Alpes franco-italiennes (Debelmas et al., 1980). Cette dernière origine est peu probable, compte tenu de l'ancienneté des ces formations géologiques et de la grande altérabilité de ce minéral. L'olivine risquerait d'être altérée avant d'avoir été transportée.

L'origine basaltique de l'olivine semblerait privilégiée puisque les autres minéraux caractérisant le cortège mantellique (diopside chromifère, enstatite) n'ont pas été observés dans les frottis.

De même que pour les CPx du Sancy, l'absence de concentration de ces minéraux en niveaux bien circonscrits et leur granulométrie analogue à celle des autres grains nous laisseraient penser à une origine centralienne héritée ou bien à une origine alpine.

La dispersion de ces minéraux au sein des limons nous montre qu'ils sont hérités d'autres formations sédimentaires. Ils proviendraient de la reprise des dépôts alluviaux et/ou fluvio-glaciaires rhodaniens évoqués précédemment. La déflation de ces terrains confirmerait l'existence de vents catabatiques (« paléo-Mistral ») dès le début du Pléistocène supérieur.

6. Conclusions

La caractérisation et l'étude minéralogique des sédiments de la couche 4 de l'abri du Maras ont permis d'apporter de nouveaux éléments précisant leurs conditions dynamiques de dépôt, leur nature et leur origine géographique (Fig. 5) :

- l'étude sédimentologique des niveaux stériles de la couche 4 a montré qu'il s'agissait de lœss, caractéristiques d'une période froide et sèche. Ces dépôts, replacés

dans la chronologie des occupations préhistoriques du site, seraient mis en place au cours d'un stadaire du SIM 5 ou au début du SIM 4 ;

- l'étude minéralogique des sédiments permet d'isoler trois types d'associations minérales : volcanique, métamorphique et ubiquiste/plutonique ;
- la répartition homogène des minéraux volcaniques et l'absence de contraste dans les mesures de la SM ne permettent pas de discriminer des niveaux de téphra au sein de la couche 4. Néanmoins, une partie des minéraux reconnus peuvent être rapprochés de ceux émis lors de la dernière phase d'activité du volcan du Sancy, déjà identifiés en contexte archéologique sur le site d'Orgnac 3 (Debard et Pastre, 1988) et récemment datés de $302,9 \pm 2,9$ ka (Michel et al., 2013). Cet écart entre la chronologie d'émission et du dépôt implique une étape de transit et un dépôt secondaire ;
- la proximité du site avec la vallée du Rhône et la reconnaissance du glaucophane, minéral alpin, dans les sédiments, permettent d'envisager une origine rhodanienne. La déflation des terrains fluviatiles et fluvio-glaciaires de la vallée du Rhône par un paléo-Mistral serait à l'origine de l'accumulation des lœss de l'abri du Maras ;
- la présence de l'olivine pose la question de l'éventuelle origine centralienne d'une partie des minéraux constituant les dépôts : volcanisme basaltique ou phréatomagmatisme du Dévès ou du Bas-Vivarais. La contribution du volcanisme de la Chaîne des Puys est peu probable, son activité étant embryonnaire à l'époque de la mise en place de la couche 4 ;
- le matériel archéologique reste concentré dans deux niveaux caillouteux de la couche 4. Son absence dans les niveaux de lœss intercalés entre ces phases d'occupation marque des phases d'abandon du site par les Néandertaliens. Ces phases d'abandon, contemporaines des limons éoliens traduiraient les conditions climatiques particulièrement rigoureuses qui caractérisent la mise en place de ces dépôts. Le spectre faunique de la couche 4 indique une faune froide largement dominée par *Rangifer tarandus* suivi de *Equus caballus* spp., *Cervus elaphus*, *Bison priscus*, *Capra ibex* et *Megaloceros giganteus* présent en petite quantité (Moncel et al., in press b). Les données archéozoologiques attestent des occupations majoritairement automnales. Les Néandertaliens reviendraient régulièrement lorsque les conditions deviennent plus humides (matériel archéologique associé à des niveaux de blocs calcaires). L'abri du Maras, situé dans un vallon proche du corridor rhodanien, aurait été fréquenté lors de phases climatiques rigoureuses. La position du site, à la fois proche mais en retrait de la vallée du Rhône et à proximité immédiate du gué de Saint-Martin sur l'Ardèche, lieu de passage privilégié des troupeaux, aurait été l'endroit idéal pour les activités cynégétiques. Bien qu'il soit protégé, cet abri a cependant été abandonné lors des périodes les plus froides, lorsque les vents catabatiques, descendant des reliefs alpins et centraliens, se chargeaient de poussières et soufflaient dans la région rhodanienne. Par conséquent, il semblerait que ces conditions climatiques particulières aient pu exercer un contrôle et une pression sur la mobilité des populations néandertaliennes

de la région (Lefort et al., 2013; Thorson et Bender, 1985).

Remerciements

Nous tenons à remercier le service régional de l'archéologie de la région Rhône-Alpes du Ministère de la Culture qui supporte scientifiquement et financièrement les fouilles programmées menées à l'abri du Maras. Nous remercions Madame Cathy Plewak, professeur d'anglais au MNHN, pour avoir revu et corrigé l'anglais de l'abstract, de la version abrégée et des légendes des figures. Nous tenons également à remercier vivement les deux rapporteurs qui, grâce à leurs remarques, leurs critiques constructives et leurs suggestions, ont permis d'améliorer significativement le contenu de cet article.

Références

- Ambert, P., 1988. L'érosion éolienne périglaciaire dans le Sud-Est de la France. *Géol. Alpine Mem. H.S.* 14, 227–234.
- Ambert, P., 2001. Vents, reliefs et paysages en Languedoc-Roussillon. *Cahiers d'Éole* 4, 8–20.
- Ambert, P., 2013. Formes et formations périglaciaires du Pléistocène supérieur dans le Midi méditerranéen français : l'exemple de l'étang de Berre. *Quaternaire* 24, 293–301.
- Amphoux, M., 1933. Le mistral. *Ann. Geogr.* 42, 215–218.
- Antoine, P., Lautridou, J.-P., 2008. Les formations loessiques en milieux périglaciaires. In: Dewolf, Y., Bourrié, G. (Eds.), *Les formations superficielles, genèse, typologie, classification, paysages et environnements, ressources et risques*. Ellipses, Paris, pp. 322–331.
- Aubert, G., 1978. *Méthodes d'analyses des sols*. CRDP, Marseille.
- Baldit, A., 1925. Le mistral. *Meteorologie* 1, 23–30.
- Baudet, J.-L., Barthès, M., Bouchud, J., Gilles, R., Grenier, P., Nicolas, J., 1955. L'abri du Maras (Saint-Martin-d'Ardèche). *Rev. Archeol.* 45, 1–16.
- Berger, E., Thèse 3^e cycle 1973. Le volcanisme récent de l'Ardèche. Univ. Paris-Sud, Orsay.
- Bocquet, J., 1974. Blue amphiboles of the western Alps: chemistry and physical characters. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 54, 425–448.
- Cantagrel, J.-M., Baubron, J.-C., 1983. Chronologie K-Ar des éruptions dans le massif volcanique des Monts-Dore : implications volcanologiques. *Geol. Fr.* 1, 123–142.
- Combière, J., 1967. Le Paléolithique de l'Ardèche dans son cadre paléoclimatique. *Publ. Inst. Préhist. Bordeaux* 4.
- Daujeard, C., 2008. Exploitation du milieu animal par les Néanderthaliens dans le Sud-Est de la France. *BAR international series S1867*, Archaeopress, Oxford.
- Daujeard, C., Moncel, M.-H., 2010. On Neanderthal subsistence strategies and land use: a regional focus on the Rhone Valley area in southeastern France. *J. Anthropol. Archaeol.* 29, 368–391.
- Daujeard, C., Moncel, M.-H., Fiore, I., Tagliacozzo, A., Bindon, P., Raynal, J.-P., 2014. Middle Paleolithic bone retouchers in southeastern France: variability and functionality. *Quat. Int.* 326–327, 492–518.
- Debard, É., 1987. L'apport allochtone éolien dans les remplissages karstiques quaternaires du Bas-Vivarais (S-E, France). *Bull. Assoc. Fr. Etude Quat.* 24, 183–193.
- Debard, É., 1988. Le Quaternaire du Bas-Vivarais d'après l'étude des remplissages d'ovens, de porches de grottes et d'abris sous roche. *Dynamique sédimentaire paléoclimatologie et chronologie*. Doc. Lab. Géol. Lyon 103.
- Debard, É., 1997. Les remplissages karstiques du Bas-Vivarais : karstogenèse, sédimentogenèse et archéologie. *Quaternaire* 8, 305–317.
- Debard, É., Pastre, J.F., 1988. Un marqueur chronostratigraphique du Pléistocène moyen à la périphérie du Massif central : la retombee à clinopyroxène vert du Sancy dans le site acheuléen d'Orgnac III (Bas-Vivarais, SE France). *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 306, 1515–1520.
- Debard, É., Pastre, J.F., 2008. Nouvelles données sur les téphras pléistocènes piégés dans les remplissages karstiques ardéchois (S-E France). *Quaternaire* 19, 107–116.
- Debelmas, J., Giraud, P., Sacchi, R., 1980. Géologie structurale des Alpes franco-italiennes. *Géol. Alpine* 56, 99–117.
- Duplaix, S., 1958. *Détermination microscopique des minéraux des sables*. Librairie polytechnique Ch. Béranger, Paris.
- Frey, M., Hunziker, J.C., Frank, W., Bocquet, J., Dal Piaz, G.V., Jäger, E., Niggli, E., 1974. Alpine metamorphism of the Alps, a review. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 54, 247–290.
- Gély, B., 2005. La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc (Ardèche). Le contexte régional paléolithique. In: Geneste, J.-M. (Ed.), *Recherches pluridisciplinaires dans la grotte Chauvet*. *Karstologia Mémoires*, 11, pp. 17–33.
- Guérin, G., Gillot, P.Y., 2007. Nouveaux éléments de chronologie du volcanisme pléistocène du bas Vivarais (Ardèche, France) par thermoluminescence. *C. R. Geoscience* 339, 40–49.
- Jacq, V., Albert, P., Delorme, R., 2005. Le mistral ; quelques aspects des connaissances actuelles. *Meteorologie* 50, 30–38.
- Lefort, J.-P., Monnier, J.-L., Danukalova, G., 16 mars 2013. Déflation et transport des particules loessiques d'âge Pléistocène supérieur par les vents catabatiques pendant les stades régressifs de la Manche : leur contrôle sur l'habitat des néandertaliens et des *Homo sapiens*. In: *Journées du CREAAH (umr 6566 cnrs) Archéologie, Archéosciences, Histoire*, Rennes, pp. 4–5.
- Meilhaud, R., 1955. Les minéraux lourds des alluvions néogènes et quaternaires de l'Allier à hauteur de Clermond-Ferrand. *Rev. Sci. Nat. Auvergne* 21, 15–34.
- Michel, V., Shen, G., Shen, C.C., Wu, C.C., Vérati, C., Gallet, S., Moncel, M.-H., Combière, J., Khatib, S., Manetti, M., 2013. Application of U/Th and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating to Orgnac 3, a Late Acheulean and early Middle Palaeolithic site in Ardèche, France. *PLoS ONE* 8, e82394.
- Moncel, M.-H., Michel, V., 2000. Première datation radiométrique par U-Th d'un niveau moustérien de l'abri du Maras (Ardèche, France). *Bull. Soc. Préhist. Fr.* 97, 371–375.
- Moncel, M.-H., Daujeard, C., Crégut-Bonnoure, É., Boulbes, N., Puaud, S., Debard, É., Bailon, S., Desclaux, E., Escudé, É., Roger, T., Dubar, M., 2010. Nouvelles données sur les occupations humaines du début du Pléistocène supérieur de la moyenne vallée du Rhône (France) – les sites de l'abri des Pêcheurs, de la Baume Flandin, de l'abri du Maras et de la grotte du Figuier (Ardèche). *Quaternaire* 21, 389–415.
- Moncel, M.-H., Chacón, M.G., La Porta, A., Fernandes, P., Hardy, B., Gallotti, R., 2015. Fragmented reduction processes: Middle Palaeolithic technical behaviour in the abri du Maras shelter, southeastern France. *Quat. Int.*, 1–25.
- Moncel, M.-H., Alués, E., Bailon, S., Barshay-Szmidt, C., Béarez, P., Crégut-Bonnoure, É., Daujeard, C., Desclaux, E., Debard, É., Lartigot-Campin, A.S., Puaud, S., Roger, T., 2015. Evaluating the integrity of palaeoenvironmental and archaeological records in MIS 5 to 3 karst sequences from southeastern France. *Quat. Int.*, 1–18.
- Nehlig, P., Boivin, P., Goër (de), A., Mergoïl, J., Prouteau, G., Sustrac, G., Thiéblemont, D., 2003. Les volcans du Massif central. *Geologues* 130–131, 66–91.
- Nomade, S., Sasco, R., Guillou, H., Scao, V., Kissel, C., Genty, D., Poster présenté à l'European Geosciences Union General Assembly 2014, Vienne (Autriche), 27 April – 2 May 2014 2014. Dating of the youngest volcanoes of Ardeche (Massif Central, France) using ⁴⁰Ar/³⁹Ar and unspiked K/Ar. *Geophysical Research Abstracts* 16, EGU2014-4901-2.
- Nomade, S., Scaillet, S., Pastre, J.-F., Nehlig, P., 2012. Pyroclastic chronology of the Sancy stratovolcano (Mont-Dore, French Massif Central): new high-precision ⁴⁰Ar/³⁹Ar constraints. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 225–226, 1–12.
- Nowak, M., 2014. Identification de téphras dans le remplissage sédimentaire du site préhistorique de l'abri du Maras (Saint-Martin-d'Ardèche, Ardèche) : essai de caractérisation (physico-chimie, origine et chronologie). *Mémoire de Master 2 « Évolution, Patrimoine naturel et Sociétés » spécialité Quaternaire et Préhistoire*. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris.
- Parfenoff, A., Pomerol, C., Tourenq, J., 1970. Les minéraux en grains, méthodes d'étude et détermination. *Masson*, Paris.
- Pastre, J.-F., 1986. Altération et paléaltération des minéraux lourds des alluvions pliocènes et pléistocènes du bassin de l'Allier (Massif Central, France). *Bull. Assoc. Fr. Etude Quat* 23, 257–269.
- Pastre, J.-F., Cantagrel, J.-M., 2001. Téphrostratigraphie du Mont Dore (Massif Central, France). *Quaternaire* 12, 249–267.
- Pastre, J.-F., Debard, É., Chennaoui, K., 1994. Un téphra-repère du volcanisme phréatomagmatique du Vivarais dans la séquence pléistocène supérieur de l'abri Moula (Soyons, Ardèche, France). *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 319, 937–943.
- Pelletier, H., 1966. Étude de l'augite aciculaire dans le résidu lourd des sables de Limagne. *Bull. Hist. Sci. Auvergne* 83, 325–332.
- Pelletier, H., 1968. Nouvelles observations sur l'augite aciculaire. *Rev. Auvergne* 85, 121–126.

- Pelletier, H., 1969. Étude morphologique de l'augite denticulée dans les projections volcaniques du massif du mont Dore (Massif central français). *Bull. Hist. Sci. Auvergne* 84, 182–186.
- Puaud, S., Thèse 2007. L'abri du Colombier II (Vallon-Pont-d'Arc, Ardèche, France). Étude stratigraphique, sédimentologique et micro-morphologique : reconstitution du cadre paléoenvironnemental et paléoclimatique du Sud de l'Ardèche au Tardiglaciaire. Université Via Domitia, Perpignan.
- Pupin, J.-P., 1976. Signification des caractères morphologiques du zircon commun des roches en pétrologie : base de la méthode typologique, applications. (Thèse de 3^e cycle) Faculté des sciences, Univ. Sophia Antipolis, Nice.
- Pupin, J.-P., 1983. Typologie des zircons des termes saturés intermédiaires et différenciés des séries alcalines du Mont-Dore et de la Chaîne des Puys (Massif central français). *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 296, 761–764.
- Raynal, J.-P., Moncel, M.-H., Fernandes, P., Bindon, P., Daujeard, C., Fiore, I., Santagata, C., Lecorre-Le Beux, M., Guadelli, J.-L., Lepape, J.-M., Tagliacozzo, A., Liabeuf, R., Servant, L., Aulanier, M., Seret, H., 2013. Land-use strategies, related tool-kits and organization of Lower to Middle Palaeolithic groups in the South-East of the Massif Central, France. *Quartär* 60, 29–59.
- Sanzelle, S., Pilleyre, T., Montret, M., Faïn, J., Miallier, D., Camus, G., Goër de Hervé, A., de Defleur, A., 2000. Datation par thermoluminescence : étude d'une corrélation possible entre le maar de la Vestide-du-Pal et un niveau de téphra de la Baume-Moula-Guercy (Ardèche, France). *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 330, 541–546.
- Thorson, R.M., Bender, G., 1985. Eolian deflation by ancient katabatic winds: a late Quaternary example from the North Alaska Range. *Geol. Soc. Am. Bull.* 96, 702–709.
- Tourenq, J., 2002. Minéraux lourds. In: Miskovsky, J.-C. (Ed.), *Géologie de la Préhistoire, méthodes, techniques, applications*. Géopré, Paris, pp. 555–569.
- Walter-Simonnet, A.-V., Bossuet, G., Develle, A.-L., Bégeot, C., Ruffaldi, P., Magny, M., Adatte, T., Rossy, M., Simonnet, J.-P., de Beaulieu, J.-L., Vanniere, B., Thivet, M., Millet, L., Regent, B., Wackenheim, C., 2008. Chronologie et spatialisation de retombées de cendres volcaniques tardiglaciaires dans les massifs des Vosges et du Jura, et le Plateau Suisse. *Quaternaire* 19, 117–132.