



**HAL**  
open science

## Approche paléopédologique de l'environnement des hominidés fossiles du dôme de Sangiran (Java central, Indonésie)

Boris Brasseur, François Sémah, Anne-Marie Sémah, Tony Djubiantono

► **To cite this version:**

Boris Brasseur, François Sémah, Anne-Marie Sémah, Tony Djubiantono. Approche paléopédologique de l'environnement des hominidés fossiles du dôme de Sangiran (Java central, Indonésie). *Quaternaire*, 2011, vol. 22/1, pp.3-11. 10.4000/quaternaire.5815 . hal-04467942

**HAL Id: hal-04467942**

**<https://hal.science/hal-04467942>**

Submitted on 26 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

## APPROCHE PALÉOPÉDOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT DES HOMINIDÉS FOSSILES DU DÔME DE SANGIRAN (JAVA CENTRAL, INDONÉSIE)



Boris BRASSEUR <sup>1,2</sup>, François SÉMAH <sup>1</sup>, Anne-Marie SÉMAH <sup>3,1</sup>  
& Tony DJUBIANTONO <sup>4</sup>

### RÉSUMÉ

Les épaisses séries volcano-sédimentaires fossilifères à Java central (Indonésie) dans la région du dôme de Sangiran (unités de Kalibeng, Pucangan, Grenzbank, Kabuh et Notopuro) se sont mises en place durant tout le Quaternaire et représentent une succession d'environnements marins, côtiers puis terrestres. Les paléosols inclus dans ces séries permettent de décrire différentes facettes des paysages anciens qui se sont succédé lors des périodes de colonisation par les hominidés au Pléistocène inférieur et moyen ancien.

Notre étude paléopédologique porte sur 7 localités réparties sur les 50 km<sup>2</sup> du dôme. Elle a permis de caractériser six ordres de paléosols (histosol, gleysol, vertisol, argillisol, protosol, oxisol), parmi lesquels 19 pédotypes ont été distingués. Nous nous sommes notamment intéressés à la comparaison entre les régions fossilifères du sud-est et du nord-ouest du dôme, aux séquences de faciès très différentes. La caractérisation des ambiances pédoclimatiques successives et l'étude des toposéquences contribuent à restituer l'histoire paléogéographique locale et fournissent des données sur le climat régnant lors de la formation des sols (dominé par l'influence des cycles de la mousson sud-est asiatique).

À la base des séries de Pucangan supérieur ont été localisés les premiers niveaux terrestres francs, lors de la mise en place d'un paysage ouvert succédant à de vastes marécages côtiers. Plusieurs environnements à saisonnalité contrastée, pouvant être interprétés comme semi-arides, sont ensuite enregistrés dans ces séries, alternant avec des environnements humides palustres. Les indices d'aridité sont ensuite récurrents dans les couches fluviales du Grenzbank et de Kabuh, qui ont livré le plus grand nombre de restes d'hominidés. Les sols révèlent une saison sèche de longue durée et un paysage de plaine alluviale à végétation ouverte, concordant avec les observations stratigraphiques et palynologiques antérieures.

**Mots-clés :** micromorphologie, stratigraphie, *Homo erectus*, paléosols, Java, Pléistocène.

### ABSTRACT

#### PALAEOPEDOLOGICAL APPROACH OF THE ENVIRONMENT OF FOSSIL HOMINIDS FROM THE SANGIRAN DOME (CENTRAL JAVA, INDONESIA)

The thick fossiliferous volcano-sedimentary series of the Sangiran dome area (Kalibeng, Pucangan, Grenzbank, Kabuh and Notopuro) from central Java (Indonesia) were deposited throughout the Quaternary and represent a succession of coastal, marine and finally continental terrestrial environments. Palaeosoils from these series of Southeast Asia are good indicators of the successive landscapes in which early hominids lived and migrated during the Lower and early Middle Pleistocene.

This palaeopedological study deals with seven localities distributed over an area of ca. 50 km<sup>2</sup>. Six palaeosoil orders (histosol, gleysol, vertisol, argillisol, protosol, oxisol) are characterised and include 19 pedotypes. We investigated the south-eastern and north-western fossiliferous regions, which show very different sedimentary sequences. The characterisation of successive pedoclimatic contexts and toposequences enables us to reconstruct the local palaeogeography and informs about the climate (mainly influenced by south-eastern Asia monsoon cycles) that prevailed during the periods of palaeosoil development.

The first fully terrestrial levels were identified at the base of the upper Pucangan unit, corresponding to the development of an open landscape on earlier sites of wide coastal swamps. Higher up in the series, environments are indicative of a contrasted seasonal climate with a long dry season, alternate with periods of more humid palustrine conditions. Recurrent aridity proxies are then found in the overlying Grenzbank and Kabuh series (both have yielded the most abundant hominid fossils). Soils from these series reflect a long dry season and an open vegetation landscape, in agreement with stratigraphical and palynological observations.

**Key-words:** micromorphology, stratigraphy, *Homo erectus*, palaeosoils, Java, Pleistocene.

<sup>1</sup> Département de Préhistoire, Muséum national d'Histoire naturelle – CNRS UMR 7194, Institut de Paléontologie Humaine, 1, rue René Panhard, F-75013 PARIS. Courriel : brasseur@mnhn.fr ; Courriel : semahf@mnhn.fr

<sup>2</sup> Unité Dynamiques des Systèmes Anthropisés (JE 2532 DSA), Université de Picardie Jules Verne, Faculté des Sciences, 33 rue Saint-Leu, F-80039 AMIENS cedex

<sup>3</sup> IRD, LOCEAN, Paleoproxus - UMR 7159, 32 avenue Henri Varagnat, F-93143 BONDY cedex. Courriel : semah@bondy.ird.fr

<sup>4</sup> Puslitbang Arkeologi Nasional, Jl. Raya Condet Pejaten 4, Pasar Minggu, JAKARTA SELATAN, Indonesia. Courriel : tonydjubiantono@yahoo.com

## 1 - INTRODUCTION

Les grandes étapes de l'évolution et des migrations humaines ne peuvent se comprendre que si elles sont situées dans le cadre chronologique et paléoclimatique du Quaternaire, commençant il y a 2,6 millions d'années avec le début des glaciations enregistrées aux latitudes moyennes (Gibbard *et al.*, 2009).

De nombreuses thématiques de recherches sont aujourd'hui développées autour des déplacements des taxons d'hominidés et des échanges culturels accompagnant les premières vagues migratoires hors d'Afrique. Ces recherches contribuent à décrire l'impact des changements environnementaux quaternaires et les biais liés au faible nombre de sites connus ou au caractère souvent discontinu des archives sédimentaires continentales.

Sur l'île de Java, les sites à hominidés de Mojokerto, Trinil, Sambungmacan et Sangiran, offrent des séries sédimentaires fossilifères représentant quelques-unes des pages les plus importantes dans l'histoire de l'évolution de l'homme et de ses migrations au Pléistocène inférieur et moyen ancien. Cette histoire est également celle des premiers insulaires et s'est déroulée dans un archipel accessible à l'Homme par la terre ferme durant les abaissements du niveau marin rythmant ces deux derniers millions d'années (voir par exemple, Sémah *et al.*, 2009).

L'étude des paléosols représente un outil important pour les géologues dans le cadre des reconstitutions paléoenvironnementales, paléoclimatiques et dans l'évaluation des rythmes de sédimentation (vitesse d'accumulation, cyclicité). Par la caractérisation des paléosols et des pédoclimats, ce travail s'intéresse aux dynamiques de mise en place puis d'évolution des dépôts et aux changements paléoenvironnementaux contemporains de la colonisation et de l'occupation par l'Homme de la région de Sangiran.

## 2 - CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET ARCHÉOLOGIQUE DU DÔME DE SANGIRAN

### 2.1 - CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE ET CLIMATIQUE ACTUEL

L'île de Java, d'orientation est-ouest, est située sur la partie interne de l'arc volcanique de la Sonde (fig. 1). Cette île se trouve à l'aplomb de la zone de subduction de la plaque indo-australienne sous la plaque eurasiatique, ce qui explique son volcanisme très actif, andésitique (Katili, 1975).

Le dôme de Sangiran se trouve au centre de l'île de Java, de 12 à 20 km au nord de la ville de Surakarta, au sein du vaste bassin sédimentaire que représente la dépression axiale de Solo (fig. 1). Cette dépression est encadrée par plusieurs édifices volcaniques (Merapi, Merbabu, Lawu) de type stratovolcans avec dômes de lave. La plupart des laves émises (andésites, dacites) ont des taux de silice intermédiaires (Berthommier, 1990).

Durant le Pléistocène supérieur, une phase tectonique régionale a entraîné la formation d'une série de dômes (Gesir, Bringinan, Onto, Klego, Gemolong et Sangiran) sur la bordure nord-ouest du volcan Lawu. Cet agencement autour de la base de ce volcan, remarqué par van Bemmelen (1949) pourrait indiquer un effondrement du flanc nord de cet édifice à l'origine du plissement des couches plastiques environnantes. Depuis cette phase de surrection, le dôme de Sangiran a été érodé par des ruisseaux et rivières, mettant à l'affleurement les séries quaternaires du site.

L'érosion est aujourd'hui rythmée par la mousson sud-est asiatique, responsable de la répartition saisonnière des précipitations (1600 mm annuels), maximales durant les mois de novembre à avril.

### 2.2 - CADRE GÉOLOGIQUE

Les séries sédimentaires de Sangiran, d'une épaisseur totale d'environ 250 mètres (Watanabe & Kadar, 1985), sont datées de 2,5 à 0,1 Ma et affleurent sur une superficie avoisinant 50 km<sup>2</sup>. Les plus anciens dépôts sont visibles au niveau du centre du dôme (un anticlinal érodé) tandis que les ensembles chronostratigraphiques plus récents sont répartis autour de ces séries anciennes.

#### 2.2.1 - Kalibeng (ou Puren)

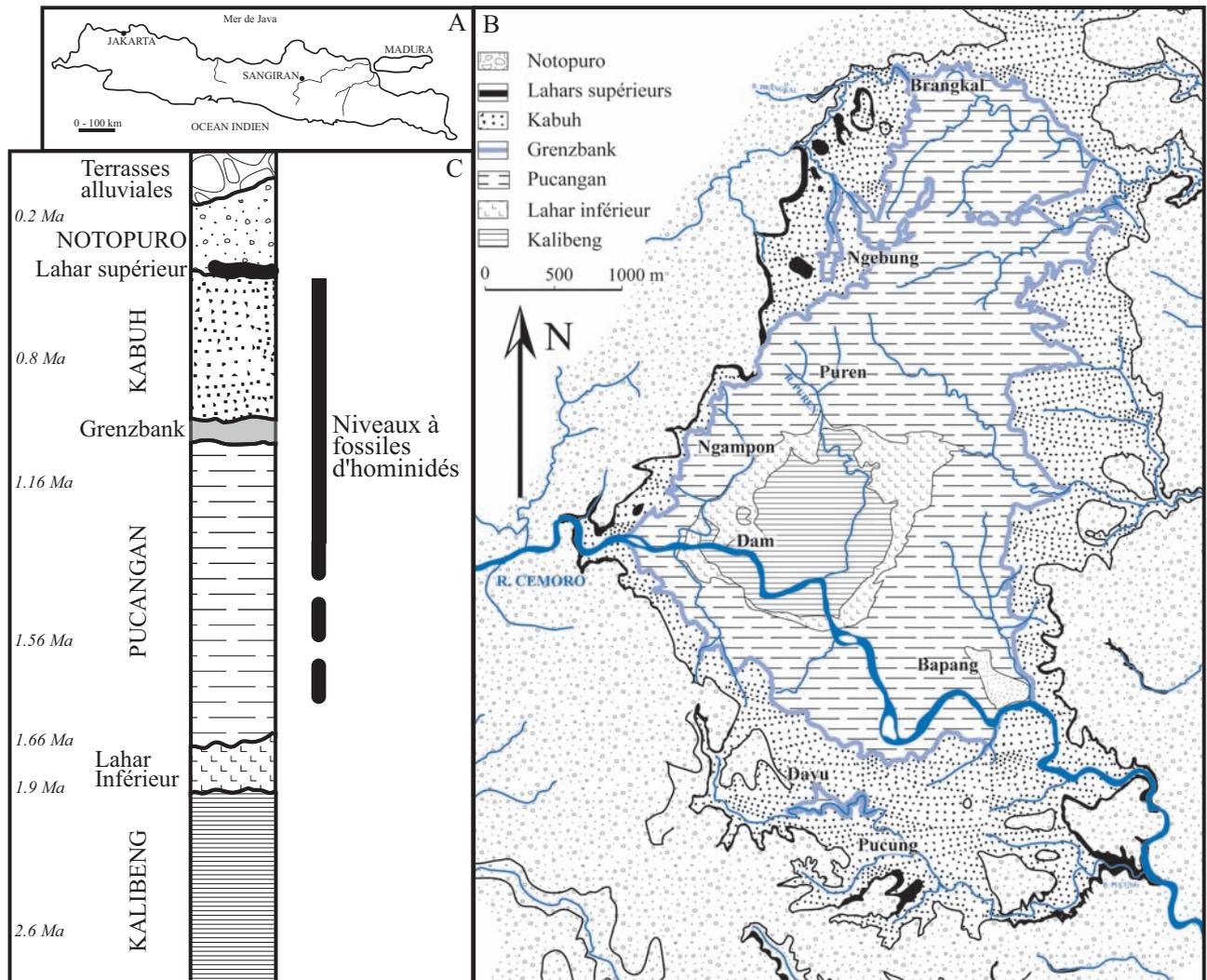
La partie supérieure de l'unité de Kalibeng, d'origine marine, affleure dans la partie centrale du dôme de Sangiran et atteint plus de 125 m d'épaisseur. Constitués d'argiles vertes à patine bleue, ces niveaux sont attribués à un milieu marin ouvert et peu profond. Le membre sommital est composé d'argiles vertes à patine bleu-gris sombre. Deux niveaux à *Corbicula* (mollusque dulçaquicole) y sont intercalés (von Koenigswald, 1940), tandis que la majorité de la malacofaune est constituée d'*Aloidis* et *Melanoides* (Watanabe & Kadar, 1985), vivant en eau douce ou saumâtre. Les contenus palynologiques indiquent une ligne de rivage proche couverte d'une forêt de mangrove (Sémah, 1986). Les travaux en biostratigraphie sur les diatomées et les mesures paléomagnétiques ont donné une fourchette d'âge comprise entre 2,14 et 1,67 Ma (Ninkovitch & Burckle, 1978 ; Sémah, 1984).

#### 2.2.2 - Pucangan (ou Sangiran)

A la base de l'unité de Pucangan s'individualise nettement, par sa lithologie et sa granulométrie, le Lahar inférieur (fig. 2). Les séries d'argiles sombres sus-jacentes ont été découpées en trois parties (inférieure, moyenne et supérieure) sur la base de nos observations et des descriptions précédentes réalisées par Watanabe & Kadar (1985).

La série du Lahar inférieur possède une épaisseur très variable (entre 1 et 46 m) et contient pour l'essentiel du matériel volcanique sablo-limoneux accompagné de blocs parfois plurimétriques. Von Koenigswald (1940) mentionne les premiers fossiles de mammifères dans cette série de lahars.

Les argiles sombres sus-jacentes, d'une épaisseur supérieure à 100 m, se seraient, dans un premier temps,



**Fig. 1 : A-** Carte de l'île de Java et localisation du dôme de Sangiran. **B-** Carte géologique du dôme. **C-** Coupe stratigraphique synthétique des séries à l'affleurement d'après Watanabe & Kadar (1985) et Sémah *et al.* (1992) modifiées.

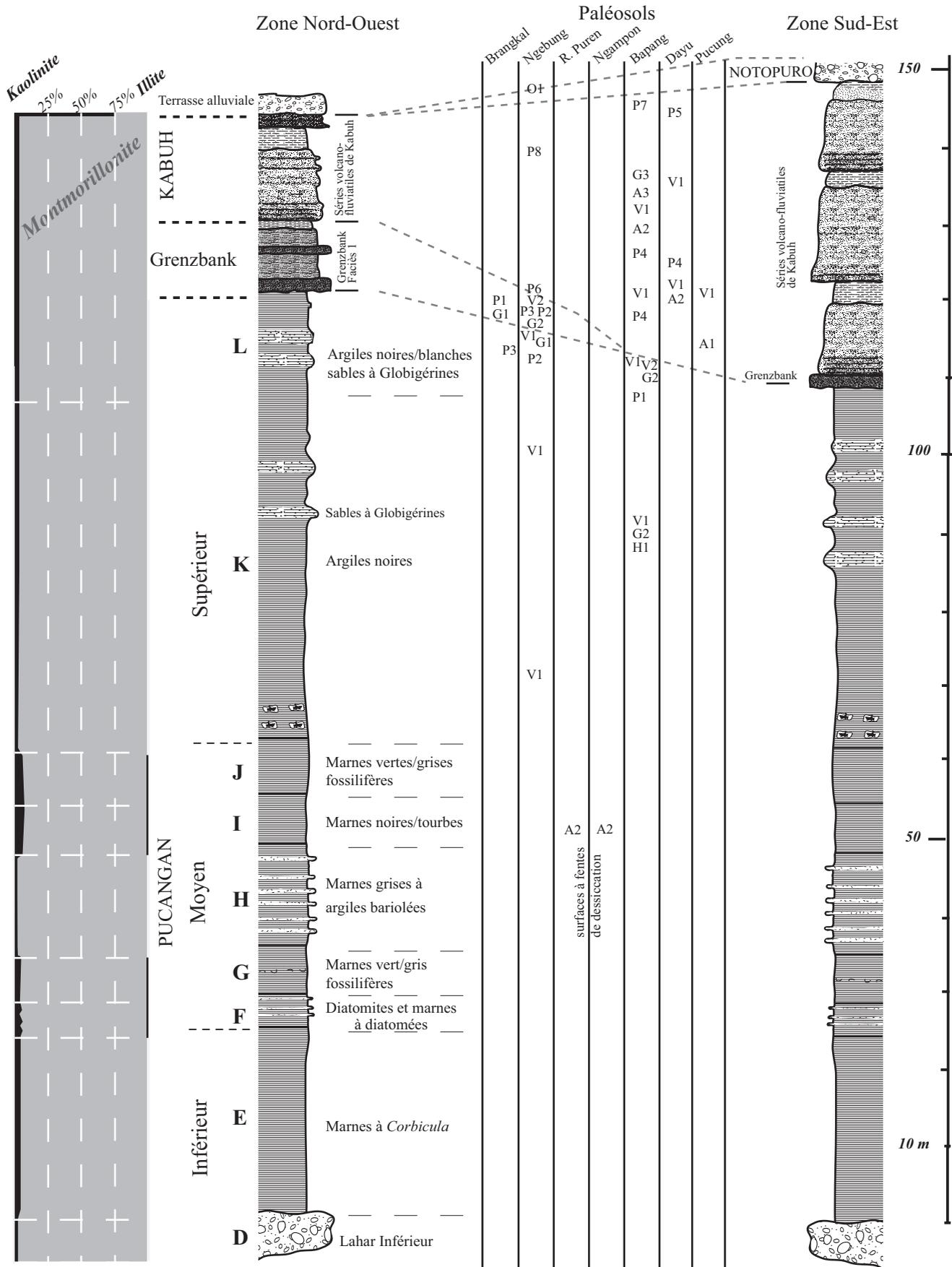
Cette dernière figure présente les principales unités géologiques (Kalibeng, Pucangan, Grenzbank, Kabuh, Notopuro) utilisées par von Koenigswald (1940) et un ensemble cohérent de datations radiochronologiques faisant consensus (Suzuki & Wikarno, 1982; Saleki, 1997; Sémah *et al.*, 2000; Bettis III *et al.*, 2004). Le cadre chronologique est encore l'objet de débats (voir partie 2.2).

*Fig. 1: A- Location of the Sangiran dome on Java Island. B- Geological map of Sangiran dome. C- Stratigraphic log, modified from Watanabe & Kadar (1985) et Sémah *et al.* (1992). This figure presents the major geological units (Kalibeng, Pucangan, Grenzbank, Kabuh, Notopuro) used by von Koenigswald (1940) and a coherent group of consensual radiochronological datings (Suzuki & Wikarno, 1982; Saleki, 1997; Sémah *et al.*, 2000; Bettis III *et al.*, 2004). The chronological frame is still debated (see part 2.2).*

déposées dans un milieu saumâtre et marin, puis lacustre dans la moitié supérieure (Watanabe & Kadar, 1985). Dans ces argiles s'intercalent plusieurs signes de transgressions marines. Les changements au sein de ces environnements littoraux sont distingués d'après les contenus en diatomées (Yokoyama & Koizumi, 1989), foraminifères (Kadar, 1985) et malacofaunes fossiles (*Arca*, *Paphia*, *Strombus*, *Dentalium* d'origine marine et *Corbicula*, *Melanoides*, *Unio*, *Anodonta*, *Viviparus*, *Sulcospira*, *Brotia*, *Thiara* d'origine continentale) d'après Watanabe & Kadar (1985). La proximité du littoral marin est également caractérisée par la récurrence de pollen de mangrove (Sémah, 1986).

L'unité de Pucangan contient les plus vieux restes fossiles de vertébrés découverts à Sangiran. Ils sont attribués à la faune de Satir (Sondaar, 1984). D'après les enregistrements polliniques, ces faunes ont vécu dans un paysage marécageux côtier dominé par la forêt tropicale humide (Sémah, 1982a; Tokunaga *et al.*, 1985; Sémah, 1986).

Des datations récentes par la méthode Argon/Argon (Ar/Ar) ont livré des âges de 1,90 Ma (Bettis III *et al.*, 2004), 1,66 Ma (Swisher *et al.*, 1994) et 1,66 Ma (Sémah *et al.*, 2000). Selon ces derniers auteurs, le dépôt de cette série de lahars, du fait de lacunes de sédimentation dues à l'émersion, a pu se dérouler sur une longue durée et traverser l'épisode d'Olduvaï (1,95-1,78 Ma) comme en témoignent les analyses paléomagnétiques. Les âges radiométriques obtenus par traces de fission (TF) et Ar/Ar sur les différents niveaux de tufs volcaniques sont datés entre 1,56 Ma (Saleki, 1997) et 1,16 Ma (Suzuki & Wikarno, 1982). L'étude paléomagnétique des argiles de Pucangan a révélé une polarité inverse dominante attribuée à la période de Matuyama (Sémah *et al.*, 1980; Sémah, 1982b; Shimizu *et al.*, 1985). Une inversion repérée au sommet a été attribuée dans un premier temps à la base de la période Brunhes mais il pourrait également s'agir de l'épisode de Jaramillo (Yokoyama & Koizumi, 1989; Langbroek & Roebroeks, 2000).



**Fig. 2 : Coupes géologiques synthétiques des secteurs nord-ouest et sud-est du dôme de Sangiran (Watanabe & Kadar, 1985; Brasseur, 2009).** Les semi-quantifications des minéraux argileux acquises en DRX et les paléosols (site par site) sont présentées en parallèle de ces deux coupes. Pour les codes des paléosols, voir tab. 1 à 5.  
 Fig. 2: Synthetic logs in the NW and SE areas of the Sangiran Dome (Watanabe & Kadar, 1985; Brasseur, 2009). XRD semi-quantifications of clay minerals and pedotypes (locus by locus) are presented along those columns. For palaeosol codes, see tables 1 to 5.

### 2.2.3 - Grenzbank

La charnière entre les unités de Pucangan et Kabuh est souvent occupée par un banc conglomératique calcaire appelé Grenzbank («banc limite» en allemand) par von Koenigswald (1940). En raison de son épaisseur variable et de sa diversité lithologique, Watanabe & Kadar (1985) l'ont également appelé «Grenzbank zone». Ce poudingue de 0 à 6 m d'épaisseur est composé de biomicrite, fragments de grès calcaire, foraminifères planctoniques, fragments de mollusques, quartz et grains andésitiques (Sudijono, 1985). De nombreux fossiles de vertébrés sont également présents dans le Grenzbank; ils sont attribués à la faune de Trinil H.K. (Leinders *et al.*, 1985). Les analyses polliniques disponibles (Tokunaga *et al.*, 1985; Sémah, 1986) indiquent un paysage ouvert et herbacé.

En l'absence de niveaux volcaniques en position primaire et peu altérés pouvant être datés, l'âge du Grenzbank est évalué à 1 Ma par rapport à celui des niveaux de Pucangan et Kabuh qui l'encadrent (Djubiantono, 1992).

### 2.2.4 - Kabuh (ou Bapang)

D'une puissance maximale de 50 m à Bapang (sud-est du dôme), mais absentes à Bubak (nord-ouest) les séries de Kabuh sont d'épaisseur très variable. La majorité des dépôts sont des séries sablo-graveleuses volcano-fluviatiles à granoclassement positif, stratifications entrecroisées, alternant avec des niveaux argilo-limoneux et des tufs volcaniques. Ces niveaux se sont déposés en contexte de plaine alluviale, à réseau en tresses sur certains sites (Larick *et al.*, 2001). Cinq niveaux de tufs ont été différenciés dans la stratigraphie de Kabuh selon Yoshikawa & Suminto (1985). La plupart des restes de vertébrés, hominidés compris, ont été découverts dans cette unité. La faune est rattachée à l'association de Kedungbrubus (de Vos *et al.*, 1982), mais certains sites (voir Moigne *et al.*, 2004) reflètent une association endémique antérieure. En règle générale, la faune et les enregistrements polliniques (Poaceae, Asteraceae, Fabaceae, Mimosaceae) indiquent un climat sec à saisonnalité marquée avec un paysage ouvert (Sémah & Sémah, 2001).

De nombreuses datations ont été réalisées sur les ponces, tufs et sables volcaniques de Kabuh. La plupart des âges Potassium/Argon (K/Ar), Ar/Ar et TF se situent autour de 0,8-0,7 Ma (Jacob & Curtis, 1971; Nishimura *et al.*, 1981; Suzuki & Wikarno, 1982; Saleki, 1997) mais une série isolée de datations effectuées à Bapang, a livré des âges bien plus anciens de 1,51 à 1,02 Ma (Larick *et al.*, 2001). Ces derniers semblent cependant invalidés par la découverte de tectites dans la partie moyenne et supérieure de Kabuh (Itihara *et al.*, 1985). Leur présence à l'état remanié nous indique que la couche sédimentaire qui les contient est postérieure à 0,8 M.a., date de l'impact météoritique (Ninkovitch & Burckle, 1978; Schneider *et al.*, 1992; Langbroek & Roebroeks, 2000).

### 2.2.5 - Notopuro (ou Pohजार)

L'unité de Notopuro dépasse 47 m d'épaisseur sur les bords de la rivière Pohजार et repose en discordance sur

celle de Kabuh. La base est constituée du «Lahar supérieur», contenant des blocs parfois plurimétriques de lave andésitique. Les dépôts suivants sont essentiellement des sables volcano-fluviatiles alternant avec quelques niveaux tufacés, qui ne sont interrompus que par un second lahar médian. Très peu de fossiles ont été découverts dans cette unité et les conditions oxydantes n'ont pas permis la préservation du pollen.

Les datations sur effluents volcaniques ont donné des âges de 0,15 Ma pour l'Ar/Ar (Saleki, 1997) et 0,25 Ma par TF (Suzuki & Wikarno, 1982).

### 2.2.6 - Terrasses fluviales et alluvions récentes

Les alluvions fluviales anciennes sont composées de sables, galets et blocs avec niveaux limoneux intercalés. Une partie de leur matériel provient des unités de Kabuh et Notopuro comme en témoigne la présence d'«éclats de Sangiran» et de tectites remaniés (de Terra, 1943; Bartstra, 1985; Sémah, 2001). Ces dépôts de terrasses, postérieurs au plissement du dôme, ne contiennent pas de fossiles et n'ont pas été datés.

Les alluvions récentes sont distribuées le long des cours d'eau, elles sont particulièrement importantes dans la plaine alluviale de la rivière Cemoro.

## 2.3 - CADRE ARCHÉOLOGIQUE ET PALÉONTOLOGIQUE

La majorité des découvertes de fossiles humains à Sangiran sont réalisées par les collecteurs locaux. De telles découvertes impliquent de nombreuses incertitudes sur la position stratigraphique des fossiles. D'autre part, l'activité tectonique a mis en contact anormal des terrains d'âges différents notamment au niveau des collines de Jokotingkir (au centre du dôme). Il est donc, par exemple, difficile d'attribuer une position stratigraphique précise aux plus anciens hominidés découverts dans les séries de Pucangan. Plusieurs auteurs (i.e. Watanabe & Kadar, 1985) pensent que les fossiles apparaîtraient à partir des couches de Pucangan supérieur, représentant les trente derniers mètres de l'unité, position contestée par d'autres chercheurs (voir par exemple Sémah, 1986; Swisher *et al.*, 1994). De nombreux fossiles d'*Homo erectus* ont été retrouvés dans les séries du Grenzbank et surtout de Kabuh.

Les premiers outils taillés de Sangiran furent découverts par von Koenigswald en 1934 autour des collines de Ngebung (von Koenigswald, 1936; von Koenigswald & Ghosh, 1973) au nord-ouest du dôme. Il s'agit d'éclats de jaspe, de calcédoine, de tuf silicifié, retrouvés dans les niveaux sablo-graveleux de Kabuh et au sommet de la série, au sein des alluvions anciennes. La présence d'outils taillés dans Kabuh fut ensuite longtemps contestée (de Terra, 1943; Movius, 1944; van Heekeren, 1972; Bartstra, 1985) car la plupart des découvertes ultérieures furent réalisées dans les alluvions anciennes sus-jacentes. Les fouilles entreprises à Ngebung 2 ont permis de retrouver les éclats de Sangiran en contexte stratigraphique au sein de Kabuh. Sémah *et al.* (1990) et Sémah (2001) proposèrent alors que les éclats des

alluvions supérieures soient issus du remaniement d'anciens niveaux de Kabuh aujourd'hui érodés. L'industrie découverte sur le site de Ngebung 2 comporte aussi des outils de plus grandes dimensions tel qu'un percuteur en quartz, ainsi que des choppers, bolas, polyèdres et hache-reaux en andésite (Sémah *et al.*, 1992).

Plus récemment, une série d'éclats a été découverte dans les niveaux du Grenzbank lors de fouilles effectuées à proximité des villages de Ngledok et Dayu (Widianto *et al.*, 1998; Widianto *et al.*, 2001). Ces outils remaniés sont dispersés au sein du conglomérat calcaire. Ils se composent d'éclats, parfois retouchés, en calcédoine, jaspe ou encore calcaire silicifié. Cette industrie est la plus ancienne découverte à ce jour à Sangiran.

### 3 - MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les paléosols caractérisés sont issus de la description et de l'analyse de 40 coupes aménagées dans les séries de Pucangan, du Grenzbank et de Kabuh. L'étude des profils a suivi la procédure et la terminologie standards (United States Department of Agriculture, 1998). Afin de caractériser en laboratoire les traits pédo-sédimentaires et la minéralogie, un double échantillonnage composé de blocs de sédiments non perturbés et d'échantillons en vrac a été réalisé. Les échantillons non perturbés ont permis la réalisation de 60 lames minces pédologiques (14 x 6,5 cm) décrites suivant la terminologie proposée par Bullock *et al.* (1985). Les échantillons en vrac ont servi au dosage de la matière organique et à l'analyse des minéraux argileux en diffraction des rayons X (DRX). Ces analyses ont été effectuées sur des pâtes orientées (Holtzapffel, 1985) à l'aide d'un diffractomètre Siemens D-500 Instrument (radiations Cu K $\alpha$ , filtre Ni). Le dosage de la matière organique a été effectué par quantification de la perte au feu.

La classification proposée par Mack *et al.* (1993) et adaptée à l'étude des paléosols a été utilisée. Celle-ci est une version modifiée de la «Soil Taxonomy» (classification américaine des sols) mais utilisant également certaines définitions et termes de la *World Reference Base for Soil Resources* (classification FAO).

Nous l'avons choisie car les classifications modernes nécessitent le calcul de la densité, de la capacité d'échange cationique, du pourcentage d'humidité, de la quantité de bases et autres paramètres chimiques. Or ces paramètres sont susceptibles de changer après l'enfouissement d'un sol (Yaalon, 1971; Retallack, 1990). De plus les classifications modernes nécessitent de disposer de l'horizon organique de surface (souvent érodé) ainsi que de données relatives au type de couvert végétal et au climat lors de la formation du sol, tous éléments que nous souhaitons justement reconstituer par l'étude paléopédologique. La classification proposée par Mack *et al.* (1993) utilise des caractères évoluant peu ou pas durant l'enfouissement puis la diagenèse. Enfin, les travaux précédents effectués sur les paléosols de Sangiran ont proposé un premier cadre paléopédologique utilisant cette classification (Bettis III *et al.*, 2009).

## 4 - CARACTÉRISATION DES PALÉOSOLS

### 4.1 - STRATIGRAPHIE ET CARACTÉRISATION DES MINÉRAUX ARGILEUX

Les observations de terrain ont été réalisées le long du lit de la rivière Puren ainsi qu'à proximité des localités de Brangkal, Ngebung, Ngampon, Dam, Bapang, Dayu et Pucung distribuées autour d'un axe nord-ouest / sud-est (fig. 1). Ces sites recoupent stratigraphiquement les séries de Pucangan, du Grenzbank et de Kabuh. Nous avons choisi de travailler le long d'un axe nord-ouest / sud-est car les différences dans les épaisseurs de ces unités et dans les séquences de faciès sont particulièrement marquées entre le secteur nord-ouest (région du village de Ngebung) et la partie sud-est du dôme (Bapang) à partir de Pucangan supérieur. Afin de respecter cette variabilité dans la géométrie des dépôts, chacun des paléosols a été resitué par rapport à deux coupes synthétiques correspondant aux observations stratigraphiques effectuées sur les deux secteurs géographiques.

L'étude des minéraux argileux en diffractométrie des rayons X réalisée sur l'ensemble de ces séries a mis en évidence des cortèges de minéraux argileux très constants avec plus de 90 % de smectites et moins de 10 % de kaolinite. Un sol rouge, développé au sommet des séries de Kabuh à Ngebung, fait néanmoins exception avec 75 % de kaolinite pour 25 % de smectites.

Lors de nos investigations dans les couches du Lahar inférieur, nous avons eu l'occasion de décrire plusieurs blocs de grande taille constitués de roches sédimentaires (fig. 3) à proximité du barrage (dam) de la rivière Cemoro. Ces blocs présentent des traits pédogénétiques carbonatés et une pédofabrique; ils sont donc issus de paléosols. Ces blocs de paléosols remaniés sont les plus anciens témoignages du développement de sols à Java central.

Les premières traces d'émersion sont représentées par des niveaux à concrétions carbonatées indurant des réseaux polygonaux de fentes de dessiccation (Brasseur, 2009). Dans ces niveaux de Pucangan moyen, l'absence de traces de pédogénèse indique que ces phases d'émersion devaient être éphémères.

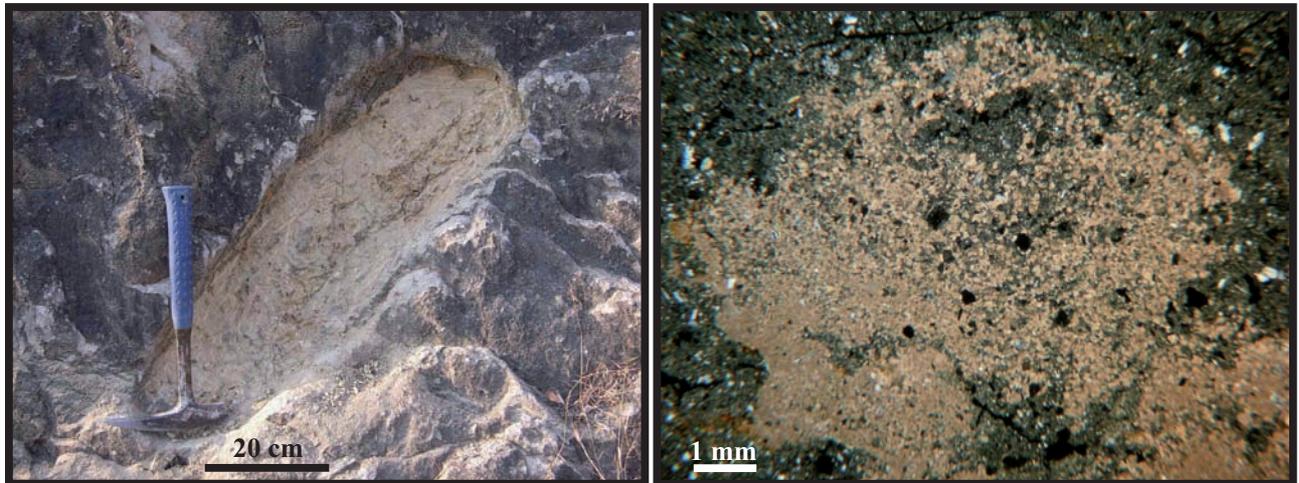
Nous avons repéré les premiers paléosols en place dans la stratigraphie à la base de Pucangan supérieur. Les traits pédogénétiques associés sont signalés par des horizons de nodules calcaires pluricentimétriques de type septarias (fig. 2).

Pour l'ensemble des séries fluviatiles du Grenzbank et de Kabuh, les paléosols sont observés au sein des couches argilo-limoneuses alternant avec les sédiments fluviatiles grossiers de chenaux. L'incision de ces paléosols par les chenaux conduit fréquemment à une troncature des profils et à un remaniement local des nodules pédologiques.

### 4.2 - MATÉRIELS PARENTAUX

#### 4.2.1 - Au sein de Pucangan et du Grenzbank

Les sols des séries supérieures de Pucangan présentent, lorsqu'ils sont peu matures, des reliquats de foraminifères



**Fig. 3 :** Photo (à gauche) d'un bloc sablo-argileux à traits pédologiques calcitiques, pris dans la partie inférieure des séries du Lahar inférieur affleurant entre le musée de Sangiran et Dam.

Le bloc mesure 80 cm de longueur; Photo prise au microscope (à droite, vue en LPA) d'une lame réalisée dans le bloc précédent. Nous y distinguons une matrice sablo-argileuse à pédofabrique granostriée discrète et hébergeant un nodule micritique (et microsparitique) *in situ*.

*Fig. 3: Picture (left side) of a sandy-clayey boulder with pedological features, found in the lower part of Lower Lahar series outcropping between the Sangiran Museum and Dam locality. The boulder is 80 cm long; Picture (right side, XPL view) of a thin section from the boulder, showing a sandy-clayey matrix with discrete granostriated pedofabric and including an in situ micritic and microsparitic nodule.*

et de nanoplancton marins tel que le genre *Discoaster*, qui disparaît à la fin du Gélasién (Bukry, 1971). La présence de ces nanofossiles démontre que les sols se sont développés sur des boues d'origine marine, remaniées et apportées par ruissellement dans le bassin sédimentaire depuis des formations plus anciennes affleurant dans le paysage.

#### 4.2.2 - Au sein de Kabuh

Au sein des couches de Kabuh, le sédiment initial pourrait être un niveau argilo-limoneux (dépôt de basse énergie dans un milieu de plaine alluviale, lacustre ou marécageuse), un banc de colluvions de pédosédiments, de sables (avec d'importants transferts argileux ultérieurs) ou une bentonite (tuf volcanique altéré).

### 4.3 - DESCRIPTION DES TRAITS PÉDOGÉNÉTIQUES ET DES PALÉOSOLS

Les dépôts allant de la partie moyenne de Pucangan jusqu'au sommet de Kabuh contiennent de nombreux paléosols qui sont les témoins de périodes de stabilité dans des paysages en constante évolution depuis le Pléistocène inférieur. Bettis III *et al.* (2009) ont regroupé ces paléosols en 8 pédotypes, chacun définis sur un profil de référence et distingués des autres par un assemblage de traits pédologiques particuliers. Notre approche propose 19 pédotypes répartis au sein de 6 ordres de paléosols.

#### 4.3.1 - Traits et processus pédogénétiques

Différents caractères pédologiques prédominants et secondaires ont été relevés sur les paléosols de Sangiran :

- des nodules carbonatés micritiques, avec parfois de la sparite fibro-radiée. Ces traits se présentent au sein d'horizons Bk, sous forme de nodules tubulaires ou sub-sphériques à vide septarique ou géodique, et plus rarement sous forme d'horizons indurés (type croûte

zonaire). Les nodules sont millimétriques ou centimétriques tandis que les croûtes mesurent quelques centimètres d'épaisseur. Ces traits calcitiques sont souvent marqueurs de conditions pédoclimatiques arides et semi-arides (Goudie, 1983 ; Wright & Tucker, 1991 ; Ahmad & Mermut, 1996 ; Tabor *et al.*, 2006).

- une matrice de teinte claire (gris, bleu ou vert), associée à la concentration d'oxydes de fer et de manganèse, de taches de décoloration et d'éventuelles marmorisations. Ces traits hydromorphes indiquent que le paléosol était gorgé d'eau pendant une partie de l'année (saison humide).

- des pisolithes ferrugineux à structure concentrique. Ces traits ferriques correspondent le plus souvent à des phénomènes de ségrégation, de concentration d'oxydes de fer et de manganèse (pisolithes et taches de sesquioxides). Ils sont rencontrés au sein de sols hydromorphes très évolués et indiquent donc des conditions pédoclimatiques humides (Van Schuylenborgh, 1973 ; Veneman *et al.*, 1976 ; Bouma, 1983 ; Fanning & Fanning, 1989).

- de nombreuses illuviations argileuses (traits argilliques) en revêtement de la porosité au sein d'un horizon inférieur Bt. Ce type de trait, indiquant un drainage du profil, reflète une position haute du sol par rapport au niveau de la nappe phréatique.

- des *slickensides* éventuellement associés à une structure polyédrique et à des traces de dessiccation. Ces traits verticaux sont rencontrés dans les sols smectitiques soumis à un pédoclimat à saisonnalité bien marquée.

#### 4.3.2 – Paléosols

##### 4.3.2.1 - Sols organiques tourbeux; Type H (Histosols)

###### Caractères généraux

Localisés au sein des séries moyenne et supérieure de Pucangan, ces niveaux argilo-sableux gris clair sont

faiblement stratifiés, à vides planaires et ne possèdent qu'un horizon organique O. Les principaux composants organiques sont des fragments humifiés, des débris végétaux (carbonisés ou non), des fragments de cuticules, de rares racines et des sclérotés fongiques. Les principaux minéraux sont des argiles et de la micrite. Ces niveaux peuvent contenir plus de 30 % de matière organique. Les fossiles découverts systématiquement sont des gastéropodes (*Melanoides tuberculata* et *M. sp.*, *Filopaludina javanica*), des bivalves (*Corbicula*

*sp.* à valves jointes et *Unio sp.*) et des spicules brisés de spongiaires (tab. 1).

Pour les sols de Pucangan moyen, un ensemble de caractères pédologiques supplémentaires a également été distingué (pédotype H2). Dans ce cas, des pyrites framboïdales et des cristaux de gypse comblent certains vides; des diatomées et des ostracodes sont associés aux fossiles déjà cités et ces niveaux organiques présentent une compaction visible en lame mince par des lits boudinés de micrite (fig. 4).

Pédotypes	Caractéristiques
H1	Absence de sels évaporitiques, association de fossiles d'eau douce
H2	Pyrites framboïdales et cristaux de gypse comblent certains vides; fossiles de mollusques, ostracodes et spicules de spongiaires

Tab. 1: Caractéristiques des différents pédotypes d'histosols.  
Tab. 1: Characteristics of the histosol pedotypes.

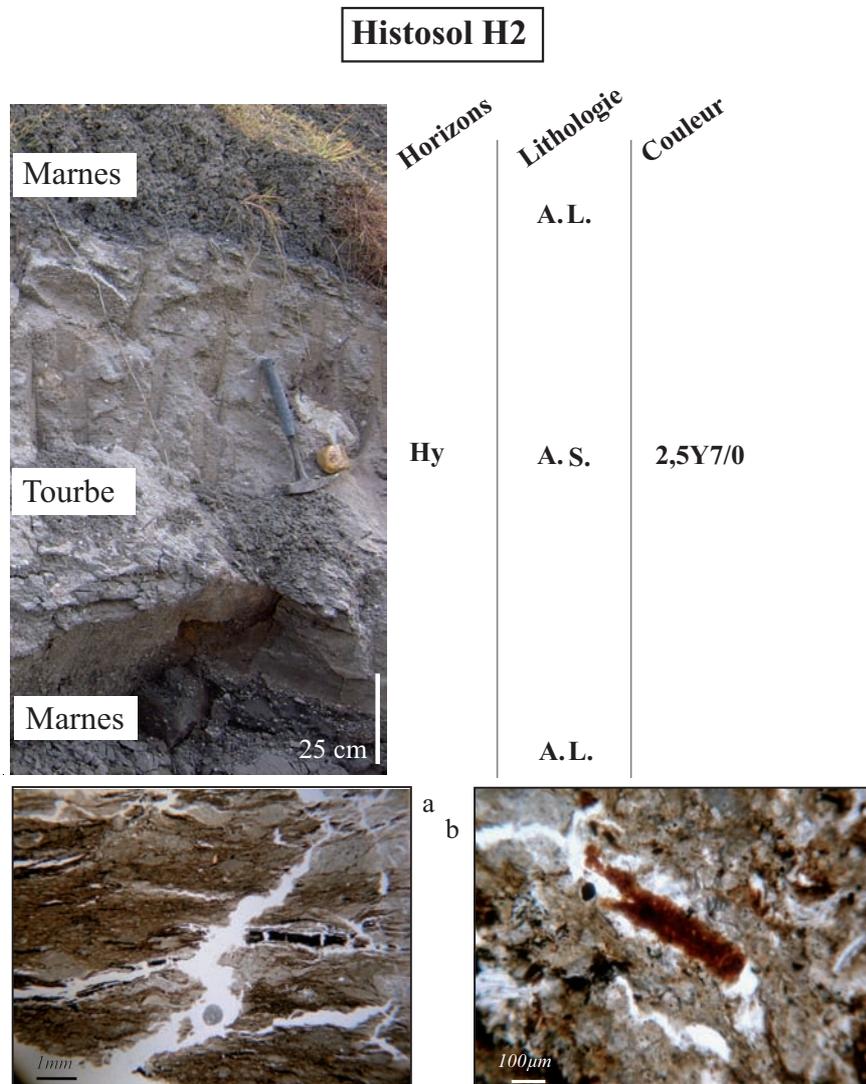


Fig. 4: Pédotype H2.

a) niveau tourbeux microlité par des alternances de matière organique et de micrite boudinée. Les horizons organiques sont composés de débris végétaux humifiés, tiges, cuticules, résidus charbonneux et fongiques. Les amas micritiques, de forme œillée, sont parfois associés à des cristaux de gypse. b) détail d'un débris humifié. Lithologie: A=Argiles; L=Limons; S=Sables; G=Graviers.

Fig. 4: Pedotype H2: a) microlaminated peaty level with alternations of organic matter and elongated micritic clusters. The organic laminae are composed of humified vegetal fragments, stems, cuticles, coal-like fragments and fungic elements. The augen shaped micritic clusters are sometimes associated to gypsum crystals. b) detail of a humified fragment. Lithology: A= Clay; L= Silts; S= Sands; G= Gravels.

### *Exemple du pédotype H2*

Le sol tourbeux H2 est localisé dans la partie moyenne de Pucangan à proximité de Ngampon (fig. 1 et 4). Ce niveau argilo-sableux gris d'un mètre d'épaisseur est faiblement stratifié, à vides planaires. Il contient 32 % de matière organique (fragments humifiés, débris végétaux, cuticules, de rares racines et des sclérotés fongiques). Plusieurs blocs de tuf volcanique de couleur blanche sont inclus dans ce niveau.

### *Interprétation*

Il s'agit de faciès tourbeux basiques, eutrophes (Mack *et al.*, 1993) se développant en milieu aquatique réducteur constamment noyé, comme l'attestent la présence de pyrite et les malacofaunes observées. Les nappes de ce type de tourbe sont alimentées par l'eau d'un lac, de marécage ou de rivière à cours lent et se trouvent dans un secteur marécageux déprimé.

Ces tourbes calcaires sont le plus souvent rencontrées en bordure de lacs et de marécages situés au sein de paysages où les roches calcaires dominent. En milieu palustre côtier, dans des environnements actuels sous un climat chaud et humide à sub-humide, ces tourbes ont déjà été décrites avec de forts taux de carbonates (Davies & Cohen, 1989; Platt & Wright, 1992; Aqrawi & Evans, 1994). Dans ces milieux, les algues et cyanobactéries (ainsi que des champignons, bactéries et protozoaires) formant le périphyton sont à l'origine de la précipitation de la calcite (Gleason & Spackman, 1974). Les carbonates s'accumulent pendant le développement et lors du dépôt du tapis algaire et cyanobactérien, notamment durant les périodes sèches. Cette mince couche carbonatée vient alors se superposer aux végétaux en cours de décomposition. La dessiccation des couches constituées de ces mâts algaire conduit à la mise en place des vides planaires (Freytet & Verrecchia, 2002). Le périphyton ayant besoin de lumière pour se développer, il est rencontré dans les zones lacustres ou palustres à faible couvert végétal. Ce type de couvert végétal ne présentant qu'un réseau racinaire très limité (Thompson & Hamilton, 1983), il pourrait expliquer la rareté des bioturbations racinaires au sein des niveaux tourbeux de Pucangan.

Les restes végétaux sont accompagnés de pyrite framboïdale. Ce minéral rare dans les tourbes est rencontré surtout en milieu marin ou saumâtre, source de sulfures (Casagrande *et al.*, 1977; Cohen *et al.*, 1984). Une partie du gypse retrouvé pourrait témoigner de saisons ou cycles de sécheresse durant lesquels la tranche d'eau s'évapore. Des amas de tuf volcanique ponceux flottants dans ce milieu se sont échoués contre la tourbe ou les massifs végétaux sus-jacents dans le cas du pédotype H2.

### **4.3.2.2 - Sols hydromorphes; Type G (Gleysols)**

#### *Caractères généraux*

Nous avons identifié ces paléosols dans les séries de Pucangan supérieur et du Grenzbank. Les gleysols sont le plus souvent de teintes ternes (gris, bleu ou vert); le matériel sédimentaire est le plus souvent riche en argiles

et imperméable. Ces gleys peuvent présenter des taches ou marmorisations d'oxydes, parfois des nodules de fer et de manganèse. Différentes pédofabriques de type réticulé, moucheté en mosaïque, grano- et porostrié sont associées à une matrice fine dont la porosité est très faible. La fraction limono-sableuse est en général dépourvue en minéraux altérables (feldspaths et autres minéraux volcaniques).

Plusieurs pédotypes présentant ces caractères généraux sont distingués à partir des caractères secondaires (tab. 2).

### *Exemple du pédotype G1 (gleysol ferrique concrétionné calcique verticale)*

Ce gleysol ferrique concrétionné calcique verticale (coupe C, niv. L.e.) est observé sous le premier banc de Grenzbank (fig. 5). Il est composé principalement d'argiles gris clair et contient plusieurs traits pédologiques tels que des *slickensides*, une structure polyédrique, des nodules carbonatés et des pisolithes ferrugineux. L'horizon supérieur (A) a probablement été érodé lors de la mise en place des dépôts grossiers sus-jacents. L'horizon que nous observons désormais est un horizon inférieur hydromorphe (B<sub>gkss</sub>), à pédofabrique réticulée et granostréée.

La matrice étant dénuée de minéraux altérables primaires, il est possible que ce paléosol ait subi une longue évolution sous des conditions d'altération par hydrolyse, dans la partie basse d'une plaine d'inondation ou à proximité d'une zone lacustre, marécageuse, noyée durant toute la saison humide.

### *Interprétation*

Ces sols sont associés à des conditions de faible oxydo-réduction où le matériel parental a été décoloré et se trouve à l'état réduit en raison de l'engorgement par une nappe d'eau en position haute pendant une partie de l'année. Ils occupent fréquemment des positions topographiques basses dans le paysage. La matrice de certains gleysols contient des taches brunes, des marmorisations d'oxydes, des nodules de fer et manganèse, des caractères vertiques (structures polyédriques, *slickensides*) et calciques (nodules carbonatés). La présence d'un ou de plusieurs de ces caractères traduit un assèchement intermittent pendant l'année dû à une nappe d'eau fluctuante. Très peu de traces de racines sont relevées dans les horizons B identifiés. La végétation couvrant ce type de paléosol devait être à racines peu pénétrantes et tolérantes à l'eau. Il pourrait s'agir de fougères, roseaux et herbacées des milieux humides.

### **4.3.2.3 - Sols à caractères vertiques dominants; Type V (Vertisols)**

Les vertisols sont le plus souvent de teintes gris sombre à brun clair, avec une structure prismatique ou colonnaire et possèdent un horizon B<sub>ss</sub> à polyèdres de dessiccation et *slickensides*. De plus, les minéraux argileux représentent au minimum 30 % du matériel et sont très majoritairement composés de smectites. À Sangiran, ces sols possèdent des assemblages de biréfringence de type

Pédotypes	Caractéristiques
G1	matrice totalement décolorée avec des concentrations de fer-manganèse en nodules de type pisolithes à structure concentrique; présence de nodules micritiques ou de sparite fibro-radiée; <i>slickensides</i> associés à une structure polyédrique
G2	<i>slickensides</i> associés à une structure polyédrique, présence de nodules de sparite fibro-radiée ou micritiques
G3	<i>slickensides</i> associés à une structure polyédrique

Tab. 2 : Caractéristiques des différents pédotypes de gleysols.

Tab. 2: Characteristics of the gleysol pedotypes.

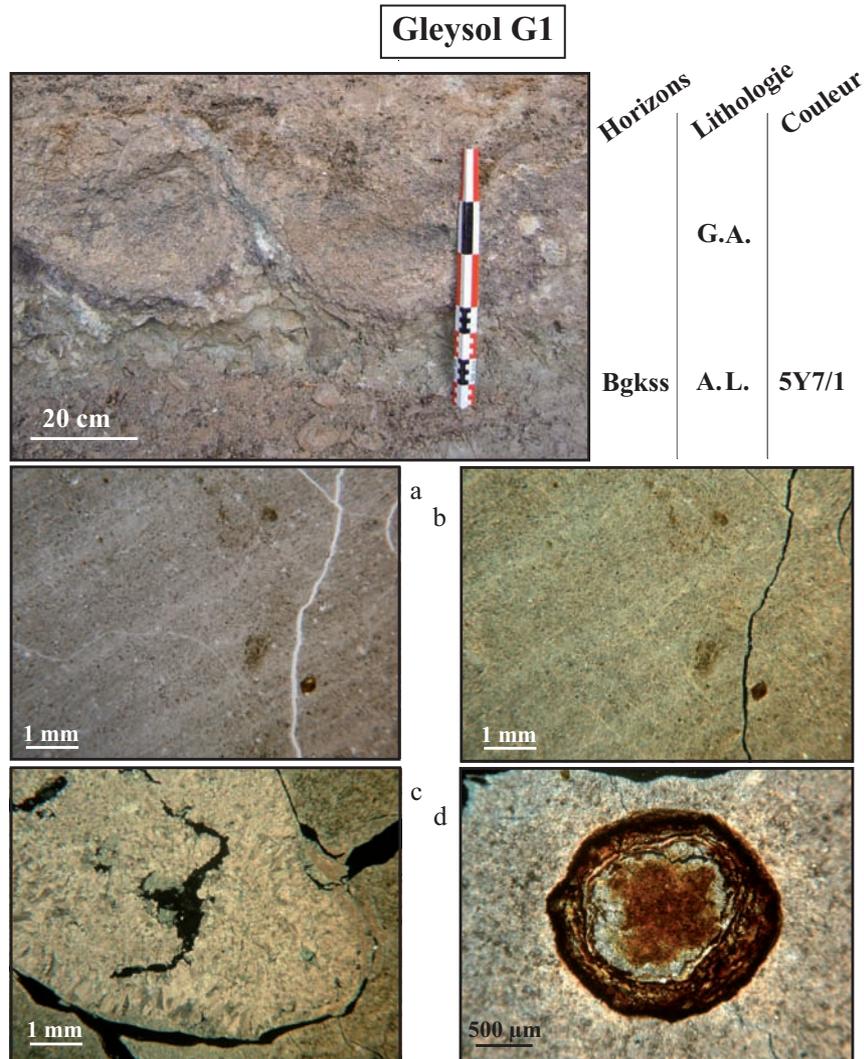


Fig. 5 : Pédotype G1.

a) matrice sédimentaire très fine, décolorée avec quelques taches d'oxydes (observation en LN); b) cette matrice possède une pédofabrique réticulée (observation en LPA avec lame  $\lambda$ ); c) nodule à vide septarique composé de micro-sparite et sparite fibro-radiée (observation en LPA). Un épisode pédologique tardif a permis le développement de carbonates micritiques sur le contour du nodule; d) pisolithe ferrugineuse à structure concentrique (observation en LPA), les argiles de la matrice sont orientées de manière préférentielle autour du nodule (fabrique granostréée). Lithologie: A=Argiles; L=Limons; S=Sables; G=Graviers.

Fig. 5: Pedotype G1: a) fine grained sedimentary matrix, bleached with oxides patches (observation under NL); b) matrix with reticulated pedofabric (XPL view with  $\lambda$  blade); c) nodule with septaric voids composed of micro-sparite and fascicular sparite (XPL view). A late pedological event led to the development of micritic carbonates around the nodule; d) ferruginous pisolith with concentric structure (XPL view), the matrix clay particles are preferentially oriented parallel to the external surface (granostriated fabric). Lithology: A= Clay; L= Silts; S= Sands; G= Gravels.

grano- et porostrié, plus rarement réticulé ou moucheté en mosaïque. Lorsqu'il ne s'agit pas de vertisols hydromorphes, la porosité racinaire est bien développée (chenaux, vésicules et cavités polyconcaves).

Ces paléosols sont identifiés dans les séries de Pucangan supérieur, du Grenzbank et de Kabuh. Ils se déclinent en 2 pédotypes, aux caractéristiques secondaires particulières (tab. 3).

*Exemple du pédotype V1 (vertisol calcique)*

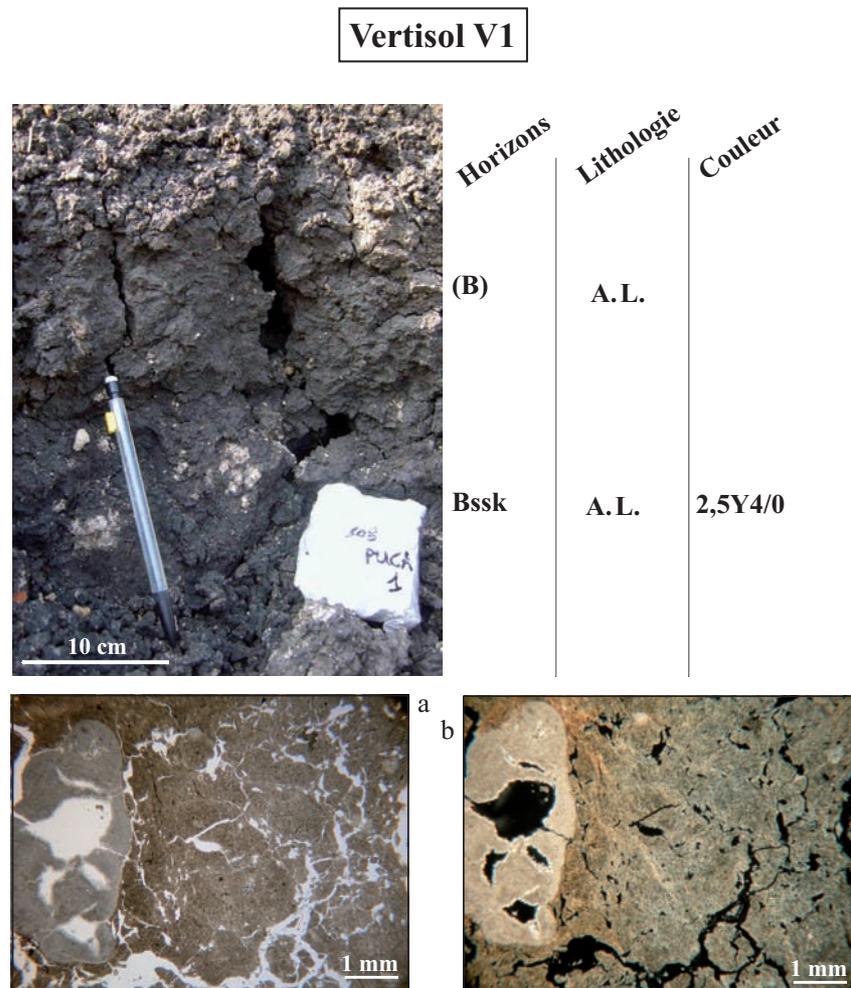
Le paléosol noir décrit à proximité de Ngebung dans les séries de Pucangan supérieur est composé d'argiles de type smectites, accompagnées de limons quartzeux (fig. 6). Plusieurs caractères pédologiques sont identifiés ; une structure prismatique ou colonnaire, des *slickensides* avec revêtements ferrugineux, des nodules carbonatés, une légère porosité polyconcave d'entassement, un assemblage (pédofabrique) réticulé. Les nodules carbonatés sont micritiques, avec parfois de la sparite fibro-

radiée. Ils possèdent souvent un vide central géodique ou septarique et leur forme varie entre nodules arrondis et manchons tubulaires verticaux (septaria ou rhizolithe). Ces traits sont classiquement rencontrés dans les vertisols calciques se développant sous des climats semi-arides à saisons très contrastées (Goudie, 1983 ; Wright & Tucker, 1991 ; Ahmad & Mermut, 1996).

De nombreux microdébris de matière organique et de charbons sont dispersés au sein de la matrice sédimentaire.

Pédotypes	Caractéristiques
V1	présence de traits carbonatés micritiques ou de sparite fibro-radiée, de forme sphérique ou tubulaire avec un vide central géodique ou septarique.
V2	matrice de teinte claire (gris, bleu ou vert) avec des concentrations de fer-manganèse, des taches de décoloration et d'éventuelles marmorisations ; présence de nodules micritiques ou de sparite fibro-radiée

**Tab. 3 : Caractéristiques des différents pédotypes de vertisols.**  
*Tab. 3: Characteristics of the vertisol pedotypes.*



**Fig. 6 : Pédotype V1.**

a) et b) photos prises au microscope d'un nodule micritique à vides septariques pris dans une matrice argileuse fine à b-fabrique réticulée et parfois grano-striée (autour des nodules). La différenciation et l'orientation des minéraux argileux de cette matrice sont liées au mouvement de gonflement et de dessiccation auxquels ont été exposés les vertisols noirs de Pucangan supérieur. Observation en LPNA & LPA ; de nombreux micro-débris végétaux (taille très fréquemment comprises entre 2 et 20 $\mu$ ) présents dans la matrice argileuse sont responsables de la coloration noire des sols. Lithologie : A=Argiles ; L=Limons ; S=Sables ; G=Graviers.

*Fig. 6: Pedotype V1: a) and b) microphotography of a micritic nodule with septaric voids inside a clayey matrix with a reticulated pedofabric and sometimes a grano-striated one (around nodules). The orientation of clay particles is linked to the shrinking and swelling movements affecting the black vertisols from Upper Pucangan. Observation under NL and XPL; the numerous vegetal microfragments (mean size between 2 and 20  $\mu$ m) in the clayey matrix are responsible for black colouring of soils. Lithology: A= Clay; L= Silts; S= Sands; G= Gravels.*

#### 4.3.2.4 - Sols peu évolués ; Type P (Protosols)

Ces sols sont présents dans les niveaux du sommet de Pucangan dans la région de Ngebung, dans les niveaux du Grenzbank et dans les niveaux volcano-fluviatiles de Kabuh.

Nous regroupons ici les sols dans lesquels le matériel parental est peu transformé ; il n'y a pas de structure macroscopique, de développement d'horizons pédologiques (horizonation), ni de pédofabrique continue. Des pédofabriques peuvent cependant être présentes ponctuellement.

Tous ces processus pédogénétiques peuvent être observés au sein des protosols mais ils sont mal exprimés, discontinus ou discrets. Plusieurs pédotypes (tab. 4) présentant un faible développement pédologique sont distingués à partir des caractères pédologiques frustes identifiés.

Les caractéristiques des protosols sont souvent liées à leur matériel parental. Ainsi, les protosols calciques sont souvent développés sur des sédiments carbonatés, les protosols vertiques et protosols hydromorphes sont observés sur des niveaux argileux riches en smectites, les protosols vitriques sur des cendres volcaniques en cours d'altération, et enfin les protosols argilliques sont rencontrés le plus souvent au sommet de séquences de sables fluviatiles.

##### Exemple du pédotype P1 (protosol calcique)

Dans le cas des protosols calciques à la base de la colline de Ngebung 2, les principaux traits pédologiques se manifestent par la redistribution et la concentration des carbonates de la matrice sédimentaire en revêtements calcitiques autour de chenaux racinaires (fig. 7). Des rhizolithes se forment alors, dont la taille varie de quelques centaines de microns à plusieurs centimètres de longueur. D'autres traits pédologiques sont également identifiés, comme des revêtements argileux ou d'oxydes, l'homogénéisation partielle de la matrice de sables fins composés de colluvions de pédosédiments, voire l'acquisition par endroits d'un début de pédofabrique réticulée.

Les rhizolithes sont répartis dans la masse au sein d'une séquence sédimentaire alluviale homogène de plusieurs mètres d'épaisseur. Cette séquence de protosols calciques s'est donc formée en parallèle à la sédimentation locale et pourrait correspondre à une série de sols cumuliques.

##### Interprétation

Ces paléosols correspondent aux premiers stades de pédogénèse sur les niveaux sédimentaires et sont très fréquents dans les niveaux du Grenzbank et de Kabuh. Le caractère fruste des modifications pédogénétiques peut être expliqué par deux hypothèses concurrentes :

- les horizons supérieurs mieux développés ont été érodés et il ne reste qu'un horizon B/C relictuel,
- la pédogénèse assez brève a été interrompue par la reprise d'une dynamique sédimentaire peu favorable au développement durable de la végétation.

#### 4.3.2.5 - Sols à accumulations d'argiles ; Type A (Argillisols)

Nous avons identifié ces paléosols dans les séries volcano-fluviatiles de Kabuh, souvent au sommet des séquences sablo-graveleuses à stratifications entrecroisées.

Les argillisols sont le plus souvent de teintes gris à brun clair et possèdent un horizon (B) à structure prismatique. Ces sols bien drainés sont marqués par d'importants transferts d'argiles s'accumulant dans l'horizon Bt où le matériel parental devient progressivement minoritaire au fur et à mesure du développement de l'argillisol. Ils possèdent des pédofabriques de type grano- et porostrié. La porosité racinaire, bien développée (chenaux, vésicules et cavités polyconcaves), se trouve fréquemment soulignée par des revêtements d'argiles et d'oxydes de fer. Ces sols présentent parfois des bioturbations tubulaires sub-verticales de plusieurs centimètres de diamètre, à remplissage argilo-sableux. Ces anciennes cavités pourraient correspondre à des chenaux racinaires de grandes dimensions. Plusieurs pédotypes sont distingués à partir des caractères secondaires (tab. 5). Le sédiment parental correspond fréquemment à un ancien niveau de sables fluviatiles et parfois à un niveau de tuf volcanique ou de bentonite. Ces sols sont donc souvent riches en minéraux volcaniques altérables.

##### Exemple du pédotype A1 (argillisol calcique)

Cet argillisol (fig. 8) localisé à proximité de Pucung est de couleur gris clair ; il est constitué de 4 horizons (B/Ct, Bmtk, Btk, Bst). Le matériel parental est un niveau sablo-graveleux fluviatile. À partir des horizons B, les grains de sable ne sont plus jointifs et sont dispersés dans la matrice argileuse. Aucun horizon supérieur (A) n'a pu être identifié, car probablement érodé lors d'un événement ultérieur. Bien que le principal critère pédologique soit une grande quantité de transfert argileux, nous remarquons que ce sol possède un horizon inférieur induré par les carbonates (Bmtk), de 10 cm d'épaisseur et d'extension latérale pluri-décamétrique. Il s'agit du seul exemple de calcrète, parfois appelé, suivant la *World Reference Base for Soil Resources* (FAO *et al.*, 1998), horizon pétrocalcique.

Ce banc calcique très développé implique une longue durée d'évolution. Le développement de ce type d'horizon indiquerait donc un paysage stable ou avec de très faibles taux de sédimentation (Goudie, 1973).

##### Interprétation

Ces sols ont des durées de développement très hétérogènes. Ainsi, certains sols à caractère vitrique contiennent encore des matériaux rapidement altérables (verres volcaniques) et correspondent à une courte durée de formation. D'autres contiennent un horizon pétrocalcique représentant une longue durée d'évolution.

Il s'agit toujours de sols bien drainés sur des levées, des terrasses ou en bordure de vallée, exceptionnellement soumis à l'inondation, mais jamais associés avec des caractères hydromorphes.

Pédotypes	Caractéristiques
P1	présence de traits carbonatés micritiques ou de sparite fibro-radiée, de forme sphérique ou tubulaire avec un vide central géodique ou septarique.
P2	présence de <i>slickensides</i> , traces de dessiccations; traits carbonatés micritiques ou de sparite fibro-radiée, de forme sphérique ou tubulaire avec un vide central géodique ou septarique;
P3	présence de traits carbonatés micritiques ou de sparite fibro-radiée, de forme sphérique ou tubulaire avec un vide central géodique ou septarique; concentrations de fer-manganèse et tâches de décoloration
P4	matrice de teinte claire (gris, bleu ou vert) avec des concentrations de fer-manganèse, des tâches de décoloration et d'éventuelles marmorisations; présence de nodules micritiques ou de sparite fibro-radiée
P5	présence d'intercalations et/ou de revêtements argileux de la porosité
P6	matrice de teinte claire (gris, bleu ou vert) avec des concentrations de fer-manganèse, des tâches de décoloration et d'éventuelles marmorisations; présence de <i>slickensides</i> , traces de dessiccations
P7	cendres volcaniques partiellement altérées; présence de traits carbonatés micritiques de forme tubulaire; revêtements argileux de la porosité
P8	cendres volcaniques partiellement altérées; revêtements argileux de la porosité

Tab. 4: Caractéristiques des différents pédotypes de protocols.

Tab. 4: Characteristics of the protocol pedotypes.

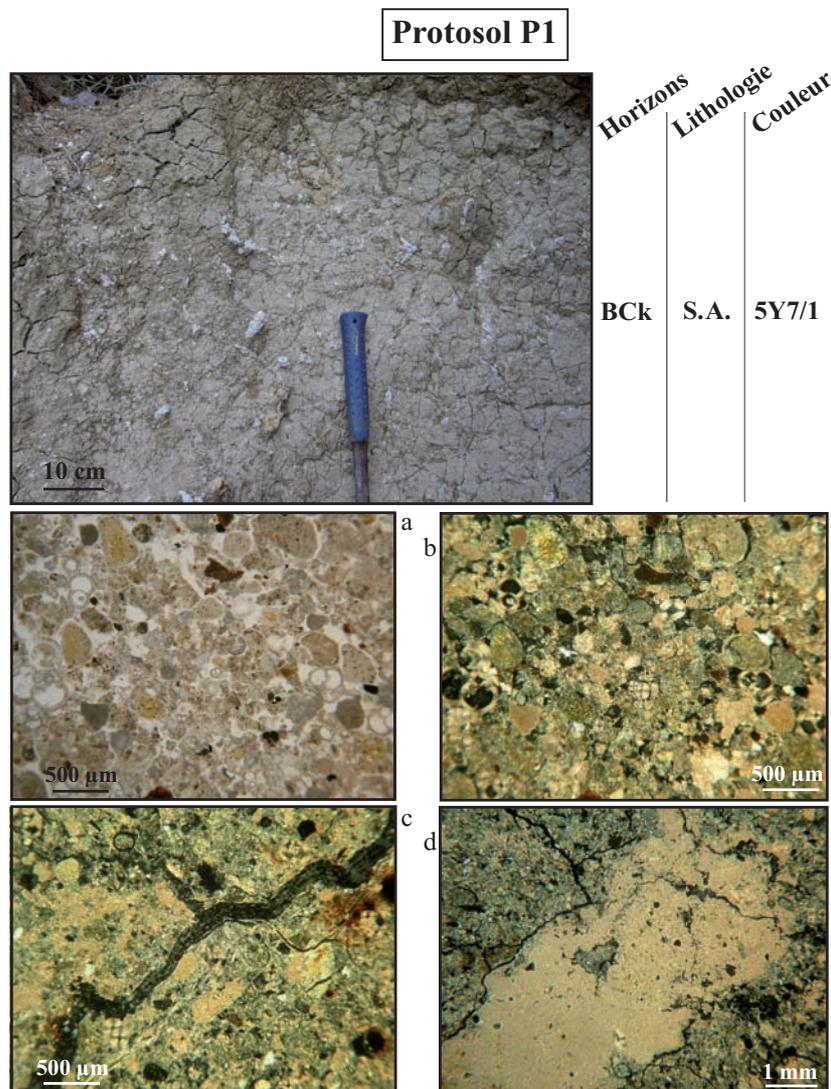


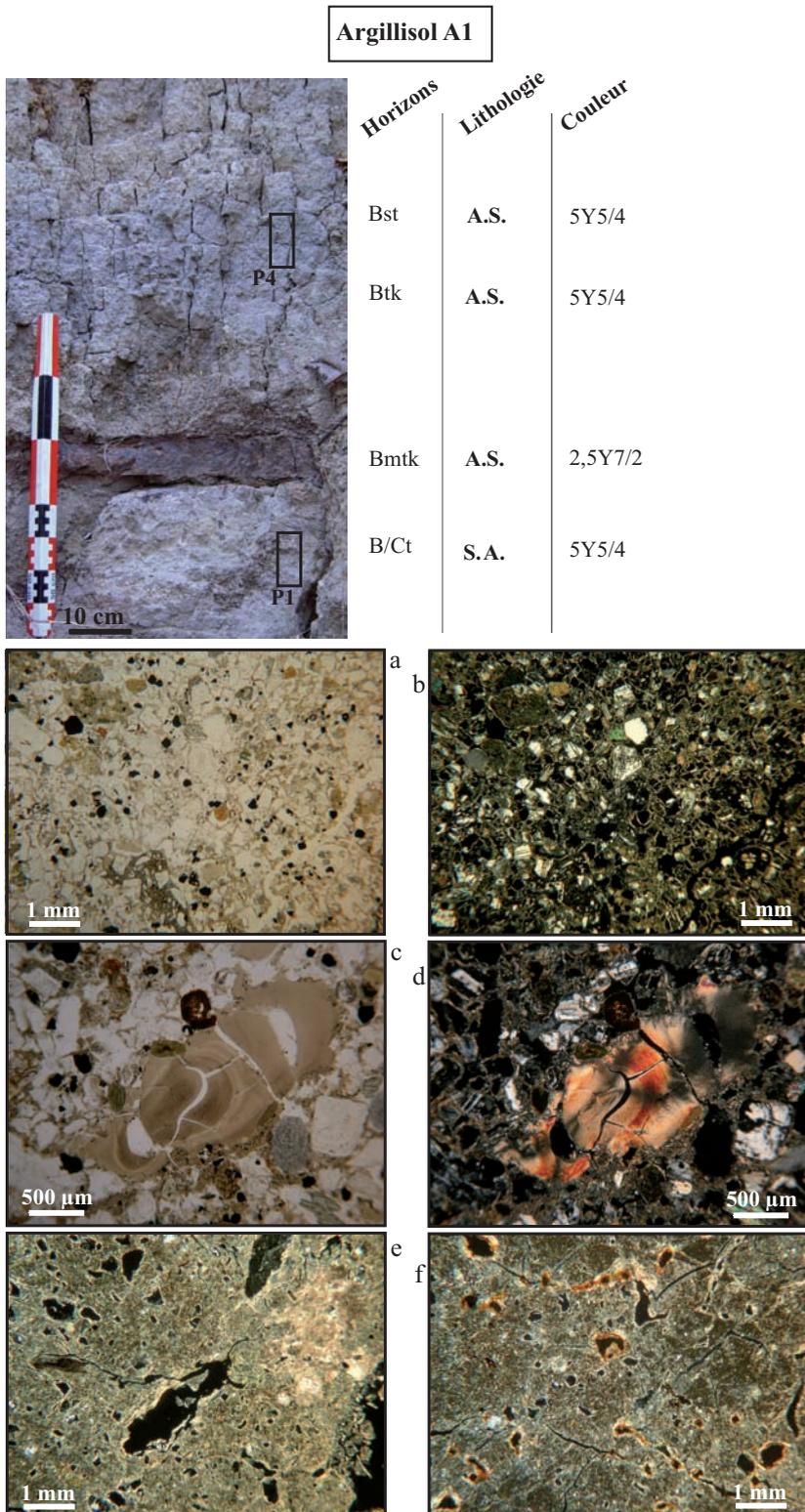
Fig. 7: Pédotype P1.

a) et b) le sédiment est composé de pseudo sables argilo-limoneux, de tests de foraminifères, de petit nodules micritiques et de rares quartz ou feldspaths (observation en LPNA & LPA); c) photo d'une zone ayant subi une transformation pédologique (observation en LPA). La plupart des pseudo-sables ont été homogénéisés dans une matrice argileuse et les foraminifères sont partiellement dissous. La matrice commence à acquérir une fabrique réticulée et des plages de micrite secondaire se forment; d) zone de formation d'un rhizolithe micritique (observation en LPA). Nous pouvons remarquer l'homogénéisation totale de la matrice sédimentaire initiale et la disparition des tests de foraminifères. L'activité pédologique se manifeste donc principalement par un transfert des carbonates depuis ces tests vers les rhizolithes. Lithologie: A=Argiles; L=Limons; S=Sables; G=Graviers.

Fig. 7: Pedotype P1: a) and b) the sediment is composed of muddy pseudo-sand grains, foraminifera tests, little micritic nodules and rare quartz or feldspar grains (NL and XPL view); c) pictures of an area showing a pedological evolution (XPL view). Most of the pseudo-sands (pedosediments) are homogenised in a clayey matrix and foraminifera tests are partly dissolved. The matrix begins to present a reticulated pedofabric and secondary micritic zones appear; d) formation of a micritic rhizolith (XPL view). We observe the complete homogenization of the initial sedimentary matrix and the disappearance of foraminifera tests. The pedogenesis is mostly marked by carbonate transfer from foraminifera tests to rhizoliths. Lithology: A= Clay; L= Silts; S= Sands; G= Gravels.

Pédotypes	Caractéristiques
A1	présence de traits carbonatés micritiques ou de sparite fibro-radiée, de forme sphérique ou tubulaire avec un vide central géodique ou septarique.
A2	traits carbonatés micritiques ou de sparite fibro-radiée, de forme sphérique ou tubulaire avec un vide central géodique ou septarique; présence de <i>slickensides</i> , traces de dessiccations
A3	niveaux de sables volcaniques peu altérés et/ou bentonites

Tab. 5: Caractéristiques des différents pédotypes d'argillisols.  
Tab. 5: Characteristics of the argillisol pedotypes.



**Fig. 8 : Pédotype A1.**

L'horizon inférieur B/Ct sans structure est situé sous un banc induré par les carbonates (Bmtk) et revêtu de fer-manganèse. Les horizons sus-jacents Btk et Bst sont à structure prismatique. Les lames minces (à droite; S06-P1, P2, P4) réalisées dans l'argillisol ont permis les observations suivantes: a) et b) une matrice sédimentaire de sable volcanique, à couronne de revêtements argileux (lame P1, observation en LPNA & LPA); c) un revêtement micro-laminé argilo-poussiéreux, de chenal ou biogalerie (lame P1, observation en LPNA); d) des teintes de biréfringence jaune orangé indiquent que le revêtement est composé principalement de smectites (lame P1, observation en LPA). L'extinction en croix de ce revêtement indique que les argiles sont bien orientées. Une bonne orientation des minéraux argileux nécessite une mise en place lente, en milieu calme (Bullock *et al.*, 1985). Il s'agit donc souvent de la partie profonde d'un sol; e) horizon Btk, composé d'une matrice argileuse à fabrique porostriée dans laquelle sont disséminés quelques sables volcaniques. Des revêtements argileux couvrent les parois des vésicules et des chenaux racinaires. Sur le bord droit de la photo, quelques nodules micritiques ou de sparite fibro-radiée sont distinguables dans la matrice (lame P4, observation en LPA); f) horizon Bst composé d'une matrice argileuse à fabrique porostriée dans laquelle « flottent » quelques sables volcaniques. Des revêtements argileux et ferrugineux juxtaposés couvrent les parois des vésicules et chenaux (lame P4, observation en LPA).

Fig. 8: Pedotype A1: the lower B/Ct horizon without structure is located under a carbonated hardground with Fe-Mn coatings. The overlying horizons Btk and Bst have a prismatic structure. The thin sections (right side; S06-P1, P2, P4) from this argillisol show the following features: a) and b) a sedimentary matrix of volcanic sands, with clay coating (P1 thin section, NL & XPL view); c) clay-dusty micro-laminated coating of channel biological tube galleries (P1 thin section, NL view); d) the yellow-orange birefringence colors indicate that smectites are the principal component (P1 thin section, XPL view). The black cross extinction of this coating reveals that the clay particles are well oriented. This kind of orientation requires a long lasting process in a quiet environment (Bullock *et al.*, 1985) usually in the deep horizons of a soil; e) Btk horizon, composed of a clayey matrix with porostriated fabric, in which we find scattered volcanic sand grains. Vesicles and channels are coated by clay. On the right side of the picture, several micritic or fasciculated sparitic nodules are noticed in the matrix (P4 thin section, XPL view); f) Bst horizon composed of a clayey matrix with porostriated fabric, with scattered volcanic sand grains. Juxtaposed clayey and ferruginous coatings are found on the vesicles and channels (P4 thin section, XPL view).

La formation de carbonates pédologiques au sein d'un matériel parental décarbonaté indique sans ambiguïté une longue saison sèche sous un climat aride à semi-aride. Dans ce cas, la végétation dominante devrait être une savane ouverte ou arborée. L'absence de traits calcitiques caractériserait plutôt des climats sub-humides et une végétation de type forêt de mousson ou savane semi-fermée.

Suivant la proportion d'argiles de type smectite atteinte, les conditions pédo-climatiques et l'évolution de la position topographique, ces sols pourront devenir des vertisols.

#### 4.3.2.6 - Sol rouge ferrugineux; Pédotype O1 (Oxisol vertique)

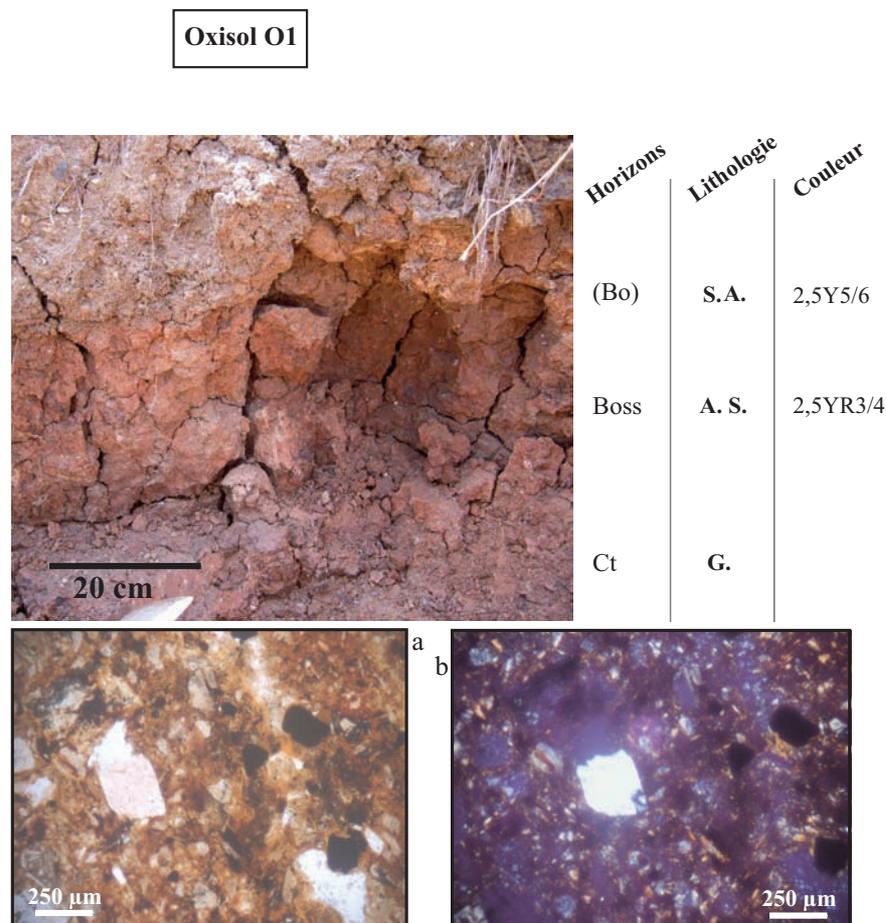
Un sol rouge à structure prismatique et petits *slickensides* a été identifié au sommet des séries de Kabuh dans la région de Ngebung, recouvert par les alluvions d'une terrasse récente (fig. 9).

La fraction grossière de ce sol argilo-sableux est composée de quartz, de cristobalite, de magnétite et d'hématite. Parmi les minéraux argileux, la kaolinite domine à 75 % tandis que les smectites largement minoritaires ne représentent que 25 % des minéraux argileux. Aucun

minéral altérable n'est donc présent au sein des horizons B tandis que l'horizon Ct se compose de sédiments volcano-fluviatiles grossiers dominés par du matériel andésitique.

Il pourrait s'agir d'un oxisol jeune développé sur un ancien vertisol car la rubéfaction, nécessitant un milieu bien drainé, est incompatible (en terme pédo-climatique) avec la vertisolisation (indiquée ici par la présence de petits *slickensides* et de smectites). Ce sol a donc été soumis à une seconde phase de pédogénèse avant le dépôt des alluvions de terrasses récentes qui le recouvrent. Il ne fait pas partie des séries de Kabuh, c'est pourquoi nous en proposons une description succincte.

Vertisols et oxisols diffèrent principalement dans la position topographique qu'ils occupent dans le paysage. En effet les vertisols se forment dans la partie basse de la plaine inondable tandis que les oxisols se développeront sur des pentes, des reliefs (terrasses, plateaux) où les conditions de drainage sont bonnes (Duchaufour, 2001). D'après la carte des sols proposée par le United States Department of Agriculture, les oxisols d'Indonésie sont surtout localisés sur les îles au climat peu humide à humide comme Sumatra, Bornéo et Célèbes (United



**Fig. 9: Pédotype O1.**

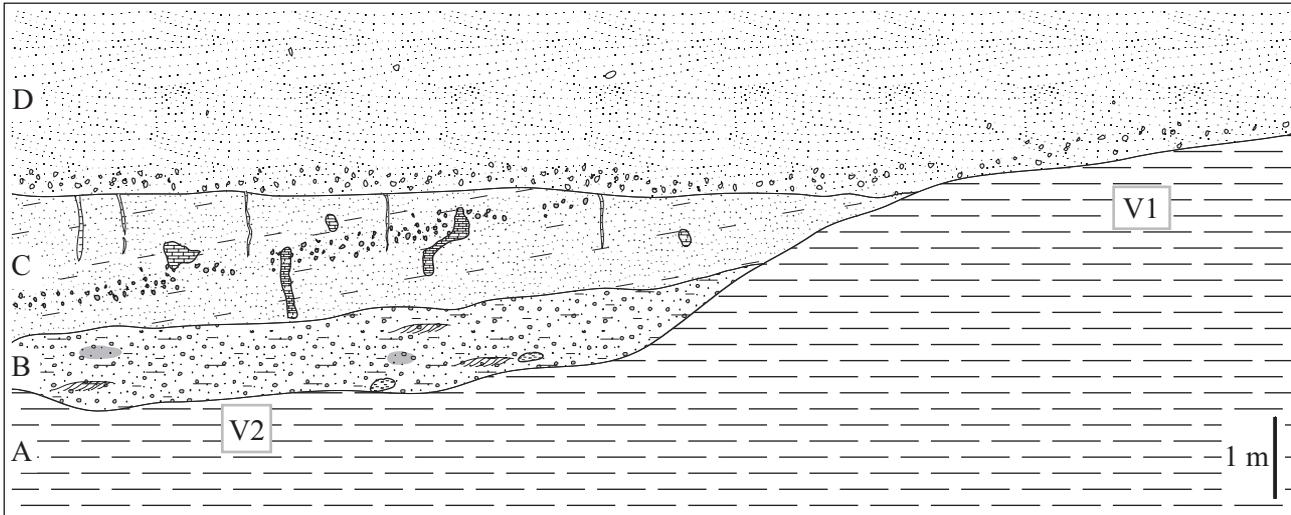
Photographie d'un oxisol vertique, situé près du sommet des séries sur la bordure sud de la colline Ngebung 2. Nous distinguons trois horizons; Ct, illuviations d'argiles ferrugineuses au sein du banc de graviers et galets inférieur; Boss, horizon oxydique à *slickensides*; Bo, horizon oxydique à structure colonnaire. a) et b) photos d'une lame minces réalisée dans l'horizon Bo. Nous y observons du quartz et des oxydes opaques (magnétite, hématite) dans une matrice argilo-limoneuse brune. Les minéraux volcaniques sont rares et très altérés. Observation en LPNA & LPA.

*Fig. 9: Pedotype O1: picture of a vertic oxisol located near the top of sedimentary series in the southern part of Ngebung 2 hill. Three horizons are noticed; Ct, with ferruginous clay illuviations in the lower a gravel and cobble bank; Boss, oxic horizon with slickensides; Bo, oxic horizon with columnar structure. a) and b) thin section photos realized inside Bo horizon. We observe quartz and opaque oxides (magnetite, hematite) in a brown silty-clayey matrix. The volcanic minerals are rare and strongly weathered. Observation under NL and XPL.*

States Department of Agriculture, 1998; Cecil *et al.*, 2003). Fauzi & Stoops (2004) décrivent également ce type de sol à l'extrémité ouest de l'île de Java, dont le climat est aussi tropical humide. Ce paléosol indiquerait donc des conditions plus humides et une saisonnalité moins marquée que ceux habituellement retrouvés dans les séries de Kabuh.

#### 4.4 - STRUCTURES PÉDOLOGIQUES PARTICULIÈRES (CATENA ET GIL-GAI)

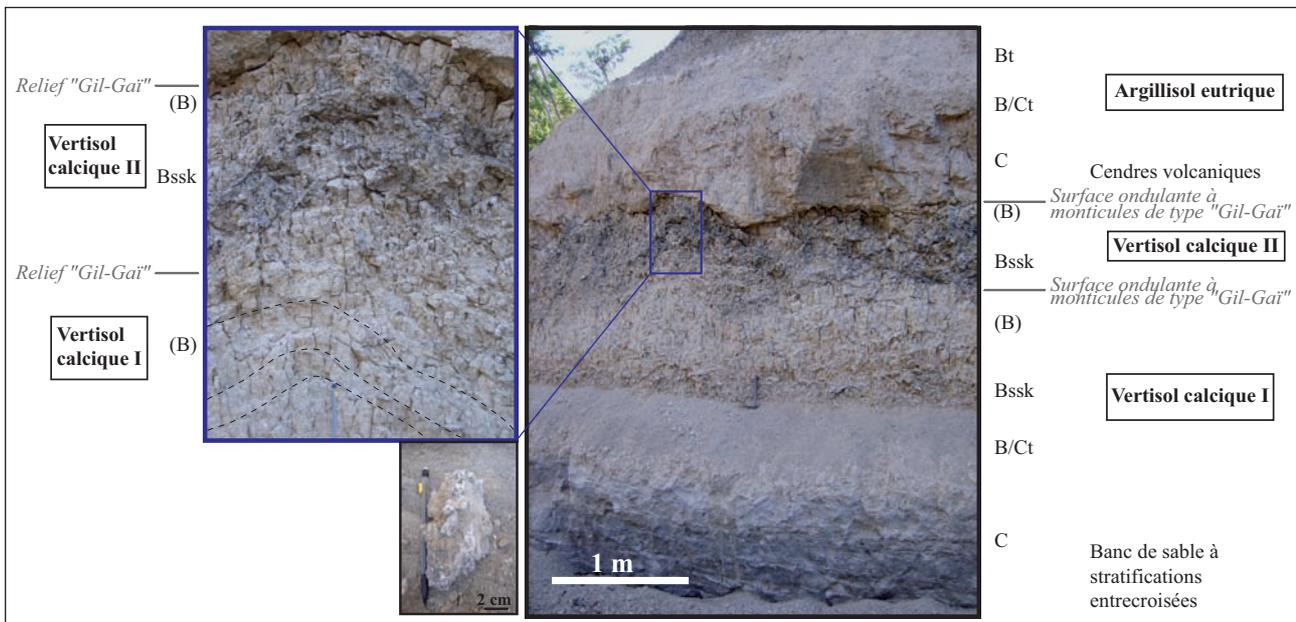
Une séquence latérale de vertisol calcique noir et de vertisol hydromorphe a été identifiée dans les niveaux du Grenzbank à proximité du village de Brangkal (fig. 10). Elle est indicatrice de différentes positions paléotopographiques vis-à-vis d'une nappe d'eau. Cette information est concordante avec les variations d'altitude observées



**Fig. 10 :** Profil d'une catena observée à la base des séries de Kabuh dans la région de Brangkal.

Le vertisol noir calcique (V1) se trouve à plus de 2 mètres au-dessus du vertisol hydromorphe (V2). Les niveaux B et C correspondent à un remplissage sédimentaire peu étendu où pédoreliques et sables volcaniques sont les principaux constituants. Enfin, le niveau D correspond aux séries volcano-fluviatiles classiques de Kabuh.

*Fig. 10: Catena section at the base of Kabuh series in the Brangkal region. The black calcic vertisol (V1) is localized more than 2 meters up to the hydromorphic vertisol (V2). The B & C levels correspond to the local sedimentary infilling where pedorelics and volcanic sands are the main components. The first classic fluvio-volcanic layers of Kabuh correspond to the D level.*



**Fig. 11 :** Séquence de paléosols (deux vertisols calciques et un argillisol eutrique) visibles au niveau du village de Bapang.

Cette figure présente deux surfaces ondulantes correspondant à des paléo-reliefs en « Gil-Gai » associés à la partie supérieure des vertisols calciques. Ces parties supérieures (B) sont à structure prismatique. La vue détaillée sur la photo de gauche permet d'observer les niveaux plissés (plusieurs soulignés en pointillés) au niveau d'un des monticules. Les *slickensides* sont localisées dans les horizons Bssk à revêtements de carbonates et de manganèse, ce qui leur donne une couleur gris sombre. L'un de ces revêtements est présenté sur la photo en bas à gauche.

*Fig. 11: Palaeosoil sequence (two calcic vertisols and one eutric argillisol) were described in Bapang village. The undulating surfaces correspond to « Gil-Gai » paleo-reliefs associated with the upper part of the calcic vertisols. These upper parts (B) have a prismatic structure. The detailed view on the left picture shows undulating structures (highlighted by dashes) at the top of a mound. The slickensides are located in the Bssk horizons with calcitic and manganese coatings, which result in the dark grey colour. One of the coatings is presented on lower left picture.*

lors de nos relevés car le vertisol noir sans caractères hydromorphes est en position haute. Cette toposéquence de paléosols correspond donc à une catena mettant en évidence une paléotopographie.

Dans quelques cas exceptionnels nous avons pu observer des reliefs en *Gil-Gai* (fig. 11), qui correspondent à d'anciennes morphologies de surfaces ondulantes (avec monticules et creux). Ces déformations uniquement visibles sur certains profils de vertisols sont issues des mécanismes de pédoturbations saisonnières. Ces vertisols possédant des *Gil-Gai* sont souvent à caractère calcique. Ils se forment sous un climat semi-aride à forte saisonnalité et végétation de type savane arborée ou savane ouverte.

## 5 - INTERPRÉTATION DES SÉQUENCES DE PÉDOTYPES

### 5.1. PALÉOTOPOGRAPHIE

#### 5.1.1 - Séries de Pucangan

Les histosols gypsiques de Pucangan moyen sont inclus dans des séquences de dépôts palustres marécageux connectés épisodiquement au milieu marin. Ces séquences sédimentaires ont été retrouvées en des points distants de plus d'un kilomètre. La faible variation latérale des séquences de faciès sédimentaires indique donc que les marécages de l'époque étaient vastes dans un paysage avec peu de reliefs.

A partir de Pucangan supérieur se mettent en place les premiers sols non hydromorphes (vertisols calciques), qui alternent avec des sols influencés par la nappe phréatique ou noyés de type gleysols et histosols. Ces séquences de sols sont sensiblement différentes et difficiles à corréliser entre les différentes zones géographiques du dôme, traduisant une complexité grandissante dans la topographie du paysage.

#### 5.1.2 - Grenzbank de la région de Ngebung

Les séries du Grenzbank dans la partie nord-ouest du dôme sont constituées de sols hydromorphes, de vertisols ainsi que de nombreux protosols. Ces derniers indiquent des vitesses de sédimentation importantes ou au moins des pulsations dans les rythmes sédimentaires. De fortes variations latérales des faciès sédimentaires, ainsi que la présence de catenas indiquent pour ces niveaux une paléotopographie complexe.

#### 5.1.3 - Séries de Kabuh

Les nombreux argillisols présents dans la plaine alluviale de Kabuh indiquent que les cours d'eau sont plus encaissés et la plaine est mieux drainée que dans les séries précédentes. Les protosols et sols vitriques abondants vers le sommet des séries caractérisent une augmentation des taux de sédimentation en lien avec l'activité volcanique locale. Les données pédo-sédimentaires indiquent une sédimentation rythmée par les épisodes volcaniques.

## 5.2 - INTERPRÉTATIONS PALÉOENVIRONNEMENTALES ET PALÉOCLIMATIQUES

Parmi l'ensemble des paléosols décrits, les vertisols (non hydromorphes), argillisols et oxisols ont le signal paléoclimatique le plus fiable (tab. 6). En effet, ils ne sont pas influencés par des paramètres locaux tels que les effets de nappes associés aux zones topographiques basses. Dans le cas des protosols, le faible degré d'évolution implique une forte influence du matériel parental sur les premiers traits pédologiques qui se développent. Le contrôle micromorphologique est alors indispensable pour réaliser une interprétation fiable des conditions paléoenvironnementales.

### 5.2.1 - Séries de Pucangan

Les histosols calciques gypsiques de Pucangan moyen se sont développés en milieu aquatique réducteur comme l'attestent la présence de pyrite et les faunes observées. Cette zone marécageuse devait être située dans un paysage calcaire, en raison de l'abondance des carbonates et à proximité du littoral comme l'atteste la présence de gypse, celle de sulfures et les malacofaunes euryhalines retrouvées. D'une manière générale, les tourbes de Pucangan sont caractéristiques de zones palustres à faible couvert végétal (typiquement de marécages à couvert de phragmites, joncs, rousseroles et autres herbacées des marécages de type Cyperaceae). Les résultats des études palynologiques (Sémah, 1986; Tokunaga *et al.*, 1985) indiquent la présence de graminées et de roseaux (*Typha*) dans ces niveaux, ce qui tend à conforter l'image d'une végétation marécageuse, avec néanmoins le développement, sur les reliefs avoisinants, d'une forêt tropicale humide.

Dans la région de Ngebung, les paléosols des niveaux de Pucangan supérieur correspondent majoritairement à des vertisols calciques contenant sur l'ensemble de leur profil des débris végétaux et organiques. Cette caractéristique implique que les vertisols observés sont cumuliques. En effet, seul l'apport constant de sédiments enterrant les horizons supérieurs organiques peut expliquer une répartition aussi homogène des fragments végétaux.

Dans la partie est du dôme, au nord de Bapang, ces paléosols alternent avec des gleysols, des niveaux sableux de colluvions de pédosédiments à foraminifères et des horizons d'histosols calciques. Ces argiles riches en matière organique sont, d'après les cortèges de mollusques, d'origine lacustre ou marécageuse. Les gleysols étudiés indiquent des milieux herbacés humides, certainement en bordure de lac ou de marécage. Les niveaux tourbeux ou portant les caractéristiques hydromorphes contiennent du pollen de Poaceae, de Cyperaceae, de roseaux (*Typha*), de taxons de la forêt pluviale (*rain forest*) et plus rarement de mangrove, ainsi que des spores de fougères. Ces résultats concordent donc avec les données livrées par l'étude des paléosols. La présence de quelques rares grains de pollen de mangrove découverts associés aux gleysols pourrait correspondre à des apports liés au littoral assez proche (par exemple durant une phase transgressive).

Pédotypes	Classification	Contexte paléoenvironnemental
H1	Histosol calcique	Marécages d'eau douce et zone péri-lacustre à couverts de joncs, fougères, buissons et arbres tolérants à l'eau
H2	Histosol calcique gypsique	Marécages côtiers couverts de phragmites, joncs, rousseroles et <i>Cyperaceae</i>
G1	Gleysol ferritique vertique calcique	Prairies humides en bordure de lac, de rivière ou de marécage à couverts de fougères, herbacées des milieux humides, inondées durant la saison humide et sujettes à la dessiccation dans leur partie superficielle lors de la saison sèche.
G2	Gleysol vertique calcique	Prairies humides en bordure de rivière à couverts de fougères, herbacées des milieux humides, inondées durant la saison humide et sujettes à la dessiccation dans leur partie superficielle lors de la saison sèche.
G3	Gleysol vertique	Forêt galerie et prairies humides en bordure de rivière, inondées durant la saison humide et sujettes à la dessiccation dans leur partie superficielle lors d'une courte période sèche.
V1	Vertisol calcique	Sols de plaine stable sous couvert végétal de savanes ouvertes, buissonnantes; associé à un climat semi-aride à saisons très contrastées,
V2	Vertisol hydromorphe calcique	Sol en position topographique basse, à ennoisement temporaire sous un climat saisonnier, à proximité d'une source d'eau; couverts d'herbacées des zones humides, d'arbres et arbustes.
P1	Protosol calcique	Sol jeune de plaine d'inondation à sédimentation active épisodique, couvert d'herbacées, arbres et buissons, sous un climat semi-aride (si le substrat est non carbonaté).
P2	Protosol vertique calcique	Sol jeune dans une zone à sédimentation active épisodique, sous un climat saisonnier (mousson) à saison sèche longue (si le substrat est non carbonaté), couvert d'herbacées, arbres et buissons.
P3	Protosol calcique hydromorphe	Sol jeune dans une dépression d'une plaine d'inondation mal drainée, à sédimentation active épisodique, sous un climat saisonnier (mousson) à saison sèche longue (si le substrat est non carbonaté)
P4	Protosol argillique calcique	Sol jeune couvert d'arbres, dans une zone de sédimentation active épisodique en position topographique haute dans la plaine alluviale (levée) par rapport aux nappes phréatiques, sous un climat soumis à une certaine aridité (si le substrat est non carbonaté)
P5	Protosol argillique	Sol jeune couvert d'arbres, dans une zone de sédimentation active épisodique en position topographique haute dans la plaine alluviale (levée) par rapport aux nappes phréatiques
P6	Protosol hydromorphe vertique	Sol jeune dans une dépression d'une plaine inondable à sédimentation active épisodique, sur matériel vertique soumis à des contrastes saisonniers
P7	Protosol vitrique calcique, argillique	Sol jeune couvert d'arbres et arbustes sous un climat semi-aride; au développement contemporain d'une période volcanique active, dans une zone de sédimentation épisodique et en position topographique haute par rapport aux nappes phréatiques
P8	Protosol vitrique argillique vertique	Sol jeune sur bentonites, couvert d'arbres sous un climat saisonnier; dans une zone de sédimentation active et en position topographique haute par rapport aux nappes phréatiques
A1	Argillisol calcique	Sol en position topographique haute dans une plaine alluviale stable, sous couvert de savane ouverte et climat semi-aride
A2	Argillisol calcique vertique	Sol en position topographique haute dans une plaine alluviale stable, sous couvert de savane ouverte et sous un climat semi-aride à forte saisonnalité
A3	Argillisol eutrique	Sol en position topographique haute dans la plaine alluviale, sur matériel volcanique peu altéré avec couvert forestier et climat sub-humide
O1	Oxisol vertique	Sol bien drainé en position topographique haute, sous couvert forestier dense et climat humide à sub-humide à saison sèche courte

Tab. 6 : Contextes paléoenvironnementaux associées aux pédotypes décrits.

Tab. 6: Palaeoenvironmental contexts associated to the described pedotypes.

Les vertisols calciques alternant avec ces niveaux hydromorphes se développent typiquement sous une végétation de savane ouverte associée à un climat saisonnier, semi-aride. Les études palynologiques (Tokunaga *et al.*, 1985; Sémah, 1986) menées sur des niveaux s'appa-

rentant aux vertisols calciques indiquent des assemblages où les Poaceae sont très dominantes, avec quelques arbres et fougères. Ce paysage ouvert peut être lié à un assèchement des conditions climatiques et/ou à une destruction répétitive de la végétation par le volcanisme. Néanmoins

l'absence de tufs ou de minéraux volcaniques dans ces sols nous conduit à privilégier l'hypothèse d'une longue période sèche favorisant les incendies.

### 5.2.2 - Grenzbank de la région de Ngebung

Plusieurs ambiances pédoclimatiques, parfois contradictoires, sont exprimées parmi les paléosols recensés, tels que des vertisols calciques (pédoclimat saisonnier semi-aride) et des gleysols vertiques (pédoclimat saisonnier humide). Ces paléosols constituent parfois des catenas comme à Brangkal et les ambiances pédoclimatiques qu'ils reflètent sont donc conditionnées par la paléotopographie de l'époque. Ainsi les sols humides à proximité des cours d'eau peuvent laisser place, à distance du lit de ces derniers, à des sols à ambiance pédoclimatique plus sèche.

D'après l'étude des paléosols et matériaux pédosédimentaires, les séries du Grenzbank se sont mises en place sous un climat semi-aride à sub-humide, avec un couvert végétal de type savane ouverte. Les cours d'eau peu encaissés débordent fréquemment dans une plaine inondable où vertisols et gleysols forment des catenas. Ces sols possèdent une faible capacité de drainage et sont couramment érodés, ce qui explique l'absence régulière d'un horizon A différencié. D'après les études palynologiques, la végétation était dominée par des graminées ou par des fougères suivant les types de sols, plus accessoirement quelques Cyperaceae sont également signalées (Tokunaga *et al.*, 1985; Sémah, 1986).

### 5.2.3 - Séries de Kabuh

Les séries volcano-fluviatiles de Kabuh contiennent peu de gleysols. Contrairement aux séries du Grenzbank de Ngebung, la plaine inondable semble beaucoup mieux drainée. Ces séries de Kabuh disposent de nombreux argillisols. Suivant la «Soil Taxonomy», les sols actuels équivalents sont des alfisols, des sols couverts habituellement dans ces régions par des forêts de mousson ou des savanes arborées. Ils sont présents en Indonésie sur les îles de Java (partie centrale et est), Célèbes, Timor, Sumba, Sumbawa, et dans l'est de Bornéo, et sont donc plutôt associés à des zones sub-humides à semi-arides (United States Department of Agriculture, 1998; Cecil *et al.*, 2003).

Leur caractère souvent calcique est par contre plutôt indicateur d'environnements secs avec un couvert végétal de type savane arborée. Il n'existe pas de cartes de répartition suffisamment précises pour localiser ce type d'argillisol parmi les îles précitées. Mais seuls les sols des îles au climat suffisamment aride permettront la formation des nodules carbonatés. En effet, ces nodules nécessitent un climat caractérisé par une évapotranspiration bien supérieure aux précipitations annuelles. Les vertisols recensés sont souvent à caractère calcique et certains possèdent des *Gil-Gai*. A titre d'exemple, nous les trouvons aujourd'hui en Indonésie sur l'île de Sumba (Dames, 1955) où les précipitations, particulièrement faibles, peuvent descendre jusqu'à 500 mm par an.

Suivant les données fauniques (Sondaar, 1984; Aimi & Aziz, 1985; de Vos *et al.*, 1994; Bouteaux *et al.*, 2007) et les données palynologiques (Tokunaga *et al.*, 1985; Sémah & Sémah, 2001) l'unité de Kabuh correspondrait à un paysage ouvert (plus de pollen d'herbacées que de pollen d'arbres) à proximité de cours d'eau. Ces résultats sont donc en accord avec notre interprétation des paléosols.

### 5.2.4 - Comparaisons avec les études antérieures

Les paléosols identifiés précédemment dans les séries sédimentaires à Bapang (Bettis III *et al.*, 2009) indiqueraient un climat à forte saisonnalité avec une saison sèche durant plusieurs mois successifs. Des analyses ont également été réalisées sur les isotopes stables de l'oxygène et du carbone ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) de rhizolithes carbonatés des séries de Pucangan et Kabuh. Ces dernières confirment les indices d'aridité portés par les types de paléosols en indiquant un couvert végétal de type savane où domine la strate herbacée (plantes en C4) sur le couvert arboré (plantes en C3).

Nos données, collectées sur un grand nombre de sites dans le dôme, concordent globalement avec les résultats proposés. Néanmoins, plusieurs éléments complémentaires ou divergents sont à souligner.

Tout d'abord, nous proposons une série d'alternances entre vertisols calciques et gleysols ou histosols dans la partie supérieure de Pucangan. Ces variations reflètent plusieurs changements environnementaux et climatiques successifs.

Nous ne trouvons aucun histosol à l'interface Pucangan/Kabuh à Bapang. Les lames réalisées à cet endroit indiquent un gleysol couvert par des lentilles finement litées de végétaux carbonisés, sans indice d'activité pédologique, et parfois intercalées dans les bancs de graviers à la base de Kabuh.

Les analyses isotopiques réalisées sur les rhizolithes présents dans les niveaux de Pucangan supérieur et du Grenzbank doivent être considérées avec prudence. En effet, les carbonates sont déjà présents dans la matrice sédimentaire, que ce soit par l'intermédiaire de nombreux tests de foraminifères remaniés ou d'autres apports détritiques. Dans ce cas, la redistribution des carbonates au sein du profil de paléosol entraîne un héritage isotopique anormal des rhizolithes en raison des valeurs particulières associées aux tests de foraminifères fossiles. Ce type d'héritage isotopique rend toute interprétation hasardeuse (Sikes & Ashley, 2007).

La séquence observée à Bapang est particulière à ce site et n'est pas corrélable avec d'autres. Nous attirons donc l'attention sur cette variabilité de faciès dont découle la grande difficulté à tirer des tendances évolutives et des corrélations à l'échelle du dôme. Ceci met en avant l'intérêt de l'observation et de la comparaison de nombreux paléosols sur des sites géographiquement distants pour une même formation lithostratigraphique.

Enfin l'oxisol identifié sous les terrasses récentes de la colline de Ngebung 2 s'est mis en place sur une pente ou un relief (terrasse, plateau) et sous des conditions d'altération typiques de climats per humide à humide. Ce paléosol, typique de la forêt pluviale (*rain forest*), indique donc des conditions plus humides et une saisonnalité moins marquée (saison sèche courte) que lors du dépôt de la séquence de Kabuh, et il serait donc intéressant de préciser sa position stratigraphique par rapport aux séries de Notopuro.

## 6 - CONCLUSIONS SUR L'ENVIRONNEMENT DES *HOMO ERECTUS* DE JAVA DURANT LE PLÉISTOCÈNE INFÉRIEUR ET MOYEN ANCIEN

A l'image de l'histoire paléoenvironnementale du site de Sangiran, il existe une grande diversité dans les paléosols décrits. La synthèse des données pédoclimatiques, combinée aux résultats de la palynologie apporte de nombreuses informations sur les paysages dans lesquels ont vécu les premiers hommes en Asie du Sud-Est insulaire.

L'arrivée de l'Homme sur la bordure sud du plateau de la Sonde pourrait être contemporaine de celle de la faune de Satir (Swisher *et al.*, 1994; Sémah *et al.*, 2000; Huffman, 2001), de peu postérieure à la fin de l'épisode d'Olduvai (1,67 Ma; Sémah, 1984), et a été suivie par d'autres phases de colonisation. A l'échelle régionale, l'ouverture du paysage mise en évidence dans des séries du Pléistocène supérieur et moyen par les études palynologiques et géomorphologiques (Verstappen, 1975, 1980; Morley, 1982; Caratini & Tissot, 1988; Thorp *et al.*, 1990; Heaney, 1991; Sémah & Sémah, 2001), est attribuée à un assèchement du climat contemporain des épisodes glaciaires observés sous les hautes latitudes (Nanson *et al.*, 1992; Tungsheng & Zhongli, 1998). Les conditions environnementales et les processus pédo-sédimentaires étaient donc très probablement, lors des stades glaciaires et des bas niveaux marins (Verstappen, 1975; Caratini & Tissot, 1988; Thorp *et al.*, 1990), liés à la mise en place d'un corridor de faibles précipitations, traversant la partie centrale du plateau de la Sonde (Verstappen, 1975; Caratini & Tissot, 1988; Thorp *et al.*, 1990; Heaney, 1991).

Les traces les plus visibles de l'évolution pédologique des reliefs sont à l'évidence celles des sols formés sous un climat à saisonnalité contrastée, voire durant des épisodes secs à arides. La fréquence de tels événements, telle qu'elle apparaît à l'issue des premières études sur les séries de Kabuh (Bettis III *et al.*, 2009; Brasseur, 2009) ou du Grenzbank et de Pucangan (Brasseur, 2009), confirme des tendances climatiques décrites sur des couches similaires par d'autres méthodes (i.e. palynologie, voir par exemple Sémah, 1982a; Sémah, 1986).

D'autres interprétations paléoenvironnementales sont inédites. Ainsi, les premiers sols terrestres francs à la base de Pucangan supérieur révèlent un paysage de plaine à

végétation ouverte sous un climat à saisonnalité marquée. Depuis les premières couches de Pucangan supérieur jusqu'au sommet de Kabuh, de nombreux indices témoignent d'un climat aux précipitations fortement saisonnières rythmées par les cycles de mousson (Ravelo *et al.*, 2004; McClymont & Rosell-Melé, 2005). Ce climat a induit des épisodes érosifs torrentiels, la formation de vertisols, des caractères vertiques d'autres sols, de nodules polyphasés et d'illuviations argileuses microlaminées ainsi que la production majoritaire de smectites.

Les variations paléoclimatiques ont été particulièrement influentes sur les cycles de faciès pédo-sédimentaires de Pucangan supérieur, qui témoignent d'un climat semi-aride à saisons très contrastées alternant avec des épisodes humides marqués par le développement d'étendues lacustres à proximité d'un littoral à mangroves (Tokunaga *et al.*, 1985).

A Ngebung, les indices récurrents d'aridité à partir du Grenzbank et des niveaux de Kabuh inférieur ne semblent s'interrompre qu'avec le développement d'un oxisol (indicateur de conditions humide à peu humide) sous les terrasses récentes.

Des recherches ultérieures devront permettre de préciser cette fréquence de l'ouverture du paysage tant en termes de chronologie absolue (notamment par une datation plus précise des niveaux volcaniques tufacés et/ou cendreux qui encadrent les séquences de paléosols) que de durée de formation des sols. Elles devront aussi tenter de caractériser, dans les séries du Grenzbank et de Kabuh, la trace des sols qui se sont formés durant les périodes plus humides.

L'ensemble des sols caractérisés dans les séries à hominidés constituent autant de surfaces que les *Homo erectus* de Java ont pu occuper. Les contextes pédo-sédimentaires établis lors de ce travail doivent donc être utilisés afin de décrire les lieux de vie choisis par l'homme dans un paysage souvent en mosaïque. Cette étude des pédo-faciès reste à compléter et à enrichir de nouvelles données entre les différentes régions du dôme afin de rendre compte de toute la complexité de ce cadre paléoenvironnemental et de son évolution spatiale au cours du Pléistocène inférieur et moyen.

## REMERCIEMENTS

Les missions de terrain ont été financées par le Ministère des Affaires Etrangères tandis que les analyses ont été réalisées aux départements de Préhistoire et d'Histoire de la Terre du Muséum national d'Histoire naturelle ainsi qu'au Centre Européen de Recherches Préhistoriques de Tautavel. Nous remercions Marie-Madeleine Blanc-Valleron, Marie-Agnès Courty, Nicolas Fedoroff pour leur aide à l'analyse des données, et Florent Déroit et Matthieu Lebon pour leurs conseils apportés lors de la relecture. Les auteurs remercient enfin Pierre Antoine et Pascal Bertran qui ont accepté de rapporter sur cet article et ont ainsi contribué à son amélioration.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHMAD N., & MERMUT A., 1996 - *Vertisols and Technologies for their management*. Elsevier, Amsterdam & Oxford, 363 p.
- AIMI M., & AZIZ F., 1985 - Vertebrate fossils from the Sangiran dome, Modjokerto, Trinil and Sambungmacan areas. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, 4, 155-197.
- AQRAWI A.A.M., & EVANS G., 1994 - Sedimentation in the lakes and marshes (Ahwar) of the Tigris-Euphrates Delta, southern Mesopotamia. *Sedimentology*, 41 (4), 755-776.
- BARTSTRA G.-J., 1985 - Sangiran, the stone implements of Ngebung and the Palaeolithic of Java. *Modern Quaternary Research in Southeast Asia*, 9, 99-113.
- BERTHOMMIER P.C., 1990 - *Etude volcanologique du Merapi (Centre-Java)*. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 223 p.
- BETTIS III E.A., ZAIMY., LARICK R., CIOCHON R.L., SUMITO, RIZAL Y., REAGAN M., & HEIZLER M., 2004 - Landscape development preceding *Homo erectus* immigration into Central Java, Indonesia: the Sangiran Formation Lower Lahar. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 206 (1/2), 115-131.
- BETTIS III E.A., MILIUS A.K., CARPENTER S.J., LARICK R., ZAIM Y., RIZAL Y., CIOCHON R.L., TASSIER-SURINE S.A., MURRAY D., SUMINTO, & BRONTO S., 2009 - Way out of Africa: Early Pleistocene paleoenvironments inhabited by *Homo erectus* in Sangiran, Java. *Journal of Human Evolution*, 56 (1), 11-24.
- BOUMA J., 1983 - Hydrology and soil genesis of soils with aquatic moisture regimes. In L.P. Smeck & G.F. Hall (ed.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy*. Elsevier, Amsterdam, 253-281.
- BOUTEAUX A., MOIGNE A.-M., SÉMAH F., & JACOB T., 2007 - Les assemblages fauniques associés aux sites à *Homo erectus* du dôme de Sangiran (Pléistocène moyen, Java, Indonésie). *Comptes Rendus Palevol*, 6 (3), 169-179.
- BRASSEUR B., 2009 - *Dynamique et histoire des dépôts du Pléistocène inférieur et moyen ancien dans le dôme de Sangiran (Java central, Indonésie)*. Thèse de Doctorat, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 360 p.
- BUKRY D., 1971 - Discoaster evolutionary trends. *Micropaleontology*, 17 (1), 43-53.
- BULLOCK P., FEDOROFF N., JONGERIUS A., STOOPS G., & TURSINA T., 1985 - *Handbook for soil thin section description*. WAINE Research Publications, Abrighton & Wolverhampton, 151 p.
- CARATINI C., & TISSOT C., 1988 - Paleogeographical evolution of the Mahakam delta in Kalimantan, Indonesia during the Quaternary and late Pliocene. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 55 (1/3), 217-228.
- CASAGRANDE D.J., SIEFERT K., BERSCHINSKI C., & SUTTON N., 1977 - Sulfur in peat forming systems of the Okefenokee Swamp and Florida Everglades: origin of sulfur in coal. *Geochemica and Cosmochimica Acta*, 41 (1), 161-167.
- CECIL C.B., DULONG F.T., HARRIS R.A., COBB J.C., GLUSKOTER H.G., & NUGROHO H., 2003 - Observations on climate and sediment discharge in selected tropical rivers, Indonesia. *Society for Sedimentary Geology Special Publication*, 77, 29-50.
- COHEN A.D., SPACKMAN W., & DOLSEN P., 1984 - Occurrence and distribution of sulfur in peat-forming environments of southern Florida. *International Journal of Coal Geology*, 4 (1), 73-96.
- DAMES T.W.G., 1955 - *The soil of East Central Java; with a soil map 1:250,000*. Balai Besar Penyelidikan Pertanian, Bogor, 155 p.
- DAVIES T.D., & COHEN A.D., 1989 - Composition and significance of the peat deposits of Florida bay. *Bulletin of Marine Science*, 44 (1), 387-398.
- DE TERRA H., 1943 - Pleistocene Geology on early man in Java. *Transactions of the American Philosophical Society*, 32, 437-466.
- DE VOS J., SARTONO S., HARDJA-SASMITA S., & SONDAAR P.Y., 1982 - The fauna from Trinil, type locality of *Homo erectus*; a reinterpretation. *Geologie en Mijnbouw*, 61, 207-216.
- DE VOS J., SONDAAR P.Y., VAN DEN BERGH G.D., & AZIZ F., 1994 - The *Homo* bearing deposits of Java and its ecological context. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 171, 129-140.
- DJUBIANTONO T., 1992 - *Les derniers dépôts marins de la dépression de Solo (Java Central, Indonésie) - Stratigraphie et paléogéographie*. Thèse de Doctorat, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 220 p.
- DUCHAFOUR P., 2001 - *Introduction à la science du sol* (6<sup>e</sup> éd.). Dunod, Paris, 331 p.
- FANNING D.S., & FANNING M.C.B., 1989 - *Soil: Morphology, Genesis, and Classification*. John Wiley and Sons, New York, 395 p.
- FAO, ISRIC, & ISSS, 1998 - World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resources Reports*, 84, 1-90.
- FAUZI A.I., & STOOPS G., 2004 - Reconstruction of a toposequence on volcanic material in the Honje Mountains, Ujung Kulon Peninsula, West Java. *Catena*, 56 (1/3), 45-66.
- FREYDET P., & VERRECCHIA E.P., 2002 - Lacustrine and palustrine carbonate petrography: an overview. *Journal of Paleolimnology*, 27 (2), 221-237.
- GIBBARD P., HEAD M.J., WALKER M.J.C., & THE SUBCOMMISSION ON QUATERNARY STRATIGRAPHY, 2010 - Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma. *Journal of Quaternary Science*, 25 (2), 96-102.
- GLEASON P.J., & SPACKMAN W., 1974 - Calcareous periphyton and water chemistry in the Everglades. *Miami Geological Society Memoir*, 2, 146-181.
- GOUDIE A., 1973 - *Duricrusts in tropical and subtropical landscapes*. Clarendon Press, Oxford, 174 p.
- GOUDIE A.S., 1983 - Calcrete. In A.S. Goudie & K. Pye (ed.), *Chemical sediments and geomorphology*. Academic Press, London, 93-131.
- HEANEY L.R., 1991 - A synopsis of climatic and vegetational change in Southeast Asia. *Climatic Change*, 19 (1/2), 53-61.
- HOLTZAPFFEL T., 1985 - Les minéraux argileux: préparation, analyses diffractométriques et déterminations. *Publications de la société géologique du Nord*, 12, 1-136.
- HUFFMAN O.F., 2001 - Geologic context and age of the Perring/Mojokerto *Homo erectus*, East Java. *Journal of Human Evolution*, 40 (4), 353-362.
- ITIHARA M., WIKARNO, & KAGEMORI Y., 1985 - Tektites from the Sangiran area. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, 4, 125-133.
- JACOB T., & CURTIS G.H., 1971 - Preliminary potassium/argon of early man in Java. *Contribution of the University of California Archeological Research Facility*, 12, 50.
- KADAR D., 1985 - Upper Cenozoic Foraminiferal Biostratigraphy of the Kalibeng and Pucangan Formations in the Sangiran Dome area, Central Java. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, 4, 218-251.
- KATILI J.A., 1975 - Volcanism and plate tectonics in the Indonesian island arcs. *Tectonophysics*, 26 (3/4), 165-188.
- LANGBROEK M., & ROEBROEKS W., 2000 - Extraterrestrial evidence on the age of the hominids from Java. *Journal of Human Evolution*, 38 (4), 595-600.
- LARICK R., CIOCHON R.L., ZAIM Y., SUDIJONO, SUMINTO, RIZAL Y., AZIZ F., REAGAN M., & HEIZLER M., 2001 - Early Pleistocene <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages for Bapang Formation hominids, Central Java, Indonesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98 (9), 4866-4871.
- LEINDERS J.J.M., SONDAAR P.Y., & DE VOS J., 1985 - The age of hominid-bearing deposits of Java: state of the art. *Geologie en Mijnbouw*, 64, 167-173.
- MACK G.H., JAMES W.C., & MONGER H.C., 1993 - Classification of paleosols. *Geological Society of America Bulletin*, 105 (2), 129-136.
- MCCLYMONT E.L., & ROSELL-MELÉ A., 2005 - Links between the onset of modern Walker circulation and the mid-Pleistocene climate transition. *Geology*, 33 (5), 389-392.
- MOIGNE A.-M., DUE AWE R., SÉMAH F., & SÉMAH A.-M., 2004 - The cervids from the Ngebung site ("Kabuh series", Sangiran Dome, Central Java) and their biostratigraphical significance. *Modern Quaternary Research in Southeast Asia*, 18, 31-44.
- MORLEY R.J., 1982 - A palaeoecological interpretation of a 10,000 year pollen record from Danau Padang, Central Sumatra, Indonesia. *Journal of Biogeography*, 9, 112-124.
- MOVIUS H.L., 1944 - Early Man and Pleistocene stratigraphy in southern and eastern Asia. *Papers of the Peabody Museum of American Archaeology and Ethnology*, 19 (3), 1-125.
- NANSON G.C., PRICE D.M., & SHORT S.A., 1992 - Wetting and drying of Australia over the past 300 ka. *Geology*, 20 (9), 791-794.
- NINKOVITCH D., & BURCKLE L.H., 1978 - Absolute age of the base of the hominid-bearing beds in Eastern Java. *Nature*, 275 (5678), 306-308.
- NISHIMURA S., IKEDA T., & YOKOYAMA T., 1981 - A fundamental investigation on the fission-track method. *Report for the Grant-in-Aid for Scientific Research*, 5-11.
- PLATT N.H., & WRIGHT V.P., 1992 - Palustrine carbonates and the Florida everglades: towards an exposure index for the fresh-water environment? *Journal of Sedimentary Research*, 62 (6), 1058-1071.

- RAVELO C., ANDREASEN D., LYLE M., LYLE A.O., & WARA M.W., 2004** - Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch. *Nature*, **429** (6989), 263-267.
- RETALLACK G.J., 1990** - *Soils of the past: An introduction to paleopedology*. Unwin Hyman, Boston, 520 p.
- SALEKI H., 1997** - *Apport d'une intercomparaison de méthodes nucléaires ( $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ , ESR et  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) à la datation de couches fossilifères pléistocènes dans le dôme de Sangiran (Java, Indonésie)*. Thèse de Doctorat, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 238 p.
- SCHNEIDER D.A., KENT D.V., & MELLO G.A., 1992** - A detailed chronology of the Australasian impact event, the Brunhes-Matuyama geomagnetic reversal, and global climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, **111** (2/4), 395-405.
- SÉMAH A.-M., 1982a** - A preliminary report on a Sangiran pollen diagram. *Modern Quaternary Research in Southeast Asia*, **7**, 165-170.
- SÉMAH A.-M., 1986** - *Le milieu naturel lors du premier peuplement de Java*. Thèse de Doctorat, Université de Provence Aix-Marseille I., Aix-en-Provence, 307 p.
- SÉMAH A.-M., DJUBIANTONO T., & BRASSEUR B., sous presse** - Landbridges, Palaeogeography and human migrations through south east Asia Archipelago. *Quaternary International*.
- SÉMAH F., SARTONO S., ZAIM Y., & DJUBIANTONO T., 1980** - Premiers résultats concernant l'étude paléomagnétique de la partie ouest du dôme de Sangiran (Java, Indonésie). *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences. Série D, Sciences naturelles*, **290**, 477-480.
- SÉMAH A.-M., & SÉMAH F., 2001** - La signification paléocéologique des couches à hominidés de l'île de Java. In F. Sémah, C. Falguères, D. Grimaud-Hervé & A.-M. Sémah (ed.), *Origine des peuplements et chronologie des cultures paléolithiques dans le Sud-Est asiatique*: Colloque international de la Fondation Singer-Polignac, Paris, 3-5 juin 1998. Semenanjung-Art'Com, Paris, 251-278.
- SÉMAH F., 1982b** - Pliocene and Pleistocene geomagnetic reversals recorded in the Gemolong and Sangiran domes (Central Java). *Modern Quaternary Research in Southeast Asia*, **7**, 151-164.
- SÉMAH F., 1984** - The Sangiran dome in the Javanese Plio-Pleistocene chronology. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **69**, 254-252.
- SÉMAH F., 2001** - La position stratigraphique du site de Ngebung 2 (dôme de Sangiran, Java Central, Indonésie). In F. Sémah, C. Falguères, D. Grimaud-Hervé & A.-M. Sémah (ed.), *Origine des peuplements et chronologie des cultures paléolithiques dans le Sud-Est asiatique*: Colloque international de la Fondation Singer-Polignac, Paris, 3-5 juin 1998. Semenanjung-Art'Com, Paris, 299-330.
- SÉMAH F., SALEKI H., FALGUÈRES C., FÉRAUD G., & DJUBIANTONO T., 2000** - Did Early Man reach Java during the Late Pleistocene? *Journal of Archaeological Science*, **27** (9), 763-769.
- SÉMAH F., SÉMAH A.-M., & DJUBIANTONO T., 1990** - They discovered Java. *Pusat Penelitian Arkeologi Nasional*, Jakarta, 128 p.
- SÉMAH F., SÉMAH A.-M., DJUBIANTONO T., & SIMANJUNTAK H.T., 1992** - Did they also make stone tools? *Journal of Human Evolution*, **23** (5), 439-446.
- SHIMIZU Y., MUBROTO B., SIAGIAN H., & UNTUNG M., 1985** - A palaeomagnetic study in the Sangiran area. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, **4**, 275-307.
- SIKES N.E., & ASHLEY G.M., 2007** - Stable isotopes of pedogenic carbonates as indicators of paleoecology in the Plio-Pleistocene (upper Bed 1), western margin of the Olduvai Basin, Tanzania. *Journal of Human Evolution*, **53** (5), 574-594.
- SONDAAR P.Y., 1984** - Faunal evolution and the mammalian biostratigraphy of Java. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **69**, 219-235.
- SUDIJONO., 1985** - The Grenzbank, a Key Marker Bed. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, **4**, 135-143.
- SUZUKI M., & WIKARNO., 1982** - Fission tracks ages of pumice tuffs, tuff layers and javites of hominid bearing formations in Sangiran, Central Java. *Abstracts of the INQUA XI<sup>e</sup> Congress, Moscow, August 1982*. Moscow, 322.
- SWISHER C.C., CURTIS G.H., JACOB T., GETTYA.G., SUPRIJO A., & WIDIASMORO., 1994** - Age of the earliest known Hominids in Java, Indonesia. *Science*, **263** (5150), 1118-1121.
- TABOR N.J., MONTAÑEZ I.P., KELSO K.A., CURRIE B., SHIPMAN T., & COLOMBI C., 2006** - A Late Triassic soil catena: Landscape and climate controls on paleosol morphology and chemistry across the Carnian-age Ischigualasto-Villa Union basin, northwestern Argentina. *Geological Society of America Special Papers*, **116** (9/10), 17-41.
- THOMPSON K., & HAMILTON A.C., 1983** - Peatlands and swamps of african continent. In A.J.P. Gore (ed.), *Mires: swamp, bog, fen and moor*, **4B**. Elsevier, Amsterdam & New York, 331-373.
- THORP M.B., THOMAS M.F., MARTIN T., & WHALLEY W.B., 1990** - Late Pleistocene sedimentation and landform development in western Kalimantan (Indonesian Borneo). *Geologie en Mijnbouw*, **69**, 133-150.
- TOKUNAGA S., OSHIMA H., POLHAUPESSY A.A., & ITO Y., 1985** - A palynological study of the Pucangan and Kabuh formations in the Sangiran area. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, **4**, 199-217.
- TUNGSHENG L., & ZHONGLI D., 1998** - Chinese loess and paleomonsoon. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **26**, 111-145.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE, SOIL SURVEY STAFF, 1998** - *Keys to soil Taxonomy* (8<sup>e</sup> éd.). Pochontas Press, Blacksburg, 328 p.
- VAN BEMMELEN R.W., 1949**, *The geology of Indonesia, general geology of Indonesia and adjacent archipelago*, **1A**. Martinus Nijhoff, Den Haag, 732 p.
- VAN HEEKEREN H.R., 1972** - *The Stone Age of Indonesia*. Martinus Nijhoff, The Hague, 247 p.
- VAN SCHUYLENBORGH J., 1973** - Sesquioxide formation and transformation. In E. Schlichting & U. Schwertmann (ed.), *Pseudogley and Gley*. Verlag Chemie, Weinheim, 93-102.
- VENEMAN P.L.M., VEPRASKA M.J., & BOUMA J., 1976** - The physical significance of soil mottling in a Wisconsin toposequence. *Geoderma*, **15**, 103-118.
- VERSTAPPEN H.T., 1975** - On palaeoclimates and landform development in Malaysia. *Modern Quaternary Research in Southeast Asia*, **1**, 3-35.
- VERSTAPPEN H.T., 1980** - Quaternary climatic changes and the natural environment in SE Asia. *Geojournal*, **4**, 45-54.
- VON KOENIGSWALD G.H.R., 1936** - Early Palaeolithic stone implements from Java. *Bulletin of the Raffles Museum Singapore*, **1**, 52-60.
- VON KOENIGSWALD G.H.R., 1940** - Neue *Pithecanthropus*-funde 1936-1938; Ein Beitrag zur Kenntnis der Prähominiden. *Wetenschappelijke Mededeelingen, Dienst van den Mijnbouw in Nederlandsch-Indië*, **28**, 1-232.
- VON KOENIGSWALD G.H.R., & GHOSH A.K., 1973** - Stone implements from Trinil beds of Sangiran, Central Java. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Series B*, **76**, 1-34.
- WATANABE N., & KADAR D. (ed.), 1985** - Quaternary geology of the hominid bearing formations in Java. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, **4**, 378 p.
- WIDIANTO H., BUDIANTO T., & SIMANJUNTAK H.T., 1998** - *Laporan Penelitian Sangiran*. Balai Arkeologi Yogyakarta, Yogyakarta, 74 p.
- WIDIANTO H., BUDIANTO T., & SIMANJUNTAK T., 2001** - The discovery of stone implements in the Grenzbank: New insights into the chronology of the Sangiran Flake Industry. *Indo-Pacific Prehistory Association Bulletin*, **21**, 157-169.
- WRIGHT V.P., & TUCKER M.E., 1991** - Calcretes: an introduction. *Reprint Series of the International Association of Sedimentologists*, **2**, 1-22.
- YAALON D.H., 1971** - Soil-forming processes in time and space. In D.H. Yaalon (ed.), *Paleopedology*. Israel University Press, Jerusalem, 29-39.
- YOKOYAMA T., & KOIZUMI I., 1989** - Marine transgressions on the Pleistocene Pucangan Formation in the Sangiran area, central Java, Indonesia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **72** (1/2), 177-193.
- YOSHIKAWA S., & SUMINTO., 1985** - Tuff layers and pumice tuff beds of the Pliocene and Pleistocene sediments in the Sangiran area. *Geological Research and Development Centre Special Publication*, **4**, 97-104.