



HAL
open science

Apports du pénétromètre à la connaissance d'un site préhistorique : le cas de l'abri de Diepkloof, Province du Cap, Afrique du Sud.

Arnaud Lenoble, Michel Martinaud

► To cite this version:

Arnaud Lenoble, Michel Martinaud. Apports du pénétromètre à la connaissance d'un site préhistorique : le cas de l'abri de Diepkloof, Province du Cap, Afrique du Sud.. *Archeosciences, revue d'Archéométrie*, 2003, 27, pp.27-36. <halshs-00400745>

HAL Id: halshs-00400745

<https://shs.hal.science/halshs-00400745v1>

Submitted on 31 Jul 2009

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.



HAL Authorization

APPORTS DU PÉNÉTROMÈTRE À LA CONNAISSANCE D'UN SITE PRÉHISTORIQUE.

Le cas de l'abri de Diepkloof, Province du Cap, Afrique du Sud.

Arnaud LENOBLE* et Michel MARTINAUD**

Résumé : L'abri-sous-roche de Diepkloof en Afrique du Sud livre des industries du *Middle* et *Late Stone Age*. La structure pulvérulente des dépôts et la préservation des restes organiques y sont remarquables. Les fouilles ont été reprises récemment. La stratégie d'implantation des zones à fouiller se heurte à l'estimation des volumes des dépôts sédimentaires.

Le pénétromètre, instrument habituellement utilisé en Génie Civil, permet une mesure ponctuelle de la compacité d'un terrain en fonction de la profondeur. Ses potentialités sont testées ici en archéologie, dans un cas simple et favorable par rapport à de précédents exemples d'application.

Deux types d'informations sont recherchées : la localisation du toit du substratum et l'estimation de l'hétérogénéité des dépôts en termes de compacité. La position du toit du substratum de grès-quartzite est déterminée selon deux directions ; elle permet une estimation du volume du remplissage de l'abri : 400 à 500 m³. Dans l'estimation de l'hétérogénéité des sédiments, trois types de remplissage sont reconnus. Premièrement, des éboulis sont présents à l'entrée de l'abri ; ils sont à l'origine du piège sédimentaire. Deuxièmement, des sédiments cimentés par des sels caractérisent la partie sommitale du remplissage. Ils expriment la stabilité des modes de formation des dépôts depuis le *Middle Stone Age*. Troisièmement, des sédiments complètement pulvérulents sont reconnus en-dessous. Ils ne sont à ce jour pas documentés par la fouille.

Les données ainsi acquises permettent de discuter la dynamique sédimentaire et la représentativité des secteurs de fouille.

Abstract : Diepkloof is a large sandstone shelter containing *Late* and *Middle Stone Age* deposits with a good preservation of the organic remains. Since these sediments are extremely loose, this site provides a simple case for estimating potentialities of penetrometric techniques in an archaeological context.

Mainly used in civil engineering, a dynamic penetrometer is a heavy instrument which allows the measurements of the variations of a cone resistance (in MPa) as a function of the depth along a vertical line. These measurements yield informations about the material compaction. The PANDA which has been used in this shelter is a light-weight (20 kg) dynamic cone penetrometer for soil investigation. It uses variable energy (the blow from a hammer) and can be operated by one person.

Measurements have been recorded along two profiles. Two kinds of data are investigated. Firstly, the depth of the substratum is documented which allows the estimation of the volume of the deposits in this cave : between 400 and 500 m³. Secondly, the variability in the sediment compaction is used to characterize the infilling of the shelter. Roof fall blocks are abundant in the entrance whereas rock fragments are scarce in the backfill. It is found that the top of the deposits between the surface and a depth of 1.5 m contains numerous hard lenses recognized as salterusts. In comparison, the bottom of the infilling is extremely loose and, in fact, is not yet reached by the excavations.

Finally, this study provides arguments to discuss the site formation processes and makes easy the best choice for future excavations.

Mots-clés : Géoarchéologie, pénétromètre, PANDA, site de Diepkloof (Afrique du Sud), paléolithique, abri-sous-roche.

Keywords : Geoarchaeology, Rockshelter deposits, penetrometre, PANDA, Diepkloof Cave (South-Africa), palaeolithic.

INTRODUCTION

La fouille de sites archéologiques d'époque pléistocène met en oeuvre un enregistrement minutieux de l'information recueillie, par la mesure des coordonnées cartésiennes des vestiges (Laplace et Méroc, 1954), la récolte intégrale des vestiges par tamisage et la documentation iconographique et photographique des structures dégagées (Levêque, 2002). Cette exhaustivité répond d'abord au souci d'archiver un document que détruit sa propre consultation (Leroi-Gourhan, 1950). Elle permet également de recueillir une base de données détaillée pour répondre aux questions complexes des processus de formation du site, qu'ils soient, selon la terminologie proposée par Schiffer (1983), " culturels " ou " naturels ". Toutefois, la récolte d'un tel luxe de détails nécessite du

gées (Levêque, 2002). Cette exhaustivité répond d'abord au souci d'archiver un document que détruit sa propre consultation (Leroi-Gourhan, 1950). Elle permet également de recueillir une base de données détaillée pour répondre aux questions complexes des processus de formation du site, qu'ils soient, selon la terminologie proposée par Schiffer (1983), " culturels " ou " naturels ". Toutefois, la récolte d'un tel luxe de détails nécessite du

* Institut de Préhistoire et de Géologie du Quaternaire, (IPGQ, UMR 5808 du CNRS), Université Bordeaux 1, F 33 405 TALENCE. a.lenoble@ipgq.u-bordeaux1.fr

** Centre de développement des Géosciences Appliquées (CDGA), Université Bordeaux 1, F 33 405 TALENCE. m.martinaud@cdga.u-bordeaux1.fr

temps, d'autant plus que les vestiges sont nombreux et variés. Le gain d'information compense alors la diminution du volume des zones documentées.

Les méthodes de reconnaissance non-destructives que propose la géophysique, sont efficaces pour s'affranchir en partie de cette limitation volumique. En livrant une information complémentaire, moins détaillée, mais plus étendue, elles permettent de discuter la géométrie des volumes de sédiments et la représentativité de l'échantillonnage que constituent les zones fouillées (Capdeville *et al.*, 1994 ; Martinaud, 1997).

Les méthodes géophysiques n'ont pas pu être employées à l'abri-sous-roche de Diepkloof. Nous présentons ici les résultats obtenus avec un pénétromètre dynamique qui offre une alternative à ces méthodes conventionnelles de reconnaissance non-destructive. Ce moyen d'étude, emprunté à la géotechnique, n'a été que rarement utilisé pour des études archéologiques. Il permet par exemple d'étalonner les études électriques et, à ce titre, son emploi s'est révélé fondamental pour la détermination des épaisseurs de sédiments archéologiques situés en pied de falaise sous les débouchés d'une série de grottes (Martinaud *et al.*, 1999). Dans l'enceinte du Château de Lauzun, un pénétrogramme de 10 m de longueur a permis d'établir qu'une butte de 9 m de hauteur était constituée de matériaux fins, sans aucune structure construite en son sein (Martinaud, 1994). Sur le site de Saint-Julien, à Tours, l'exploitation conjointe des pénétrogrammes et des données archéologiques, avant, pendant et après la fouille, a permis d'évaluer les potentialités de cette technique (Breysse *et al.*, 2002).

Les caractéristiques géomorphologiques du site de Diepkloof semblaient en faire un site particulièrement bien adapté, au regard des sites déjà étudiés à l'étude pénétrométrique.

PRÉSENTATION DU SITE : UN ABRI-SOUS-ROCHE AUX DÉPÔTS REMARQUABLES

SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

Le site de Diepkloof se situe sur la rive gauche de la Verlorenvlei, à 18 km au Sud-Est de son embouchure à Elands' Bay (fig. 1).

Cette région, à environ 150 km au Nord de la ville du Cap, connaît un régime climatique semi-aride, faisant transition entre la région tempérée du Cap et les rivages plus arides de Namibie. Les précipitations, 275 mm/an, sont majoritairement hivernales. Elles sont largement inférieures à l'évapotranspiration potentielle, évaluée à plus de 1100 mm/an (Sinclair *et al.*, 1986). Mais, l'aridité estivale est en partie compensée par les brouillards côtiers d'advection, fréquents dans cette région (Sinclair *et al.*, *op. cit.*). La végétation, éparsse, est composée de buissons épineux ; elle est rattachée au biome de type *fynbos* (Parkington, 1986).

L'ABRI-SOUS-ROCHE

Cet abri-sous-roche, ouvert à l'Est, est creusé aux dépens des flancs d'une butte témoin des quartzites du Groupe de la *Table Mountain* (Sinclair *et al.*, 1986).

Un sondage a été réalisé dans les années 70 par J. Parkington (Parkington, 1976). Des dépôts riches en matériel archéologique ont été observés sur 1,5 m d'épaisseur, sans que la base du remplissage soit toutefois atteinte. Ces premières recherches ont livré une industrie du *Late Stone Age* (industrie de Robberg) sur une quinzaine de centimètres d'épaisseur, surmontant des niveaux *Middle Stone Age* (industrie d'Howieson's Poort ; Parkington, *op. cit.* ; Volman, 1981).

Depuis 1999, une équipe franco-africaine a repris les travaux sur le site (Rigaud *et al.*, 2000 et 2001). Une zone principale de fouille a été ouverte au fond de l'abri, attenante au sondage Parkington. Cette zone couvre 6 m² environ et se complète de sondages annexes (fig. 2).

Les dépôts qui forment le remplissage peuvent être observés à partir des coupes dégagées par le sondage Parkington. Ainsi, "les sédiments qui contiennent les vestiges du *Middle Stone Age* présentent un faciès lité. Celui-ci résulte d'un empilement de niveaux lenticulaires sablo-limoneux, d'épaisseur variable (1 à 10-15 cm), d'extension généralement faible (souvent inférieure à 1 m) et de couleur noire, blanche, gris très foncé, brun foncé, brun jaune clair ou brun très pâle. Quelques écailles et des blocs quartzitiques décimétriques à pluridécimétriques s'observent au sein de cette matrice fine" (Texier *in* Rigaud *et al.*, 2000).

L'état de conservation des restes organiques et des cendres de foyer est remarquable. Par exemple, les lits noirs sont constitués quasi-exclusivement de charbons de bois. L'observation en lames minces montre que les lits blancs sont constitués quasi-exclusivement de cendres de bois. Les autres lits livrent en différentes proportions des sables, des os, des charbons de bois et des débris végétaux brunifiés dans un fond matriciel plus ou moins phosphaté (Lenoble et Texier, *in* Rigaud *et al.*, 2001).

Des précipitations salines de halites et de gypse sont présentes dans la masse des dépôts. "Elles apparaissent de façon aléatoire, sous deux habitus : cristaux fibreux dans les discontinuités sédimentaires et amas lenticulaires d'extension métrique et de 5 à 10 cm d'épaisseur" (Lenoble et Texier, *in* Rigaud *et al.*, 2001). En dehors

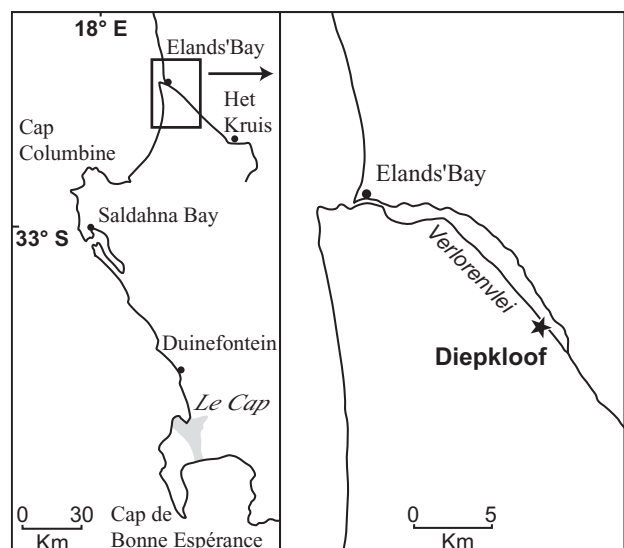


Fig. 1 : Localisation du site de Diepkloof, Province du Cap, Afrique du Sud.

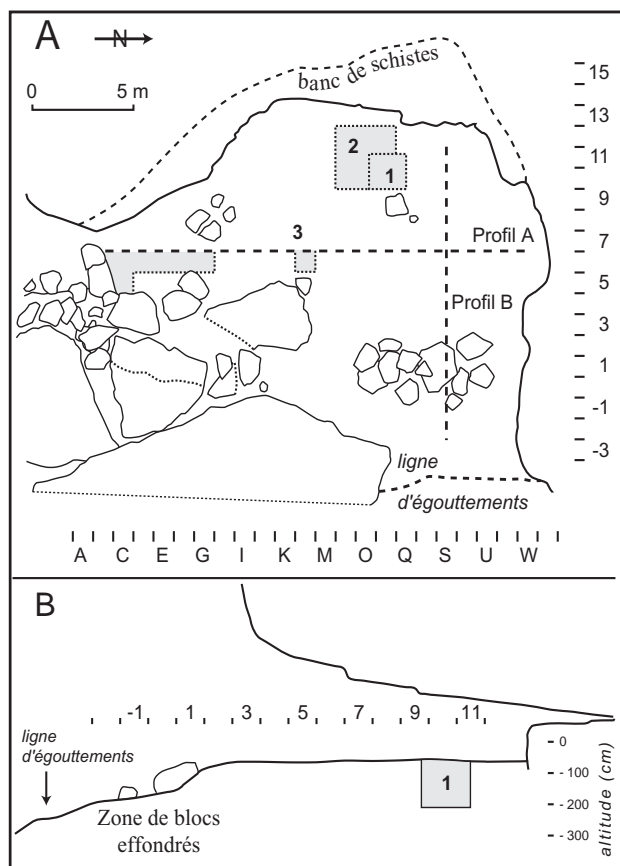


Fig. 2 : A – plan de l'abri de Diepkloof. le sondage initial de J. Parkington est indiqué en (1), la zone concernée par la reprise des travaux en (2) et le sondage exploratoire de C. Poggenpoel en (3). Les profils d'emplacement des essais sont également indiqués (Profil A et B). B – Profil topographique de l'abri le long de la rangée Q.

des zones cimentées par les cristallisations, les sédiments sont secs et pulvérulents.

La faible importance de cailloux rencontrés dans le remplissage est imputable à la lithologie de l'encaissant - un quartzite -, dans la mesure où l'altération de ce type de roche conduit plutôt à une désagrégation qu'à une fragmentation (Donahue et Adovasio, 1990). C'est, *a priori*, un aspect assez commun dans les dépôts pléistocènes, puisque de nombreuses régions sont favorables au développement d'abri par altération de quartzites (Walker, 1964 ; Marescaux, 1973 ; Raynal, 1975 ; Busche et Erbe, 1987 ; Martini, 1987 ; Galan et Lagarde, 1988 ; Donahue et Adovasio, 1990 ; Sponholz, 1994 ; Peyrot 1997).

En revanche, les autres aspects du remplissage sont assez inhabituels pour des dépôts pléistocènes. L'excellente préservation des restes organiques - ici cendres, charbons et débris végétaux brunifiés - caractérise la préservation en milieu sec (*cf.* la notion de « dry preservation » de Renfrew et Bahn, 2000 et la notion de « contexte karstique passif de milieu semi-aride » de Woodward et Goldberg, 2001). Des exemples de préservation de cendres sont rapportés en milieu semi-aride (*e. g.* Courty *et al.*, 1989 ; Goldberg et Laville, 1991 ; Anderson, 1997 ; Albert *et al.*, 1999). Mais l'absence de cohésion des sédiments n'a été rencontrée, à notre connaissance, qu'en milieu aride (*e. g.* Moeyersons *et al.*, 2002). La préservation de cristallisation de halite est également particulièrement rare (Watson, 1989 ; Pariente, 2001).

QUESTIONS EN SUSPENS

Deux des questions soulevées par les fouilles anciennes et actuelles restent en suspens.

La première question concerne l'épaisseur des dépôts. Le substratum rocheux n'a pas été atteint. Connaître l'épaisseur du remplissage est indispensable à l'évaluation du volume du gisement. Sur la base de l'altitude du substratum devant l'abri, aux rares points où il n'est pas masqué par les éboulements, une épaisseur de 1,5 à 2 m avait été proposée (Rigaud *et al.*, 2000). Cette estimation part de l'hypothèse d'un fond d'abri régulier et horizontal.

La seconde question est celle de l'hétérogénéité du remplissage. Cette information est utile pour élaborer une stratégie d'implantation des zones d'excavation et pour discuter la représentativité des secteurs fouillés.

TECHNIQUE ET MÉTHODE

Les méthodes géophysiques usuelles de subsurface ne sont pas utilisables ici. Le milieu sec (substratum, sédiments pulvérulents et couches indurées) est très défavorable aux méthodes électriques ou électrostatique. L'absence de contraste de susceptibilité magnétique supprime l'intérêt des prospections magnétiques ou de susceptibilité. En revanche, ce milieu doit être très favorable à la méthode du radar géophysique ; cependant, la difficulté d'en disposer n'ont pas permis son emploi ici.

Ces impossibilités nous ont conduits à tester les potentialités du pénétromètre dynamique léger de type PANDA.

PRINCIPE DE L'ESSAI DE PÉNÉTRATION AU PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE

Le pénétromètre est un outil employé en géotechnique pour évaluer la capacité portante des sols et établir un type de fondation pour des ouvrages à construire. Il fournit la mesure d'une « résistance de pointe » exprimée en MPa (ou mégapascal), calculée par une « formule de battage », grandeur qui traduit la compacité des couches traversées (Costet et Sanglerat, 1975).

En pratique, on fait pénétrer un train de tiges métalliques dans le sol par battage d'une tête - "l'enclume" - située à son sommet. L'extrémité inférieure du train de tiges est constituée d'un cône d'angle et de dimensions normalisées, en métal très résistant. La pénétration est réalisée soit à l'aide d'un marteau frappant la tête (pénétromètre dynamique à énergie variable), soit par la chute libre d'un "mouton" pesant, tombant d'une hauteur constante sur la tête (pénétromètre dynamique à énergie constante). L'enfoncement correspondant est mesuré. En géotechnique, l'acquisition de ces mesures porte le nom "d'essai". Le résultat de cet essai ou pénétrogramme est le graphe de la "résistance de pointe" en fonction de la profondeur. Selon les terrains, la résistance de pointe peut atteindre des valeurs de quelques dizaines de MPa.

Les mesures réalisées avec un pénétromètre dynamique contiennent une composante de frottement latéral de

la tige, qui peut être importante si les matériaux sont cohérents. En cela, ces mesures se distinguent de celles acquises à l'aide d'un pénétromètre statique (enfoncement à vitesse lente et constante grâce à un vérin), où le frottement latéral est séparé de la résistance de pointe.

LE PÉNÉTRMÈTRE PANDA EN RECHERCHE ARCHÉOLOGIQUE

Le PANDA (Pénétrmètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur) est un pénétromètre ultra-léger, à énergie variable, conçu pour le contrôle de compactage de remblais techniques et pour la reconnaissance des sols en général (Gourvès, 1991). Grâce à un capteur de vitesse et à un capteur d'enfoncement, il enregistre automatiquement la valeur de la résistance de pointe (fig. 3 et fig. 4). Cette dernière est calculée à partir de l'énergie de battage (énergie fournie par le marteau) et de l'enfoncement correspondant. Le pénétrogramme est visualisé après transfert des mesures sur ordinateur. Des référentiels propres à la discipline géotechnique permettent de caractériser certains paramètres des différentes couches à partir de leur résistance de pointe mesurée dans des conditions normalisées.

Les applications archéologiques qui ont été mentionnées en introduction sont antérieures à 1999 ; elles ont été effectuées avec un appareil réputé « léger » (mouton de 10 kg ou de 30 kg), présentant un cône de 4 cm de diamètre. Bien qu'il soit beaucoup plus maniable que les systèmes mécanisés, ce système, de par son poids et son maniement, reste lourd.

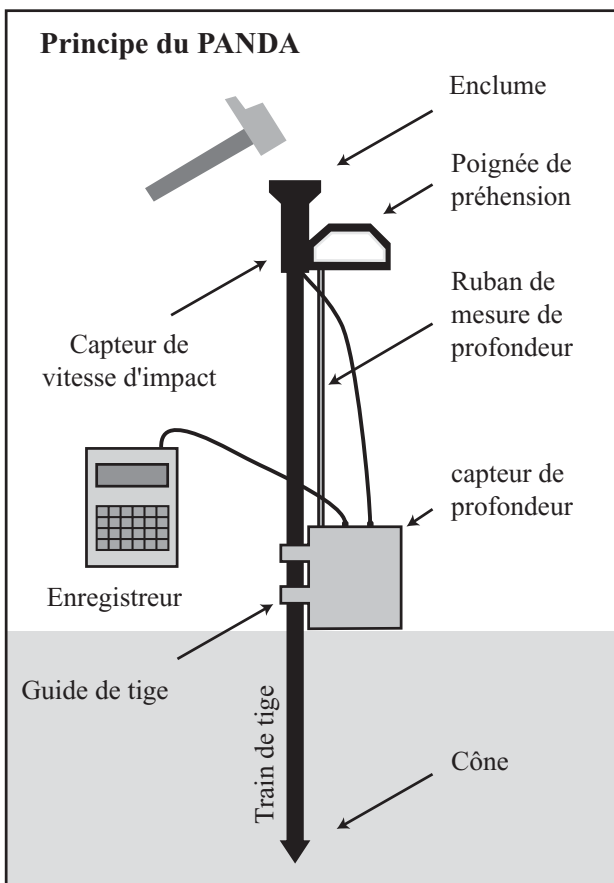


Fig. 3 : Principe du pénétromètre dynamique de type PANDA (explication dans le texte).

A l'inverse, le caractère ultra-léger du PANDA (poids total de 20 kg) et son emploi simple (formation au maniement en une heure) en font un appareil utilisable en routine. Son rendement peut être augmenté en adaptant sa batteuse automatique. Outre sa légèreté, ce pénétromètre présente des caractéristiques remarquables pour des études relatives à des sédiments archéologiques :

- l'emploi de la plus petite pointe disponible, d'une surface de 2 cm², en fait une méthode peu destructrice ;
- le pas d'échantillonnage en profondeur peut être petit.

Il est donc bien adapté à la différenciation de couches de faible épaisseur (quelques centimètres). Ce pas est irrégulier puisqu'il dépend à la fois de la compacité du sol et de l'opérateur par l'intermédiaire de l'énergie avec laquelle le marteau est projeté sur l'enclume. Cette valeur de l'enfoncement par coup varie entre 1 mm et quelques cm. On peut éventuellement le régulariser (ramener l'échantillonnage à un pas constant) pour une exploitation statistique (Breyse *et al.*, 2002). Une illustration du pas irrégulier est fournie par les pénétrogrammes bruts 22 et 23 de la figure 5.

Ces qualités n'affranchissent pas ce mode d'investigation des limites inhérentes à la mesure de la compacité des dépôts par pénétration :

- comme pour le carottage pédologique, le caractère de l'information fournie est ponctuel (une ligne verticale), par opposition à l'information volumique que fournissent les méthodes géophysiques de surface ;
- des arrêts, nous qualifions d'anormaux parce qu'ils ne détectent pas le substratum dur, peuvent être provoqués par des blocs noyés dans les sédiments.

Nous utilisons ici le PANDA pour fournir des indications semi-quantitatives relatives à la succession verticale des couches.

INTERPRÉTATION DES PÉNÉTROGRAMMES

L'information attendue des essais est double. Il s'agit de l'évolution avec la profondeur de la résistance de

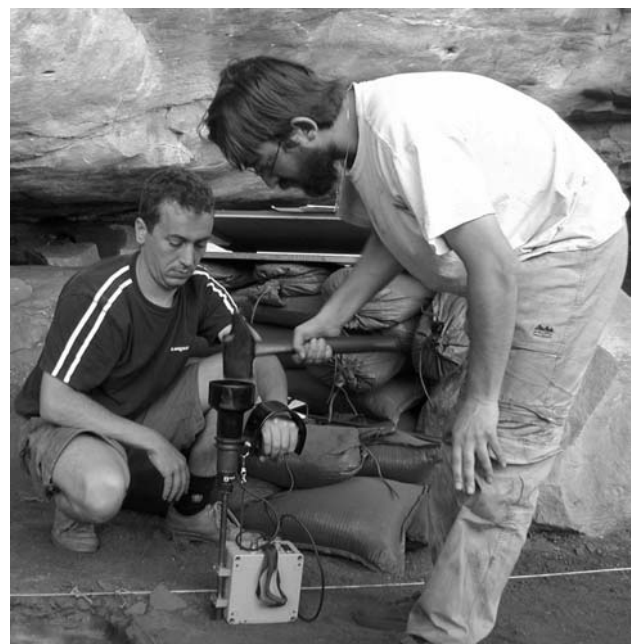


Fig. 4 : Vue de la réalisation d'un essai avec le pénétromètre PANDA.

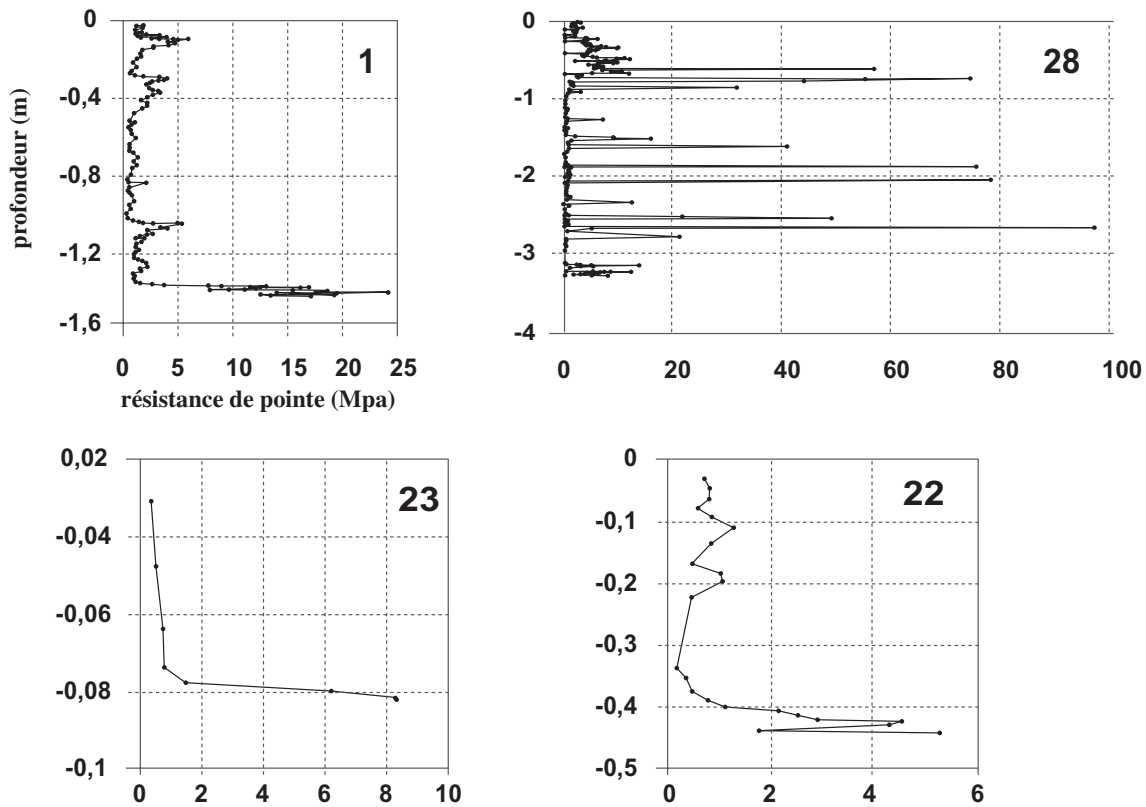


Fig. 5 : Exemples de pénétrogrammes. 1 – apparemment correct (absence de valeurs exagérément fortes de la résistance de pointe) ; 28 – incorrect (nombreuses valeurs aberrantes de la résistance de pointe), refus non atteint à 3,30 m ; 22 – apparemment correct, refus à 0,45 m ; 23 – apparemment correct, refus à 0,08 m.

pointe des sédiments traversés, d'une part, et de la profondeur de l'arrêt sur le substratum, d'autre part.

La variation de compacité des sédiments permet d'apprécier leur hétérogénéité. Sa connaissance passe par l'étude détaillée des pénétrogrammes. Il s'agit d'analyser les valeurs de résistance de pointe obtenues et leurs variations dans les trois dimensions pour effectuer des corrélations entre pénétrogrammes voisins. On s'attend, dans ces sédiments pulvérulents, à obtenir des résistances de pointe plutôt faibles avec des zones de valeurs plus élevées à la traversée des couches indurées.

En particulier, quatre situations pouvant être à l'origine de fortes valeurs de résistance (supérieures à 5 Ma) sont identifiées :

- rencontre de la pointe avec une couche indurée par les précipitations de halites et de gypse,
- rencontre de la pointe avec un fragment de matériau dur (éclat de silex, plaquette de quartzite, etc.) qui finit par éclater ou qui est déplacé après quelques coups,
- contournement d'un caillou par inclinaison de la tige (mais seulement à faible profondeur),
- arrêt.

Un arrêt est diagnostiqué lorsque trois forts coups successifs, associés au signal d'alarme spécifique, ne provoquent aucune progression du train de tiges. On distingue, après analyse des résultats et compte-tendu de la logique de terrain, deux types d'arrêts :

- l'arrêt final sur le substratum dur,
- l'arrêt intermédiaire sur blocs ou gros cailloux.

Ce second cas est identifié par des profondeurs d'arrêt jugées anormalement faibles. Des essais complémentaires, réalisés à 50 cm de part et d'autre du point de mesure, permettent de vérifier l'exactitude du diagnostic.

STRATÉGIE

La stratégie adoptée vise à optimiser la durée totale des essais, l'objectif final étant la cartographie complète du site.

Pour cela, des tests sont d'abord réalisés. En fonction des résultats obtenus, la cartographie de l'abri est entreprise. L'enregistrement des données se fait en deux phases. La première consiste en l'établissement de deux profils orthogonaux de mesures faiblement espacées. Les informations recueillies permettent de déterminer la maille de la grille adaptée à la cartographie complète de l'abri.

Les deux profils de la première étape de cartographie sont choisis de façon à disposer de deux grandes longueurs (fig. 2). Les essais y sont équidistants d'un mètre. On a fait l'hypothèse que cet échantillonnage spatial est adapté à la description des géométries que l'on cherche à mettre en évidence : forme horizontale ou inclinée du substratum, plane ou irrégulière, présence ou absence d'amas plurimétriques de blocs.

RÉSULTATS

Un test a été entrepris en bordure d'une tranchée en cours de réalisation, dans la partie sud du gisement (extrémité sud du profil A, fig. 2). Ce test s'est avéré doublement positif

- les dépôts ont été traversés jusqu'à une profondeur de 1,4 m, valeur jugée compatible avec un arrêt provoqué par le substratum ;
- les dépôts montrent une variation de compacité avec la profondeur qui est cohérente avec les variations appréciées par l'observation des sédiments exposés sur les sections de la tranchée.

À la suite de ce test, l'établissement d'une cartographie a été entrepris. La couverture complète de l'abri n'a cependant pas été réalisée. Après quelques essais, la plupart des pénétrogrammes ont livré des mesures erronées. Cela se traduit par de nombreux pics constitués d'une seule mesure de plusieurs dizaines de MPa et par des valeurs strictement nulles, situations toutes-deux impossibles (pénétrogramme 28, fig. 5). Ce dysfonctionnement est apparu au cours de la première phase de la cartographie, c'est pourquoi la réalisation des essais a été abandonnée après l'exploration des deux profils orthogonaux. Le premier profil, parallèle au fond de l'abri, se compose de 28 essais ; le second, allant du fond de l'abri à l'entrée, de 15 essais (fig. 6).

HÉTÉROGÉNÉITÉ DES SÉDIMENTS

Les douze premiers pénétrogrammes, pour lesquels les séries de mesures ne semblent pas affectées par le dysfonctionnement, ont été retenus (essais 1 à 12 de la figure 6A). Pour disposer d'une série complète de pénétrogrammes pour la partie sud de l'abri, nous avons cependant pris en compte, sur la figure 7, l'essai 28. Sur cet essai, les valeurs nulles et les valeurs supérieures à 10 MPa ont été supprimées. Cela ne signifie pourtant pas que les valeurs restantes soient fiables. Mais on constate qu'à l'exception de quelques fortes valeurs qui se distribuent accidentellement sur le profil, ce pénétrogramme est cohérent avec les essais 9 et 11 qui l'encadrent. Cette observation nous conduit à juger fiables les données considérées sur la figure 7. L'ordre de succession des pénétrogrammes qui composent cette figure, de gauche à droite et de haut en bas, suit celui de la figure 6A.

Des régularités apparaissent (figure 7) :

- La résistance de pointe varie globalement entre 0,5 et 2 MPa, valeurs qui paraissent cohérentes avec les sédiments pulvérulents.

- Tous les pénétrogrammes montrent des zones plus compactes, d'épaisseur décimétrique, entre la surface et environ 1,5 m de profondeur. Ces zones se caractérisent par une série de points pour lesquels la valeur maximale est au milieu de la zone indurée. Ces zones peuvent être corrélées d'un pénétrogramme à l'autre. Par exemple, une zone indurée est mise en évidence à 0,35 m de profondeur sur les essais successifs 3 et 1 ; une autre, à 0,7 m de profondeur est perçue sur les essais 5, 6 et 7. L'extension latérale de ces zones indurées ne dépasse pas trois mètres ; elles sont par ailleurs sub-horizontales. L'épaisseur, l'extension, la disposition sub-horizontale de ces zones et les valeurs de compacité nous conduisent à y identifier des croûtes de halite et de gypse.

- Sur les pénétrogrammes 7 à 9, entre la profondeur de 1,5 m et l'arrêt, la courbe est très lisse indiquant une zone très homogène dans les faibles valeurs.

Les données pénétrométriques apportent donc une information détaillée sur le contenu sédimentaire en termes de compacité. Dans les conditions indiquées ci-dessus, il serait imprudent de faire totalement confiance à la qualité des mesures. Cependant leur cohérence avec des faits de terrain nous invite à valider les quelques observations énoncées sur l'hétérogénéité des sédiments.

PROFONDEUR DU SUBSTRATUM

Le dysfonctionnement du capteur de vitesse est sans influence sur la qualification de l'arrêt sur un matériau qui ne se laisse pas traverser. Aussi les essais ont été poursui-

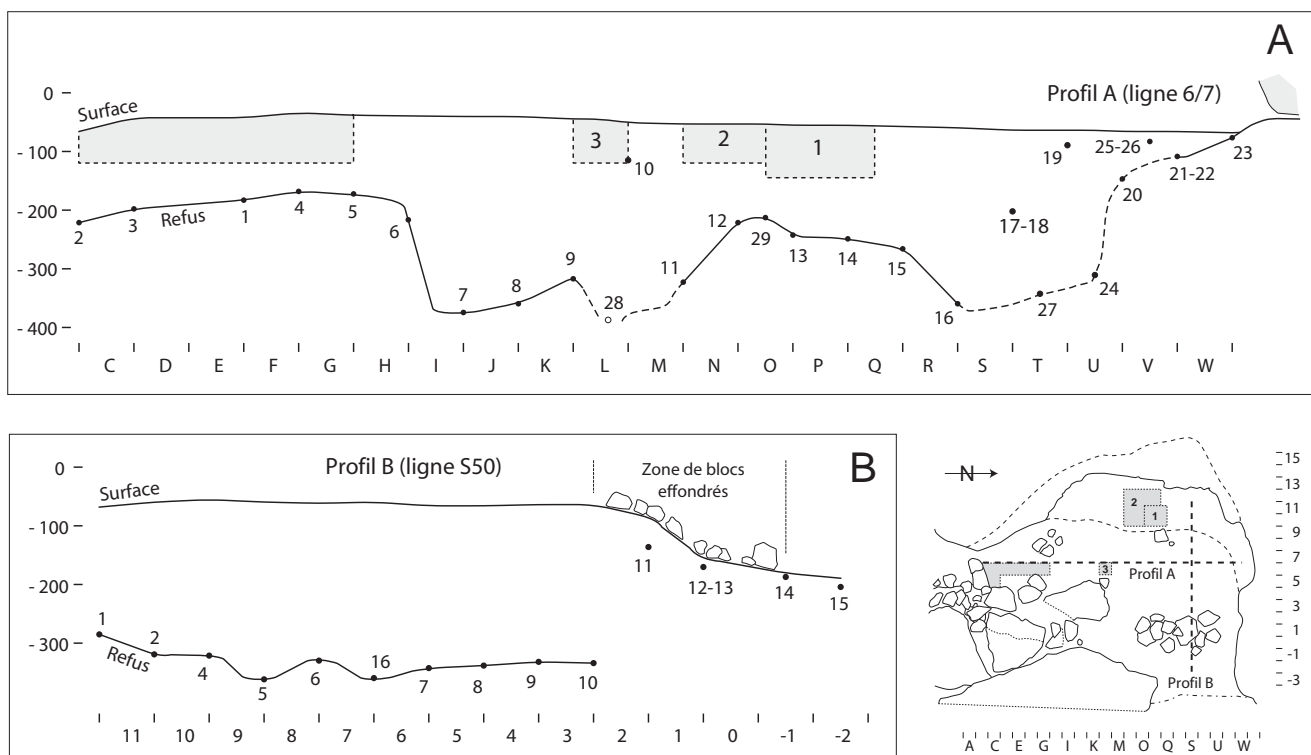


Fig. 6 : Profondeur des arrêts des différents essais et interprétation de la géométrie du fond de l'abri. A – selon le profil A ; B – selon le profil B. La numérotation des zones de fouilles est celle de la figure 2.

Abri de Diepkloof

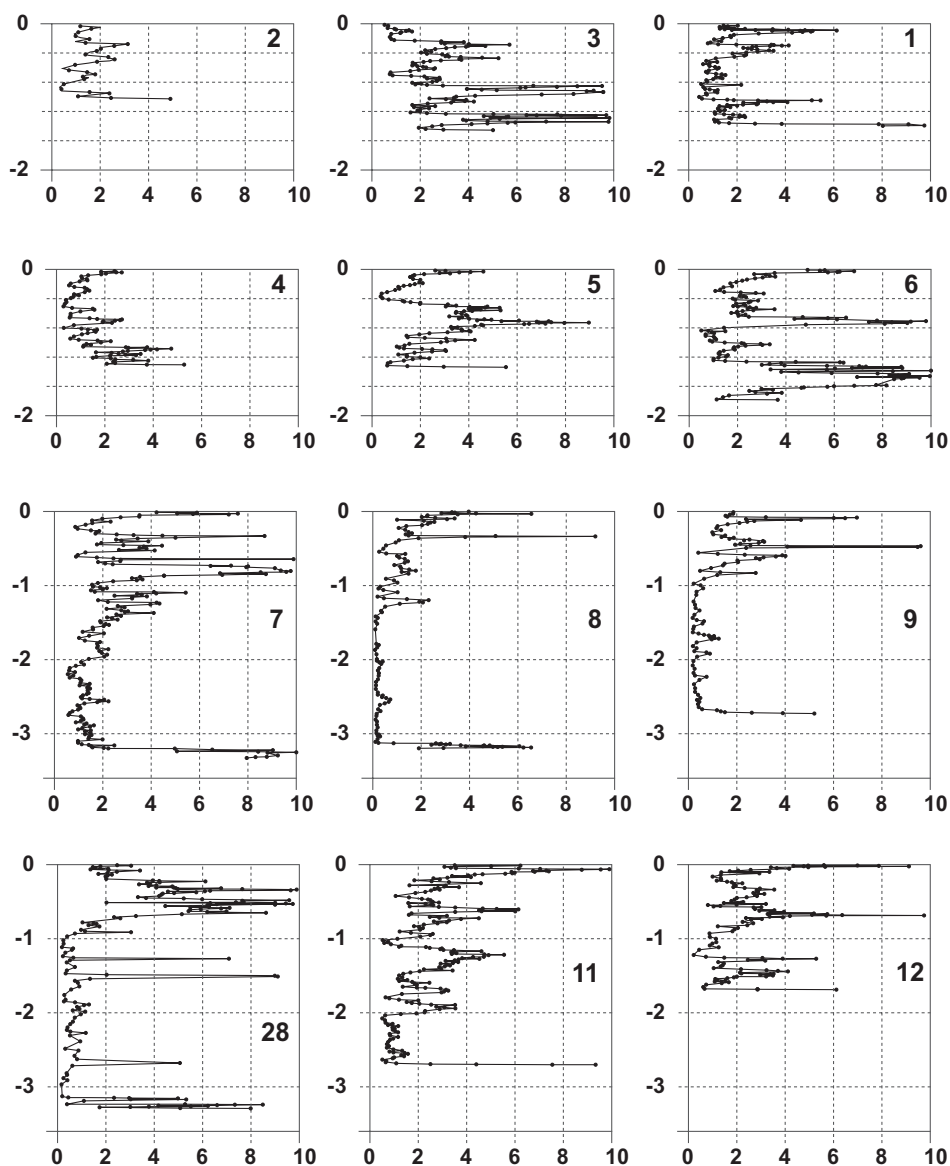
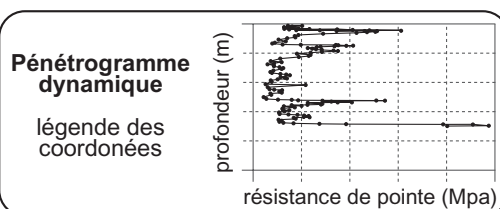


Fig. 7 : Pénétrogrammes de la première partie de la pseudo-section transverse (profil A).

vis jusqu'à l'établissement des deux profils prévus pour la première phase de l'exploration.

Les profondeurs d'arrêt transformées en altitudes sont reportées sur la figure 6. Dans un cas (profil A, mesure 28), l'arrêt n'a pas été atteint, faute d'une longueur suffisante du train de tige (pour des raisons de poids et d'encombrement et compte-tenu des hypothèses initiales, la longueur du train de tiges emporté était de 3,5 mètres).

Sur le profil A, les arrêts des essais 10, 17/18, 19 et 25/26 ont été jugés anormaux. Les essais de contrôle à 50 cm ont confirmé cette interprétation.

Ces essais exceptés, les profondeurs mesurées se regroupent en séries de trois à six essais consécutifs de valeurs comparables. Ces séries font apparaître une juxtaposition

de replats d'extensions plurimétriques, horizontaux ou légèrement inclinés, recouverts par 1,5 à 3,5 mètres de sédiments. La composante de l'inclinaison de ces replats dans le plan nord-sud a été quantifiée à partir du report des profondeurs d'arrêt par rapport à la surface du sol (fig. 6A). Cette composante est de 6° pour le replat défini par les essais 2 à 5, 12° pour le replat des essais 16 à 24, 16° pour le replat des essais 7 à 9 et environ 20° pour le replat défini par les essais 20 à 23, chaque fois en direction du Sud.

Sur le profil B, les profondeurs sont voisines et régulières (environ 2,5 m), jusqu'au fond de l'abri. En revanche, à l'entrée de l'abri, les essais 11 à 15 ont conduit à des arrêts à très faible profondeur sous la surface (fig. 6B).

DISCUSSION SUR LE CONTENU DE L'ABRI

ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS

La forme du toit du substratum que révèlent les essais est compatible avec celle des autres abris-sous-roche de la région qui n'ont pas de remplissage : il arrive fréquemment que l'altération des différents bancs de quartzite fasse apparaître des plates-formes de quelques mètres-carrés, étagées et reliées par des surfaces sub-verticales de quelques mètres de hauteur. Cette morphologie représente un héritage de l'organisation en bancs de ces quartzites sédimentaires. Un argument nous fait par ailleurs préférer l'hypothèse de replat sculptés dans la roche-mère plutôt que d'éboulis. Il s'agit de l'inclinaison des replats en direction du Sud, pour des valeurs variant de quelques degrés à une vingtaine de degrés. Ces valeurs sont conformes aux pendages des joints de stratification qu'exploite la karstification du quartzite. Ainsi, une mesure de la direction de la base du banc de schiste argileux qui forme l'encoche de fond d'abri donne une valeur de $7,5^\circ$ vers le Sud-Ouest, ce qui représente une composante de 3° en direction du Sud dans le plan méridien. Une autre valeur est donnée par le substrat qui affleure à l'extrémité nord du profil parallèle au fond de l'abri, et qui est incliné de 20° en direction du Sud.

Certains arrêts peuvent cependant être provoqués par des grosses dalles effondrées ou par des amas de blocs. Ce pourrait être, par exemple, le cas du replat qui apparaît au centre de l'abri, mis en évidence par les essais 12 à 15 (fig. 6A), et qui se distingue des autres par sa forme et son inclinaison. L'épaisseur des sédiments dont rend compte la figure 6 est donc une profondeur *a minima*.

La profondeur maximale des dépôts est d'au moins 3,3 m. Cette valeur est nettement supérieure à l'estimation des fouilleurs (2 m). Par ailleurs, l'hypothèse initiale d'un toit du substratum plan et horizontal n'est pas vérifiée. La reconnaissance réalisée fait apparaître une topographie irrégulière du substratum et permet une localisation fiable des zones de plus grande épaisseur du remplissage. C'est un apport important pour la stratégie d'implantation des travaux. Ainsi, à la suite de nos mesures, notre collègue C. Poggenpoel (Université du Cap) a entrepris un sondage exploratoire (3 sur la figure 6A) au droit de l'essai 28, où l'arrêt n'a pas été obtenu.

Les points situés à l'entrée de l'abri sur la seconde ligne de mesure ne sont pas attribués au toit du substratum, mais à des blocs effondrés (*cf. infra*, hétérogénéité des dépôts).

La reconnaissance de la forme du substratum permet d'estimer le volume de sédiment contenu dans l'abri. Pour cela, les surfaces du remplissage ont été mesurées sur les deux sections établies par report des profondeurs des arrêts (fig. 6). Le produit de ces deux mesures conduit à un volume de 475 m^3 .

Gardant à l'esprit que, d'une part, l'épaisseur estimée par ces arrêts est *a minima* mais que, d'autre part, les profils ont été choisis pour leur plus grande longueur, il nous paraît prudent de considérer que le volume du remplissage est compris entre 400 et 500 m^3 .

La représentativité des zones de fouilles peut être quantifiée à partir de cette estimation. Le sondage Parkington,

approfondi et élargi à la reprise des fouilles en 1999, mesure $1,85 \times 1,7 \times 1,6 \text{ m}$, soit un volume de 5 m^3 . Il représente donc un prélèvement de 1 à 1,25 % du total du remplissage de l'abri. Les nouvelles fouilles couvrent, quant-à-elles, une surface de $3 \times 3 \text{ m}$, amputée par le sondage Parkington. L'hypothèse d'une profondeur constante de 1,6 m à cet endroit du site conduit à estimer à 10 m^3 le volume de sédiment concerné par les fouilles en cours, soit 2 à 2,5 % du remplissage de l'abri.

HÉTÉROGÉNÉITÉ DES DÉPÔTS

Les points situés à l'entrée de l'abri sur le profil B ont été réalisés dans une zone où de nombreux blocs sont visibles, en surface ou partiellement enfouis. Nous avons pu vérifier, en dégageant quelques centimètres de sédiment à l'emplacement de l'essai 14, que l'arrêt a été provoqué par le sommet d'un bloc de taille similaire à ceux qui sont présents en surface. Ces arrêts témoignent donc de la présence d'un éboulis important au-devant de l'abri, à l'image des blocs présents en surface. Cet éboulis, révélé par les essais 11 à 15 du profil, est situé dans le prolongement des grandes dalles effondrées de la partie sud de l'entrée (fig. 6). On caractérise donc, à l'aplomb de l'auvent, une accréation sédimentaire dominée par des effondrements, comme cela a été observé dans d'autres abris-sous-roche (*e. g.* Abbot, 1997 ; Kuehn et Dickson, 1999 ; Moeyersons *et al.*, 2002).

Le diagnostic d'une telle organisation sédimentaire n'est pas sans conséquence sur la compréhension de la formation du site. Par exemple, dans leur étude des abris-sous-roche développés dans des grès, Donahue et Adovasio (1990) observent une augmentation du taux de sédimentation dans les dépressions qui apparaissent en recul et à la suite des effondrements de l'entrée de l'abri. Ce modèle d'édification des dépôts a été retrouvé dans le site kenyan de Shurmai (Kuehn et Dickson, 1999). La juxtaposition des effondrements successifs entraîne un déplacement de ce piège sédimentaire (Donahue et Adovasio, 1990). Une telle dynamique conduit à des dépôts emboîtés, où l'enregistrement sédimentaire est contrôlé par la localisation et la périodicité des effondrements.

L'hétérogénéité des dépôts mise en évidence par les pénétrogrammes permet également de discuter la représentativité des observations faites à partir des sondages.

Ainsi, des indurations par cristallisation de sels ont été reconnues, sans variation significative de leur importance entre le sommet et la base des dépôts, sur toute l'épaisseur du mètre cinquante de remplissage dégagé par les coupes du sondage Parkington (Texier *in* Rigaud, 2000 ; Lenoble et Texier, *in* Rigaud, 2001). Les essais réalisés au pénétromètre dynamique permettent de généraliser cette observation à l'ensemble des dépôts du site. Des zones d'indurations, qui sont identifiées comme des croûtes salines, sont systématiquement mises en évidence par les essais dans le mètre cinquante du sommet du remplissage (fig. 7).

Ces croûtes se forment par redistribution des produits de condensation des brumes salées qui remontent la vallée et qui sont à l'origine d'un dépôt de sel sur les parois de l'abri et de la butte témoin, ainsi que directement sur le sol de l'abri. L'essentiel des apports dans l'abri semble toutefois correspondre à une mobilisation

des sels déposés sur le rocher par les eaux de pluies qui s'infiltrent dans la butte de quartzite. Ces solutions réapparaissent dans l'abri à la faveur des diaclases (Texier, in Rigaud *et al.*, 2000), d'où elles suintent jusqu'au sol. Cette concentration secondaire explique la localisation irrégulière des croûtes salines.

Malgré cette irrégularité dans la localisation des apports de sels dans l'abri, c'est l'ensemble de la partie supérieure du dépôt qui, selon les essais réalisés, contient des zones indurées. Cette distribution se comprend par la prise en compte des modes de sédimentation. L'interprétation qui est faite des sédiments observés en section est un dépôt par ruissellement, à la suite d'averses importantes, mais dans un environnement semi-aride (Lenoble et Texier, in Rigaud, 2001). Cette ambiance climatique est déduite de la formation contemporaine de précipitations salines. La pénétration des eaux de ruissellement dans l'abri est imputée au drainage karstique au sein du massif quartzitique. Selon ce schéma, les zones sédimentaires actives sont également des zones favorables à l'accumulation de sels. C'est pourquoi, même si la sédimentation se fait par glissement latéral des zones actives suite aux phases d'effondrement de l'auvent (*cf. supra*), la formation de croûtes salines au fur et à mesure de l'accrétion des dépôts est un trait constant du système morphodynamique à l'origine de la partie sommitale des dépôts.

En revanche, le mode de sédimentation décrit ne rend pas compte de la présence du dépôt de plusieurs mètres cubes de sédiments pulvérulents que font apparaître les essais 7, 8, 9 et 28 à la base du remplissage. Nous en déduisons que l'enregistrement sédimentaire de l'abri est plus complexe que ne le laisse supposer la simple observation des coupes actuellement disponibles. Et, pour rendre compte de ces différences de pénétrogrammes, nous émettons l'hypothèse que le remplissage résulte de la succession de plusieurs modes de sédimentation. Cette hypothèse pourra être testée par la poursuite du sondage exploratoire entrepris par notre collègue C. Poggenpoel à la suite de nos essais, puisque celui-ci se situe à l'aplomb du changement de profil de compacité des sédiments (fig. 6).

CONCLUSION

Bien que le programme prévu n'ait pas pu être entièrement exécuté, cette expérience a été fructueuse. Le pénétromètre s'est avéré d'emploi facile et efficace face au problème particulier du site de Diepkloof. Deux aspects, en particulier, désignent le pénétromètre comme l'instrument d'investigation adapté à la mise en évidence de la variabilité des dépôts sur ce site. Le premier est le faible nombre de cailloux dans le remplissage, à l'exception des effondrements d'entrée. Ce caractère est imputable à la roche mère qui est un quartzite, et dont l'altération conduit plutôt à une désagrégation qu'à une production d'éboulis. Le second aspect est la pulvéulence du sédiment, les cimentations étant limitées à des croûtes de halite et de gypse. Ce caractère est rare dans la mesure où il ne se rencontre qu'en milieu aride ou semi-aride.

Cette expérience montre que le pénétromètre employé à maille fine (environ 1 m.) peut apporter des réponses sur la nature et le volume du remplissage. Le prélèvement

que représente la fouille a pu être quantifié : il atteint, tout au plus, 2,5 % du remplissage de l'abri. La géométrie de ce remplissage peut être appréciée sur la base d'observations précises. En l'état actuel des données, le toit du substratum apparaît constitué de replats plurimétriques sub-horizontaux étagés. La poursuite de la fouille pourra mettre à l'épreuve l'hypothèse d'un toit du substratum creusé dans la roche, ainsi que l'hypothèse alternative d'éboulements.

Il apparaît que certaines des caractéristiques livrées par les sondages, en l'occurrence l'imprégnation des dépôts par des précipitations de sels, sont un caractère général de la partie supérieure du remplissage de l'abri. La présence de ces croûtes salines traduit une formation des dépôts en contexte climatique semi-aride, contexte qui peut donc être inféré pour l'ensemble du sommet du remplissage de l'abri. L'emploi du pénétromètre dynamique a également montré que la base du remplissage, qui correspond au comblement des dépressions du substratum, ne peut être expliquée par la simple extrapolation du système morphodynamique reconnu pour la partie supérieure des dépôts. La réalisation de sections sur lesquelles sont projetées les profondeurs d'arrêt permet également la localisation et l'estimation de la profondeur de ces zones sédimentaires remarquables.

Ces informations sont jugées significatives : elles permettent d'orienter l'emplacement des nouvelles initiatives de fouille dans l'objectif d'un échantillonnage raisonné, et non plus d'un prélèvement « à l'estime » des dépôts de l'abri.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre des recherches archéologiques menées sur le site de Diepkloof. Ces recherches sont financées par le Ministère des Affaires Étrangères, la région Aquitaine, le CNRS, l'Université de Cape Town et la Foundation for Research Development. Merci à J.-Ph. Rigaud (IPGQ) et J. Parkington (Université de Cape Town) qui dirigent la fouille de Diepkloof et qui ont facilité le déroulement de cette étude. Merci à François Lacrampe-Cuyaubère qui a participé efficacement à la réalisation des mesures sur le site. Merci également à Jean-Pierre Texier qui a suivi ce travail et nous a fait bénéficier de ses conseils avisés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBOT J. T. 1997. Stratigraphy and geoarchaeology of the Red Canyon Rockshelter, Cook County, Wyoming. *Geoarchaeology*, 12, 315-335.
- ALBERT R. M., LAVI O., ESTRIF L., WEINER S., TSATSKIN A., RONEN A. et LEV-YADUN S. 1999. Mode of occupation of Tabun Cave, Mt Carmel, Israel, during the mousterian period : a study of the sediments and phytoliths. *Journal of Archaeological Science*, 26, 1249-1260.
- ANDERSON D. D. 1997. Cave archaeology in southeast Asia. *Geoarchaeology*, 13, 307-638.
- BUSCHE D. et ERBE W. 1987. Silicate karst landforms of the southern Sahara (north-eastern Niger and southern Libya). *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.*, Suppl.-Bd. 64, 55-72.
- BREYSSSE D., NIANDOU H., RODIER X., GALINIE H., LAURENT A. 2002. Le pénétromètre et l'hétérogénéité des sols archéologiques urbains. *Revue française de géotechnique*, 100, 43-58.
- CAPDEVILLE J.-P. , FERRULLO O., LENOBLE A. , M. MARTINAUD M. et L. MOUILLAC, 1994. Questions de paléorelief et de dynamique sédimentaire abordées par la confrontation de données géologiques et géophysiques : le site de

- plein air paléolithique de Bordeneuve. *Réunion des Sciences de la terre, Forum Géologie et Archéologie*, Nancy, avril 1994.
- COSTET J., SANGLERAT G. 1975** *Cours pratique de mécanique des sols, Calcul des ouvrages*. Dunod, Paris.
- COURTY M. A., COLDBERG P. et MACPHAIL R. 1989.** *Soils and micromorphology in archaeology*. Cambridge University Press, Cambridge, 344 p.
- DONAHUE J. et ADOVASIO J. M. 1990.** Evolution of sandstone rockshelters in eastern north America ; a geoarchaeological perspective. In : *Archaeological Geology of North America*, N. P. Lasca et J. Donahue eds. Geological Society of America, centennial special volume 4, Boulder, 231-251.
- GALAN C. et LAGARDE J. 1988.** Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quartzites du Roraima (Venezuela). *Karstologia*, 11-12, 49-60.
- GOLDBERG P. et LAVILLE H. 1991.** Etude géologique des dépôts de la grotte de Kébara (Mont-Carmel) : campagnes 1982-1984. In : *Le squelette moustérien de Kébara 2*. Ed. du CNRS, Paris, 29-41.
- GOURVES R. 1991.** Le PANDA : *Pénétrömètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols*. Laboratoire LERMES, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 10 p.
- KUEHN D. D. et DICKSON D. B. 1999.** Stratigraphy and noncultural site formation at the Shurmai Rockshelter (GnJm1) in the Mukogodo Hills of North-Central Kenya. *Geoarchaeology*, 14, 63-85.
- LAPLACE G. et MEROC. 1954.** Application des coordonnées cartésiennes à la fouille d'un gisement. *BSPF*, 51, 58-66.
- LEROI-GOURHAN A. 1950.** Les fouilles préhistoriques : technique et méthodes. Picard et Cie, Paris, 88 p.
- LEVEQUE, F. 2002.** Méthodes de fouilles. In : *Géologie de la Préhistoire*, J. C. Miskowsky ed.. Presses universitaires de Perpignan, Gap, 415-423.
- MARESCAUX M. G. 1973.** Les grottes du Gabon Nord-Oriental : un "Karst" dans l'oxyde de fer et la silice. *Bulletin de l'Association Géographique Française*, 410, 607-618.
- MARTINAUD M. 1994.** Prospections électriques au château de Lauzun, Lot-et-Garonne. Rapport déposé au Service Régional de l'Archéologie de la région Aquitaine, Bordeaux, 20 p.
- MARTINAUD M. 1997.** La pratique de la méthode électrique par une unité de service en prospection archéologique. Choix des quadripôles et exemples de résultats. *Revue d'archéométrie*, 21, 5-20.
- MARTINAUD M., BARET C., GAMBIER D., MADANI F., MORALA A., MOUILLAC L., ROYERE J., SIREIX C. 1999.** Sur l'intégration de résultats géophysiques avec des résultats de sondages mécaniques ponctuels. *Revue d'archéométrie*, 23, 33-45.
- MARTINI J. 1987.** Les phénomènes karstiques des quartzites d'Afrique du Sud. *Karstologia*, 9, 45-52.
- MOEYERSONS J., VERMEERSCH P. M. et VAN PEER P. 2002.** Dry cave deposits and their palaeoenvironmental significance during the last 115 ka. Sodmein Cave, Red Sea mountains, Egypt. *Quaternary Science Reviews*, 21, 837-851.
- PARIENTE S. 2001.** Soluble salts dynamics in the soil under different climatic conditions. *Catena*, 43, 307-321.
- PARKINGTON J. 1976.** Coastal settlement between the mouths of the Berg and Olifants rivers, Cape province. *South African archaeological bulletin*, 31, 127-140.
- PARKINGTON J. 1986.** Landscape and subsistence changes since the last glacial maximum along the western Cape coast. In : *The end of the palaeolithic in the Old World*, L. G. Strauss ed. B.A.R. international series, Londres, 201-227.
- PEYROT B. 1997.** Phénomènes karstiques et pseudo-karstiques dans des quartzites au Burundi. *Karstologia*, 29, 7-16.
- RAYNAL, J. P. 1975.** *Recherches sur les dépôts quaternaires des grottes et abris du bassin permotriassique de Brive*. Thèse de 3ème cycle, Université Bordeaux I, 165 p.
- RENFREW C. et BAHN P. 2000.** *Archaeology : theory, methods and practice*. Thames et Hudson, London, 3ème ed., 640 p.
- RIGAUD J. P., COSTAMAGNO S., LENOBLE A., TEXIER J. P., TEXIER P. J., TRIBOLO C., ALLENET G., LEROYER C. et LACRAMPE F. 2001.** Rapport sur les travaux effectués au cours de la campagne 2001 dans l'abri de Diepkloof (Province du Cap, Afrique du Sud). Ministère Français des Affaires Etrangères, Paris, 61 p.
- RIGAUD J. P., TEXIER J. P. et TEXIER P. J. 2000.** Diepkloof (Province du Cap, Afrique du Sud) : rapport sur les travaux réalisés au cours de la campagne 1999 / 2000. Ministère Français des Affaires Etrangères, Paris, 16 p.
- SCHIFFER M. B. 1983.** Toward the identification of site formation processes. *American Antiquity*, 48, 675-706.
- SINCLAIR S. A., LANE S. B. et GRINLEY J. R. 1986.** *Verlorenvlei*. CSIR Research Report. National Research Institute for Oceanology, Stellenbosch : 95 p.
- SPONHOLZ B. 1994.** Silicate karst associated with lateritic formations (examples from eastern Niger). *Catena*, 21, 269-278.
- VOLMAN T. P. 1981.** The Middle Stone Age in the Southern Cape. Unpublished PhD thesis, University of Chicago, 496 p.
- WALKER P. H. 1964.** Sedimentary properties and processes on a sandstone hillside. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34, 328-334.
- WATSON, A. 1989.** Desert crusts and rock varnish. In : *Arid zone geomorphology*, D. S. G. Thomas ed. Belhaven Press, Londres, 25-55.
- WOODWARD J. C. et GOLDBERG P. 2001.** The sedimentary records in mediterranean rockshelters and caves : archives of environmental change. *Geoarchaeology*, 16, 327-354.