

de centaines de capteurs pour multiplier les points de mesure, reste qu'en zone peu sismique on est limité par le peu d'événements à enregistrer. D'où l'idée d'utiliser une autre source d'information : le bruit sismique ambiant. On entend par là toutes les vibrations qui traversent en permanence les couches géologiques superficielles, qu'elles soient générées par des processus naturels lointains comme la houle de l'Atlantique ou de la Méditerranée, ou plus localement par des activités humaines comme le passage d'un TGV, celui des voitures sur une autoroute voisine, ou encore le bruit d'une usine.

Le premier enjeu était donc de montrer que cette « nouvelle » donnée sismique était exploitable pour mesurer l'effet de site au Tricastin. Le deuxième était de prouver qu'elle pouvait aussi servir à construire le modèle tridimensionnel de vitesse des ondes de cisaillement nécessaire pour simuler correctement la propagation et le piégeage des ondes dans le canyon. Aujourd'hui, les méthodes d'imagerie les plus performantes pour établir un tel modèle à cette échelle sont celles qualifiées « de sismique active » appliquées dans le domaine de la prospection pétrolière. Elles consistent non seulement à équiper la zone investiguée d'un grand nombre de capteurs, mais aussi à générer une source sismique bien contrôlée, en général au moyen d'un camion vibreur. Mais le coût de ces campagnes reste très élevé.

« L'imagerie dite "passive", parce qu'il suffit de laisser des capteurs enregistrer ce bruit de fond sismique sans avoir à générer les signaux, offre ainsi une nouvelle possibilité bien plus accessible », s'enthousiasme Bérénice Froment, pilote du projet DARE. La technique a déjà fait ses preuves pour produire des images de la croûte terrestre (à l'échelle de la dizaine de kilomètres) à partir des vibrations sismiques produites par la houle océanique (de fréquences inférieures au hertz). Ici l'échelle ciblée étant de quelques centaines de mètres, il faut des signaux de fréquences plus élevées (supérieures au hertz), engendrés par les processus plus locaux. Plus intermittents et très dépendants du site d'étude, ces signaux sont aussi plus difficiles à exploiter.

Pour relever tous ces défis, l'équipe du BERSSIN, aidée des sociétés EGIS et SIPROBE, a déployé 400 capteurs en février 2020 sur une zone d'environ 10 kilomètres par 10 kilomètres couvrant l'ensemble du canyon et les roches encaissantes avec pour premier objectif de mesurer le bruit sismique dans cet environnement industrialisé. En un mois d'acquisition, ils ont enregistré environ 1,2 téraoctet de données. Selon les premières analyses, les

signaux liés à l'activité industrielle locale sont de bonne qualité jusqu'à plusieurs hertz, et devraient permettre d'estimer l'amplification du mouvement sismique. Ce travail est en cours.

CANYON À GÉOMÉTRIE COMPLEXE

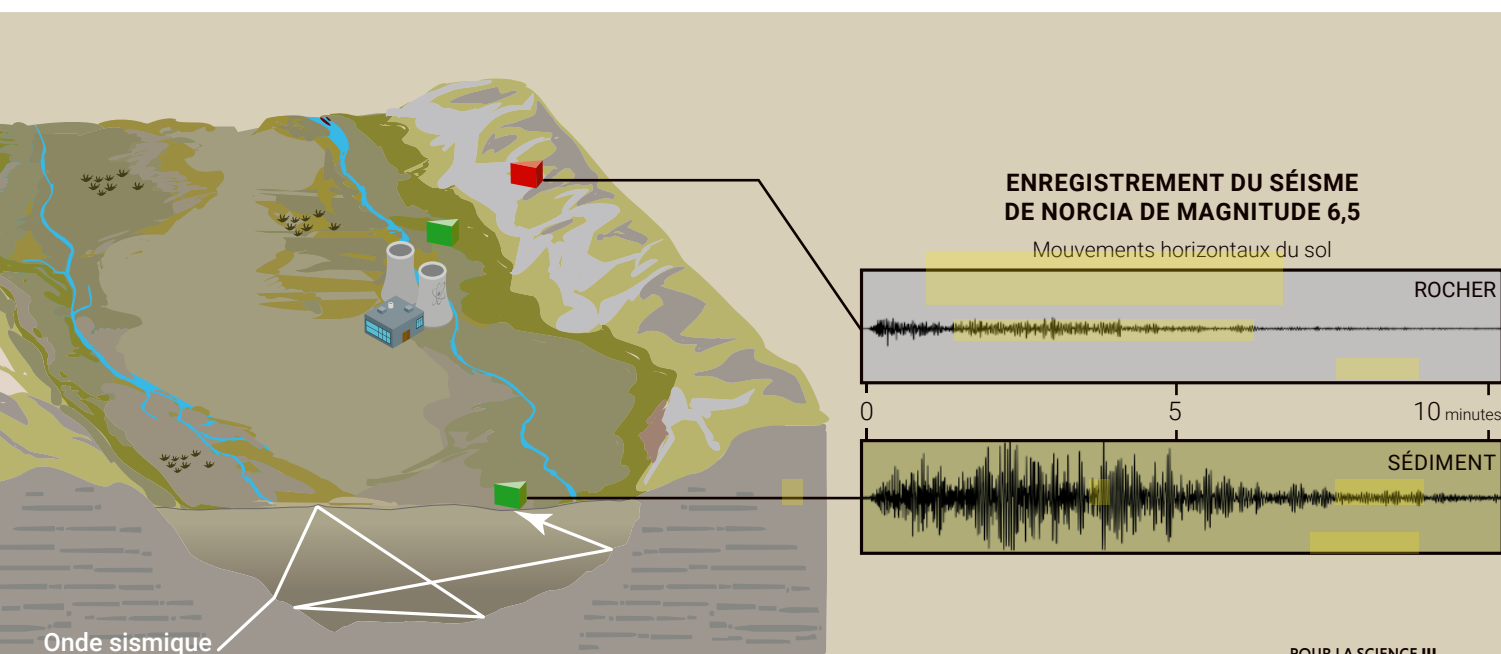
Parallèlement, le modèle préliminaire de vitesse des ondes de cisaillement obtenu à partir de ces données confirme les forts contrastes – d'un facteur 2,5 environ – entre le remplissage sédimentaire et les roches encaissantes. Il dévoile la géométrie tridimensionnelle complexe de l'ensemble du canyon. Il montre par exemple que le canyon est plus profond et plus encaissé au sud qu'au nord et localise précisément la zone de confluence entre l'ancien canyon de l'Ardèche et celui du Rhône au sud-ouest. Ce modèle doit être affiné avant d'être utilisé pour la simulation numérique de l'effet de site, mais il est déjà très prometteur.

La méthodologie globale étant nouvelle, les résultats demanderont à être validés par une approche plus classique. Le projet bénéficie pour cela du soutien des agences nationales de recherche française (ANR) et allemande (DFG) dans le cadre d'un partenariat avec l'université et le centre Helmholtz de Potsdam et l'université de Grenoble pour lancer une campagne complémentaire de mesures. Cette fois, ce sont 50 stations sismologiques calibrées pour enregistrer les tremblements de terre, qui, réparties sur la même zone depuis septembre 2020, collecteront des données pendant au moins six mois. Les résultats de cette collaboration franco-allemande sont attendus à l'horizon 2022. Au-delà de l'étude spécifique du site du Tricastin, ils devraient prouver l'intérêt de cette donnée abondante et rapide à acquérir qu'est le bruit sismique pour évaluer les effets de site. ■

RÉFÉRENCES

- > www-dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2019-11-11/index.html
- > Note d'information IRSN (www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_NI-Seisme-Teil-26112019.pdf)
- > G. Clauzon, Bulletin, Société Géologique de France 24, 587–610, 1982 ; L. Mocochain et al., *Sedimentary Geology*, 188, 219–233, 2006.
- > V. Perron et al., *Geophys. J. Int.*, 215, 1442–1454, 2018.

*L'aléa sismique est la probabilité pour une région ou un site de subir un séisme de caractéristiques données. Le risque sismique, lui, correspond à la probabilité de pertes humaines et de dégâts estimés en fonction de l'aléa.



L'ESSENTIEL

> *Homo naledi* est un humain qui vivait sur un vaste plateau karstique sud-africain il y a quelque 300 000 ans.

> Son petit volume crânien et sa morphologie de grimpeur semblent contradictoires avec une vie dans un milieu largement dénué d'arbres.

> Il pourrait s'agir d'une adaptation aux déplacements sur des falaises et dans des grottes, mode de vie qui lui aurait apporté eau et sécurité, et qui semble avoir été pratiqué dans le même milieu par d'autres bons grimpeurs : les australopithèques.

L'AUTEUR



JEAN-LUC VOISIN
paléanthropologue associé
au laboratoire Ades (Anthropologie
bio-culturelle, droit, éthique et santé)
à Aix-Marseille Université

Homo naledi

Le grimpeur qui n'était plus un singe

L'anatomie de grimpeur d'*Homo naledi* semble aberrante étant donné la rareté des arbres dans la région où vivait cette espèce. Mais il pourrait s'agir d'une adaptation aux falaises et aux grottes, habitats qui étaient aussi ceux des prédécesseurs australopithèques.

En 2015, les paléanthropologues, incrédules, ont dû admettre dans la famille humaine une forme aberrante : *Homo naledi*. Découverte en 2013 au plus profond d'une caverne, cette sorte de gnome archaïque semble avoir retenu les capacités arboricoles des australopithèques. Pourtant, il s'agit clairement d'un humain, qui vivait il y a environ 300 000 ans dans une Afrique australe dénuée de forêts.

L'étude d'*H. naledi* ne fait que débiter et, pour l'instant, je suis l'un des seuls chercheurs français à avoir eu l'occasion d'y participer. Tout a commencé pour moi au début de l'année 2014 lorsque je reçus un courriel d'Elen Feuerriegel, alors étudiante à l'université nationale australienne, à Canberra. Elen me consultait pour ses recherches, ce qui m'amena à participer à son jury de thèse. Nous nous connaissions donc bien quand, en 2017, depuis l'université de l'État de Washington à Seattle,

où elle était en poste, elle me proposa d'aider à étudier le membre supérieur d'*H. naledi*. L'analyse anatomique de l'épaule de cet *Homo* que j'eus alors le privilège de pouvoir faire et mon expérience personnelle de l'escalade m'ont amené à émettre une hypothèse surprenante : et si *Homo naledi* était une forme humaine sélectionnée par l'escalade ?

A priori, cette idée n'a rien de plausible : le passé arboricole des hominidés, c'est-à-dire la lignée d'hominidés qui a conduit à *Homo*, remonte aux australopithèques, donc à plus de 1 million d'années – soit une époque très antérieure à celle d'*H. naledi*. Mais tout dans *H. naledi*, depuis les conditions de sa découverte jusqu'à chacune de ses caractéristiques, surprend et trouble au point de rendre cette forme humaine quasi irréelle. Et pourtant, elle existe, ou plutôt elle a existé, il n'y a pas si longtemps à l'échelle de l'évolution.

La publication en 2015 de la découverte d'*H. naledi* par Lee Berger, de l'université du



Certains des traits d'*Homo naledi*
(ici une reconstitution par
la plasticienne Élisabeth Daynès)
se rapprochaient plus de ceux
des australopithèques que
de ceux de la lignée humaine.

Witwatersrand, en Afrique du Sud, et son équipe fit la une des journaux à travers le monde, mais surtout elle troubla profondément les préhistoriens. Le rameau humain était en effet déjà touffu. On connaissait alors entre six et neuf espèces d'australopithèques (trois espèces ne font pas consensus), trois espèces d'australopithèques robustes (paranthropes) et plus de dix espèces humaines (toutes ne faisant pas consensus non plus). C'est dans ce cadre complexe que s'inscrivait *H. naledi*, qui ajoutait au chaos ambiant.

DES OS FOSSILISÉS D'AU MOINS 15 INDIVIDUS

Naledi signifie «étoile» en sésoto, l'une des onze langues officielles de l'Afrique du Sud. Lee Berger a choisi ce nom parce que ses partenaires spéléologues ont découvert les premiers ossements d'*H. naledi* en 2013 dans le complexe de grottes de Rising Star («étoile montante»), au sein du karst dolomitique de la province de Gauteng, en Afrique du Sud. La grotte se trouve à moins de 3 kilomètres de Sterkfontein et à moins de 800 mètres de Swartkrans, deux des sites à australopithèques les plus importants d'Afrique australe (voir la figure ci-dessous). Les vestiges osseux de cette nouvelle espèce proviennent des cavités Lesedi et Dinaledi.

À Dinaledi, plus de 1550 os, dont 137 dents isolées et 58 dents encore portées par les os mandibulaires et maxillaires, furent mis au jour – ou plutôt à la nuit absolue régnant dans la grotte. Les variations entre ces os sont moindres que celles constatées au sein de chacune des

autres espèces humaines, ce qui prouve que l'on a bien affaire à une seule forme humaine. Lesedi, fouillée en 2013 sur une petite surface seulement, a livré 118 restes attribués à deux adultes et à un très jeune enfant. Les os déposés au sein des cavités Lesedi et Dinaledi l'ont été en un intervalle de temps très court et représentent un minimum de 15 individus comprenant des adultes, des adolescents et des enfants. Autrement dit, on a découvert, en une fois, tout un échantillon de population, ce qui est rarissime pour le Paléolithique.

Tout aussi spectaculaire, pour un paléoanthropologue, est le fait que tous les os du squelette, ou presque, sont représentés en plusieurs exemplaires et souvent en connexion. Par exemple, une main droite comprend tous les os du carpe (poignet), du métacarpe (paume) et des phalanges, à l'exception du pisiforme (l'un des petits os du carpe); pas moins de 110 autres os de la main l'accompagnent.

La découverte d'une population fossile du Paléolithique est déjà, en soi, un événement remarquable. Mais ses circonstances la rendent à peine croyable. Aucune industrie lithique, aucun charbon, aucun reste de faune, bref aucune trace de culture matérielle entourant les fossiles ne livre le moindre renseignement sur le mode de vie «nalédien».

L'accès extrêmement difficile à la cavité Dinaledi constitue une énigme. Il implique en effet un éclairage, donc le contrôle du feu; il oblige ensuite à franchir le «Superman's Crawl», un boyau si étroit que seuls des spéléologues petits et minces peuvent prétendre y ramper sans rester bloqués; arrivés ensuite



Situé à environ 30 kilomètres au nord de Johannesburg, en Afrique du Sud, le Berceau de l'humanité sud-africain est une zone de 470 kilomètres carrés où de nombreux fossiles d'australopithèques et d'humains ont été découverts.

