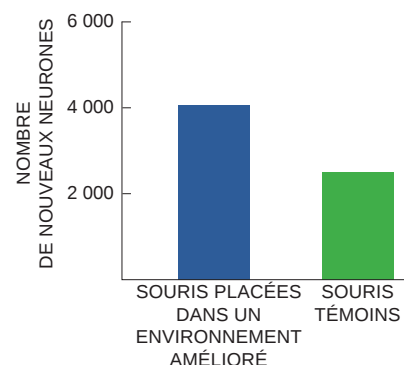




4. UN ENVIRONNEMENT AMÉLIORÉ (à l'extrême gauche) favorise mieux qu'une petite cage (ci-contre, à gauche) la neurogenèse dans le gyrus denté de l'hippocampe. Certains neurobiologistes cherchent quelles caractéristiques de l'environnement ont le plus d'effets sur la neurogenèse. La comparaison de la neurogenèse chez des souris élevées dans des cages normales et dans des cages pourvues d'une roue montre que l'utilisation intensive d'une roue favoriserait la neurogenèse (ci-dessus).

division des cellules, leur migration ou leur différenciation. Si l'on parvenait à isoler les gènes qui participent à la production de neurones, on pourrait identifier les protéines associées et préciser la contribution respective des gènes et des protéines à la neurogenèse.

La réparation du cerveau

Les neurobiologistes finiront peut-être par décoder la cascade des réactions qui, après un stimulus particulier – telles une modification de l'environnement ou une réaction physiologique – aboutissent à l'augmentation ou à la diminution de cette activité génique et, par conséquent, de la neurogenèse. Ils disposeront alors des informations nécessaires au déclenchement de la régénération neuronale. On pourrait, par exemple, administrer des molécules régulatrices, introduire des gènes par thérapie génique pour que les molécules utiles soient produites directement dans l'organisme, transplanter des cellules souches, moduler les stimulus environnementaux ou cognitifs, modifier l'activité physique ou encore combiner ces différents facteurs.

Avant d'atteindre ces objectifs, des décennies d'études soutenues s'imposeront, mais l'enjeu est considérable : nous avons la perspective de réparer des aires cérébrales où l'on sait que la neurogenèse a lieu et des aires où des cellules souches existent, mais ne se divisent pas. On envisage ainsi de

stimuler la migration des cellules souches vers des aires inhabituelles et leur différenciation en tel ou tel type de cellules nerveuses. Les nouvelles cellules ne reconstruiront pas des zones entières du cerveau et ne restitueront pas la mémoire perdue, mais elles pourraient, par exemple, fabriquer de la dopamine (la diminution de ce neurotransmetteur est responsable de la maladie de Parkinson).

Des recherches menées dans d'autres domaines pourraient également améliorer les traitements. Ainsi, on sait désormais cultiver des cellules souches d'embryon humain, qui peuvent se différencier en n'importe quel type de cellules de l'organisme – ou presque. Un jour, peut-être saura-t-on déclencher à volonté la différenciation de ces cellules souches embryonnaires en un type particulier de neurones. Transplantés dans la zone endommagée du cerveau, ces neurones remplaceraient les cellules détruites.

Fred GAGE est professeur de neurosciences à l'Institut Salk de La Jolla. Gerd KEMPERMANN, qui a travaillé dans le laboratoire de F. Gage pendant trois ans, est maintenant à l'Université de Regensburg.

Gerd KEMPERMANN, H. Georg KUHN et Fred H. GAGE, *More Hippocampal Neurons in Adult Mice Living in an Enriched Environment*, in *Nature*, vol. 386, pp. 493-495, 3 avril 1997.

Peter S. ERIKSSON et al., *Neurogenesis*

Toutefois, les greffes risquent d'être rejetées par le système immunitaire du receveur. Pour vaincre cette difficulté, on pourrait prélever des cellules souches dans le cerveau des personnes malades et les modifier, plutôt que d'utiliser des cellules souches d'un donneur. On dispose déjà de moyens relativement peu invasifs pour prélever des neurones chez des malades.

Malheureusement de telles applications médicales sont encore fort éloignées. Un jour, il faudra passer de l'étude des rongeurs à celle des êtres humains et l'on devra alors utiliser des méthodes très élaborées, à l'instar des techniques d'imagerie non invasives (l'imagerie par résonance magnétique ou la tomographie par émission de positons, par exemple). Nous devrons également nous assurer que les neurones dont on aurait stimulé la croissance dans le cerveau (ou qui auraient été transplantés) rempliront bien le rôle qui leur serait assigné, et celui-là seulement.

in the Adult Human Hippocampus, in *Nature Medicine*, vol. 4, n° 11, pp. 1313-1317, novembre 1998.

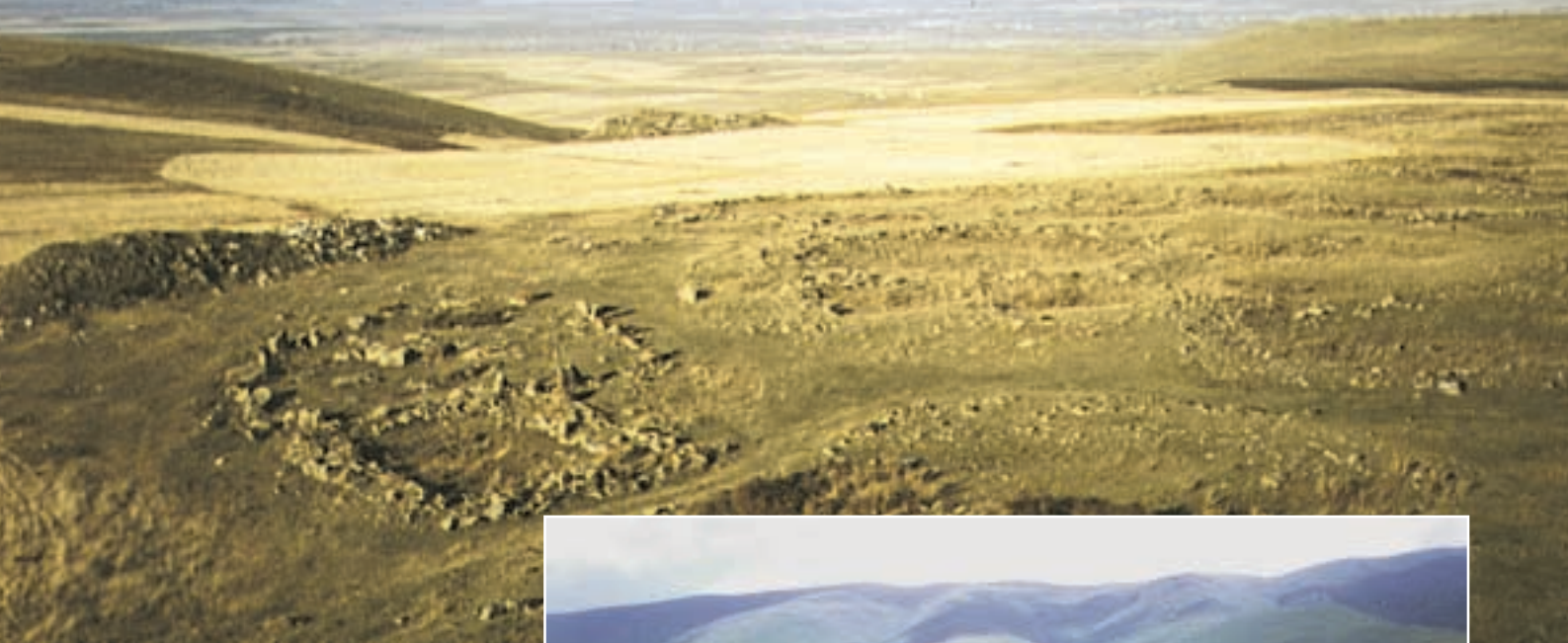
Elizabeth GOULD et al., *Learning Enhances Adult Neurogenesis in the Hippocampal Formation*, in *Nature Neuroscience*, vol. 2, n° 3, pp. 260-265, mars 1999.

Henriette VAN PRAAG et al., *Running Increases Cell Proliferation and Neurogenesis in the Adult Mouse Dentate Gyrus*, in *Nature Neuroscience*, vol. 2, n° 3, pp. 266-270, mars 1999.

Tremblements de terre et archéologie

HERVÉ PHILIP • ARKADI KARAKHANIAN

La sismologie rencontre l'histoire : lors des recherches sur les séismes anciens, les géologues ont découvert la ville de Behoura, en Arménie, et retracé comment Arghishti I^{er}, roi d'Ourartou, l'avait conquise huit siècles avant notre ère.



1. SUR CETTE PHOTOGRAPHIE aérienne on distingue une partie de la cité antique découverte au Sud-Est du lac Sévan, au voisinage de la faille de Pambak-Sévan-Sunik, d'où a été prise la photographie. On voit (à gauche) des murs dessinant des fonds d'habitations et des enceintes de pierres dressées. La longueur d'un côté de la ville est de l'ordre du kilomètre. Les géologues ont creusé des tranchées perpendiculairement au tracé de la faille (F), qui recouperent l'escarpement de faille (a), haut de deux mètres environ, pour en étudier l'histoire et la dater. Le passage de la faille dans la tranchée est souligné par le changement de teinte des déblais entre les calcaires crétacés du substratum (en clair) et les sédiments déposés en pied d'escarpement (en sombre). La datation des différents niveaux et l'amplitude des déplacements sur les failles permettent d'estimer la périodicité et l'importance des séismes.



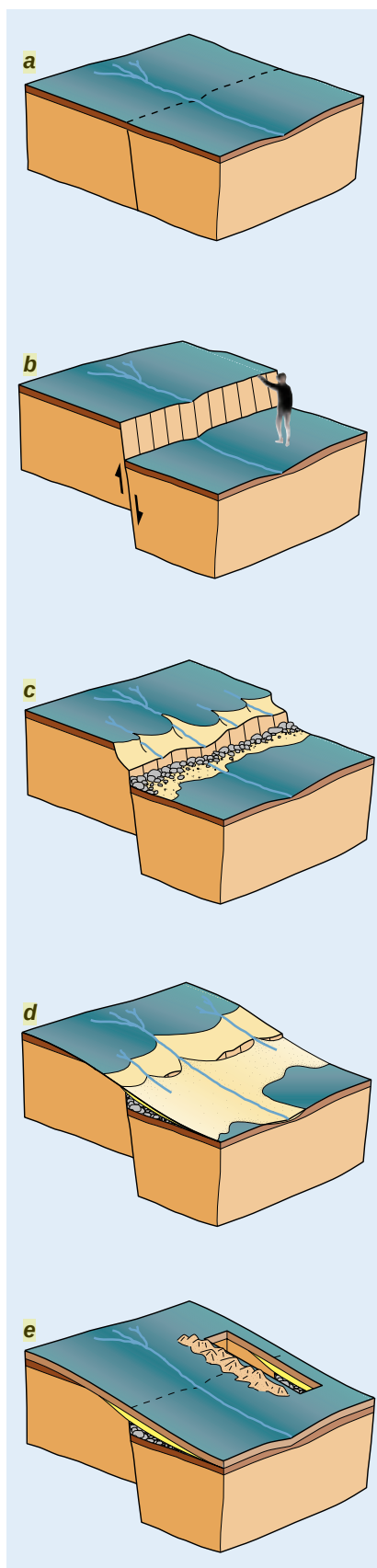
Au cours du temps, le déplacement des plaques entraîne une accumulation de contraintes dans les roches et sur les failles.

Quand la limite de rupture est atteinte, les deux compartiments de la faille coulisent brutalement l'un par rapport à l'autre et un séisme se produit ; chaque séisme « remet les compteurs de contraintes à zéro ». Ensuite, les contraintes recommencent à s'accumuler pour un nouveau cycle sismique. La datation des séismes passés permet d'évaluer le temps d'accumulation des contraintes (temps de récurrence) : aussi les géologues déterminent-ils l'activité sismique passée d'une région pour évaluer le risque sismique actuel.

Souvent, la période couverte par les informations fournies par les réseaux sismologiques (quelques décennies) ou par la documentation historique (quelques siècles dans la plupart des pays) n'est pas suffisante pour que les géologues déterminent la période de retour de forts séismes. Cette période peut dépasser quelques siècles aux zones frontières entre les plaques, et plusieurs millénaires dans les régions à l'intérieur des continents. Aussi, géologues et sismologues des zones continentales s'intéressent à des périodes de temps allant bien au-delà de la période historique.

La paléosismologie, l'étude des séismes anciens, s'intéresse aux déformations et aux perturbations que les séismes de forte magnitude produisent et ont produit par le passé sur les formations géologiques superficielles (alluvions, colluvions, sols...). Ces déformations résultent de l'arrivée de la rupture sismique en surface le long de la faille responsable du séisme (effets directs), et des mouvements vibratoires du sol : éboulements de falaise, glissements de terrain, liquéfaction de sol, chutes de stalactites dans les grottes (effets dits indirects). Ces perturbations caractéristiques des séismes peuvent être fossilisées, et donc préservées, par des dépôts postérieurs ou par la formation d'un sol.

Le paléosismologue repère, dans un premier temps, les sites favorables, c'est-à-dire susceptibles d'avoir enregistré, dans les niveaux sédimentaires superficiels, les effets des séismes anciens ; pour accéder à ces informations, il creuse des tranchées. (On réserve le terme d'archéosismologie à l'étude des séismes anciens affectant



2. ÉVOLUTION D'UN ESCARPEMENT de faille créé lors d'un séisme (b). L'escarpement est progressivement nivelé par l'érosion (c et d). Le paléosismologue creuse une tranchée (e) pour étudier les sédiments issus de l'érosion du compartiment soulevé.

des sites archéologiques, étude où archéologues et géologues coopèrent.)

La plupart des études paléosismologiques sont réalisées sur la trace de la faille active ou dans son environnement immédiat ; les failles actives sont facilement repérables dans la topographie par les anomalies morphologiques que leurs fonctionnements successifs produisent : rivières et ruisseaux décalés ou barrés, reliefs déplacés, etc.

Lorsqu'un séisme dépasse la magnitude 6,5 - 7 dans les continents, la rupture sismique arrive jusqu'en surface et forme un ressaut topographique (escarpement de faille), particulièrement net lorsque les formations géologiques en surface sont dures ; le ressaut topographique peut alors atteindre plusieurs mètres de haut.

Évolution de l'escarpement

Cet escarpement va être soumis à l'érosion et il s'érodera plus ou moins rapidement en fonction de l'agressivité du climat. La dégradation de l'escarpement par l'érosion commence, immédiatement après le séisme, par l'éboulement de blocs composés d'éléments de roche qui s'accumulent au pied de l'escarpement. Ensuite, des dépôts plus fins, amenés par le ruissellement, recouvrent peu à peu les dépôts de blocs et finissent, sinon par niveler l'escarpement, du moins par en atténuer la pente.

L'ensemble des sédiments grossiers et des sédiments fins qui les surmontent constitue le coin « colluvial », la traduction sédimentaire d'un séisme. Quand l'escarpement n'est pas remobilisé rapidement par un nouveau fonctionnement de la faille, les effets de l'érosion se poursuivent ; ils s'atténuent progressivement jusqu'à ce que l'escarpement atteigne un profil d'équilibre ; il est enfin fossilisé par un sol qui s'installe, quand le climat le permet. Si la faille est réactivée, un nouveau cycle commence et un deuxième coin colluvial se superpose au premier. Le volume d'un coin colluvial est fonction de la hauteur de l'escarpement, et donc de la taille du séisme. La mesure de cette taille constitue une évaluation de l'importance d'un séisme passé.

Le paléosismologue effectue une grande partie de ses observations sur les parois des tranchées qu'il creuse perpendiculairement à l'escarpement ; il en établit un relevé, identifiant chaque niveau stratigraphique et notant la présence ou non

de déformations d'origine sismique. Lorsque ce travail très minutieux, comparable à celui effectué lors d'une fouille archéologique, est terminé, il faut interpréter la coupe obtenue et identifier, d'après la nature et la disposition géométrique des différents niveaux, les événements sismiques ainsi mis en évidence. Après avoir identifié ainsi un ou plusieurs séismes, la question immédiate est la datation des événements sismiques.

L'interprétation et la datation des séismes

La présence de sol, et donc de matière organique, offre, dans certains cas, la possibilité de dater par la méthode carbone 14, utilisable jusqu'à 35-40 000 ans. Il existe bien sûr d'autres méthodes de datation utiles lorsqu'il n'y a pas de matière organique dans les dépôts (climat aride, par exemple) ou que l'on aborde des périodes de temps plus

anciennes que 40 000 ans. Ces méthodes sont toutes relativement récentes et souvent très délicates d'utilisation (U-Th, TL, OSL, Be¹⁰-Al²⁶...). En datant plusieurs niveaux, le géologue détermine les dates des différents séismes.

Quand la faille passe à proximité d'un site archéologique, on peut être avoir la chance d'accéder à des éléments complémentaires. Ceux-ci permettent de dater certains niveaux, par des fragments de céramique par exemple, et donc de dater des séismes qui se seraient produits lors de l'occupation du site.

Nous verrons qu'en Arménie, nous avons été heureux : non seulement nous avons trouvé sur nos sites de tranchées des vestiges d'occupation humaine de l'Âge du bronze, mais nous avons pu préciser la date d'un événement sismique grâce à la découverte d'une cité ancienne et à la relecture d'un récit de bataille gravé sur une pierre située sur les rives du lac de Van.

La quête des séismes anciens rassemble ainsi des spécialistes qui, *a priori*, ne devaient pas se rencontrer : préhistoriens, sismologues, pédologues, historiens, paléographes, géologues, géomorphologues, etc.



3. ESCARPEMENT DE LA FAILLE associée au séisme de Spitak (Arménie), en décembre 1988, quelques jours après le séisme. La faille traverse des formations volcaniques consolidées du début du Tertiaire, qui donnent à l'escarpement son aspect de « mur ».

Les séismes en Arménie

Le séisme de Spitak, en Arménie, qui s'est produit le 7 décembre 1988, est le plus meurtrier qu'aient connu les régions transcaucasiennes depuis plusieurs siècles ; mais l'histoire de l'Arménie montre que ce pays, qui s'étendait autrefois bien au-delà de ses frontières actuelles, avait subi par le passé les effets de séismes tout aussi destructeurs que celui de Spitak.

Ainsi, Dvin, l'ancienne capitale de l'Arménie, a-t-elle été abandonnée après avoir été détruite à plusieurs reprises. Une autre ancienne capitale, Ani, aujourd'hui en territoire turc, subissait un siège (au XI^e siècle) depuis de longs mois lorsque se produisit un fort séisme qui détruisit ses fortifications, facilitant ainsi sa prise par les armées d'assiégeants.

Les nombreuses églises d'Arménie sont autant de témoins de ces séismes du passé : églises détruites, puis reconstruites, endommagées à nouveau et réparées, etc. ; les exemples sont nombreux, et l'identification et la datation de ces dégâts sur l'architecture monumentale ont contribué à la connaissance des séismes du passé récent de l'Arménie. L'étude du séisme de Spitak par



4. CARTE TECTONIQUE des régions du Caucase où sont représentées les principales failles actives de la région. 1. principaux décrochements, 2. failles inverses, 3. épicerentre du séisme de Spitak, 4. mouvements relatifs du Bloc arabe, de l'Anatolie et du Bloc iranien par rapport à l'Eurasie au Nord. La vitesse de convergence entre le Bloc arabe et l'Eurasie est d'environ 25 millimètres par an.

des équipes franco-arméniennes en 1988-1989 a été le point de départ d'une collaboration scientifique dans le domaine de la sismotectonique (Programme international de coopération scientifique du CNRS-Ministère des Affaires étrangères).

En Arménie, nombreuses sont les failles actives pouvant engendrer des séismes destructeurs ; leur identification et leur potentialité sismique constituent une donnée importante à prendre en compte pour ce pays en pleine reconstruction économique et énergétique (centrale nucléaire).

La faille historique de Pambak-Sevan-Sunik

Ces trois dernières années, notre intérêt s'est porté sur l'une des failles les plus importantes d'Arménie : la faille de Pambak-Sevan-Sunik. Cette faille, qui s'étend de la région de Spitak, au Nord-Ouest, jusqu'en Iran, au Sud-Est, sur plus de 400 kilomètres de long, n'a pas produit des séismes importants (de magnitude supérieure à 7) pendant la période historique, alors qu'elle présente tous les indices morphologiques d'une faille active décrochante dextre dans l'Holocène (il y a moins de 10 000 ans). Ce « silence » ne serait-il pas annonciateur de la préparation d'un prochain séisme important ?

Après des études préparatoires (images SPOT, photos aériennes, études morphologiques et géologiques sur le terrain...), nous avons sélectionné des sites qui nous paraissaient réunir des conditions favorables pour étudier les traces de séismes anciens. Au cours de cette phase préparatoire, nous avons compris les conditions exceptionnelles

dans lesquelles nous nous trouvions pour des études paléosismologiques : nous avons eu le bonheur de découvrir des sites archéologiques anciens (Âge du bronze) situés sur le passage même de la faille active.

La cité perdue

C'est ainsi que, dans la région de Khonarasar, au Sud-Est du lac Sévan, nous avons découvert une ville antique, avec habitations, fortifications, nécropole. À chaque instant de notre exploration, nous mesurons l'intérêt de notre découverte : une Pompéi de l'Âge du bronze ! Malgré son étendue (environ un kilomètre carré) et le bon état de conservation des constructions, elle était totalement inconnue des archéologues ! Des fragments de céramique nous indiquèrent que cette cité avait été occupée jusqu'au I^{er} millénaire avant J.-C.

En suivant les traces de la faille sur le segment de Khonarasar, nous avons vu un mur mégalithique décalé horizontalement de près de deux mètres par la faille. Nous avions là un indice exceptionnel de son activité la plus récente, il y a 500, 1 000, 2 000 ans ou plus ? L'histoire ancienne et la paléogéographie viennent à notre secours et précisent la date du séisme responsable du décalage du mur.

Au début du siècle dernier, près de la ville de Van, en Anatolie orientale, les archéologues avaient découvert, sur une paroi rocheuse, un texte en caractères cunéiformes comprenant huit colonnes, dont sept sont bien conservées. C'est la plus longue inscription cunéiforme ourartienne connue (manuscrit de Khor-khor du roi Arghishti I^{er}). Le royaume d'Ourartou (IX-IV^e siècle avant J.-C.)

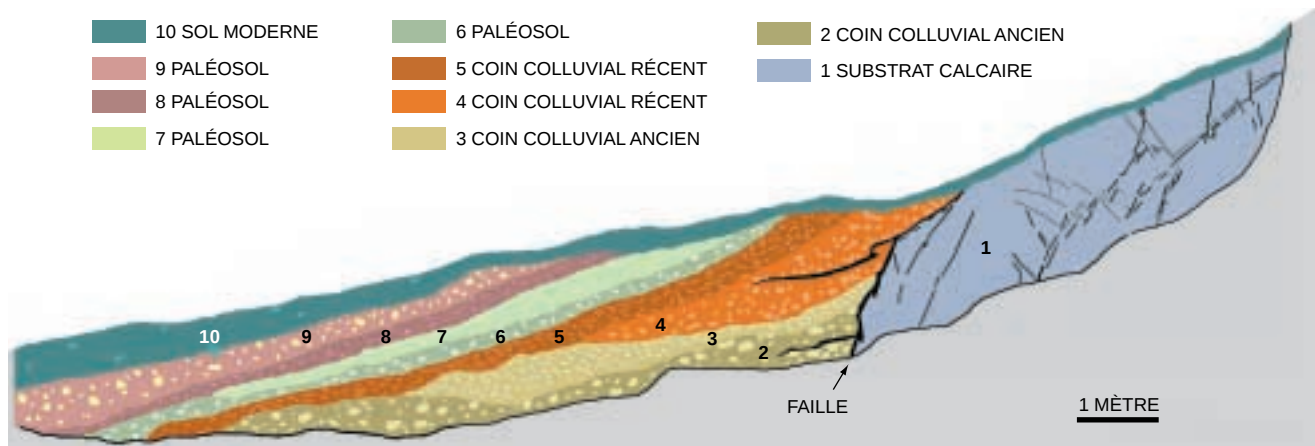
avait pour capitale Touchpa, sur les rives du lac de Van, site de l'actuelle ville de Van. Le texte a été gravé entre 742 et 739 avant J.-C., et sa première description a été établie par Schultz en 1828.

L'inscription nous apprend que le roi Arghishti I^{er}, fondateur de la forteresse d'Érévan (Erébouni), entreprit une campagne militaire aux frontières Nord du royaume, dans la région du lac Sévan, entre 782 et 773 avant J.-C. Le roi dut assiéger la ville de Behoura, au pied des montagnes de Bamni (massif volcanique de Vardénis).

L'emplacement de cette cité pré-ourartienne était inconnu. À la suite de notre découverte, nous n'avons pas hésité à faire le parallèle entre la ville de Behoura et les vestiges que nous venions de découvrir.

Le texte cunéiforme présente un grand intérêt sismotectonique car il évoque les conditions dans lesquelles la ville a été prise par le roi Arghishti I^{er}. « Par la grandeur de Khaldi [Dieu majeur ourartien], Arghishti I^{er} dit : « Quand j'ai encerclé la ville de Behoura une nouvelle fois, les montagnes de Bamni [massif de Vardenis] étaient dévastées, la fumée [cendres ?] recouvrait la ville et atteignaient le Soleil. Au moment où les montagnes de Bamni étaient dévastées, j'ai pris la ville de Behoura. »

Dans un autre passage faisant allusion aux mêmes faits, c'est le fils d'Arghishti, Sardouri II, qui parle : « Le peuple [de Behoura] craignant mes armes s'échappa et partit dans les montagnes d'Ushkiani et de Bamni, j'en ai encerclé une partie que j'ai tuée, les autres qui se sont échappés ont été brûlés par le dieu Taisheba [Dieu tellurique]. »



5. RELEVÉ D'UNE TRANCHÉE indiquant les différents niveaux sédimentaires qui se sont déposés dans le compartiment abaissé à gauche. Ces dépôts et l'érosion dans le compartiment surélevé ont nivelé l'es-

carpement de faille. On note la présence de deux coins colluviaux (niveaux 2-3 et 4-5) qui indiquent ici que deux séismes se sont produits avant le dépôt du niveau 6.