

Des s



# séismes préhistoriques en Suisse

*Les sédiments situés sous le lac de Lucerne, en Suisse, ont révélé l'histoire sismique de cette région depuis 15 000 ans.*

M. Schellmann • F. Anselmetti  
D. Giardini • J. McKenzie • N. Ward

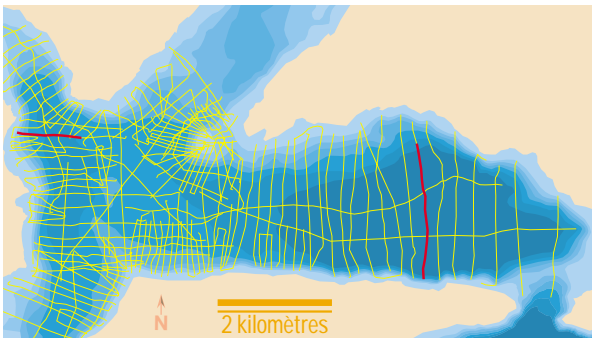
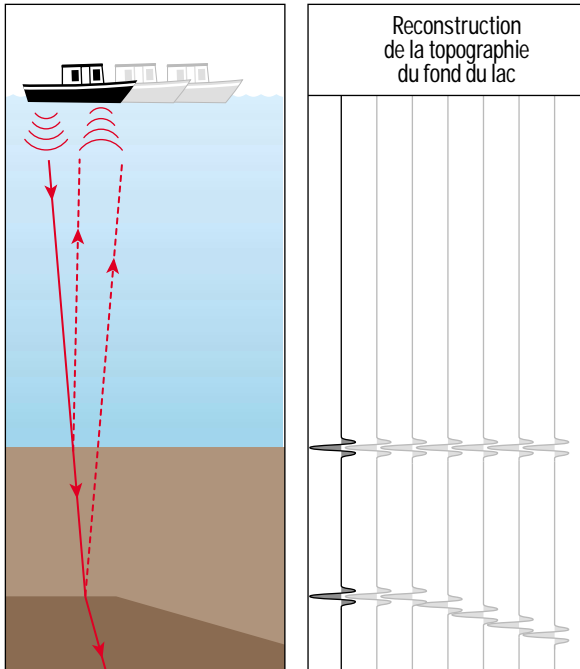
« **M**ardi 18 septembre 1601, peu avant deux heures du matin, un tremblement de terre d'une violence effroyable secoua les environs de Lucerne... De mémoire d'homme, la région n'avait jamais connu un tel séisme, et aucune chronique n'indique qu'il s'en soit jamais produit par le passé ». C'est ainsi que le citoyen suisse Renward Cysat, témoin oculaire de la catastrophe, commença le rapport où il décrit en détails l'un des séismes les plus violents survenus en Europe centrale. Les dégâts furent considérables dans une grande partie de la Suisse, et le séisme fut ressenti en France, en Allemagne et en Italie. D'après les sismologues, la magnitude du tremblement de terre de Lucerne aurait atteint 6,2 sur l'échelle de Richter, soit une intensité comparable à celle du séisme qui a frappé le Maroc au mois de février dernier.

On connaît certaines régions à risques de séismes violents, en Californie par exemple, mais qui croirait que la Suisse est menacée par des tremblements de terre ? Le risque sismique n'est d'ailleurs pas perçu par les autorités helvétiques avec la même acuité que le risque lié aux avalanches ou aux inondations. Pourtant, l'étude des archives historiques montre que le pays a connu plusieurs tremblements de terre de grande ampleur, provoquant des dégâts matériels et des pertes en vies humaines. En 1356, par exemple, une grande partie de la ville de Bâle fut en grande partie détruite par un séisme d'une rare violence.

**1. Le lac de Lucerne** n'est pas considéré comme une zone sismique à risque. La ville de Lucerne (*au premier plan*) a pourtant subi un tremblement de terre destructeur en 1601. Les archives géologiques ont révélé que plusieurs séismes ont frappé la région depuis la préhistoire.



2. L'activité sismique est la plus intense le long des frontières qui séparent les plaques tectoniques (en rose), mais certains séismes violents surviennent aussi au milieu des plaques. Les points rouges indiquent les séismes dont la magnitude a dépassé 5,5, survenus depuis 1973.



3. La technique de la sismique-réflexion a permis de dresser la carte détaillée des structures sédimentaires du lac de Lucerne. Cette technique utilise un transducteur acoustique fixé sous la coque d'un navire. Celui-ci émet une impulsion sonore qui est partiellement réfléchiée par le fond du lac et par les interfaces qui séparent les couches sédimentaires de compositions différentes. Ce même transducteur capte les faibles échos qui remontent en surface, et qui sont enregistrés. Le relevé des profils sismiques le long d'un maillage dense long de 300 kilomètres a permis aux auteurs de cartographier la répartition des sédiments dans la zone Ouest du lac.

Comment peut-on quantifier les risques, et par là-même les moyens à investir dans des mesures antisismiques, si l'on a pas une idée précise de la fréquence et de l'intensité des tremblements de terre dans une région donnée? Jusqu'à récemment, le catalogue des séismes passés se fondait exclusivement sur des mesures sismiques et des documents historiques. Or, en Suisse, le premier sismographe ne fut installé qu'en 1911, et les archives historiques couvrent à peine le dernier millénaire. Concernant des événements dont la fréquence et de l'ordre de un tous les 1 000 ans, ces deux sources d'informations, bien que précieuses, sont insuffisantes pour qu'une carte précise des zones à risques soit dressée. Ce problème se pose en fait dans toutes les régions situées loin des frontières de plaques tectoniques, frontières où surviennent l'essentiel des séismes.

Pour recenser les tremblements de terre passés survenus loin des frontières de plaques, la seule solution consiste à étendre aux temps préhistoriques le catalogue des événements connus. Pour ce faire, nos ancêtres de l'Âge de pierre n'ayant laissé aucune description de séismes, il nous faut découvrir et interpréter les archives géologiques laissées par les tremblements de terre. C'est ce que nous avons fait en sondant le fond du lac de Lucerne. En dressant une carte tridimensionnelle précise de la topographie des couches de sédiments enfouis, nous avons établi l'histoire sismique de la région, jusqu'à des temps préhistoriques. Ces études de terrains, couplées à des simulations numériques, nous ont également permis de reconstituer précisément le scénario d'un tremblement de terre autour du lac.

## Des séismes enregistrés au fond des lacs

Les sédiments lacustres, parce qu'il enregistrent avec une grande sensibilité les conditions environnementales du passé, comptent parmi les archives géologiques les plus précieuses. Dans la zone du lac de Lucerne, les sédiments s'accumulent à la vitesse de un millimètre par an, et cela depuis plusieurs millénaires. La composition de ces couches sédimentaires contient de nombreuses informations sur les conditions locales qui prévalaient au moment où les sédiments se sont déposés. Par exemple, les pollens happés par les boues sédimentaires du fond du lac donnent des indices sur l'évolution de la végétation au voisinage du lac. De même, des couches à gros grains renseignent sur les époques où des inondations ont véhiculé des débris sableux jusqu'au lac.

En provoquant des glissements de terrain sur les pentes immergées situées à la périphérie des lacs ou des océans, les tremblements de terre laissent aussi des traces permanentes dans les dépôts sédimentaires. À cet égard, l'exemple le plus célèbre est le séisme des Grands Bancs qui, en 1929, atteignit une magnitude de 7,2 et déclencha un gigantesque glissement de terrain sous-marin, au large de Terre-Neuve. L'écoulement soudain de sédiments le long de la pente continentale entraîna suffisamment de matériaux pour rompre plusieurs câbles téléphoniques, coupant ainsi des lignes de communications transatlantiques. Par ailleurs, ce glissement de terrain engendra un tsunami. Connaissant ces événements, nous avons supposé que les

sédiments déposés au fond de lacs suisses avaient gardé la mémoire des événements sismiques du passé.

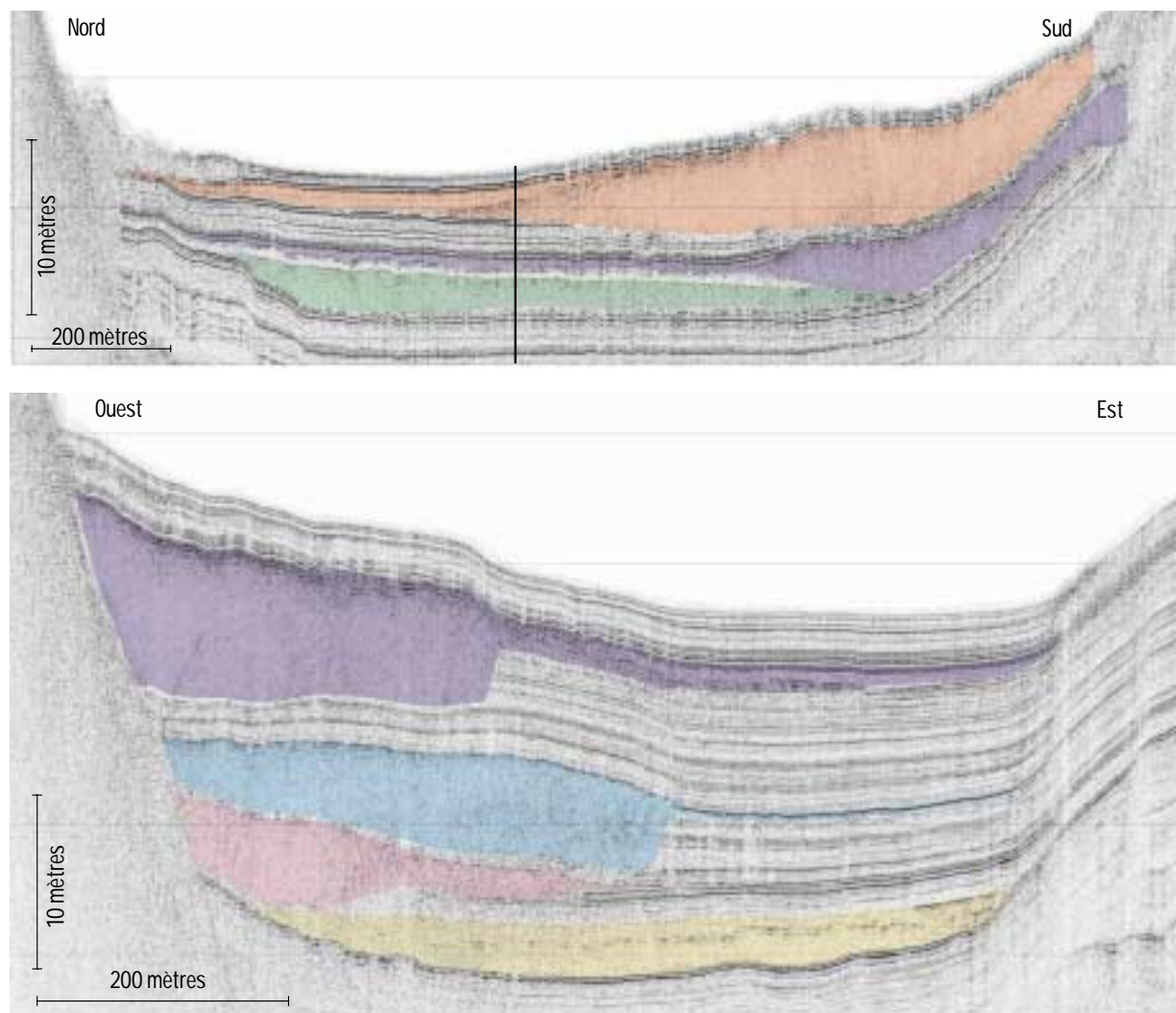
Une secousse laisse de nombreux indices: des stalactites dans des grottes peuvent se rompre, des rochers en équilibre instable se renverser, des pentes escarpées devenir instables, et des sols sablonneux s'effondrer. Toutefois, certains de ces événements peuvent avoir des causes diverses: une stalactite peut se détacher sous l'effet de son propre poids, et un glissement de terrain peut résulter de fortes pluies. Ainsi, les paléosismologues recherchent d'abord le mécanisme déclencheur et, s'il s'agit bien d'un séisme, ils datent les structures qu'il a laissées.

Pour ce faire, nous avons étudié le compte rendu de Cysat sur le séisme de 1601. Le matin qui suivit la secousse, le fonctionnaire parcourut à cheval les berges du lac pour évaluer les dégâts. Il décrit le chaos dont il fut témoin: « Le long du lac, nous avons observé des bateaux, des arbres, des planches, des tubes et d'autres objets qui avaient été entraînés et rejetés sur la berge, 50 pas [40 à 50 mètres] au-delà de la limite normale de l'eau, et étaient ainsi projetés

jusqu'à deux halberds [trois ou quatre mètres] au-dessus du niveau du lac... Plus près, en direction de la ville, nous avons vu des gens ramasser des poissons qui avaient été projetés sur la berge... À Lucerne, les bateaux s'étaient détachés des embarcadères et avaient rompu leurs amarres. Ils dérivèrent rapidement... Comme un fait surnaturel, le courant de la Reuss, [la rivière qui normalement s'écoule du lac de Lucerne] s'inversait six fois par heure. »

En outre, Cysat rapporta que l'eau de la rivière qui sépare les deux parties de la ville disparut presque complètement, de sorte « qu'on pouvait traverser le lit de la rivière en se mouillant à peine les pieds... De plus, les moulins [à eau] cessèrent de tourner. » Cysat nota également que « des montagnes et des collines subaquatiques que l'on pouvait voir et toucher avec des barres lorsque le niveau de l'eau du lac était bas, avaient été fragmentées et entraînées dans les profondeurs ».

À la lecture de ce récit, on imagine sans difficulté que des traces durables de l'événement ont dû subsister au fond du lac. Nous en étions d'autant plus persuadés qu'au début



**4. Des profils sismiques** ont été obtenus selon deux trajectoires (Nord-Sud et Ouest-Est) de navigation du navire (les deux lignes rouges sur la figure 3). Ils révèlent des dépôts différents associés à des effondrements des berges du lac (les zones colorées). On repère les zones d'activité sismique (les zones en couleur) parce qu'elles sont

assez homogènes et ne présentent pas l'alternance régulière de couches sédimentaires sombres et claires présentes ailleurs. En prélevant des carottes sédimentaires, on peut dater les principaux événements sismiques (les plus anciens sont représentés en jaune, les plus jeunes en violet).

des années 1980, les chercheurs du Laboratoire de limnologie de l'Institut fédéral de technologie de Zurich, avaient découvert, au fond du lac, deux vastes dépôts résultant d'un glissement de boue subaquatique, et qu'ils les avaient attribués au séisme de 1601.

En 1996, l'une d'entre nous (Judith McKenzie) reprit ce travail. Avec Flavio Anselmetti, elle découvrit plusieurs dépôts associés à des glissements, dont bon nombre étaient plus profonds, et donc plus anciens, que ceux étudiés précédemment. Il apparut rapidement que ces dépôts anciens dataient d'époques préhistorique, et que si nous parvenions à distinguer les glissements provoqués par des tremblements de terre, des glissements dus à d'autres phénomènes géoclimatiques, nous aurions un accès direct à l'histoire sismique de la région de Lucerne.

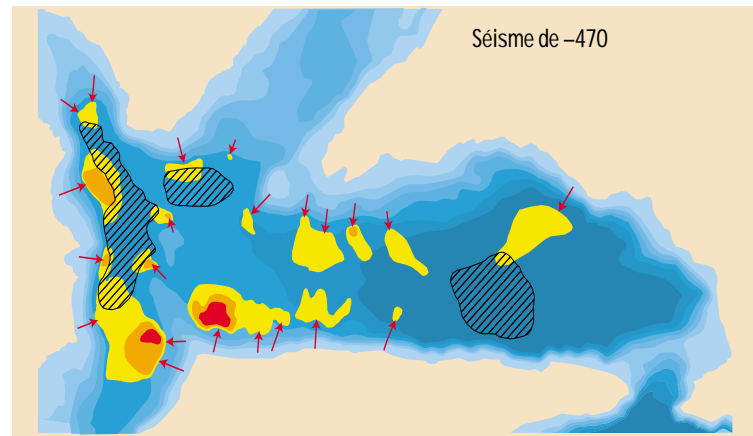
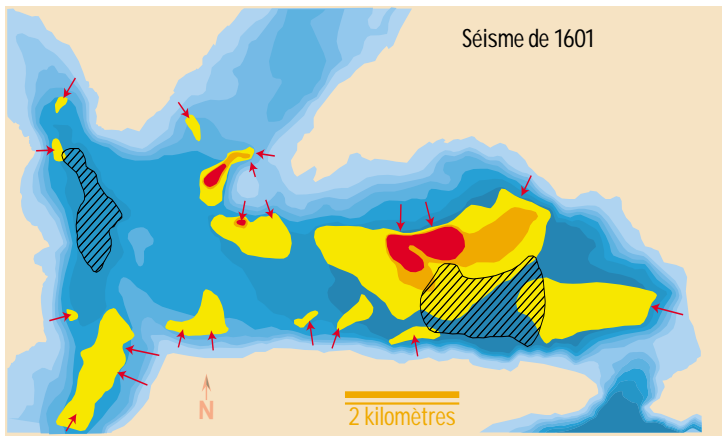
Par hasard, à cette époque, Domenico Giardini recherchait justement un tel catalogue sismique pour déterminer où, quand et avec quelle fréquence étaient survenus les grands tremblements de terre. Lorsque F. Anselmetti rapporta les découvertes faites sur le lac de Lucerne, il comprit immédiatement que ces dépôts pouvaient être autant d'indices révélateurs des séismes survenus dans le passé lointain de la Suisse. Ayant défini l'objectif et la stratégie de cette recherche, nous avons commencé notre exploration.

## À la recherche des séismes passés

En juin 2001, M. Schnellmann et F. Anselmetti ont étudié les sédiments du lac de Lucerne par réflexion sismique. Cette technique est semblable à l'échographie utilisée en médecine : de même qu'un médecin peut observer l'intérieur du corps humain à l'aide d'ultrasons, un géologue peut obtenir une image de la structure interne des sédiments accumulés sous des masses d'eau, en envoyant des ondes sonores vers le fond, de la surface. Une fraction de l'énergie sonore est réfléchiée par les différentes couches qui composent le fond du lac, puis captée par un transducteur acoustique (qui joue à la fois le rôle d'un haut-parleur et celui d'un microphone). Le signal est enregistré à bord du navire et nous renseigne sur la structure des sédiments.

Nous avons collecté des échos sismiques sur une distance totale de plus de 300 kilomètres, le long d'un maillage dense de la surface. Ainsi, nous avons reconstitué une carte tridimensionnelle des sédiments, identifié la trace des couches les plus intéressantes et dressé une liste des effondrements sur la totalité de la zone considérée. Nous avons exclu les bassins qui longent les deltas des rivières, qui peuvent être le lieu d'effondrements totalement indépendants des tremblements de terre.

Nous avons découvert des ruptures de pentes, signalant les endroits où d'importantes masses de sédiments se sont affaissées, soit des dépôts de glissement enfouis, aux endroits où le matériau effondré s'est déposé. Effondrements et accumulations sont facilement identifiables sur les profils sismiques : les sédiments lacustres qui se sont normalement déposés présentent des couches horizontales, alors que des sédiments bouleversés présentent une structure chaotique, ressemblant aux points blancs d'un écran



5. Le séisme historique de 1601 (à gauche) engendra de nombreux dépôts d'effondrement, dont l'épaisseur varie de moins de cinq mètres (en jaune) à plus de dix mètres (en rouge). Certains dépôts ont une épaisseur intermédiaire (en orange). Dans les zones les plus profondes du lac, ces

dépôts sont recouverts d'une couche de boue épaisse et homogène (les hachures), issue des différents matériaux restés un temps en suspension dans les eaux du lac. Des dépôts similaires sont associés à un tremblement de terre préhistorique (à droite) qui aurait eu lieu en -470.

de télévision sans image (voir la figure 4). L'analyse des profils enregistrés révéla que de nombreux dépôts nouvellement découverts se situaient au même niveau que ceux mis en évidence par l'équipe de l'Institut fédéral de technologie de Zurich et qui concernaient le séisme de 1601. De fait, l'horizon sédimentaire correspondant à cet événement contient au moins 13 effondrements importants, indiquant que ce tremblement de terre a déclenché un glissement synchrone sur toute l'étendue du lac. En outre, nous découvrîmes qu'au centre de deux sous-bassins distincts, ces dépôts de glissement étaient recouverts de couches de boue homogène, atteignant par endroits jusqu'à deux mètres d'épaisseur. Cette masse de sédiments est sans doute restée quelque temps en suspension dans les eaux du lac, avant de se déposer sur le fond.

Partant de l'hypothèse que les tremblements de terre de magnitude égale ou supérieure à celle du séisme de 1601 ont laissé des dépôts similaires, nous avons rapidement découvert, à quelques trois mètres sous le fond du lac, un horizon contenant 16 effondrements distincts. Dans trois sous-bassins différents, ces dépôts étaient recouverts d'une épaisse quantité de boue homogène, ce qui allait dans le sens de vestiges laissés par un violent séisme. Nous étions de plus en plus persuadés qu'il s'agissait de vestiges d'un violent séisme préhistorique.

Une autre observation nous a permis d'éliminer l'hypothèse d'une origine plus banale : certains des restes de ces anciens glissements se trouvaient au pied des pentes de deux collines subaquatiques, l'une d'entre elles se trouvant même à environ 85 mètres sous la surface. Des événements plus ordinaires, tels que des vagues déclenchées par une tempête ou par une inondation de grande ampleur, auraient certes pu déclencher des glissements en périphérie du lac, mais ils n'auraient jamais déstabilisé de pentes situées profondes et éloignées du rivage. Il n'y avait aucun doute, nous avons bien trouvé les traces d'un ancien tremblement de terre. Un examen plus approfondi de nos enregistrements révéla trois autres séismes anciens de magnitude importante.

Quand les tremblements de terre que nous avons identifiés se sont-ils produits ? Pour répondre à cette

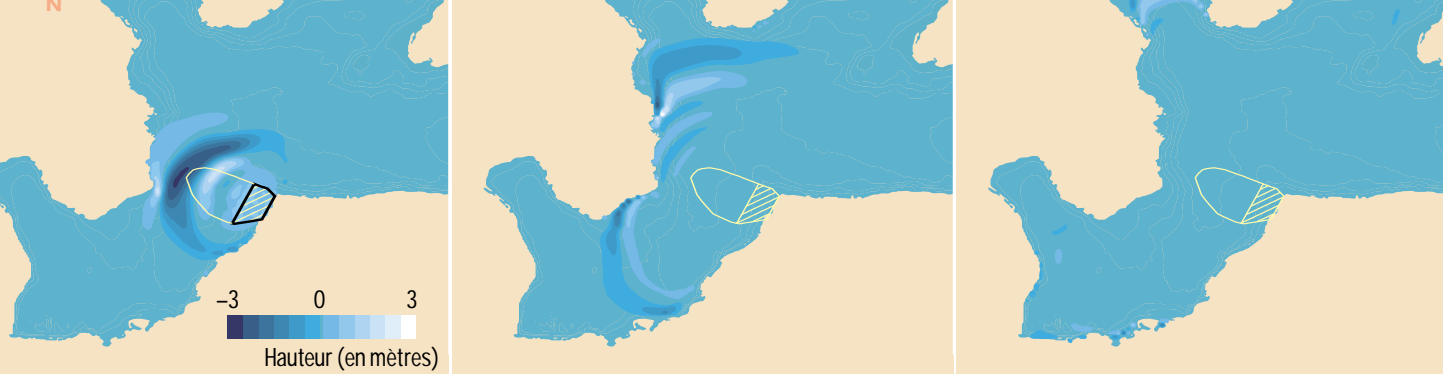
question, nous avons prélevé des échantillons des différents dépôts de glissement enfouis sous le fond du lac, à plus de 150 mètres sous la surface. Nous avons effectué des prélèvements dans divers dépôts de glissement, ainsi que dans des sédiments non perturbés. Nous avons ensuite analysé en laboratoire huit carottes de sédiments, longues de 8 à 10 mètres, et provenant de deux sous-bassins. Comme nous nous y attendions, les tremblements de terre se sont manifestés par des dépôts chaotiques et recouverts de couches de boue homogène. Ces tranches caractéristiques dans la carotte contrastaient avec les couches horizontales existant ailleurs dans les sédiments.

## Un séisme, il y a 14 000 ans

Pour déterminer l'âge des sédiments, nous avons d'abord extrait les feuilles et les petits morceaux de bois des sédiments non perturbés, situés immédiatement au-dessus, et nous les avons datés au carbone 14. Nous avons tiré d'autres informations de deux couches de cendres volcaniques trouvées dans les sédiments, cendres que nous avons associées à des éruptions volcaniques préhistoriques de l'Est de la France et de l'Ouest de l'Allemagne. En combinant toutes nos informations, nous avons calculé l'âge des dépôts de glissement et des quatre tremblements de terre qui les avaient occasionnés. Nous avons ainsi déterminé que des tremblements de terre s'étaient produits vers -470, -7 820, -11 960 et -12 610.

Notre étude des sédiments du lac de Lucerne a révélé une partie de la longue histoire sismique de cette région. Elle n'a cependant pas répondu à quelques questions importantes posées par la description du tremblement de terre de 1601 : comment expliquer les mouvements dont l'eau du lac semble avoir été animée ? Des glissements de boue subaquatiques de l'ampleur constatée peuvent-ils déplacer suffisamment d'eau pour produire des vagues de quatre mètres de hauteur ? Ces vagues, qui s'apparentent à des tsunamis, présentent-elles un risque réel pour les riverains du lac ?

Pour évaluer la nature et l'amplitude des vagues envisageables dans le lac de Lucerne après un séisme, nous avons fait des simulations numériques des tsunamis. Ces vagues



**6. Une simulation numérique** révèle comment une simple rupture sur la berge d'un lac (zone hachurée) et le dépôt d'effondrement résultant (contour en jaune), tels ceux qui ont été causé par le séisme qui a eu lieu en -470, engendrent en surface une perturbation de type tsunami. Une minute après l'effondrement de la berge, l'amplitude de la

vague atteint presque six mètres (à gauche). La vague se propage rapidement à partir du site où elle s'est formée, parcourant environ deux kilomètres dans deux des bras du lac durant la minute suivante (au centre). Trois minutes après le début de la simulation, la majeure partie de la perturbation se limite au bras Nord-Ouest du lac (à droite).

destructrices résultent généralement de grands déplacements de sédiments au fond de la mer. Si les tsunamis océaniques ont été étudiés et sont relativement bien comprises, les mouvements d'eau dans un lac l'ont rarement été.

Nous avons choisi de modéliser l'effet tsunami du glissement subaquatique de -470. Nous avons dressé une carte détaillée de l'un des endroits où le fond du lac avait cédé, et retracé le mouvement des sédiments et la géométrie du dépôt résultant ; ces informations étaient suffisantes pour reconstituer avec précision cette ancienne rupture (voir la figure 5). Nos données sismiques ont montré que le glissement a laissé une cicatrice haute de neuf mètres sur la rive du lac. Il a ensuite déplacé un volume de sédiments équivalent à un cube de 100 mètres de côté et une fraction de cette boue a parcouru latéralement une distance atteignant par endroits 1 500 mètres.

## L'eau du lac simulée

De plus, notre simulation numérique a fait apparaître des vagues de plus de trois mètres, qui ont frappé la rive opposée au site de rupture une minute après le déclenchement du glissement (voir la figure 6). Leur longueur d'onde a dû dépasser un kilomètre, soit une situation très différente de celle des vagues de surface engendrées par le vent (les vagues de notre simulation ressemblent à des montagnes d'eau s'élevant au centre des sous-bassins, exactement comme l'a décrit le témoin oculaire des événements de 1601).

Dans son rapport Cysat mentionne aussi des inversions de l'écoulement normal du lac, au rythme de six par heure. Autrement dit, la période du mouvement de l'eau fut d'environ 10 minutes. Curieusement, c'est plus de dix fois plus lent que la période des tsunamis virtuels de notre modèle numérique. Nous pensons que ces oscillations de surface, ayant une période de 10 minutes, ne se sont établies qu'au bout d'un certain temps, témoignant des mouvements d'allers et retours de l'eau à la surface du lac. La période des mouvements de résonance d'une grande masse d'eau dépend de la géométrie du bassin. Le vent et les changements de pression atmosphérique sont connus pour engendrer des oscillations similaires, quoi que de plus faible amplitude. Ces ondulations dues aux conditions météorologiques du lac de Lucerne ont été étudiées dès la fin du

XIX<sup>e</sup> siècle, et ont révélé des déplacements caractéristiques de 10 minutes, superposés à deux périodes d'oscillation plus longues. Il est légitime de penser que les mouvements dus au séisme présentaient également ces périodes.

Notre étude a permis de déterminer avec précision les caractéristiques de l'événement de 1601. De surcroît, nous avons, pour la première fois, reconstitué l'histoire sismique de la région de Lucerne en étudiant les dépôts sédimentaires du fond du lac. Cependant, diverses questions restent ouvertes. Quels ont été les épicentres des séismes passés ? Quelle a été leur magnitude ? Pour y répondre, il faudra étudier d'autres enregistrements des séismes du passé. Par chance, la Suisse centrale dispose, grâce à ses lacs, de tels enregistrements préhistoriques indépendants. Chaque lac réagissant un peu différemment des autres aux secousses, l'effet d'un séisme sur un lac doit être calibré à l'aide des événements historiques. En collaboration avec le Service suisse de sismologie, des membres du groupe de limnologie de l'Institut fédéral de technologie de Zurich étudient les empreintes qu'ont laissées, au fond de quatre lacs plus petits situés près du lac de Lucerne, les séismes historiques et préhistoriques. Ils espèrent ainsi en déterminer les épicentres et les magnitudes.

Renward Cysat ne pensait probablement pas que quatre siècles après l'avoir rédigé, son rapport serait le point de départ d'une étude sismologique qui non seulement a permis d'analyser l'événement dont il fut le témoin, mais a également révélé des tremblements de terre plus anciens.

Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir aimablement autorisés à publier cet article.

**Michael SCHELLMANN** prépare un doctorat de géologie, à l'Institut fédéral de technologie, à Zurich. **Flavio ANSELMETTI** est directeur du Laboratoire de limnologie, et **Domenico GIARDINI** est professeur de sismologie à l'Institut de géophysique du même institut et directeur du Service suisse de sismologie. **Judith McKenzie** est professeur de sciences de la Terre à l'Institut de géophysique, à Zurich. **Steven Ward** mène ses recherches sur les ondes sismiques à l'Université de Santa Cruz, en Californie.

Michael SCHELLMANN et al., *Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits*, in *Geology*, vol 30, pp. 1131-1134, 2002.

Steven WARD, *Landslide tsunami*, in *Journal of Geophysical Research*, vol 106, pp. 11201-11216, 2001.